

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.29>КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ И ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ СТЕБЛЕЙ
ПОДСОЛНЕЧНИКА

Научная статья

Усова К.А.¹, Шкуро А.Е.^{2*}, Глухих В.В.³² ORCID : 0000-0002-0469-2601;^{1,2,3} Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (shkuroae[at]m.usfeu.ru)

Аннотация

Площадь посевов подсолнечника на территории РФ составляет более 9000000 га. В результате его промышленной переработки остается большое количество отходов (лузги, стеблей), часть из которых можно использовать в качестве наполнителей при получении полимерных композитов. Настоящая работа посвящена исследованию свойств композитов на основе полиэтилена высокой плотности и измельченных стеблей подсолнечника. В результате исследования установлено, что введение этого типа наполнителя приводит к снижению твердости, прочности при изгибе, ударной вязкости, и повышению плотности, пластичности и водопоглощения. Определены закономерности влияния содержания наполнителя на приведенные показатели. Преимуществом рассматриваемых материалов является высокая ударная вязкость. Композит, содержащий 20 мас. %, характеризуется показателем ударной вязкости равным 25,3 кДж/м².

Ключевые слова: композит, полимерные композиционные материалы, стебли подсолнечника, прессование, полиэтилен, экструзия.

COMPOSITES BASED ON HIGH-DENSITY POLYETHYLENE AND CHOPPED SUNFLOWER STALKS

Research article

Usova K.A.¹, Shkuro A.E.^{2*}, Glukhikh V.V.³² ORCID : 0000-0002-0469-2601;^{1,2,3} Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (shkuroae[at]m.usfeu.ru)

Abstract

The area of sunflower crops in the territory of the Russian Federation is more than 9,000,000 hectares. As a result of its industrial processing, a large amount of waste (husks, stems) remains, some of which can be used as fillers in the production of polymer composites. This work is devoted to the study of the properties of composites based on high-density polyethylene and crushed sunflower stems. As a result of the study, it was found that the introduction of this type of filler leads to a decrease in hardness, bending strength, impact strength, and an increase in density, plasticity and water absorption. The patterns of the effect of filler content on the above indicators are determined. The advantage of the materials under consideration is high impact strength. A composite containing 20 wt. % is characterized by an impact strength of 25.3 kJ/m².

Keywords: composite, polymer composite materials, sunflower stalks, pressing, polyethylene, extrusion.

Введение

Древесно-полимерный композит (ДПК) – материал, объединяющий лучшие свойства древесины и термопластичных полимеров [1]. Характеристики композита определяются сочетанием свойств полимера и древесного наполнителя. В качестве полимерной матрицы ДПК обычно используют полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), реже поливинилхлорид (ПВХ) и полипропилен (ПП). В качестве наполнителя чаще всего используется древесная мука [1], [2].

Высокая стоимость изделий из ДПК является причиной, сдерживающей их производство и потребление. Снижение стоимости ДПК возможно при использовании более дешёвых наполнителей. В настоящее время внимание исследователей обращено на различные малоиспользуемые отходы лесного и сельского хозяйства [3], [4]. Перспективным для применения в качестве наполнителей для ДПК видом лигноцеллюлозных отходов является фитомасса подсолнечника.

Подсолнечник однолетний (лат. *Helianthus annuus*) – однолетнее травянистое растение семейства Астровые, выращиваемое ради пищевого масла. В 2010 году его посевная площадь составляла 16% всех посевных площадей в мире, а на территории Российской Федерации – более 9 миллионов гектаров [5].

Механические свойства составных частей стеблей подсолнечника неодинаковы и зависят от расположения волокон и влажности. Например, внешние волокна (кора) значительно жёстче чем волокна, находящиеся в центре стебля (сердцевина). Свойства волокон также существенно изменяются по направлению роста стебля [6]. При погружении в воду сердцевина стебля может впитывать влагу (до нескольких тысяч процентов от своего веса). Эта способность делает её перспективной для производства биосорбентов [7]. Предварительно обработанные стебли подсолнечника могут использоваться как заполнители для бетонов [8].

Композиты на основе различных полимерных смол и измельченных стеблей подсолнечника характеризуются низкими коэффициентами теплопроводности и достаточной прочностью, что позволяет использовать их в качестве термоизоляционных материалов [9].

В работе [10] рассматриваются вопросы получения и исследования свойств композитов с полимерной фазой пластифицированного ПВХ и измельченными стеблями подсолнечника. Показано, что при увеличении содержания стеблей подсолнечника в композите, его плотность, пластичность и способность поглощать воду увеличиваются. По показателям твердости и жесткости композиты со стеблями подсолнечника уступают композитам с ПВХ и древесной мукой.

Известно, что ПВХ является полярным полимером, способным к межмолекулярному взаимодействию с функциональными группами лигнина и целлюлозы. В связи с этим представляет интерес получение и исследование свойств композиционного материала с неполярной полимерной фазой, в частности, полиэтиленом высокой плотности, и измельченными стеблями подсолнечника. Целью данной работы является получение и исследование физико-механических свойств полиэтилена высокой плотности, наполненного измельченными стеблями подсолнечника. В задачи исследования входило установление закономерностей между содержанием наполнителя и свойствами материала.

Методы и принципы исследования

В качестве полимерной матрицы использовали полиэтилен высокой плотности марки 273-83 (ПАО «Казань Оргсинтез»). В качестве наполнителя использовали стебли подсолнечника (предоставлены учебно-опытным хозяйством УрГАУ, Екатеринбург). Стебли измельчались с помощью лабораторной мельницы ИКА А11, частота вращения ножей которой составляла 3600 об/мин. Измельченные стебли просеивали через сито с диаметром отверстий 0,7 мм и высушивали в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянной массы. В качестве лубриканта использовали технический полиэтиленовый воск марки 200 (ООО «Русский Воск»), в качестве агента, улучшающего совместимость полимерной фазы и наполнителя (компатибилизатора) применяли Метален-1108 (АО «Метаклэй»). Исходные компоненты в соответствии с рецептурами (табл. 1) перемешивались вручную в пластиковой таре, а затем компаундировались с помощью одношнекового лабораторного экструдера (ЛЭРМ-1) при температуре 180-190 °С. Полученные композиты гранулировались, после чего из гранул методом горячего прессования при 180 °С и 5 МПа изготавливались стандартные образцы в форме пластин толщиной 4 ± 1 мм.

Таблица 1 - Рецептуры композитов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.29.1>

№ П.п.	Содержание компонента, мас. %			
	Наполнитель	ПЭНД	Метален	Воск
1	0	97	1,5	1,5
2	20	77	1,5	1,5
3	30	67	1,5	1,5
4	40	57	1,5	1,5
5	50	47	1,5	1,5

Для полученных композитов определяли показатели плотность, твердость по Бринеллю (ГОСТ 4670-67), пластичность (как отношение пластической деформации к полной), модуль упругости при сжатии (ГОСТ 4670-67), прочность при изгибе (ГОСТ 17036-71), ударную вязкость (ГОСТ 17036-71) и водопоглощение (ГОСТ 19592).

Основные результаты

Результаты определения физико-механических свойств образцов композитов представлены на рисунках 1-3. Уравнения регрессии, с высокой точностью описывающие зависимости изменения определяемых показателей от содержания наполнителя, приведены на графиках с соответствующими коэффициентами детерминации.

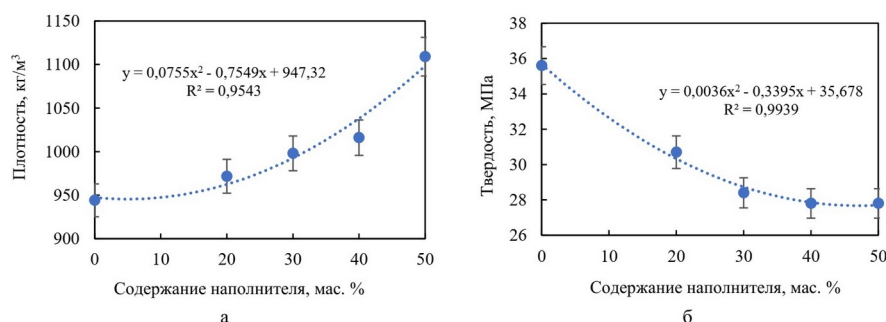


Рисунок 1 - Влияние содержания наполнителя на плотность (а) и твердость (б) композитов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.29.2>

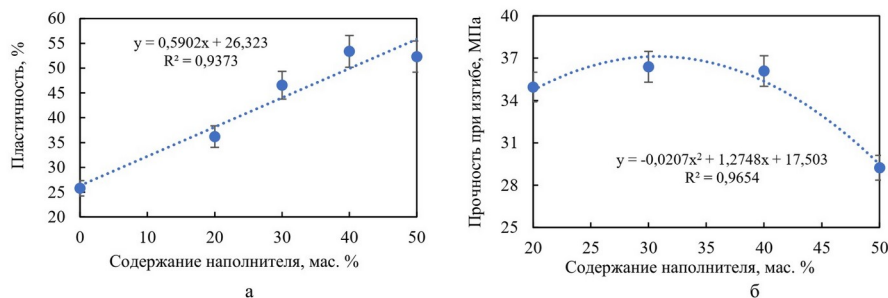


Рисунок 2 - Влияние содержания наполнителя на пластичность (а) и твердость (б) композитов

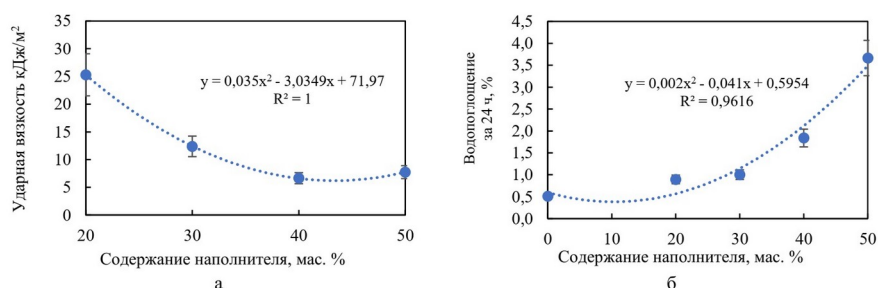
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.29.3>

Рисунок 3 - Влияние содержания наполнителя на ударную вязкость (а) и водопоглощение за 24 часа (б)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.29.4>

Обсуждение

Плотность материала увеличивается с введением измельченных стеблей подсолнечника в полимерную фазу полиэтилена высокой плотности. Влияние содержания наполнителя на этот показатель носит экстремальный характер. Повышение плотности композиционного материала объясняется высокими плотностями основных компонентов стеблей подсолнечника – лигнина и целлюлозы.

Твердость по Бринеллю, прочность при изгибе и ударная вязкости материала уменьшаются при введении наполнителя. Падение физико-механических свойств можно объяснить недостаточно однородным распределением наполнителя в полимерной фазе полиэтилена, низкой интенсивностью взаимодействия фаз наполнителя и полиэтилена, а также недостаточным количеством компатибилизатора в составе композита, необходимого для того, чтобы обеспечить высокий уровень адгезии между компонентами.

В то же время наблюдается резкий рост пластичности и водопоглощения материала, который объясняется плохим смачиванием расплавом полимера частиц наполнителя, что приводит к разрушению кластеров наполнителя при приложении к образцу внешних нагрузок. Высокое водопоглощение композитов с измельченным подсолнечником может быть объяснено неоднородностью структуры материала, так как известно, что наиболее значительный вклад в водопоглощение ДПК вносит капиллярное впитывание, связанное с дефектами на поверхности образца. Кроме того, водоудерживающие свойства и гидрофильность сердцевинки стеблей подсолнечника широко известны, и безусловно являются факторами, вносящими вклад в водопоглощение композитов.

Ударная вязкость композита, содержащего 20 мас. % измельченных стеблей подсолнечника характеризуется как очень высокая. При таком низком уровне содержания наполнителя, материал будет обладать текучестью расплава достаточной для переработки методом литья под давлением. В целом по этому показателю композиты с полимерной фазой полиэтилена высокой плотности значительно превосходят как образцы с ПЭНП и древесной мукой, так и аналоги с полимерной фазой ПВХ и стеблями подсолнечника [10].

Высокое водопоглощение материала может быть как минусом, так и плюсом. В частности, способность к поглощению влаги необходима для биоразлагаемой тары с водоудерживающими свойствами и эффектом подкормки. Высокая гидрофильность материала также является маркером его способности к биоразложению.

По большинству физико-механических свойств композиты на основе полиэтилена высокой плотности и измельченных стеблей подсолнечника уступают эталонам на основе ПЭНП и древесной муки и композитам на основе пластифицированного ПВХ и стеблей подсолнечника [10]. Однако ключевое преимущество последних – ударная вязкость, проявляется в композитах, рассмотренных в настоящем исследовании материалах, еще более явно. Такие

композиты могут быть рекомендованы для создания ударопрочных изделий методом литья под давлением. К тому же композиты на основе полиолефиновых матриц в среднем на 18-24% легче чем их аналоги с ПВХ.

Заключение

В работе показана возможность получения древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена высокой плотности и измельченных стеблей подсолнечника. Установлено, что введение этого лигноцеллюлозного наполнителя приводит к снижению показателей твердости, прочности при изгибе, ударной вязкости, и повышению плотности, пластичности и водопоглощения материала. Определены закономерности влияния содержания наполнителя на перечисленные свойства.

По большинству физико-механических свойств композиты, созданные на основе полиэтилена высокой плотности и измельченных стеблей подсолнечника, уступают эталонам, изготовленным из полиэтилена низкой плотности и древесной муки, а также композитам, созданным на основе пластифицированного поливинилхлорида и стеблей подсолнечника. Для повышения характеристик исследуемых композитов необходимо значительно увеличить расход компатибилизатора. Это позволит улучшить межфазное взаимодействие между полимерами, что способствует более равномерному распределению компонентов и снижению внутренних напряжений в материале. Альтернативным методом является проведение механохимической активации полиэтилена. Этот процесс включает механическое воздействие на полимер, что приводит к его разрушению и образованию новых функциональных групп. В результате такого воздействия повышается реакционная способность полиэтилена, что улучшает его совместимость с другими компонентами композита.

Ключевым преимуществом рассматриваемых материалов является высокая ударная вязкость. Композит, содержащий 20 мас. % измельченных стеблей подсолнечника характеризуется показателем ударной вязкости 25,3 кДж/м², что сопоставимо с уровнем композитов на основе полиамида. Наиболее рациональным уровнем содержания наполнителя в композите представляет 20 мас. %. При этом ударная прочность максимальна, а твердость и прочность при изгибе материала остаются на высоком уровне, близком к уровню эталонов на основе полиэтилена и древесной муки.

Среди потенциальных областей использования композитных материалов, созданных на основе полиэтилена высокой плотности и измельченных стеблей подсолнечника выделяются:

- тара и объёмные материалы для упаковки: ящики, коробки, прокладочные материалы, транспортные паллеты;
- рекламные щиты, таблички и другие изделия;
- биоразлагаемые контейнеры для саженцев и быстрорастущих растений, которые могут сохранять удобрения в почве, продлевая их действие.

Такие материалы могут быть рекомендованы для создания ударопрочных изделий методом литья под давлением

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Шкиндеров М.С., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.29.5>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Shkinderov M.S., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.29.5>

Список литературы / References

1. Мацевич Т.А. Механические свойства террасной доски на основе полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида / Т.А. Мацевич, А.А. Аскадский // Строительство: наука и образование. — 2017. — № 3. — С. 5. — DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.4.
2. Аскадский А.А. Водопоглощение древесно-полимерных композитов на основе ПВХ с частичной заменой древесного наполнителя на минеральный / А.А. Аскадский, Т.А. Мацевич, В.И. Кондращенко // Строительные материалы. — 2019. — № 5. — С. 62–66.
3. Шкуро А.Е. Получение и изучение свойств древесно-полимерных композитов с наполнителями из отходов растительного происхождения / А.Е. Шкуро, В.В. Глухих, Н.М. Мухин // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. — 2016. — № 3. — С. 101–105.
4. Чельшева И.А. Использование отходов растениеводства в качестве наполнителей полимерных композиций / И.А. Чельшева, Л.Г. Панова // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2006. — № 1.
5. Ma X. Effects of dietary sunflower meal supplementation on productive performance, antioxidant capacity, lipid metabolism, and gut microbiota in laying ducks / X. Ma, Y. Liu, Q. Zhang // Journal of Cleaner Production. — 2022. — № 331.
6. Brouard Y. Mechanical and hygrothermal behavior of clay–Sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation / Y. Brouard, D. Hoxha, N. Ranganathan [et al.] // Construction and Building Materials. — 2018. — № 161. — P. 196–207.
7. Nozahic V. Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder / V. Nozahic, S. Amziane // Composites: Part A. — 2012. — № 43. — P. 1837–1849.
8. Binici H. An environmentally friendly thermal insulation material from sunflower stalk, textile waste and stubble fibers / H. Binici, M. Eken, M. Dolaz [et al.] // Construction and Building Materials. — 2014. — № 51. — P. 24–33.

9. Mati-Baouche N. Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan / N. Mati-Baouche, H. De Baynast, A. Lebert [et al.] // *Industrial Crops and Products*. — 2014. — № 58. — P. 244–250.

10. Захаров П.С. Исследование свойств полимерного композиционного материала на основе поливинилхлорида и стеблей подсолнечника / П.С. Захаров, Д.Д. Чирков, А.Е. Шкуро // *Вестник Технологического университета*. — 2022. — № 5. — С. 51–56. — DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_3_51.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Matseevich T.A. Mehanicheskie svojstva terrasnoj doski na osnove polietilena, polipropilena i polivinilhlorida [Mechanical properties of decking boards based on polyethylene, polypropylene and polyvinyl chloride] / T.A. Matseevich, A.A. Askadskij // *Construction: Science and Education*. — 2017. — № 3. — P. 5. — DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.4. [in Russian]

2. Askadskij A.A. Vodopogloschenie drevesno-polimernyh kompozitov na osnove PVH s chastichnoj zamenoj drevesnogo napolnitelja na mineral'nyj [Water absorption of wood-polymer composites based on PVC with partial replacement of wood filler with mineral] / A.A. Askadskij, T.A. Matseevich, V.I. Kondraschenko // *Construction Materials*. — 2019. — № 5. — P. 62–66. [in Russian]

3. Shkuro A.E. Poluchenie i izuchenie svojstv drevesno-polimernyh kompozitov s napolniteljami iz othodov rastitel'nogo proishozhdenija [Production and study of the properties of wood-polymer composites with fillers from waste of plant origin] / A.E. Shkuro, V.V. Gluhih, N.M. Muhin // *Bulletin of the Moscow State University of Forestry – Forest Bulletin*. — 2016. — № 3. — P. 101–105. [in Russian]

4. Chelysheva I.A. Ispol'zovanie othodov rastenievodstva v kachestve napolnitelej polimernyh kompozitsij [Use of plant waste as fillers in polymer composites] / I.A. Chelysheva, L.G. Panova // *Bulletin of the Saratov State Technical University*. — 2006. — № 1. [in Russian]

5. Ma X. Effects of dietary sunflower meal supplementation on productive performance, antioxidant capacity, lipid metabolism, and gut microbiota in laying ducks / X. Ma, Y. Liu, Q. Zhang // *Journal of Cleaner Production*. — 2022. — № 331.

6. Brouard Y. Mechanical and hygrothermal behavior of clay–Sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation / Y. Brouard, D. Hoxha, N. Ranganathan [et al.] // *Construction and Building Materials*. — 2018. — № 161. — P. 196–207.

7. Nozahic V. Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder / V. Nozahic, S. Amziane // *Composites: Part A*. — 2012. — № 43. — P. 1837–1849.

8. Binici H. An environmentally friendly thermal insulation material from sunflower stalk, textile waste and stubble fibers / H. Binici, M. Eken, M. Dolaz [et al.] // *Construction and Building Materials*. — 2014. — № 51. — P. 24–33.

9. Mati-Baouche N. Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan / N. Mati-Baouche, H. De Baynast, A. Lebert [et al.] // *Industrial Crops and Products*. — 2014. — № 58. — P. 244–250.

10. Zaharov P.S. Issledovanie svojstv polimernogo kompozitsionnogo materiala na osnove polivinilhlorida i steblej podsolnechnika [Study of the properties of a polymer composite material based on polyvinyl chloride and sunflower stems] / P.S. Zaharov, D.D. Chirkov, A.E. Shkuro // *Bulletin of the Technological University*. — 2022. — № 5. — P. 51–56. — DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_3_51. [in Russian]