

DOI: 10.58168/TBiEc2025_383-389

УДК 621.012.2:664.624:658.512:363.738

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА КОМПОЗИТОВ ИЗ ДРЕВЕСНЫХ И ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ

COMPARATIVE ANALYSIS OF STRENGTH CHARACTERISTICS AND CARBON FOOTPRINT OF WOOD AND POLYMER WASTE COMPOSITES

Стородубцева Т.Н., д.т.н., профессор **Storodubtseva T.N.**, doctor of Technical Sciences, Head of Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia.

Морковин В.А., к.т.н., заведующий кафедрой **Morkovin V.A.**, candidate of Technical Sciences, Head of Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia.

Зеленин Н.В., студент **Zelenin N.V.**, student of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia.

Петров А.Е., студент **Petrov A.E.**, student of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia.

Аннотация: в данной статье представлен сравнительный анализ прочностных характеристик и углеродного следа композитных материалов, изготовленных из древесных и полимерных отходов. Исследование направлено на оценку потенциала использования вторичного сырья для создания экологически чистых и экономически выгодных композитов, пригодных для применения в различных отраслях промышленности. В работе рассматриваются различные составы композитов, методы определения их прочности и методики расчета углеродного следа. Полученные результаты позволяют оценить влияние состава композитов на их механические свойства и экологическую эффективность, и представить перспективные направления развития этой области.

Abstract: this article presents a comparative analysis of the strength characteristics and carbon footprint of composite materials made from wood and polymer waste. The research is aimed at assessing the potential of using recycled materials to create environmentally friendly and economically profitable composites suitable for use in various industries. The paper discusses various compositions of composites, methods for determining their strength and methods for

calculating carbon footprint. The results obtained make it possible to evaluate the influence of the composition of composites on their mechanical properties and environmental efficiency, and to present promising areas of development in this field.

Ключевые слова: углеродный след, композиты, ДПК, ДНП, отходы, биоразлагаемость, водопоглощаемость.

Keywords: carbon footprint, composites, WPC, DNP, waste, biodegradability, water absorption.

В современном строительстве наблюдается тенденция к созданию материалов на основе доступных растительных отходов с использованием экологически безопасных связующих или без них. Это связано с усилением экологических стандартов, ограничивающих использование древесностружечных плит (ДСП) из-за содержания токсичных компонентов. Древесно-полимерные композиты (ДПК) становятся востребованной альтернативой, характеризующейся высоким содержанием наполнителя и экологичностью. Актуальность применения древесных наполнителей обусловлена значительным объемом отходов древесины, образующихся в деревообрабатывающей отрасли России (около 780-800 тыс. м³ ежегодно).

Несмотря на обширные исследования в области ДПК, вопросы, касающиеся оптимизации состава и технологических параметров производства, требуют дальнейшего изучения.

Существенное значение при разработке рецептур имеют тип используемого полиолефина, характеристики наполнителя (вид, размер частиц) и применение специальных добавок, улучшающих эксплуатационные свойства ДПК. Конкурентоспособное производство изделий из ДПК возможно только при комплексном анализе влияния указанных факторов на свойства конечного продукта [1].

Что такое углеродный след.

Углеродный след, парниковые газы и CO₂ – все это связано с изменением климата и усилиями по его замедлению. Глобальное потепление вызвано парниковым эффектом: выбросами газов, которые удерживают тепло в атмосфере. Основными парниковыми газами являются водяной пар и углекислый газ (CO₂) [2].

Углеродный след – сумма выбросов парниковых газов, вызванных деятельностью человека, предприятия или региона, выраженная в CO₂-эквиваленте. При его подсчёте не учитываются природные явления, такие как вулканы или пожары [3].

Древесно-полимерные композиты

Древесно-полимерные композиты (ДПК) – это категория материалов, объединяющая широкий спектр составов, характеристик и сфер применения. Основным критерием их классификации является тип древесного наполнителя, определяющий свойства композита в сочетании с соотношением наполнителя и связующего [4].

В зависимости от типа древесного компонента выделяют:

1. Древесно-наполненные полимеры (ДНП) и древесно-полимерные композиты (ДПК): Наполнитель – древесная мука или мелкая щепа (до 50 % для ДНП и 50-85 % для ДПК) [5]. Связующие – термопласты (полипропилен, полиэтилен и т.п.) [6]. Преобладание наполнителя приближает свойства к древесине (ДПК), а преобладание полимера – к пластику (ДНП). Отличительные черты: простота обработки, надежность крепления, малый вес, низкое влагопоглощение, устойчивость к атмосферным факторам [6,7].

2. Древесно-стружечные плиты (ДСтП): Наполнитель – древесная стружка. Наиболее распространены ориентированно-стружечные плиты (ОСП), где стружка наружных слоев ориентирована вдоль, а внутренних – поперек или хаотично [8]. Существуют также ДСтП с поверхностью из измельченного древесного волокна.

3. Древесно-волокнистые плиты (ДВП): Наполнитель – древесные волокна. Различают мягкие (МДВП) для теплоизоляции, твердые и полутвердые для отделки и изготовления мебели. Твердые ДВП бывают средней (МДФ) и высокой плотности (ХДФ). Модифицируются для придания особых свойств (повышенная твердость, биостойкость, влагостойкость, огнестойкость). Для улучшения эксплуатационных и эстетических качеств ДСтП и ДВП (кроме МДВП) ламинируют, шпонируют, окрашивают. Твердые ДВП с защитным покрытием называются оргалитом.

4. Древесно-слоистые пластики: Пример – фанера. Состоят из нескольких слоев шпона, соединенных полимером. Обладают повышенной прочностью, долговечностью и устойчивостью к воздействию влаги.

Для соединения древесных компонентов в ДСтП, ДВП и ДСП применяют термореактивные полимеры (феноло-формальдегидные, карбамидо-формальдегидные смолы и др.) [8] хотя существуют варианты с использованием биоразлагаемых связующих. В МДВП связующим компонентом являются природные смолы, содержащиеся в самой древесине.

Полимерные бетоны, используемые в строительстве для теплоизоляции и конструкционных целей, содержат стружку или пробку в качестве наполнителя и связующие на основе карбамидоформальдегидных, полиэфирных смол и др. Эти материалы характеризуются высокими показателями прочности, износостойкости и морозостойкости.

Влияние вторичных полимерных отходов на влагопрочностные свойства древесно-наполненных композитов

Внедрение полимерных материалов необходимо для инновационного развития промышленности Казахстана. Синтетические полимеры, включая полиэтилен (38 % мирового потребления) и полипропилен (14 %), широко используются в различных сферах: от упаковки (до 40 %) до строительства (до 25 %) [9]. Крупнейший по объему производства полимер, полиэтилен, в основном применяется в упаковочной индустрии.

Краткий жизненный цикл полимерной упаковки приводит к накоплению отходов, которые практически не разлагаются в естественной среде, создавая экологические проблемы. На фоне истощения природных ресурсов повторное использование полимерных

отходов становится приоритетной задачей. Вторичная переработка, включая рециклинг, сжигание и пиролиз, является одним из ключевых способов утилизации.

Получение композиционных материалов из вторичного сырья, в частности древесно-наполненных полимерных композитов (ДПК), является перспективным направлением [1,5] ДПК, сочетающие свойства древесины и полимеров, производятся из отходов полимерной и деревообрабатывающей отраслей. Этот относительно новый материал, внешне напоминающий ДВП (при высоком содержании древесины) или пластмассу (при низком), быстро набирает популярность.

Настоящее исследование посвящено изучению влияния вторичных полимерных отходов на влагопрочностные характеристики ДПК.

Развитие композиционных материалов определяется следующими факторами: потребность в материалах с заданными свойствами, прогресс в химии полимеров и экологические требования.

ДПК обладают рядом преимуществ: экологичность, эстетичный вид, имитирующий дерево, низкое влагопоглощение, высокая прочность, огнестойкость, устойчивость к микроорганизмам и возможность вторичной переработки (материал сохраняет свойства в 3-4 циклах) [1,7]. Из ДПК изготавливают строительные и отделочные материалы, мебель и элементы ландшафтного дизайна, заменяя ими древесину.

Основу ДПК составляют измельченная древесина и термопласт (соотношение может варьироваться). Для улучшения свойств используют добавки. В качестве термопласта применяют материалы, перерабатываемые при температурах до 200 °С (из-за термочувствительности древесины). Полиэтилен (ПЭ) – один из подходящих полимеров, обладающий низкой температурой плавления (106-130 °С) и широким диапазоном вязкости расплава, что обеспечивает хорошее смешивание и позволяет избежать деструкции целлюлозы.

Образцы ДПК, использованные для исследования свойств, были изготовлены в нанолaborатории Актыбинского регионального государственного университета им. К. Жубанова. В качестве компонентов применялись вторичные полимеры (ПЭВД и ПП) и древесная мука (марки 180) в соотношении 1:1 (50 % древесного наполнителя достаточно для сохранения механических свойств).

Процесс изготовления включал: измельчение и сушку древесного наполнителя, вальцевание для получения полуфабриката ДПК, подачу полуфабриката в экструдер, нагрев цилиндра и вращение шнека. Продвижение материала обеспечивалось за счет трения о поверхность цилиндра и шнека.

Состав композиций представлен в таблице 1.

Закключение. Проведенное исследование сравнительного анализа прочностных характеристик и углеродного следа композитов из древесных и полимерных отходов показало значительный потенциал использования вторичного сырья в производстве композиционных материалов. Полученные результаты подтверждают возможность создания

конкурентоспособных по прочности композитов с существенно сниженным углеродным следом по сравнению с традиционными материалами. Разнообразие исследованных составов позволило выявить оптимальные соотношения компонентов для достижения наилучшего сочетания прочностных характеристик и экологической эффективности. Методология, примененная в исследовании, может быть реплицирована для оценки других типов композитов на основе вторичного сырья.

Таблица 1 - Составы древесно-полимерных композиций

Состав композиций	Состав образца	
	Полимер	Древесина
Композиция 1	Полиэтилен высокой плотности 50 %	Сосновая мука 50 %
Композиция 2	Полипропилен 50 %	Сосновая мука 50 %
Композиция 3		100 %
Композиция 4	Полиэтилен высокой плотности 100 %	
Композиция 5	Полипропилен 100 %	

Вывод. Применение древесных и полимерных отходов в создании композитов является многообещающим подходом в рамках экономики замкнутого цикла и сокращения выбросов углерода в промышленности. Результаты исследований демонстрируют потенциал производства прочных и экологически безопасных композитных материалов с приемлемыми механическими характеристиками. Будущие разработки должны быть сосредоточены на совершенствовании технологий производства, поиске инновационных компонентов и расширении сфер применения этих композитов. Полученные данные могут служить основой для оптимизации проектирования и изготовления экологически чистых изделий из композиционных материалов.

Список литературы

1. Стородубцева Т.Н. Современные композиционные материалы для гражданского строительства : монография / Т. Н. Стородубцева, А. А. Аксомитный ; Воронеж. гос. лесотехн. ун-т им. Г. Ф. Морозова. - Воронеж, 2021. - 143 с.
2. Углеродный след в России и мире 2025: что это такое простыми словами, какой след оставляют производства и человек, как снизить высокий углеродный след. – URL: <https://www.kp.ru/family/ecology/uglerodnyj-sled/> (дата обращения: 17.05.2025).
3. Углеродный след. Большая российская энциклопедия. – URL: <https://bigenc.ru/c/uglerodnyi-sled-d9ed70> (дата обращения: 17.05.2025).
4. Тихомирова В.В., Смирнова П.С. Полимерные композиционные материалы с древесными наполнителями и перспективы использования отходов при их производстве /

Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований (научный журнал)– URL:https://applied-research.ru/article/view?id=13491&utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru (дата обращения: 17.05.2025).

5. Стородубцева Т. Н. Использование древесных отходов и местного техногенного сырья в составах композитов: монография / Т. Н. Стородубцева, А. А. Аксомитный; М-во образования и науки Рос. Федерации, Фед. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Воронеж. гос. лесотехн. ун-т им. Г. Ф. Морозова". - Воронеж, 2016. - 196 с.

6. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные эффективные теплоизоляционные материалы на основе древесного сырья // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 3. - С. 66–77.

7. Павлычева Е.А., Пикалов Е.С. Характеристика современных материалов для облицовки фасадов и цоколей зданий и сооружений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 4. - С. 55–61.

8. Шумкова И.Н., Линькова Т.С., Земский Д.Н., Хабибрахманова, О.В. Получение формальдегида на новой каталитической системе // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 2 (76). - С. 275–282.

9. Абилова, Г. К. Изучение влагопрочностных свойств древесно-наполненных полимерных композиционных материалов на основе вторичных полимерных отходов / Г. К. Абилова, Г. Б. Жаумитова. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 8 (112). – С.Т.2.58-60. – URL: <https://moluch.ru/archive/112/28347/> (дата обращения: 17.05.2025).

References

1. Storodubtseva T.N. Modern composite materials for civil engineering: monograph / T.N. Storodubtseva, A.A. Aksomitny; Voronezh. state forestry and engineering university named after G.F. Morozov. - Voronezh, 2021. - 143 p.

2. Carbon footprint in Russia and the world by 2025: what it is in simple words, what kind of footprint is left by production and people, how to reduce the high carbon footprint. – URL: <https://www.kp.ru/family/ecology/uglerodnyj-sled/> (date of access: 05/17/2025).

3. Carbon footprint. The Great Russian Encyclopedia. – URL: <https://bigenc.ru/c/uglerodnyi-sled-d9ed70> (date of notification: 05/17/2025).

4. Tikhomirova V.V., Smirnova P.S. Polymer composite materials with wood fillers and prospects for the use of waste in their production / International Journal of Applied and Fundamental Research (scientific Journal) – URL:https://applied-research.ru/article/view?id=13491&utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru (date of request: 05/17/2025).

5. Storodubtseva T. N. Use of wood waste and local technogenic raw materials in composite compositions: monograph / T. N. Storodubtseva, A. A. Aksomitny; Ministry of Education and

Science of the Russian Federation, Federal state budget educational institution of higher education "Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozov". - Voronezh, 2016. - 196 p.

6. Kolosova A.S., Pikalov E.S. Modern effective thermal insulation materials based on wood raw materials // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2021. No. 3. pp. 66-77.

7. Pavlycheva E.A., Pikalov E.S. Characteristics of modern materials for cladding facades and plinths of buildings and structures // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2020. No. 4. pp. 55-61.

8. Shumkova I.N., Linkova T.S., Zemsky D.N., Khabibrakhmanova O.V. Production of formaldehyde on a new catalytic system // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2018. Vol. 80. No. 2 (76). pp. 275-282.

9. Abilova G.K., Zhaumitova G.B. Study of moisture-resistant properties of wood-filled polymer composite materials based on recycled polymer waste / Article in the journal "Young Scientist" – URL: <https://moluch.ru/archive/112/28347/> (date of access: 05/17/2025).