

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КРИВОЛАПОВ ДМИТРО СЕРГІЙОВИЧ

УДК 678.027.3; 678.742.2; 678.046.5

ДИСЕРТАЦІЯ

ВИСОКОНАПОВНЕНІ ДЕРЕВИННО-ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИТИ
БУДІВЕЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ ПОЛІОЛЕФІНІВ

16 Хімічна та біоінженерія

161 Хімічні технології та інженерія

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Д. С. Криволапов

Науковий керівник

Суха Ірина Валеріївна

кандидат технічних наук, доцент

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Криволапов Д. С. «Високонатовнені деревинно-полімерні композити будівельного призначення на основі поліолефінів». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія. Навчально-науковий інститут «Український державний університет науки і технологій» Українського державного університету науки і технологій, Дніпро, 2025.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню нових матеріалів, які поєднують у собі властивості деревини та полімерів. У роботі розглядаються основні аспекти створення, модифікації та застосування деревинно-полімерних композитів (ДПК), що відкриває нові можливості для їх використання в різних галузях промисловості. Зокрема, розглядається можливість використання у якості мінерального наповнювача зольного пилу та фосфогіпсу, а також у якості апрету або компатибілізатору стеаринової кислоти та епоксидованої соєвої олії.

Основна мета дослідження полягає в розробці ефективних технологій виготовлення композитів, які б забезпечували високу міцність, довговічність та стійкість до зовнішніх впливів. У роботі аналізуються різні методи модифікації деревинно-полімерних композитів, а також особлива увага приділяється вивченню впливу добавок та модифікаторів на фізико-механічні, технологічні та експлуатаційні властивості отриманих композитів. Дослідження також включає експериментальні випробування, які дозволяють оцінити ефективність запропонованих рішень та їх практичну застосовність. Результати роботи можуть бути використані для створення нових екологічно чистих матеріалів, що відповідають сучасним вимогам сталого розвитку.

Результати експериментальних досліджень продемонстрували, що введення стеаринової кислоти в деревинно-полімерний композит у кількості понад 1,1 мас. % позитивно впливає на технологічні параметри екструзії.

Зокрема, спостерігається зменшення крутного моменту головного приводу екструзійного обладнання, що свідчить про поліпшення процесу екструзії, а також збільшення продуктивності виробництва. При вмісті стеаринової кислоти в межах 0,8 – 1,25 мас. % відзначається суттєве покращення фізико-механічних характеристик композиту. Зокрема, міцність при вигині зростає на 20%, досягаючи значення 51,3 МПа. Крім того, ударна в'язкість за методом Шарпі на зразках з надрізом збільшується на 37%, до 11,9 кДж/м². Також спостерігається зменшення коефіцієнта лінійного термічного розширення та водопоглинання, що свідчить про поліпшення стабільності матеріалу в умовах зміни температури та вологості. Оптимізація вмісту стеаринової кислоти в деревинно-полімерному композиті може суттєво підвищити його експлуатаційні характеристики, що робить цей матеріал більш привабливим для використання в різних галузях промисловості.

Вперше показано, що введення епоксидованої соєвої олії у склад деревинно-полімерного композиту у кількості 0,5 мас.% суттєво покращує фізико-механічні та експлуатаційні властивості матеріалу. Ударна в'язкість за Шарпі на зразках з надрізом зростає з 7,5 кДж/м² до 20,0 кДж/м², що свідчить про значне підвищення стійкості композиту до ударних навантажень. Міцність при вигині також демонструє позитивну динаміку, збільшуючись з 31,6 МПа до 50,8 МПа, що вказує на покращення механічних характеристик матеріалу. Крім того, введення епоксидованої соєвої олії приводить до зменшення коефіцієнта лінійного термічного розширення на 15%, що є важливим фактором для стабільності розмірів композиту при зміні температури. Це покращує експлуатаційні характеристики матеріалу, роблячи його більш придатним для використання в умовах змінних температур. При подальшому збільшенні вмісту епоксидованої соєвої олії в композиті спостерігається зменшення водопоглинання та технологічної усадки, що може бути позитивним аспектом для деяких застосувань. Проте, варто зазначити, що фізико-механічні властивості композиту починають погіршуватися. Це свідчить про те, що оптимальний вміст епоксидованої

соевої олії в деревинно-полімерному композиті становить 0,5 мас.%. Подальше збільшення цього показника може призвести до негативних наслідків, таких як зниження механічної міцності та ударної в'язкості, що, в свою чергу, обмежує можливості використання композиту в умовах, де потрібні високі експлуатаційні характеристики.

Встановлено, що при заміщенні кальциту зольним пилом у композитних матеріалах спостерігається суттєве покращення їх експлуатаційних та технологічних властивостей. Зокрема, відзначається зменшення водопоглинання, коефіцієнта лінійного термічного розширення та технологічної усадки. Це свідчить про підвищення стабільності матеріалу під час експлуатації, що є важливим фактором для багатьох застосувань. Крім того, використання зольного пилу в якості наповнювача приводить до збільшення міцності композиту при вигині. Зокрема, міцність зростає на 9 %, підвищуючи показник з 51,3 МПа (при відсутності зольного пилу) до 55,8 МПа (при відсутності кальциту). Це свідчить про те, що зольний пил може значно покращити механічні характеристики композиту. Однак, незважаючи на позитивні зміни в міцності, спостерігається також зниження ударної в'язкості за Шарпі на зразках з надрізом. Цей показник зменшується більш ніж у два рази — з 11,9 кДж/м² до 5,1 кДж/м². Це вказує на те, що хоча зольний пил покращує деякі властивості композиту, він може негативно впливати на його ударну в'язкість, що варто враховувати при проектуванні матеріалів для специфічних умов експлуатації.

Показано, що при заміщенні у композиті кальциту фосфогіпсом експлуатаційні, фізико-механічні та технологічні властивості матеріалу залишаються стабільними. Це важливий аспект, оскільки забезпечує збереження якості виробів, виготовлених на основі таких композитів. Фосфогіпс, будучи дешевим побічним продуктом виробництва екстракційної фосфорної кислоти, відкриває нові можливості для зниження собівартості виробів. Використання фосфогіпсу в деревинно-полімерних композитах відкриває нові можливості для розробки матеріалів з покращеними

характеристиками. Це може бути особливо актуально в умовах зростаючих вимог до екологічності та сталого розвитку. Фосфогіпс, як побічний продукт, може зменшити витрати на сировину та знизити екологічний слід виробництва, що робить його привабливим вибором для промисловості.

Побудовані регресійні моделі є статистично адекватними, підтверджуючи значущий вплив модифікаторів (епоксидованої соєвої олії та зольного пилу). Важливо відзначити, що взаємодія між епоксидованою соєвою олією та зольним пилом виявилася статистично незначущою як для міцності при вигині, так і для ударної в'язкості, що вказує на переважно адитивний характер їхнього спільного впливу в досліджуваному діапазоні. Отримані результати надають практичну основу для оптимізації складу ДПК з метою покращення їхніх механічних властивостей, що сприятиме розширенню сфер застосування цих екологічно привабливих матеріалів.

Розроблені високонаповнені деревинно-полімерні композити з гібридним наповнювачем поєднують екологічність та високу продуктивність, використовуючи переважно відходи та вторинні матеріали. Ці матеріали демонструють високу міцність, стійкість до термічних деформацій та водостійкість, що робить їх ідеальними для використання у будівництві та виробництві меблів. ДПК характеризуються довговічністю: вони не піддаються впливу вологи, не гниють та стійкі до шкідників, що значно знижує потребу в частих ремонтах. Тому їх можна застосовувати у зовнішніх конструкціях (тераси, огорожі, фасади), де важлива стійкість до атмосферних впливів.

Композити легко адаптуються для різних застосувань завдяки можливості варіювання складу наповнювачів. Використання вторинних матеріалів та зменшення витрат на обробку робить їх виробництво економічно вигідним. У контексті глобальних екологічних викликів, ці ДПК є доцільним та необхідним рішенням.

Розроблена рецептура деревинно-полімерного композиту успішно апробована у виробничих умовах. Експериментальна партія продукції

підтвердила стабільність фізико-механічних властивостей, економічну ефективність та екологічну доцільність запропонованого підходу. Впровадження забезпечило відчутний економічний ефект, зумовлений зниженням собівартості, енергоспоживання та мінімальними витратами на адаптацію технології. Це свідчить про готовність матеріалу до серійного застосування та його конкурентоспроможність на ринку оздоблювальних виробів.

Ключові слова: деревинно-полімерний композит, поліетилен високої густини, стеаринова кислота, зольний пил, епоксидована соєва олія, фосфогіпс, кальцит, технологічна усадка, водопоглинання, фізико-механічні властивості.

ABSTRACT

Kryvolapov D.S. Wood-polymer composites based on polyolefins. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 161 "Chemical Technologies and Engineering". Ukrainian State University Of Science And Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2026

The dissertation is devoted to the study of new materials that combine the properties of wood and polymers. The paper discusses the main aspects of the creation, modification and application of wood-polymer composites, which opens up new opportunities for their use in various industries. In particular, the possibility of using fly ash and phosphogypsum as mineral fillers, as well as stearic acid and epoxied soybean oil as adhesion promoters or compatibilizers is considered.

The main purpose of the study is to develop effective technologies for the manufacture of composites that would provide high strength, durability and resistance to external influences. The paper analyses various methods of modifying wood-polymer composites, and pays special attention to the effect of additives and modifiers on the physical, mechanical, technological and operational properties of the resulting composites. The research also includes experimental tests to assess the effectiveness of the proposed solutions and their practical applicability. The results of the work can be used to create new environmentally friendly materials that meet modern requirements for sustainable development.

The results of experimental studies have shown that the introduction of stearic acid into a wood-polymer composite in an amount of more than 1.1 wt. % has a positive effect on the technological parameters of extrusion. In particular, there is a decrease in the torque of the main drive of the extrusion equipment, which indicates an improvement in the extrusion process and an increase in production capacity. At a stearic acid content of 0.8-1.25 wt. %, there is a significant improvement in the physical and mechanical characteristics of the composite. In particular, the bending strength increases by 20%, reaching a value

of 51.3 MPa. In addition, the Charpy impact strength of the notched specimens increases by 37%, up to 11.9 kJ/m². There is also a decrease in the coefficient of linear thermal expansion and water absorption, which indicates an improvement in the stability of the material under conditions of temperature and humidity changes. Optimising the stearic acid content in a wood-polymer composite can significantly improve its performance, making this material more attractive for use in various industries.

For the first time, it was shown that the introduction of epoxidised soybean oil in the amount of 0.5 wt.% in the wood-polymer composite significantly improves the physical, mechanical, and operational properties of the material. The Charpy impact strength of the notched specimens increases from 7.5 kJ/m² to 20.0 kJ/m², which indicates a significant increase in the composite's resistance to impact loads. The bending strength also demonstrates positive dynamics, increasing from 31.6 MPa to 50.8 MPa, indicating an improvement in the mechanical characteristics of the material. In addition, the introduction of epoxy soybean oil leads to a 15% reduction in the coefficient of linear thermal expansion, which is an important factor for the dimensional stability of the composite with temperature changes. This improves the performance of the material, making it more suitable for use in variable temperatures. With a further increase in the content of epoxidised soybean oil in the composite, a decrease in water absorption and process shrinkage is observed, which can be a positive aspect for some applications. However, it is worth noting that the physical and mechanical properties of the composite begin to deteriorate. This indicates that the optimal content of epoxidised soybean oil in a wood-polymer composite is 0.5 wt%. A further increase in this indicator can lead to negative consequences, such as a decrease in mechanical strength and impact strength, which, in turn, limits the possibility of using the composite in conditions where high performance is required.

It has been established that the replacement of calcite with fly ash in composite materials leads to a significant improvement in their operational and technological properties. In particular, there is a decrease in water absorption, the

coefficient of linear thermal expansion and technological shrinkage. This indicates an increase in material stability during operation, which is an important factor for many applications. In addition, the use of fly ash as a filler leads to an increase in the bending strength of the composite. In particular, the strength increases by 9 %, rising from 51.3 MPa (in the absence of fly ash) to 55.8 MPa (in the absence of calcite). This indicates that fly ash can significantly improve the mechanical properties of the composite. However, despite the positive changes in strength, there is also a decrease in Charpy impact strength on the notched specimens. This indicator decreases by more than half - from 11.9 kJ/m² to 5.1 kJ/m². This indicates that although fly ash improves some of the properties of the composite, it can negatively affect its impact strength, which should be taken into account when designing materials for specific operating conditions.

It has been shown that when calcite is replaced by phosphogypsum in the composite, the operational, physical, mechanical, and technological properties of the material remain stable. This is an important aspect as it ensures that the quality of products made from such composites is maintained. As a cheap by-product of phosphoric acid production, phosphogypsum opens up new opportunities to reduce the cost of products. The use of phosphogypsum in wood-polymer composites opens up new opportunities for the development of materials with improved characteristics. This may be particularly relevant in the context of growing environmental and sustainability requirements. As a by-product, phosphogypsum can reduce raw material costs and lower the environmental footprint of production, making it an attractive choice for industry.

The constructed regression models are statistically adequate, confirming the significant influence of the modifiers (epoxidized soybean oil and fly ash). It is important to note that the interaction between epoxidized soybean oil and fly ash proved to be statistically insignificant for both flexural strength and impact toughness, indicating a predominantly additive nature of their combined effect within the investigated range. The obtained results provide a practical basis for optimizing the composition of wood-plastic composites to enhance their

mechanical properties, which will support the expansion of application areas for these environmentally attractive materials.

The developed highly filled wood-polymer composites with a hybrid filler combine environmental sustainability and high performance, utilizing primarily waste and recycled materials. These materials exhibit high strength, resistance to thermal deformation, and water resistance, making them ideal for use in construction and furniture manufacturing. WPCs are characterized by durability: they are impervious to moisture, do not rot, and are resistant to pests, significantly reducing the need for frequent repairs. Therefore, they can be applied in outdoor structures (terraces, fences, facades), where resistance to weathering is essential.

The composites are easily adaptable for various applications due to the ability to vary the composition of fillers. The use of recycled materials and reduced processing costs make their production economically advantageous. In the context of global environmental challenges, these WPCs represent a reasonable and necessary solution.

The developed wood-polymer composite formulation was successfully tested under industrial conditions. The experimental batch of products confirmed the stability of physical and mechanical properties, economic efficiency, and environmental viability of the proposed approach. Implementation resulted in a tangible economic benefit due to reduced production costs, lower energy consumption, and minimal expenses for technology adaptation. These outcomes demonstrate the material's readiness for large-scale application and its competitiveness in the decorative building materials market.

Keywords: wood-polymer composite, high-density polyethylene, stearic acid, ash dust, epoxidised soybean oil, phosphogypsum, calcite, technological shrinkage, water absorption, physical and mechanical properties.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті:

1. **Криволапов Д.С.**, Сухий К.М., Баштаник П.І., Третьяков А.О., Безрукавий В.О. Дослідження впливу стеаринової кислоти на властивості деревинно-полімерних композитів // Питання хімії та хімічної технології. 2023. № 5. С. 50–54. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2023-150-5-50-54>. Журнал цитується наукометричними базами SCOPUS. *Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел, планування експерименту, розробка експериментальних композицій, проведення експериментальних досліджень, аналіз та оформлення результатів, написання і подання статті.*

2. **Криволапов Д.С.**, Сухий К.М., Баштаник П.І., Третьяков А.О., Безрукавий В.О. Вплив зольного пилу на властивості деревинно-полімерних композитів // Питання хімії та хімічної технології. 2024. № 3. С. 83–88. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2024-154-3-83-88>. Журнал цитується наукометричними базами SCOPUS. *Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел, планування експерименту, розробка експериментальних композицій, проведення експериментальних досліджень, аналіз та оформлення результатів, написання і подання статті.*

3. Kulikov, A.; **Kryvolapov, D.**; Sukhyu, K.; Yeromin, O.; Fedak, M.; Prokopenko, O.; Sukha, I.; Musaiio, A.; Hrebik, T. Study of the Impact of Epoxidized Soybean Oil on the Characteristics of Wood-Polymer Composites // Materials. 2025. 18. 2455. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18112455> Видання віднесена до другого квартилю відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank та цитується наукометричними базами SCOPUS та Web of Science Core Collection. *Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел, планування експерименту, розробка експериментальних композицій,*

проведення експериментальних досліджень, аналіз та оформлення результатів, написання і подання статті.

4. **Д.С. Криволапов**, К.М. Сухий, П.І. Баштаник, І.В. Суха, О.В. Савченко. Вплив фосфогіпсу на властивості деревинно-полімерних композитів // Питання хімії та хімічної технології. 2025. № 2. С. 144–149. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-159-2-144-149>. Журнал цитується наукометричними базами SCOPUS. *Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел, планування експерименту, розробка експериментальних композицій, проведення експериментальних досліджень, аналіз та оформлення результатів, написання і подання статті.*

Патенти:

5. **Криволапов Д.С.**, Сухий К.М., Баштаник П.І., Третьяков А.О., Беяновська О.А. Деревинно-полімерна композиція : пат. 129141 Україна / ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» ; заявл. 10.07.2024 ; опубл. 22.01.2025, Бюл. № 4.

Тези доповідей:

6. **Криволапов Д.С.**, Баштаник П.І., Сухий К.М. Дослідження процесу переробки деревинно-полімерних композитів // Тези доповідей II Міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» м. Дніпро, Україна. 20 травня 2023 р. С. 16–18. *Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел, планування експерименту, розробка експериментальних композицій, проведення експериментальних досліджень, аналіз та оформлення результатів, написання і подання тез.*

7. **Криволапов Д.С.**, Романченко І.С., Баштаник П.І., Третьяков А.О., Сухий К.М. Вплив зольного пилу на властивості деревинно-полімерного композиту // Тези доповідей XI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Хімія і сучасні технології» м. Дніпро, Україна. 06-07 грудня 2023. том II. С. 117–118. *Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел, планування*

експерименту, розробка експериментальних композицій, проведення експериментальних досліджень, аналіз та оформлення результатів, написання і подання тез.

8. **Криволапов Д.С.,** Сухий К.М., Баштаник П.І., Третьяков А.О. Вплив зольного пилю на властивості деревинно-полімерного композиту // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології забезпечення параметрів комфорту, енергоефективності і екологічності житловихбудівель на основі смарт-технологій» м. Дніпро, Україна. 20–21 лютого 2024. С 133–134. *Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел, планування експерименту, розробка експериментальних композицій, проведення експериментальних досліджень, аналіз та оформлення результатів, написання і подання тез.*

9. **Д.С. Криволапов,** П.І. Баштаник, К.М. Сухий Вивчення впливу технологічних факторів на властивості термопластичних деревинно-полімерних композитів // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні полімерні матеріали та технології» м. Львів, Україна. 24-26 вересня 2024. С 43. *Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел, планування експерименту, розробка експериментальних композицій, проведення експериментальних досліджень, аналіз та оформлення результатів, написання і подання тез.*

10. **Криволапов Д.С.,** Романченко І.Ю., Баштаник П.І., Сухий К.М. Вплив епокидваної соєвої олії на властивості деревинно-полімерного композиту // Тези доповідей III Міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» м. Дніпро, Україна. 20 травня 2024 р. С. 48–49. *Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел, планування експерименту, розробка експериментальних композицій, проведення експериментальних досліджень, аналіз та оформлення результатів, написання і подання тез.*

11. **Криволапов Д.С.,** Баштаник П.І., Сухий К.М. Вплив фосфогіпсу на властивості деревинно-полімерних композитів // Тези доповідей IV

Міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» м. Дніпро, Україна. 20 травня 2025 р. С. 9–12.
Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел, планування експерименту, розробка експериментальних композицій, проведення експериментальних досліджень, аналіз та оформлення результатів, написання і подання тез.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	18
Вступ	19
РОЗДІЛ 1 ВЛАСТИВОСТІ ДЕРЕВИННО-ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ	27
1.1 Полімери, що використовуються у ДПК	28
1.2 Деревинне борошно як наповнювач полімерів	33
1.3 Вплив розміру часток деревинного борошна на властивості ДПК	35
1.4 Модифікація деревинного борошна	37
1.4.1 Фізична модифікація деревинного наповнювача	38
1.4.2 Хімічна модифікація деревинного наповнювача	41
1.4.3 Інші види модифікації деревинно-полімерних композитів	47
1.5 Нанонаповнювачі та нанокompозити	52
1.6 Мінеральні наповнювачі у ДПК	58
1.7 Процеси переробки деревинно-полімерних композитів	67
1.8 Мастильні речовини	70
Висновки до розділу 1	72
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	74
2.1 Об'єкти дослідження	74
2.1.1 Вторинний поліетилен високої густини	74
2.1.2 Деревинне борошно	75
2.1.3 Кальцит	77
2.1.4 Поліетилен із вмістом 1-6 % прищепленого малеїнового ангідриду	78
2.1.5 Стеаринова кислота	79
2.1.6 Поліетиленовий віск	80
2.1.7 Зольний пил	81
2.1.8 Фосфогіпс	82

2.1.9 Епоксидована соєва олія	82
2.1.10 УФ-стабілізатор	83
2.1.11 Барвники на основі оксиду заліза	84
2.2 Методика приготування зразків для дослідження	85
2.3 Методи дослідження	86
2.3.1 Визначення густини методом гідростатичного зважування	87
2.3.2 Випробування міцності при вигині	87
2.3.3. Випробування на ударну в'язкість за Шарпі	88
2.3.4 Визначення водопоглинання композиту	89
2.3.5 Методика визначення технологічної усадки	89
2.3.6 Визначення коефіцієнту лінійного розширення	90
2.3.7 Інфрачервона спектроскопія	91
2.3.8 Мікроскопічний аналіз	91
Висновки до розділу 2	91
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	93
3.1 Вплив стеаринової кислоти на властивості деревинно-полімерних композитів.	93
Висновки до підрозділу 3.1	106
3.2 Вплив епоксидованої соєвої олії на властивості деревинно-полімерних композитів на основі вторинного поліетилену високої густини.	107
Висновки до підрозділу 3.2	117
3.3 Вплив зольного пилу на властивості деревинно-полімерних композитів на основі вторинного поліетилену високої густини	118
Висновки до підрозділу 3.3	128
3.4 Вплив фосфогіпсу на властивості деревинно-полімерних композитів	129
Висновки до підрозділу 3.4	144

3.5 Комбінований вплив епоксидованої соєвої олії та зольного пилу на властивості деревинно-полімерних композитів	145
Висновки до розділу 3.5	168
3.6 Впровадження результатів дослідження у виробничу практику	170
Висновки до підрозділу 3.6	175
ВИСНОВКИ	176
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	178
ДОДАТОК А. Список наукових праць за темою дисертації	205
ДОДАТОК Б. Акт Про виготовлення експериментальної партії деревинно-полімерного композита на основі вторинного поліетилену високої густини	207
ДОДАТОК В. Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження в навчальний процес	209

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АБС – акрилонітрил-бутадієн-стирол;
ВНТ – вуглецеві нанотрубки;
ДПК – деревинно-полімерний композит;
ДСПМ – деревинно-стружково-пластиковий матеріал;
ЕСО – епоксидована соєва олія;
МАПП – сополімер поліпропілену з щепленим малеїновим ангідридом;
МАПЕ – поліетилен з щепленим малеїновим ангідридом;
НКЦ – нанокристали целюлози;
НФЦ – нанофібрили целюлози;
ПВХ – полівінілхлорид;
ПГБ – полі(3-гідроксибутират);
ПГБВ – полігідроксибутират-ко-валерат;
ПЕ – поліетилен;
ПЕВГ – поліетилен високої густини;
ПЕНГ – поліетилен низької густини;
ПЕТ – поліетилентефталат;
ПММА – поліметилметакрилат;
ПП – поліпропілен;
ПС – полістирол;
СБС – сополімер стирол-бутадієн-стирол
СМА – сополімери стиролу та малеїнового ангідриду;
OSB – орієнтовано-стружкові плити;
PLA – полімолочна кислота

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Композиційні полімерні матеріали широко застосовуються завдяки можливості поєднання різних полімерів та функціональних наповнювачів [1]. У зв'язку з посиленням екологічних вимог та обмежень на використання токсичних деревинно-стружкових плит [2], надзвичайно актуальною стає розробка будівельних матеріалів на основі дешевих відходів рослинного походження та екологічно чистих зв'язувальних речовин. Проблема енерго-ресурсозбереження та необхідність раціонального використання відходів деревопереробки обумовлюють доцільність створення деревинно-полімерних композитів (ДПК) [3,4]. Використання саме деревинних наповнювачів (як відходів деревопереробки) та вторинних полімерів є особливо актуальним з огляду на значні обсяги їхніх відходів у промисловості та побуті як в Україні, так і у світі.

Науково-технічний прогрес постійно підвищує експлуатаційні вимоги до полімерних композитів. Введення наповнювачів та апретуючих речовин є ефективним способом покращення властивостей та здешевлення виробництва [5]. Оскільки ДПК експлуатуються в умовах дії вологи, температурних змін, УФ-випромінювання та механічних навантажень, комплексна оцінка їхніх властивостей та розробка нових рецептур є життєво важливою для забезпечення довговічності та надійності продукції.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених ДПК, залишається низка невирішених питань щодо рецептуробудування та технологічних параметрів процесу. Саме тому актуальність цього дослідження полягає у вивченні впливу зольного пилу та фосфогіпсу як наповнювачів, а також стеаринової кислоти та епоксидованої соєвої олії як апретуючих речовин на властивості ДПК. Вибір саме цих матеріалів є особливо актуальним через їхню доступність та низьку вартість (зольний пил — відхід енергетичної галузі, фосфогіпс — побічний продукт виробництва

добрив). Їхнє використання не лише робить виробництво ДПК економічно вигіднішим, але й має значний позитивний вплив на екологічну ситуацію, сприяючи утилізації промислових відходів та зменшенню навантаження на довкілля.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційна робота пов'язана з кафедральною науково-дослідною роботою «Розробка альтернативних енергоресурсів та інноваційних полімерних матеріалів технічного призначення» № 35/2306999, № ДР 0123U103914.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є розробка деревинно-полімерних композитів та технологічних процесів отримання виробів з них з покращеним комплексом фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Для реалізації поставленої мети вирішувалися наступні **завдання**:

- дослідити вплив структурної модифікації ДПК за рахунок введення стеаринової кислоти та епоксидованої соєвої олії на структуру, фізико-механічні та експлуатаційні властивості ДПК;
- розробити оптимальні рецептурні параметри технологічного процесу отримання виробів з ДПК з підвищеним рівнем фізико-механічних та експлуатаційних властивостей;
- дослідити можливість часткової заміни деревинного борошна неорганічними відходами теплових електростанцій та хімічних виробництв;
- впровадити розробки на підприємствах України по виготовленню будівельних матеріалів з ДПК.

Предметом дослідження є високонаповнені композиційні матеріали та вироби будівельного призначення на основі деревинної сировини та поліетилену високої густини.

Об'єктом дослідження є закономірності процесу модифікації та регулювання комплексу фізико-механічних, теплофізичних, експлуатаційних властивостей ДПК.

Методи дослідження.

При виготовленні деревинно-полімерного композиційного матеріалу зважені компоненти завантажувались у лопатевої змішувач моделі sky win swhl 600/1200 та змішувались при обертах лопатей 800 об/хв. до температури 100°C протягом 50-60 хвилин. Далі суміш подавалась у двошнековий гранулятор sky win swmsz-3, де відбувалася гомогенізація композиційного матеріалу при температурі від 160 до 200 °C та обертах шнеків 250–350 об/хв. Композиційний матеріал, отриманий у вигляді гранул, далі був перероблений методом екструзії у терасну дошку, з якої вирізалися зразки для досліджень.

Експериментальні дані одержували згідно існуючих стандартних методик та сучасних методів досліджень:

- Визначення ударної в'язкості за Шарпі проводилось згідно ISO 179:2017.
- Визначення міцності при вигині проводилась згідно зі стандартом ISO 178:2019.
- Водопоглинання визначалось за стандартом ISO 62:2008.
- Коефіцієнт лінійного термічного розширення визначався згідно ASTM D696.
- Визначення технологічної усадки проводилась згідно з DIN 16901.
- Методика визначення густини проводилась згідно зі стандартом ISO 1183-1.
- Інфрачервону спектроскопію проводили на спектрометрі Shimadzu IR Spirit-X методом порушеного повного внутрішнього відбиття (приставка QATR-S, алмазний оптичний елемент, $\theta=45^\circ$) у діапазоні 4000–350 cm^{-1} з 24 сканами та роздільною здатністю 4 cm^{-1} .
- Мікроскопічний аналіз морфології, гомогенності та дисперсії компонентів у деревинно-полімерних композитах проводили за допомогою

мікротвердометра ПМТ-3 (з оптичною системою х64), а отримані зображення обробляли програмним забезпеченням ImageJ.

Обробка статистичних даних здійснювалась регресійно-кореляційним методом з використанням спеціалізованих комп'ютерних програм.

Наукова новизна отриманих результатів.

У дисертаційній роботі вперше системно досліджено особливості та закономірності змін фізико-механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей деревинно-полімерних композитів на основі вторинного поліетилену високої густини при використанні гібридних наповнювачів різної природи, а також технологічних та сумісних добавок.

Вперше встановлено, що при введенні у ДПК стеаринової кислоти в кількості 0,8–1,2 мас. % забезпечуються найвищі механічні та експлуатаційні показники. Стеаринова кислота, як поверхнево активна речовина, підвищує сумісність полярного деревинного борошна та неполярного поліетилену, одночасно зменшуючи в'язкість композиції, що позитивно впливає на підвищення швидкості екструзії.

Вперше встановлено, що епоксидована соєва олія у ДПК діє як апрет або компатибілізатор, покращуючи адгезію між целюлозою деревинного борошна та полімерною матрицею, що зменшує напруження між фазами при навантаженні. Введення 0,5 мас. % епоксидованої соєвої олії покращує фізико-механічні та експлуатаційні властивості матеріалу: ударна в'язкість за Шарпі (на зразках з надрізом) зростає з 7,5 до 20,0 кДж/м², міцність при вигині збільшується з 31,6 до 50,8 МПа, а коефіцієнт лінійного термічного розширення зменшується на 15 %. При подальшому збільшенні її вмісту в композиті зменшується водопоглинання та технологічна усадка, але спостерігається погіршення фізико-механічних властивостей матеріалу.

Вперше встановлено, що заміщення кальциту зольним пилом у композитах суттєво покращує експлуатаційні та технологічні властивості: зменшуються водопоглинання, коефіцієнт лінійного термічного розширення та технологічна усадка. При використанні зольного пилу як наповнювача

також спостерігається збільшення міцності при вигині композиту на 9 % (з 51,3 МПа без зольного пилу до 55,8 МПа без кальциту). Проте, ударна в'язкість за Шарпі на зразках з надрізом зменшується більш ніж у 2 рази (з 11,9 кДж/м² до 5,1 кДж/м² відповідно), що вказує на компроміс між механічними характеристиками.

Вперше встановлений вплив фосфогіпсу на фізико-механічні, технологічні та експлуатаційні властивості ДПК. Показано, що при заміщенні кальциту фосфогіпсом у композиті експлуатаційні, фізико-механічні та технологічні властивості матеріалу залишаються стабільними. Оскільки фосфогіпс є дешевим побічним продуктом виробництва екстракційної фосфорної кислоти, його використання як наповнювача у деревинно-полімерних композитах дозволяє знизити собівартість виробів і позитивно впливає на екологію довкілля.

Вперше визначено закономірності та встановлено характер комбінованого впливу епоксидованої соєвої олії та зольного пилу на властивості ДПК. Доведено, що їхня взаємодія є синергетичною щодо густини та антагоністичною для коефіцієнта лінійного термічного розширення, що дозволяє контролювати його. Вплив на водопоглинання, технологічну усадку, міцність при вигині та ударну в'язкість є переважно адитивним. Це забезпечує науково обґрунтовану базу для цілеспрямованої оптимізації рецептур та досягнення балансу між ключовими експлуатаційними характеристиками.

У результаті, отримано та досліджено високонаповнений композит із гібридним наповнювачем (основними складовими якого є відходи або вторинні матеріали), який за рахунок введення апретів та технологічних добавок володіє прийнятними механічними властивостями, хорошою довговічністю та низькими експлуатаційними витратами.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати дисертаційної роботи мають важливе практичне значення для розвитку виробництва деревинно-полімерних композитів та ефективного використання вторинної сировини в Україні.

Зокрема, розроблені та оптимізовані інноваційні рецептури для виробництва ДПК на основі вторинного поліетилену високої густини з гібридним наповнювачем забезпечують суттєве покращення механічних та експлуатаційних властивостей матеріалу. Практичне значення підтверджено успішним впровадженням запропонованої рецептури: на потужностях ТОВ «НВП Сервіс комплект» (м. Дніпро) в період з 4.02.2025 по 7.08.2025 виготовлялась терасна дошка з використанням розробленої рецептури та технології процесу (Акт впровадження додається). Це дозволило ефективно використовувати відходи полімерних, лісозаготівельних, енергетичних та хімічних галузей промисловості, що повністю відповідає принципам циркулярної економіки та сталого розвитку. Впровадження нової рецептури значно знизило водопоглинання та коефіцієнт лінійного термічного розширення композиту, підвищивши його розмірну стабільність та довговічність. Важливою перевагою також є підвищення ключових фізико-механічних властивостей та зниження собівартості продукції за рахунок інтеграції доступних вторинних складових, підвищуючи її конкурентоспроможність.

Розроблений ДПК є перспективним матеріалом, рекомендованим для широкого спектра застосувань, включаючи виготовлення підлог для терасних приміщень, декоративних огорож, парканних систем, сходів, універсальних профілів, а також аксесуарів та комплектуючих, де критично важлива висока довговічність та стабільність.

Результати досліджень також впроваджені до навчального процесу підготовки фахівців за спеціальністю 161 "Хімічні технології та інженерія" (спеціалізація "Хімічні технології переробки полімерних і композиційних

матеріалів") (Акти додаються). Це забезпечує актуалізацію освітніх програм та підготовку кадрів з урахуванням сучасних наукових досягнень.

Практичні результати дисертаційної роботи захищено патентом України на винахід, що підтверджує їхню наукову новизну, винахідницький рівень та промислово придатність.

Особливий внесок здобувача.

У межах дисертаційного дослідження автор самостійно здійснив всебічний інформаційний пошук та аналіз вітчизняних і закордонних літературних джерел, присвячених деревинно-полімерним композитам. Цей етап включав визначення актуального стану досліджень, виявлення прогалин, аналіз методологічних підходів, формування теоретичної бази та критичну систематизацію інформації.

Здобувач самостійно спланував та виконав усі експериментальні роботи, що стали основою дослідження. Цей процес охоплював розробку методології, підготовку обладнання та матеріалів, безпосереднє проведення експериментів, а також детальний аналіз отриманих даних із використанням статистичних методів та програмного забезпечення. Здобувач ретельно проаналізував результати для виявлення ключових тенденцій та взаємозв'язків, а також інтерпретував дані для формування обґрунтованих висновків.

Постановка наукової задачі, визначення завдань, обговорення результатів та формулювання висновків дисертації здійснювалися у тісній взаємодії з науковим керівником к.т.н., доц. І.В. Сухой. Регулярні консультації, обговорення проміжних результатів та коригування плану дослідження забезпечили досягнення поставленої мети. Співавторство у наукових публікаціях, що базуються на результатах дослідження, включало участь як наукового керівника, так і фахівців з інших наукових напрямків, що сприяло розширенню горизонтів дослідження, забезпечило міждисциплінарний підхід та підвищило об'єктивність отриманих результатів.

Апробація матеріалів дисертації.

Результати, отримані в ході виконання дисертаційної роботи були представлені на шестиох наукових конференціях, зокрема: II, III та IV Міжнародна наукова конференція «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» м. Дніпро; XI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених «Хімія і сучасні технології» м. Дніпро; Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології забезпечення параметрів комфорту, енергоефективності і екологічності житлових будівель на основі смарт-технологій» м. Дніпро; Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні полімерні матеріали та технології» м. Львів. Також наявні акти впровадження (ДОДАТОК Б, В).

Публікації.

За темою дисертації було опубліковано 11 наукових праць, серед них: 3 статті у наукових фахових виданнях України, проіндексованих у базі Scopus, 1 стаття у журналі, який віднесено до другого квартилю відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank та цитується наукометричними базами SCOPUS та Web of Science Core Collection, 1 патент на винахід та 6 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота викладена на 210 сторінках машинописного тексту, складається з вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Робота ілюстрована 22 таблицями та 45 рисунками. Список використаних джерел містить 222 найменування.

РОЗДІЛ 1

ВЛАСТИВОСТІ ДЕРЕВИННО-ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Особливе значення у створенні екологічно чистого довкілля надається житлу, де організм людини піддається впливу великої кількості хімічних речовин, які виділяються з будівельних конструкцій, оздоблювальних матеріалів, меблів, тощо. Так, джерелом міграції формальдегіду в навколишнє середовище є деревостружкові, деревоволокнисті, мінераловатні плити, фанера та інші матеріали [1], виробництво яких базується на використанні формальдегідовмісних смол [2]. Одним з перспективних напрямків прогресивних технологій є створення композиційних матеріалів на основі екологічно чистих продуктів, де у якості зв'язувального використовують термопласти та які здатні конкурувати за своїми техніко-економічними показниками з виробництвом традиційних деревостружкових, деревоволокнистих та орієнтовано-стружкових плит [3, 4].

Композиційні матеріали на основі термопластів мають ряд переваг у порівнянні з композитами, які мають термореактивну матрицю: висока ударна міцність, тріщиностійкість, низьке водопоглинання, приємний та природній зовнішній вид, тощо [5]. Таким чином, деревинно-полімерний композит (ДПК) є дуже перспективним і екологічно чистим матеріалом для досягнення довговічності без використання токсичних хімікатів [6]. Особливий інтерес до ДПК виник на хвилі пошуку шляхів максимізації ефективності використання сировини та мінімізації утворення відходів, а також через економію поновлюваних ресурсів. [7].

ДПК завдяки унікальному поєднанню природних естетичних і структурних властивостей деревини з довговічністю, універсальністю та економічною ефективністю полімерів використовуються в якості будівельного матеріалу для підлогових покриттів, стінових панелей, парканів, сходинок, тощо [8]. Ці композити широко використовуються в

техніці через їх низьку вартість, високу співвідношення міцності та маси та простоти виготовлення [9].

ДПК має подвійну модальну анізотропію та нелінійні в'язкопружні механічні властивості, а також демонструють різні реакції напруження та деформації при розтягуванні та стисненні [10]. То ж, оскільки такі композити можуть використовуватись в умовах підвищеної вологості, температурних впливів, УФ-опромінювання, а також під дією механічних навантажень різних видів, а такі недоліки, як низька термічна стабільність і сумісність з іншими конструкційними матеріалами, можуть перешкоджати більш широкому використанню ДПК у будівництві [11], то оцінка якості продукції та порівняння різних типів виробів повинні проводитися з урахуванням усіх перерахованих факторів [12] та відповідати усім вимогам будівництва [13, 14].

Характеристики композиційних матеріалів залежать від типу та вмісту деревинного наповнювача, вибору полімерної матриці, а також сумісних технологій та параметрів процесу [15]

1.1 Полімери, що використовуються у ДПК

Важливим обмеженням використання полімерів, у ДПК, є вимоги до умов процесу переробки у виробі (температура плавлення, тиск), які не супроводжуються термічним розкладанням деревинного наповнювача. Деревина розкладається за температури близько 220 °C [16]; таким чином, для виробництва ДПК можуть використовуватися термопластичні полімери загального призначення. У всіх виробників ДПК як вітчизняних, так і зарубіжних, найбільш популярними полімерними матеріалами є полівінілхлорид (ПВХ) [17], поліетилен (ПЕ) [18], поліпропілен (ПП) [19], полістирол (ПС) [20] і поліметилметакрилат (ПММА) [21]. Механічні властивості цих полімерів можна поліпшити за рахунок додавання

деревинних волокон, але отримані композити не мають механічних властивостей композитів конструкційного призначення [22].

Властивості полімерної матриці та мають визначальний вплив на фізико-механічні властивості ДПК. Ратанавілай та ін. [23] вивчали вплив полімерної матриці на фізико-механічні властивості ДПК при використанні ПЕВГ, ПЕНГ, ПП, ПВХ і ПС для приготування композитів. Так, ДПК з ПС та ПП мали більш високі показники міцності при вигині, тоді як ПЕВГ, ПЕНГ та ПВХ мали більш низькі властивості при вигині. Зокрема, механічні властивості ДПК, виготовленого з використанням ПЕНГ, виявилися гіршими.

Хартманн та ін. [24] використовували систему зв'язувальних, які не містять формальдегіду, для отримання композиційного матеріалу деревинно-стружково-пластикового матеріалу (ДСПМ) з високими механічними властивостями, який може стати альтернативою звичайним орієнтовано-стружковим плитам (OSB). ДСПМ було оптимізовано для використання під навантаженням, матеріал є нетоксичним, при його виробництві утворюється мінімум відходів та є економічно ефективним.

Абушенко А.В. та ін. [25] дослідили фізико-механічні властивості деревинно-полімерних композитів в залежності від виду полімерної матриці (таблиця 1.1)

Таблиця 1.1 – Орієнтована міцність ДПК в залежності від базової смоли [25]

Властивість	Одиниця виміру	Речовина		
		ПЕ	ПВХ	ПП
Міцність при розтягуванні	МПа	5...16	20...30	17...40
Модуль пружності при розтягуванні	Гпа	2...5	5...7	4...8
Міцність при вигині	МПа	10...26	40...47	30...52
Міцність при стисненні	МПа	10...27	60	-

З даних таблиці 1.1 можна зробити висновок, що при використанні у якості полімерної матриці ПВХ деревинно-полімерний композит володіє найбільшими фізико-механічними властивостями.

В роботі [27] проведено випробування зразків ДПК на основі ПЕВГ та ПВХ. На рисунку 1.1 та 1.2 показані криві розтягування зразків з ПЕВГ та ПВХ відповідно.

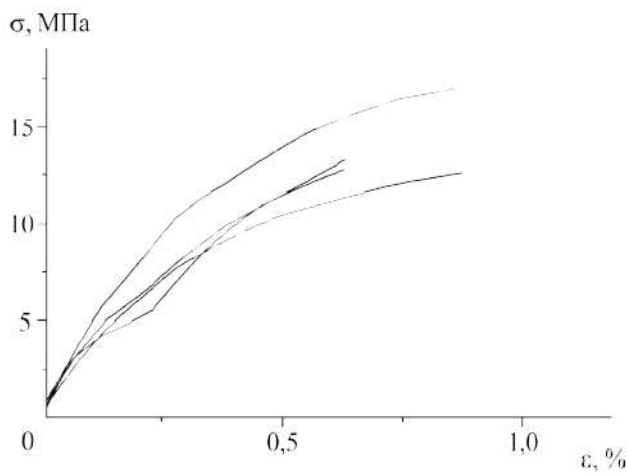


Рисунок 1.1 – Криві розтягування зразків з ПЕВГ [27]

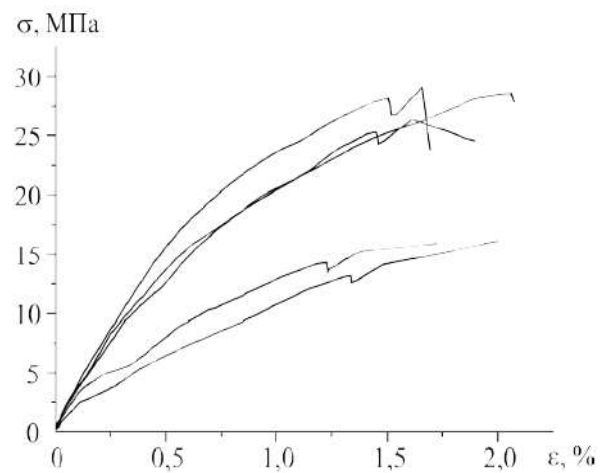


Рисунок 1.2 – Криві розтягування зразків з ПВХ [27]

З даних рисунка 1.1 та 1.2 можна побачити, що залежності напруження від деформації не є лінійними на всьому протягу кривих розтягування. Це означає, що модуль пружності зразків зменшується із зростанням деформації. Таке явище спостерігається для багатьох композиційних матеріалів, які з ростом деформації виявляють нелінійну механічну поведінку. Воно полягає у тому, що структура матеріалу порушується, з'являються порожнини в матеріалі та модуль пружності знижується з ростом деформації [27].

Поліамід 66 вивчався як матриця для ДПК для потенційного технічного застосування [28]. Результати дослідження показали більш високий модуль пружності, термічну стабільність та знижену температуру склування для деревинно-поліамідного ДПК порівняно з чистим поліамідом 66.

У деяких випадках конструкційні полімери додаються до полімерів загального призначення для утворення полімерних сумішей. Лей і Ву застосували двоетапний процес екструзії для отримання сумішей поліетилентерефталату (ПЕТ) та поліетилену високої густини (ПЕВГ) з додаванням деревинного борошна [29]. Оскільки температура другої екструзії не перевищувала температуру плавлення ПЕВГ, деревинне борошно не піддавалось термічному розкладанню. Зроблено висновки, що деревинне борошно підвищує механічні властивості суміші ПЕТ/ПЕВГ, модуль пружності та кристалічність матриці [29].

Сополімери стиролу та малеїнового ангідриду (СМА) використовуються в автомобільній промисловості для виготовлення компонентів інтер'єру. Додавання деревинного волокна в СМА покращує його переробку та механічні властивості. Симонсен та ін. виявили, що деревинні наповнювачі покращують жорсткість і міцність СМА, в той же час зменшуючи ударну в'язкість по Ізоду з надрізом [30]. Крім того, температура склування знизилася для наповненого СМА. Інше дослідження композитів деревина/СМА полягає у використанні води, що утворюється в результаті реакції етерифікації між деревинними волокнами і матрицею СМА, як піноутворювач [31]. Отримані ДПК на основі СМА в результаті процесу екструзії знизили густину композиту до 15 % і збільшили його міцність при вигині і жорсткість до рівня вище, ніж у поліаміду 66.

Композити надвисокомолекулярного поліетилену наповнені деревинним борошном були виготовлені методом компресійного формування [32], спостерігалось підвищення модуля пружності при розтягуванні, вигині та зсуві на 10 % а також досліджений композит мав більшу твердість. Чотират та ін. у своїх дослідженнях зробили висновок, що деревинна тирса збільшує модуль пружності ДПК на основі акрилонітрилу-бутадієн-стиролу (АБС) [33]. Однак використання деревинного борошна знижує міцність композиту через слабкий міжфазний зв'язок.

Біорозкладні полімерні матриці постійно привертають увагу дослідників. Грегорова та ін. виготовили композити деревинне волокно/полімолочна кислота (PLA) методом лиття з розчину з подальшим гарячим пресуванням [34]. Додавання деревинного волокна збільшує температуру склування, модуль Юнга та модуль пружності чистого PLA, тоді як міцність при розриві та подовження при розриві знизилася на 20 та 50 % відповідно.

В роботі [35] у якості матриці для ДПК використовували полі(3-гідроксибутират) (ПГБ) і оцінювали його біорозкладання. Отримані результати показали, що композити деревина/ПГБ є біорозкладними, а швидкість розкладання збільшується зі збільшенням вмісту деревини у композиті. Сінгх та Моханті отримали ДПК з деревинних волокон та полігідроксибутират-ко-валерату (ПГБВ) методом екструзії [36]. Вони виявили, що модулі пружності ПГБВ при розтягуванні, вигині збільшуються за рахунок додавання деревинних волокон. Навпаки, коефіцієнт лінійного теплового розширення та ударна в'язкість з надрізом знизилася на 18 %.

Практично всі виробники ДПК як вітчизняні, так і зарубіжні у своєму виробництві для зниження його собівартості застосовують вторинні полімери. У таблиці 1.2, наочно можна побачити вплив кратності переробки на фізико-механічні властивості ПЕНГ [26]:

Таблиця 1.2 – Вплив кратності переробки на фізико-механічні властивості ПЕНГ [26]

Найменування показнику	Кратність переробки				
	1	2	3	4	5
Міцність, МПа при:					
розтягуванні	29,00	35,90	35,03	34,15	33,02
стисканні	17,00	16,02	17,07	14,32	14,06
вигині	22,70	23,82	22,48	24,95	22,25

Продовження таблиці 1.2

Відносне подовження при розриві, %	6,00	5,22	4,98	4,50	4,20
Питома ударна в'язкість, кДж/м ²	7,10	7,05	6,98	6,98	7,08

Як можна побачити з даних наведених у таблиці 1.2 [26], для матеріалів ДПК, які повинні мати високі експлуатаційні властивості, можна використовувати вторинні поліолефіни трьох кратної переробки. Вторинні полімери, перероблені понад три рази, не рекомендовано використовувати у виробництві ДПК.

1.2 Деревинне борошно як наповнювач полімерів

Створення наповнених композицій на основі вторинних полімерів та природних наповнювачів, таких як деревинне борошно, крохмаль та ін. може допомогти із вирішенням проблеми пов'язаною з накопиченням у доквіллі відходів синтетичних полімерів, які володіють високою стійкістю до фізико-хімічного та біологічного розкладання [37], а також розробити інноваційні екологічно чисті будівельні матеріали [38]. Також, введення наповнювача може значною мірою позначитися на таких важливих властивостях матеріалу як його деформаційно-міцнісні показники.

Так, у роботі [39] був визначений вплив природного наповнювача – деревинного борошна на фізико-механічні властивості полімерного композиту на основі вторинного поліпропілену. Автори використовували вторинний ПП (зразок №1 і зразок №2), а також вторинний полімер (зразок №3), який являє собою продукт сополімерізації пропілену та етилену. Проведення фізико-механічних випробувань композицій на основі зразків

№1, 2, 3 та деревинного борошна показало, що закономірності впливу наповнювача на фізико-механічні властивості у них загальні (рисунок 1.3)

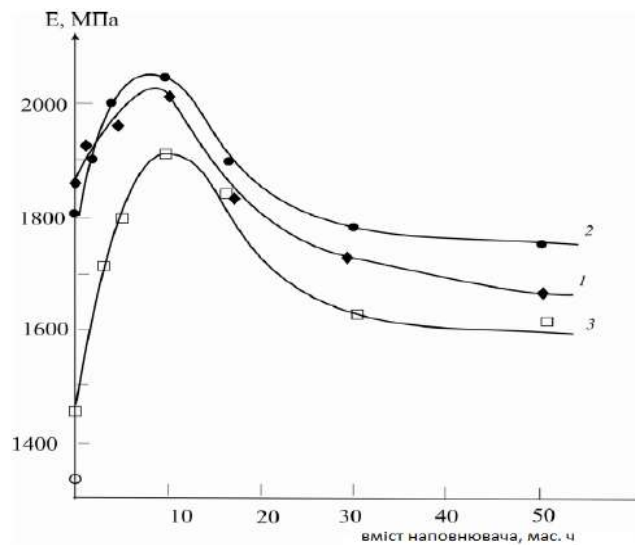


Рисунок 1.3 – Залежність модуля пружності композиції для зразків №1 (1), №2 (2), №3 (3) від вмісту деревинного борошна [39]

Як можна побачити з даних рисунка 1.3, введення до 10 мас. ч. деревинного борошна впливає на збільшення модуля пружності. Подальше збільшення вмісту деревинного борошна вище 20 мас. ч. супроводжується незначним його зменшенням. Також виявлено, що значення напруження при розриві залишаються на рівні вихідних значень до вмісту деревинного борошна до 40 мас. ч., після чого при збільшенні вмісту деревинного борошна в композиції спостерігається падіння значення міцності при розриві. Аналогічні зміни зазнають і значення подовження при розриві [39].

Му та ін. [40] вивчали властивості композитів на основі ПЕВГ з використанням чотирьох видів біомаси, а саме тополі, сосни, пшеничної соломи та бамбука у якості армуючого наповнювача. Отримані результати показали, що частинки деревини тополі з високим вмістом целюлози мають більш високі показники міцності при вигині в поєднанні з матрицею з ПЕВГ.

У роботі [41] використовували волокно тополі і бамбукове волокно в якості сировини для отримання ДПК на основі ПП з надвисоким

наповненням та провели порівняльний аналіз впливу кількості деревинного волокна у якості наповнювача на механічні властивості при високих і низьких температурах. Експериментальні результати показали, що модуль пружності при вигині спочатку збільшувався, а потім зменшувався на 90 %, коли ступінь наповнення збільшувався з 75 до 90 %.

Ксю та ін. [42] вивчали вплив масового співвідношення деревини сосни Масон і деревини китайської ялини на фізико-механічні властивості композиційних матеріалів. Отримані результати показали, що вплив китайської ялини на міцність при вигині композиту більший, ніж у сосни Масон. У порівнянні із композитом з сосни Масон статична міцність при вигині та модуль пружності композиту з китайської ялини були більше на 48 % та 25 % відповідно.

1.3 Вплив розміру часток деревинного борошна на властивості ДПК

Відомо, що ДПК, які виготовлені з тих самих деревинних волокон із різними розмірами і формами частинок, показали різну міцність на вигин. Так, в роботі [43] було порівняно фізико-механічні властивості композиційних матеріалів, приготованих з трьох типів ялинкового порошку (крупного порошку, порошку 850 мкм і порошку Arbocel C320). Результати показали, що композит, виготовлений з деревинного порошку розміром 850 мкм, має більш високу міцність при вигині. Також Леу та ін. [44] використовували у якості полімерної матриці поліпропілен та деревинне борошно у якості наповнювача для екструзії деревинно-полімерних матеріалів та показали, що дрібніше деревинне борошно (менше 125 мкм) може поліпшити міцність при вигині деревинно-полімерного композита. У свою чергу, Шодеманш та ін. [45] повідомили, що міцність при вигині та модуль пружності при вигині ДПК збільшуються зі збільшенням кількості частинок деревинного борошна.

В роботі [46] наведено результати досліджень впливу розміру часток деревного борошна різних марок на фізико-механічні та реологічні властивості дерево-полімерних композитів на основі поліпропілену (Рисунок 1.4)

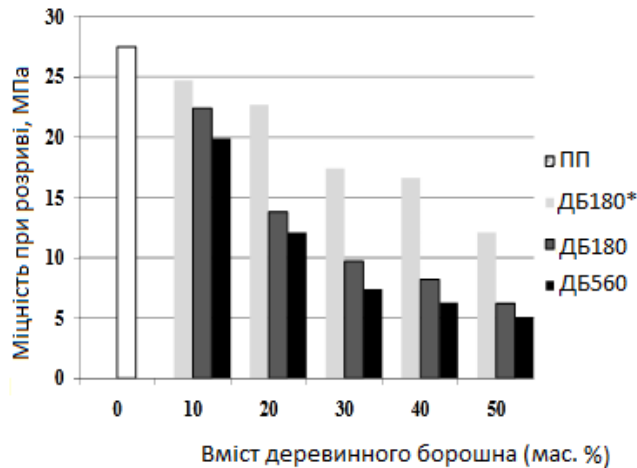


Рисунок 1.4 – Вплив типу та вмісту деревинного борошна на модуль пружності ДПК.

Як можна побачити з даних рисунка 1.4, із збільшенням вмісту деревинного борошна міцність при розриві досліджуваних композицій знижується. Причому із зменшенням розміру часток деревинного борошна спостерігається менш значне зниження властивостей. Це явище можна пояснити збільшенням поверхні взаємодії з полімерною матрицею при зменшенні розмірів часток наповнювача. Найбільш високі значення фізико-механічних показників демонструють композиції з додатково подрібненим борошном [46].

У роботі [47] показано, що із зменшенням розміру часток деревинного борошна дозволяє значно зменшити в'язкість наповненого композиту, що покращує перероблюваність композицій та супроводжується збільшенням продуктивності екструзійного обладнання.

Ванг та ін. [48] приготували композит шляхом армування ПЕВГ частинками деревинних відходів в голчастій, лускатій, стрічкоподібній та

порошкоподібній формі та вивчили фізико-механічні властивості. Результати досліджень показали, що голчаста форма наповнювача найбільше підходить для виготовлення деревинно-полімерного матеріалу з підвищеними фізико-механічними властивостями. Ширп та ін. [49] використовували деревину бука (60% за вагою) та поліетилен високої густини для виготовлення ДПК. Встановлено, що зі збільшенням довжини волокна водопоглинання композиту знижується, а міцність при вигині та модуль пружності збільшуються. Делвіаван та ін. [50] вивчили вплив розподілу частинок за розмірами та температури сушіння деревини на механічні властивості ДПК, і було виявлено, що кращі механічні властивості досягаються при 30-хвилинному мокрому подрібненні та ліофілізації.

У роботах [51, 52, 53, 54] визначено, що взаємозв'язок між розміром частинок та властивостями композиту при вигині залежить від типу деревинного наповнювача, і більшість з них є частинками розміром 180 – 250 мкм. Тому деревинні волокна із великим співвідношенням розмірів сторін підходять для виготовлення деревинно-полімерних композитів із підвищеною міцністю при вигині.

Також у дослідженнях [55, 56, 57] виявлено, що при використанні суміші різних типів, порід та розмірів деревинних волокон у ДПК, можна забезпечити більш високі фізико-механічні та експлуатаційні властивості композиту.

1.4 Модифікація деревинного борошна

Гідрофільність деревинних волокон зумовлена наявністю гідроксильних груп, що містяться в молекулярних ланцюгах целюлози та геміцелюлози. Однак більшість термопластів, що використовуються у ДПК, гідрофобні. Деревинні волокна агломеруються під час компаундування. В результаті деревина може погано диспергуватись у полімерних матрицях, і, отже, її армуючий ефект може не досягатись. Механічні властивості ДПК можуть

погіршуватися в деяких випадках при виникненні агрегації. Таким чином, модифікація деревинного волокна дуже важлива для виготовлення ДПК з підвищеними фізико-механічними властивостями [58].

Попередня обробка деревини має супроводжуватись руйнуванням тривимірної сітчастої структури клітинної стінки рослин [59]. Попередню обробку поверхні можна поділити на фізичні та хімічні методи. До фізичних методів відносяться сушіння, обробка лугом, обробка розрядом та інші способи підвищення адгезії на межі розділу лігноцелюлози та полімерної матриці. Так, у роботі [60] було виявлено, що механічні властивості ДПК можна поліпшити шляхом екструзії попередньо обробленої і висушеної тирси.

1.4.1 Фізична модифікація

На практиці більшість полімерів, що використовуються в ДПК, виявляють гідрофільні властивості. Тому більшість дослідників досліджували мікро- та наноструктури на поверхні деревини для вибору модифікаторів [61]. Гідрофобізація поверхні деревинних наповнювачів може супроводжуватись підвищенням фізико-механічних властивостей ДПК. Чжан та ін. [62] провели модифікацію деревинного борошна, чим встановили, що механічні властивості ДПК значно покращилися в результаті термодинамічної сумісності наповнювача та полімерної матриці. Порівняно з ДПК без гідрофобної модифікації міцність при вигині збільшилася на 20–30 %, а модуль пружності при вигині – на 24–26 % в залежності від ступеня гідрофобної модифікації деревинного борошна.

Акоста та ін. [63] використовували метод вакуумного просочення вінілацетатом, який потім полімеризували у деревинному наповнювачі. При цьому міцність при вигині модифікованого ДПК перевищувала вихідну на 25–30 %. Граббстром та ін. [64] вивчали силанову зшивку регенованих деревинних композитів ПЕНГ та її вплив на властивості композитів.

Результати показали, що міцність при вигині незшитих зразків збільшилася приблизно на 30 % [64].

Екстракція гарячою водою може покращити механічні та експлуатаційні властивості ДПК. Пелаес-Саманьего та ін. [65] модифікували неочищене деревинне волокно сосни Пондероза за допомогою екстракції гарячою водою. Після витримки протягом 120 хвилин випробування на вигин показало поліпшення фізико-механічних властивостей ДПК: міцність при вигині зросла на 8–12 %. Водопоглинання та набрякання композитів, виготовлених з ПП або ПЕВГ та сосни, зменшувалися. Андрусик та ін. досліджували ДПК з використанням екстрагованого деревинного борошна та поліпропілену [66]. Механічні властивості композиту значно покращені, а саме, міцність на розтяг зросла на 10–15 %, міцність при вигині — на 12–18 %, а ударна в'язкість — на 15–20 % порівняно з композитами, виготовленими з необробленого деревинного борошна. Горючість, питома вага та теплове розширення після обробки залишилися незмінними. Аналогічні результати були отримані в дослідженні Хоссейнаї, де Південну жовту сосну екстрагували гарячою водою при трьох рівнях температури — 140 °C, 155 °C та 170 °C — і перероблювали у деревинно-полімерні композити на основі поліпропілена [67]. Було виявлено, що в процесі екстракції міцність на розрив зросла на 15 %, а температура початку термічного розкладу підвищилася на 20 – 25 °C порівняно з композитами, виготовленими з необробленого деревного борошна.

Термічна обробка деревини - це процес, при якому деревинні волокна піддаються впливу тепла і вологи при температурі близько 230 °C для створення інертної поверхні та видалення геміцелюлози [68]. В роботі [69] було показано, що термо- та механохімічна модифікація деревинного борошна істотно впливає на властивості ДПК. Так, у композиті наповненому деревинним борошном хвойної породи в'язкість нижче, ніж у листяної породи, що дозволяє підвищити продуктивність екструзійного обладнання. У той же час, термомодифікація деревинного борошна по різному впливає на

реологічні властивості. В разі використання листяної породи в'язкість практично не змінюється, а для хвойної породи спостерігається підвищення в'язкісних властивостей на 12–15 %. Це пов'язано з тим, що деревина листяної та хвойної породи відрізняється вмістом геміцелюлози, целюлози та лігніну, що суттєво впливає на реологічні властивості композиту. При температурі термомодифікації 225 °С термодеструкції піддається геміцелюлоза, а в меншому ступені — лігнін та целюлоза. Для композицій із термообробленим деревинним борошном листяної породи спостерігається зниження міцності при розриві на 12–14 %, модуля пружності — на 10–12 %, а відносного подовження при розриві — на 8–10 % порівняно з композитами на основі необробленого наповнювача. У той же час, для композицій із термообробленим деревинним борошном хвойної породи зафіксовано підвищення міцності при розриві на 15–18 %, модуля пружності — на 12–16 %, та відносного подовження — на 10–13 %, що свідчить про покращення міжфазної взаємодії та структурної цілісності композиту [69].

Обробка лугом може покращити механічні властивості ДПК. Лоу та ін. [70] обробляли лугом кокосові висівки для видалення пектину, геміцелюлози, жиру та домішок. У їх дослідженні деревинно-полімерний композит був виготовлений з волокна шкаралупи кокосового горіха та ПП. Обробка лугом супроводжувалася втратою маси шкаралупи кокосу за рахунок збільшення пористості, а тривала обробка лугом із вищою концентрацією супроводжувалась надмірною деградацією поверхні волокон, що призводило до зниження механічної міцності композиту, зокрема зменшення міцності на розтяг на 10–12 % та зниження ударної в'язкості на 8–10 %. Це пов'язано з тим, що агресивна лужна обробка руйнує структурні компоненти волокна, зменшує його здатність до армування та погіршує міжфазну адгезію з полімерною матрицею [70].

Ма та ін. [71] використовували обробку лугом і золь-гель метод для модифікації деревинного борошна з метою отримання гібриду деревинного борошна і кремнезему та використання його у якості армуючого

наповнювача для ДПК на основі ПП. Експериментальні результати дослідів ДПК на основі діоксиду кремнію та ПП показано на рисунку 1.5.

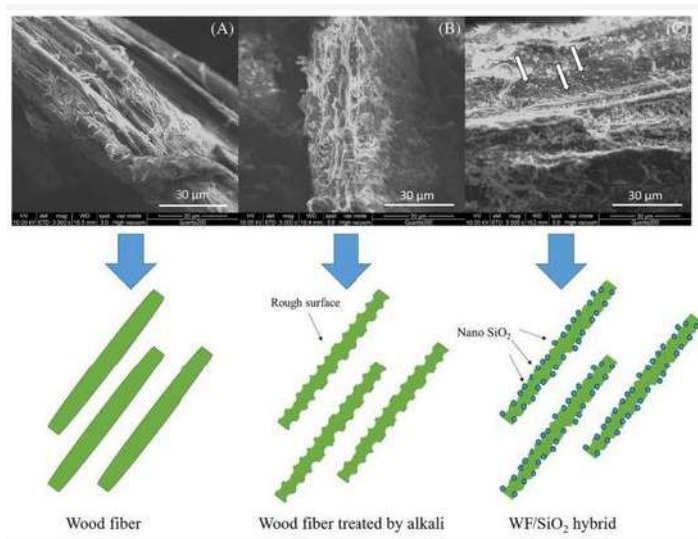


Рисунок 1.5 – СЕМ-морфологія (А) деревинного борошна, (В) деревинного борошна, обробленого лугом, і (С) гібриду деревинного борошна/кремнезему [71]

Композити з гібридним наповнювачем продемонстрували покращення механічних властивостей: міцність на розтяг зросла на 12 %, модуль пружності — на 10 %. Термостійкість підвищилась на 5 %, а стійкість до термоокиснення — на 27 % порівняно з композитами, що містять комерційний нанокремній [71].

1.4.2 Хімічна модифікація

Як було сказано раніше, зазвичай деревинно-полімерні композити є сумішшю гідрофобного полімеру та гідрофільної деревини (або гідрофільного целюлозного волокна), отже, адгезія поміж ними погана, зв'язок на межі поділу фаз між полімером та деревинним наповнювачем зазвичай слабкий, та він не може оптимально передавати напруження між двома фазами при навантаженні [12]. Для покращення з'єднання на

міжфазній границі використовують функціональні речовини, які взаємодіють із поверхневими функціональними групами деревинного наповнювача та гідрофобізують поверхню для підвищення сумісності наповнювача і полімера [72]. Для застосування у ДПК розглянуто багато апретуючих речовин, серед них силікати, титанати, органічні кислоти, хлортріазини, ангідриди, епоксиди, ізоціанати, акрилати, аміди, іміди, силани, полімерні з'єднання та ін. [12].

Модифікатори – це хімічні речовини, які мають різні функціональні кінцеві групи, які реагують, наприклад, з гідроксильними групами деревинного волокна та мають термодинамічну сумісність з полімерною матрицею [73]. Ангідридні та карбоксильні групи можуть вступати в реакцію з гідроксильними групами на поверхні деревини для створення хімічного зв'язку, у той час як неполярний або слабополярний полімерний ланцюг сумісний з вуглеводневим «хвостом» модифікатора і, таким чином, збільшується сумісність між деревиною та полімером. Модифікатори можуть забезпечити міцне з'єднання між полімером та поверхнею деревинного волокна, зменшення водопоглинання деревинного борошна, покращення сумісності та дисперсності між деревинним волокном та полімером, а також покращити механічні властивості композитних матеріалів [74].

Малеїнізовані поліолефіни - це найбільш широко використовувані апрети. Вони містять дві функціональні області: одна – поліолефіновий остаток, який здатний утворювати переплутані ланцюги з полімерною матрицею, або вбудовуватися в матрицю; друга – малеїновий ангідрид, який здатний до сильних ковалентних взаємодій із целюлозним волокном при температурах екструзії, через водневі або іонні зв'язки [75]. Ли та ін. [76] досліджували вплив різного вмісту ПЕ з щепленим малеїновим ангідридом на міцність при вигині композиту скловолокно/деревинний пластик. Результати показали, що максимальна міцність при вигині композиту із додаванням ПЕ з щепленим малеїновим ангідридом становило ≈ 40 МПа, що на 20 % більше ніж для вихідної композиції.

У роботі [77] для отримання композитів на основі ПП було використано два сополімери поліпропілену з щепленим малеїновим ангідридом (МАПП) з різною молекулярною масою. Найбільша міцність при розриві спостерігалася для композитів ПП/деревина при співвідношенні МАПП та деревинного борошна 0,05 : 0,1. МАПП з більшою молекулярною масою переважно сприяв підвищенню міцності композиту, але МАПП із меншою молекулярною масою значно покращив технологічність. Також показано, що у сухих умовах деревинно-полімерний композит, що містить МАПП із найвищою молекулярною масою ($\approx 77\ 000$), має найвищий модуль пружності при вигині — приблизно 2,6 ГПа, що на 18 % перевищує показник композиту, модифікованим МАПП із найнижчою молекулярною масою ($\approx 10\ 000$), який демонструє модуль близько 2,2 ГПа. [78].

В роботі [79] була зроблена спроба оцінки ефективності введення добавок на структуру ДПК на основі ПЕВГ та його властивості. У якості добавок використовувались продукти компанії Du Pont (США) Fusabond M603 та Fusabond E226, що являють собою сополімер модифікований малеїновим ангідридом, та компанії ВУК Kometra GmbH (Германія) Kometra Scona Tspe 1112 Gall – лінійний поліетилен модифікований малеїновим ангідридом (добавки позначені Д1, Д2, Д3 відповідно). У якості наповнювача використовувалось деревинне борошно листвяних порід у дозоровці 50 мас. %. Вплив концентрації добавок на міцність при розриві композицій представлені на рисунку 1.6.

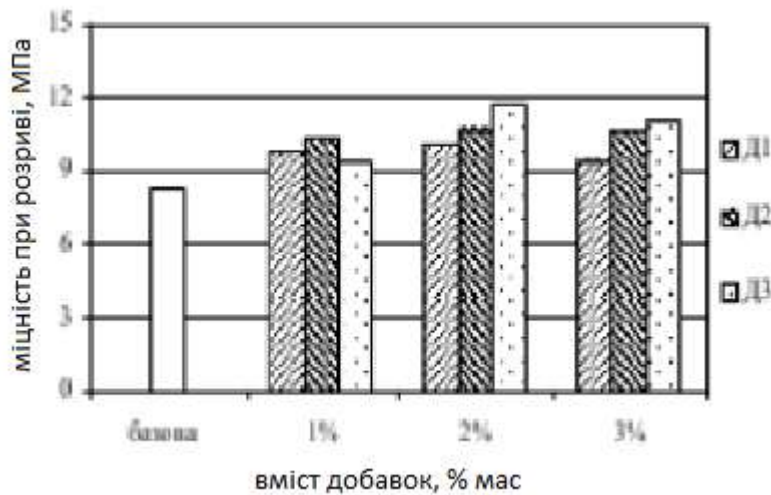


Рисунок 1.6 – Вплив введення добавок на міцність при розриві [79]

Як показали випробування (рисунок 1.6), ефективність та характер впливу добавок розрізняється в залежності від марки та виробника. Показано, що введення добавок дозволяє покращити міцність при розриві, знизити водопоглинання, покращити сумісність композиції [79].

Кількість модифікатора істотно впливає на ефект посилення. У роботах [80] та [81] досліджено вплив поліетилену, щепленого малеїновим ангідридом (МАПЕ), на адгезію між подрібненим вуглецевим волокном або деревним наповнювачем та полімерною матрицею. Згідно з [80], додавання МАПЕ до композиту з вуглецевим волокном підвищило модуль пружності на розтяг з 3,1 ГПа до 3,66 ГПа, а ударну міцність — з 2,8 кДж/м² до 3,0 кДж/м². У роботі [81] для високонаповнених деревинно-полімерних композитів використання МАПЕ як сумісника забезпечило зростання міцності на розтяг з 4,1 МПа до 13,3 МПа та міцності на згин з 6,5 МПа до 18,8 МПа. Таким чином, застосування МАПЕ суттєво покращує механічні характеристики композитів порівняно з немодифікованими зразками.

Гао та ін. [82] отримали ДПК з щепленим малеїновим ангідридом, використовуючи ПП, ПЕ, ПС методом реактивної екструзії. Результати механічних випробувань показали, що механічні властивості щепленого пластику та композитів з відходів пластику значно покращилися. Зокрема,

міцність на розтяг та модуль пружності зросли на $\approx 15\text{--}30\%$ залежно від типу полімеру, а водопоглинання та товщинне набухання зменшились на $\approx 20\text{--}25\%$, що свідчить про покращену водостійкість [82].

До композиту також можуть бути додані мастильні матеріали та поверхнево-активні речовини для поліпшення адгезії між лігнінцелюлозою та полімером. Перишич та ін. [83] дослідили гібридні композити на основі ПММА/деревина, армовані первинним, вторинним та змішаним поліетилентерефталатним (ПЕТ) волокном. Для модифікації деревинних волокон використовували толуол-2,4-діізоціанат та (3-меркаптопропіл)триметоксисилан. Випробування показали, що додавання ПЕТ-волокна підвищує міцність на розтяг композиту з 18,2 МПа (без волокон) до 26,7 МПа (з первинним ПЕТ). Міцність на згин зросла з 29,5 МПа до 39,8 МПа. Крім того, застосування зшивальних агентів зменшило водопоглинання композиту на $\approx 25\%$, що свідчить про покращену гідрофобність та міжфазну адгезію.

Силани знайшли досить широке застосування у якості апретів та компатибілізаторів полімерів, наповнених мінеральними наповнювачами. Існує багато різних органофункціональних груп, що діють на органосиланах. Органосилани, які можуть бути корисні у ДПК, включають аміносилани, алкілсилани із довгим алкілльованим ланцюгом, вінілалкілсилани та їх олігомери [84]. Процесом сполучення деревинного волокна у ДПК органосиланами є приклад реактивної екструзії, а саме, продавлювання розчину суміші вінілтриметоксисилану та пероксиду декумілу у екструдер із спільною подачею деревинного борошна та гранул ПЕВГ. У результаті вінілтриметоксисилан щеплювався на поліетилен та деревинне борошно. Зшитий поліетилен не розчиняється у киплячому ксилолі, тоді як незшита частина розчинна. З цього було визначено ступінь зшивки, та вона була відсутня для композиції, одержаної без апрету, 33 % для композиції, одержаної у присутності 2 % силану, 59 % для апретованої та зшитої

композиції. При 4 % апрету кількість зшитої фракції композиції, як було показано, становить до 75–80 % [85].

Бенгтссон та ін. [86] отримали зшиті силаном композити різного вмісту, використовуючи як сировину вінілтриметоксисилан. Композит зберігали в кліматичній камері при кімнатній температурі для вивчення впливу вологості на ступінь зшивання. Ступінь зшивання композитів був найвищим, а механічні властивості зшитих композитів були кращими, ніж у композитів без силану. Отриманий композит деревина/ПЕВГ мав підвищену ударну в'язкість та властивості повзучості, у той час як модуль пружності при вигині був нижче. Ці зміни виникли внаслідок того, що полімерна матриця в обробленому силаном ДПК мала нижчу кристалічність. Гао та ін. [87] у дослідженнях використовували модифікований силан особливої хімічної структури, отриманий з різних типів волокон тополі. Основні результати показали, що механічні властивості ДПК були значно покращені після модифікації силану, при цьому ДПК, модифіковані вінілтриметоксисиланом, показали найкращі характеристики. Міцність при вигині композиту з 3 % силанового модифікатора збільшилася на 10 %.

В роботі [88] були порівняні переваги і недоліки різних обробок борошна на властивості композитів деревина/ПП. Було виявлено, що бензилювання знижує водопоглинання ДПК, але здійснює зворотний вплив на міжфазну адгезію. Дві поверхнево-активні речовини (стеаринова кислота та пальмітат целюлози) не покращили міцність ДПК на розрив, але вони позитивно вплинули на однорідність та технологічність композитів.

Для усунення несумісності між деревинним волокном та ПЕВГ у дослідженні [89] застосовували ацетилювання деревини. Така обробка покращила міжфазну адгезію та модуль пружності, тоді як деформація при руйнуванні зменшилася. Також у роботі [90] для обробки волокон деревини тополі застосовували етерифікацію (ацетатом, пропіонатом, бензоатом). Отримані композити з деревинного волокна та ПЕВГ мали кращі механічні

властивості, підвищену стійкість до грибків та підвищену стійкість до атмосферних впливів.

Існує багато комерційно доступних апретів, компатибілізаторів, зшиваючих агентів та інших диспергаторів, які пропонують різні виробники. Так, компанія Dover Chemical Corporation виробляє смолоподібні хлоровані парафіни. Виробник рекомендує його як нереактивний апрет, та декларує, що продукт у кількості 10 % мас. разом із 3 % змазки у ДПК діє як апрет та підвищує міцність та модуль пружності при згинанні, а також стійкість до УФ та вологи [91].

Щеплення деревинного волокна може покращити екологічну адаптацію ДПК. Чи та ін. [92] використовували гексилтриметоксилсилан для проведення поверхневої модифікації рослинного волокна та отримували ДПК з ПЕ та модифікованого рослинного волокна. Через 180 днів міцність при вигині та модуль пружності знизилися з 9,9 % та 8,5 % до 2,0 % та 3,1 % відповідно. Результати показали, що модифікація поверхні рослинного волокна може значно покращити стійкість ДПК до природного старіння.

Багато апретів по ряду причин не використовуються у промисловості головним чином через відсутність великомасштабних випробувань та нестачу фінансових пропозицій. Серед них, наприклад, поліпропілен з привитим N-вінілформамідом [93] та полі-N-акрилоїлдопаміном [94]. А модифікація фурфуриловим спиртом може покращити стабільність розмірів, стійкість до плісняви та твердість модифікованої деревини [95].

1.4.3 Інші види модифікації деревинно-полімерних композитів

Добавки є досить важливими інгредієнтами ДПК, які можна використовувати для різноманітних цілей. Типи добавок, що використовуються в промисловості ДПК, включають мастильні матеріали та добавки для контролю реології, апрети, стабілізатори, наповнювачі, біоциди,

добавки для естетики продукту, антипірени та засоби придушення диму, тощо [12].

Лі та Уолкотт вивчали реологію композитів ПЕВГ/клен після додавання до системи двох різних мастил: складного етеру та стеарату цинку [96]. Мастило складноетерного типу покращує дисперсність частинок клена і забезпечує гарне зовнішнє змащування. В роботі [97] показано, що стеарат цинку незмінно зменшує міцність та жорсткість ДПК порівняно з неметалевим мастилом. Однак, якщо без апретів це зниження було незначним та становило близько 1 % для міцності та модуля при вигині, у присутності кожного з апретів це зниження досягало 70–90 % для міцності при вигині, та 10–20 % для модуля пружності при вигині, при порівнянні двох видів мастил, неметалевої та металовмісної, та на 100–130 та 15–20 % за відсутності мастила зі стеаратом металу відповідно. Отже, стеарат цинку пригнічує дію малеїнізованих полімерів у ДПК [97].

Також було досліджено вплив вмісту мастила на обробку та властивості композитів деревинне борошно/ПЕВГ [98]. Виявлено, що в'язкість знижується при збільшенні вмісту мастила. Оптимальна кількість деревинного волокна, ПЕВГ, поліетилену малеїнового ангідриду та мастила може полегшити обробку за рахунок зниження в'язкості та збереження механічних властивостей та гладкості поверхні.

Для поліпшення фізико-механічних властивостей ДПК, які викликані додаванням деревинних волокон у полімерну матрицю, були досліджені добавки, що підвищують ударну в'язкість композитів. Було виявлено, що блок-сополімер стирол-бутадієн-стирол (СБС) може поліпшити ударостійкість і подовження при розриві за рахунок зменшення міцності на розрив [99]. Зменшення термічної стабільності ДПК не спостерігалось.

Також досліджувався вплив пластифікатору на технологічні властивості ДПК. Використання пластифікаторів супроводжується зниженням температури склування ДПК, яка підвищується при додаванні деревинного борошна в полімерну матрицю, що полегшує переробку композитів та

поліпшує експлуатаційні властивості [100]. Композити деревинне борошно/ПЕНГ мали знижену в'язкість і менший крутний момент екструдера під час переробки. Показано, що при застосуванні пластифікаторів збільшується видовження при розриві на 10–20 % [101].

Окрім сировини, інші волокна, порошок, лігнін тощо можуть поліпшувати адгезію поверхні розділу і, таким чином, підвищити міцність композитів. Лі та ін. [102] отримали ДПК шляхом гідроксилметилювання лужного лігніну, а потім модифікованого лужного лігніну, порошку евкالیпта і ПЕВГ. Досліджено та проаналізовано механічні властивості ДПК, отриманого з використанням модифікованого лігніну. Результати показали, що максимальна міцність при вигині ДПК, виготовлених з використанням модифікованого лігніну, збільшилась на 38 %.

Ті ж самі автори [103] виявили, що механічна міцність ДПК, отриманого шляхом додавання лігніну і порошку кавової шкарлупи, значно покращилася, а статична міцність при вигині може бути збільшена на 50 %. Корозійна стійкість ДПК була покращена за рахунок додавання лігніну. При вмісті лужного лігніну 15 % та порошку кавової шкарлупи 45 % властивості ДПК досягали оптимуму.

Таким чином, додавання лігніну або модифікованого лігніну можна розглядати як напрямок досліджень, спрямований на поліпшення фізико-механічних характеристик ДПК. Типи лігніну, методи модифікації та поєднання лігніну з сировиною вимагають подальших досліджень.

Як альтернатива використання поліетилену з щепленим малеїновим ангідридом для композитів дерево/поліетилен була досліджена система компатибілізаторів поліаміноаміду-епіхлоргідрину та стеаринового ангідриду [104]. При цьому міцність при розриві збільшилась на 33 % та модуль пружності на 40 % порівняно з композитами з чистої деревини та поліетилену.

Ті ж автори досліджували систему модифікаторів полідифенілметандіізоціанат та стеаринового ангідриду, для композитів

деревина/ПЕ [105]. Міцність при розриві та модуль пружності композитів були значно вищими, ніж у композитів, оброблених малеїновим ангідридом. Підвищення міцності при розриві та модуля пружності спостерігається за рахунок покращеної міжфазної адгезії та зменшення агломерації частинок деревини.

Ультрафіолетове (УФ) опромінення призводить до поступового знебарвлення та втрати механічної міцності ДПК. Щоб вирішити цю проблему атмосферостійкості, в ДПК вводяться такі стабілізатори, як амініні світлостабілізатори (HALS) та поглиначі ультрафіолету (UVA) [106]. Добавка HALS (діетер) може стабілізувати колір ДПК, реагуючи з вільними радикалами, що утворюються під впливом ультрафіолетового випромінювання. Чим вище молекулярна маса HALS, тим більшу стабільність мають ДПК. Поєднання бензотриазолу UVA та HALS супроводжується синергічним зниженням знебарвлення композиту. Чаочанчайкул та Сомбатсомпоп досліджували три різних УФ-стабілізатори для композитів деревина/ПВХ [107]. Вони виявили, що УФ-стабілізатори зменшують фотодеградацію ДПК, проте не впливають на механічні властивості. Ті ж автори також вивчали вплив термостабілізаторів на структурні та термічні властивості композитів деревина/ПВХ [108]. Результати показали, що деревинне борошно прискорює термічне розкладання ПВХ, і цього можна уникнути, додавши стеарати металів і оловоорганічні сполуки. У їхньому дослідженні було доведено, що меркаптид метилолова покращує термічну стабільність композитів деревина/ПВХ [108].

Вогнестійкість ДПК дуже важлива, якщо вони призначені для виготовлення меблів та житлових будівель. Щоб краще зрозуміти вплив антипіренів на вогнестійкість композитів деревне борошно/ПЕ, було досліджено п'ять вогнезахисних систем (декабромдифенілоксид, гідроксид магнію, борат цинку, фосфат меламіну і поліфосфат амонію) [109]. Усі п'ять реагентів покращили вогнестійкість ДПК. Також Гарсія та ін. [110]

повідомили про ДПК з покращеними характеристиками вогнестійкості та довговічності за рахунок додавання комбінації антипіренів та світлостабілізаторів.

При відсутності у складі деревинно-полімерного композиту певних речовин, що перешкоджають поширенню плісняви або інших протимікробних компонентів, пліснява може буйно розростатись. Для пригнічення біодеструкції ДПК застосовувалися біоциди та оцінювалась їх ефективність [111]. Втрата маси деревинного компонента в ДПК, що викликана грибок бурої гнилі, була меншою порівняно з масивною деревиною. Зменшення гниття деревини пояснюється ефектом пластикової інкапсуляції. Борат Na/Ca показав себе трохи краще, ніж борат цинку. Аналогічним чином, Доусон-Андо і Матуана використовували два типи біоцидів (срібло та цинк) у трьох концентраціях для обробки ДПК, виготовлених з деревинного борошна та ПЕВГ [112]. Загалом, біоцид цинку ефективно контролював зростання грибків та зміну кольору, а найкращий ефект досягався при вмісті 1 % мас. Навпаки, біоцид срібла не пригнічував зростання грибків або зміну кольору.

Спінені ДПК мають такі цікаві технологічні властивості, як менша густина і вартість, підвищена ударна в'язкість, співвідношення міцності до маси і чіткість поверхні (гостріші контури і кути) [113]. До змішаних деревинних волокон і гранул ПП були додані три типи хімічних піноутворювачів (ендотермічні, екзотермічні та ендотермічні/екзотермічні), зразки яких були отримані литтям під тиском [114]. Враховуючи розмір осередків, діаметр та відстань, для мікроспінених композитів екзотермічні піноутворювачі виявилися кращими для спінування в матриці з ПП. Густина ДПК знизилась майже на 30 %, а шорсткість поверхні зменшилася на 70 %. Чжан та ін. розробили систему тандемної екструзії для виготовлення мікропористих ДПК з використанням CO_2 в якості фізичного спінувача [115]. Виявлено, що система тандемної екструзії дозволяє виробляти ДПК з дрібнокомірчастою структурою, яка демонструє упорядковану структурну

морфологію. В дослідженні [116] вивчалися мікрокомірчасті ДПК, отримані в процесах лиття під тиском, екструзії та компресійним формуванням композитів для інтер'єру автомобілів, де лиття під тиском виявилось найкращим методом переробки з точки зору морфології осередків, зниження густини, виділення запаху та механічних властивостей.

1.5 Нанонаповнювачі та нанокompозити

Так звані наночастки увійшли в сферу добавок для полімерів, композитів в цілому та ДПК зовсім нещодавно. Наночастки використовуються у кількості звичайно нижче 10 %, а частіше – до 5 %, таким чином вони не є реально «наповнювачами», а скоріше функціональними добавками. Однак оскільки навіть в таких невеликих концентраціях вони іноді покращують властивості матеріалів, деякі називають їх «нанонаповнювачами» [117].

Додавання наноматеріалів дозволяє заповнити зазори між волокнами деревини та підвищити міцність при вигині. Ефект поліпшення пов'язаний з кількістю добавки, типом матеріалу та виробничим процесом. Збільшення густини зазвичай призводить до підвищення продуктивності [118]. Каймакчі та ін. [119] досліджували вплив нановолокон сепіолітової глини на механічні властивості деревинно-полімерних нанокompозитів. Результати показують, що фізико-механічні властивості ДПК збільшуються зі збільшенням вмісту нановолокон сепіоліту. У дослідженні [120] було встановлено, що введення мікронного алюмінієвого порошку (в межах 0,1–2 мас. %) до складу деревинно-полімерного композиту сприяє покращенню його механічних властивостей. Найвищі показники міцності були зафіксовані при концентрації 0,1 мас. % алюмінію та впливі мікрохвильового випромінювання потужністю 539 Вт протягом 15 секунд. За цих умов міцність при вигині зросла на 31 %, досягнувши значення 16,8 МПа, що

свідчить про ефективність алюмінієвого порошку як армуючого наповнювача.

Чен та ін. [121] сплавили і сформували модифіковані багат шарові вуглецеві нанотрубки з ПЕВГ та деревинним порошком, а також дослідили механічні властивості отриманих зразків композитного матеріалу. Результати показали, що міцність при вигині та модуль пружності композиту були збільшені на 5,8 % та 13,7 % відповідно при використанні багат шарових вуглецевих нанотрубок з модифікованою поверхнею порівняно з необробленими нанотрубками.

Чжан та ін. [122] приготували новий ДПК, що містив вуглецеві нанотрубки (ВНТ), деревинне волокно (14 % мас.) і поліетерсульфон (86 % мас.). Фізико-механічні властивості композиту при вигині з різним вмістом ВНТ показані на рисунку 1.7.

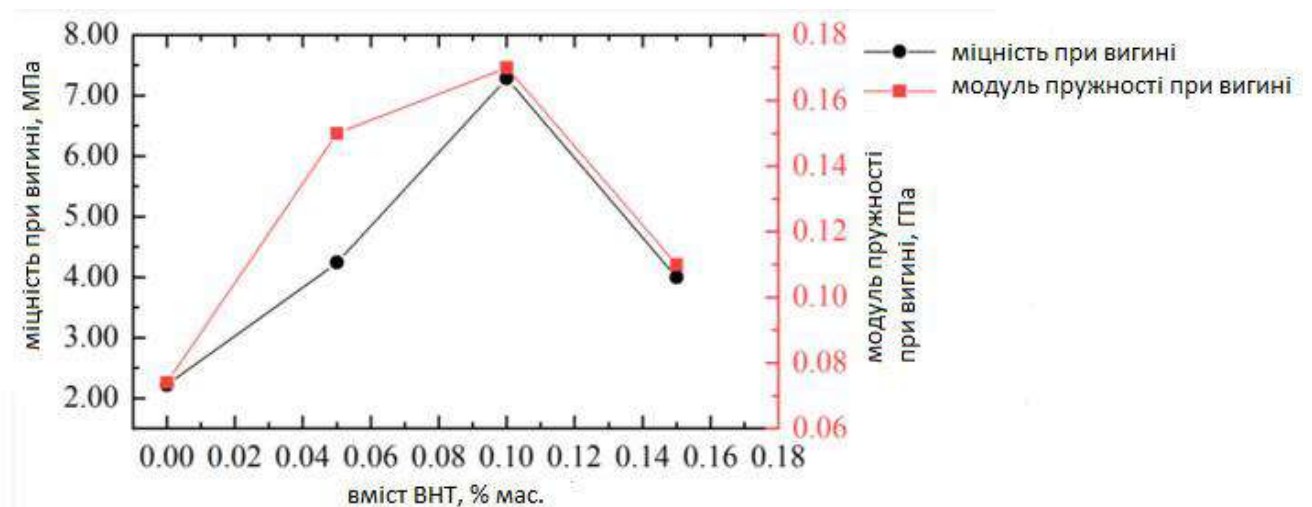


Рисунок 1.7 – Вплив вмісту ВНТ на фізико-механічні властивості при вигині ДПК.

Результати експериментів показали, що додавання невеликої кількості ВНТ може значно покращити механічні властивості композитів дерево/поліетерсульфон [122].

Згідно з визначенням, нанокompозити — це багатофазні тверді матеріали, в яких хоча б одна з фаз має розміри в одному, двох або трьох напрямках у нанометровому діапазоні (менше 100 нм) [123]. Відповідно, целюлозні нанокompозити належать до цієї категорії, оскільки їх армування здійснюється за допомогою наночастинок целюлози — целюлозних нанокристалів або нанофібрил. В залежності від методів виробництва, наночастинки целюлози поділяються на дві категорії. Одна з них — нанокристали целюлози (НКЦ) — волокна целюлози обробляються кислотою для видалення аморфних ділянок шляхом розриву зв'язків між целюлозою та геміцелюлозою, що призводить до вивільнення кристалічного целюлозного волокна [124]. Інший тип наночастинок целюлози — це нанофібрили целюлози (НФЦ). Метод виробництва НФЦ використовує силу зсуву до волокон целюлози перпендикулярно її осі, щоб розірвати внутрішні зв'язки нановолокон [125]. З цієї причини у НФЦ містяться як кристалічні, так і аморфні області.

Оскільки наночастинки целюлози мають надзвичайні властивості, їх часто включають у полімерні матриці як підсилувачі або функціональні добавки. Нанокристали целюлози як посилювач полімерів вивчалися менше, ніж НФЦ, оскільки прогнозовані витрати на комерційне виробництво НКЦ значно перевищують витрати на процес виробництва НФЦ. Крім того, НФЦ є кращим кандидатом як армуючий матеріал, ніж НКЦ, оскільки НФЦ мають більше співвідношення сторін і більше переплетення волокон у композиті [125]. Інша причина може полягати в тому, що термічна стабільність НКЦ зменшується при кислотному гідролізі, що стає серйозною проблемою під час переробки, наприклад, методом екструзії [123].

На предмет використання НФЦ у ДПК були досліджені різні термопластичні та термореактивні полімерні матриці та існує багато робіт у яких досягалось поліпшення властивостей композитів. Маланін та співавтори [126] створили нанокompозити, додаючи целюлозні мікрофібрили (НФЦ) до полі(стирол-ко-бутилакрилатного) латексу методом лиття з розчину. При

вмісті 10 мас. % НФЦ межа міцності при розтягуванні зросла з 7,1 МПа (для чистого полімеру) до 34,5 МПа, що свідчить про значне армування. Водночас видовження при розриві зменшилося, що є типовим для жорсткіших композитів. Пен та ін. створили нанокompозит НФЦ/ПП шляхом компаундування в розплаві та екструзії з поліпропіленом малеїнового ангідриду як зшиваючий агент [127]. Спостерігалось збільшення модуля пружності при розриві на 36 %, модуля пружності при вигині на 21 % і ударної в'язкості на 23 % армованого ПП при вмісті волокна 6 мас. %. Лейтнер та ін. виготовили композити НФЦ/полівініловий спирт (ПВС) методом лиття з розчину [128]. Механічні властивості ПВС підвищувалися зі збільшенням вмісту наповнювача. При вмісті наповнювача 50 % мас. модуль пружності при розриві ПВС був у 20 разів, а міцність при розриві у 3,5 рази вище, ніж у чистого ПВС.

Застосування целюлозних нанокompозитів різноманітні, наприклад, у конструкційних матеріалах, біомедичних каркасах, оптичних пристроях, бар'єрних плівках, компонентах акумуляторів, покриттях, автомобільних деталях тощо [129].

При введенні у ДПК шаруваті наночастки зазвичай не підвищують міцність при вигині або розриві (хоча були деякі повідомлення щодо сприятливого впливу наночастинок на міцність при вигині), але значно підвищують модуль пружності при вигині (жорсткість). Іноді вони навіть підвищують водопоглинання ДПК, погіршуючи експлуатаційні властивості [130].

Таблиця 1.3 демонструє вплив монтморилонітних «наноглин», що застосовуються у вигляді мастербатчів у ПП на композит на основі ПП, що містить 50 % мас. кленового деревинного борошна, на міцність та модуль при вигині ДПК [130].

Таблиця 1.3 – Вплив наноглини на міцність при вигині та модуль пружності при вигині ДПК на основі поліпропілену, що містить 50 % мас. кленового деревинного борошна (180 мкм). Аппрет не введено [130].

Наноглина, % мас.	Міцність при вигині, МПа	Модуль пружності при вигині, МПа
0	41	3900
2	38	3500
4	36	3401
10	33	3598

Як показано у таблиці 1.3, присутність шаруватих наноглин рівномірно знижує міцність при вигині та не впливає на модуль пружності при вигині. На відміну від ДПК, чистий поліпропілен, наповнений тією ж наноглиною, має значно підвищену міцність модуля при вигині. Очевидно, що ефект посилення від введення в полімерну матрицю шаруватих силікатів нівелюється введенням відповідної кількості деревинного наповнювача [130].

У роботах [131] та [132] були проведені дослідження впливу дозування, типу та засобу введення наноглини на фізико-механічні та експлуатаційні властивості деревинно-полімерних композитів. Модифікація деревинного борошна органомодифікованим шаруватим нанопоповнювачем дозволяє за рахунок додаткового армування структури композицій в результаті інтеркалювання полімерної матриці в міжшаровий простір наноглини підвищити фізико-механічні властивості, термостійкість та водостійкість ДПК.

В роботі [133] приведені результати досліджень впливу введення монтморилоніту на фізико-механічні властивості, твердість та водопоглинання деревинно-полімерних композитів. Для модифікації застосовувався нанопоповнювач монтморилоніт (Катамін АБ) дозуванням 0,65 % мас. Результати фізико-механічних випробувань наведено на рисунку 1.8

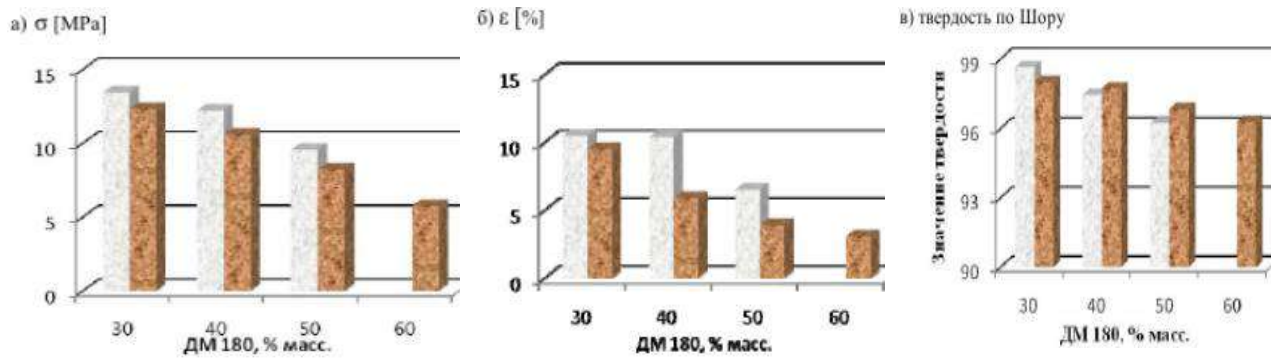


Рисунок 1.8 – Вплив введення Катаміну АБ на фізико-механічні властивості ДПК: базова композиція відмічена світлим, темним – композиція із додаванням монтморилоніту (а – міцність при розриві, б – відносне видовження при розриві, в – твердість за Шором) при різному вмісті деревинного борошна [133].

Як можна побачити з даних рисунка 1.8, при збільшенні вмісту деревинного борошна, міцність та відносне подовження знижуються. Введення монтморилоніту дозволяє досягти більш високого ступеню наповнення [133]. Спостерігається зниження міцності при розриві та відносного видовження із збільшенням вмісту наповнювача, що цілком зрозуміло зміненням у кристалічній фазі полімеру при високих наповненнях [134].

Шляхом порівняльного аналізу можна виявити, що оптимальна кількість наноматеріалів, яка додається, для досягнення найкращих характеристик залежить від типів матеріалів і вмісту деревинного наповнювача, але зазвичай це концентрації до 1–2 %. Модифікаційна обробка наноматеріалів перед додаванням може посилити ефект модифікації та отримати матеріали з високими фізико-механічними, технологічними та експлуатаційними властивостями.

1.6 Мінеральні наповнювачі у ДПК

Карбонат кальцію (CaCO_3). Є три основні форми CaCO_3 , що використовується як наповнювач в пластмасах: мелений, осаджений та з покриттям. Більше 90 % карбонату кальцію використовується у вигляді меленого мінерального наповнювача.

Полімери наповнені карбонатом кальцію зазвичай характеризуються високим модулем пружності. Наприклад, ПЕВГ наповнений 76 мас. % CaCO_3 має модуль пружності у 3–6 разів вище, ніж ненаповнений ПЕВГ. Аналогічно, при наповненні поліпропілену 80 мас. % карбонатом кальцію, модуль пружності композиту збільшується на 230–350 %. У загальному випадку, та ж тенденція зазвичай спостерігається, коли полімер, що наповнений деревинним борошном, додатково містить карбонат кальцію [4].

Але досліди показують, що карбонат кальцію в інтервалі 12–32 мас. % знижує ударну в'язкість ДПК приблизно на 25 %. Данні таблиці 1.4 показують, що карбонат кальцію і тальк підвищують модуль пружності при вигині приблизно на 40–60 %, знижують ударну в'язкість та енергію руйнування приблизно на 30–40 % та дещо підвищують водопоглинання. Всі ці ефекти є загальновідомими у дослідженнях композитів та дещо змінюються кількісно при зміні розміру часток мінеральних наповнювачів, типу полімеру, деревинного борошна, густини матриці, тощо [135].

Таблиця 1.4 – Вплив карбонату кальцію і тальку на властивості ДПК (ПТР ПЕВГ 0,4 г/10 хв; 50 мас. % деревинного волокна) [135]

Склад	Модуль пружності при вигині, МПа	Ударна в'язкість по Ізоду з надрізом, кДж/м ²	Енергія руйнування, Дж	Відсоток поглинання вологи за 2 тижня
ПЕВГ(45%) - контрольний	2357	1,02	16,14	1,4

Продовження таблиці 1.4

ПЕВГ(35%)/ CaCO ₃ (10%)	3151	0,76	12,88	7,1
ПЕВГ(30%)/ CaCO ₃ (15%)	3433	0,78	12,47	9,0
ПЕВГ(25%)/ CaCO ₃ (20%)	3282	0,70	11,52	8,9
ПЕВГ(25%)/ талък (20%)	3707	0,66	9,35	7,8

Проведена робота [136] показала, що введення кальцитів у деревинно-полімерні композити на основі полівінілхлориду практично не знижує їх експлуатаційні властивості та дозволяє успішно їх використовувати для проведення будівельних робіт. При цьому питома ударна в'язкість підвищується, міцність при вигині знижується, але залишається в межах допустимих значень, а твердість по Шору майже не змінюється.

Талък. Талък - це гідратований силікат магнію, неметалевий мінерал білого або жовтуватого кольору, хімічно інертний. На відміну від багатьох інших мінеральних наповнювачів, його частинки мають особливу пластинчасту форму. Він має природну олеофільність і, отже, є хорошим наповнювачем для гідрофобних полімерів, таких як поліетилен, поліпропілен тощо [137]. У загальному випадку талък покращує багато властивостей поліолефінів при використанні його в якості наповнювача. Він підвищує жорсткість (модуль пружності при вигині) та міцність при розтягуванні та вигині, знижує технологічну усадку, водопоглинання та коефіцієнт термічного розширення-стиснення. Також він дозволяє знижувати собівартість композиту [138].

Є загальні рекомендації, що талъки, які використовуються як наповнювачі в термопластах, повинні мати розмір часток менш 10 мкм, а при

використанні разом із деревинним волокном вони повинні мати розмір приблизно 7–10 мкм. Так, введення більш дрібнодисперсних часток тальку супроводжується підвищенням модуля пружності наповненого деревним борошном (27,5 % мас.) неорієнтованого поліпропілену 2950–4000 МПа (без добавки тальку) до 4200–5200 МПа (тальк розміром часток 10 мкм). У тій же системі, але із більшим розміром часток (45–70 мкм тальк) збільшення модуля пружності при вигині було ледь помітним: 3200–4000 та 3200–4300 МПа відповідно. Міцність при вигині у тій же системі зазвичай знижувалася при зменшенні розміру часток тальку [139].

Для часток тальку розміром близько 7 мкм максимальна міцність при вигині та модуль пружності при вигині ДПК спостерігалися при вмісті талька 27 мас. % разом із 40 мас. % ПЕВГ та 33 мас. % деревинного волокна (28 та 4750 МПа відповідно). При трохи більшому вмісті тальку у тій же системі (30 мас. %) як міцність при вигині, так і модуль пружності були або такими ж, або трохи нижче, при цьому значно знижувалась продуктивність екструзії [140].

Тальк також позитивно впливає на збереження властивостей ДПК при вигині після довготривалої витримки у воді. Наприклад, через 210 днів витримки воді ДПК на основі ПЕВГ із 60 мас. % вмістом наповнювача (деревинне борошно та комбінований тальк) падіння фізичної міцності склало 26 % (6 мас. % тальку), 20 % (20 мас. % тальку), 17 % (27 мас. % тальку) 16 % (30 мас. % тальку). Відповідні значення для падіння модуля пружності при вигині були такі: 51 % (6 мас. % тальку), 45 % (20 мас. % тальку), 40 % (27 мас. % тальку) 37 % (30 мас. % тальку) [141].

Часткова заміна деревинного борошна тальком або введення тальку у ДПК привела до зниження в'язкості розплаву ДПК та підвищення об'ємної продуктивності екструдера. Заміна 10 мас. % деревинного борошна тальком привела до підвищення продуктивності на 15 %, а заміна 50 мас. % деревинного борошна тальком призвела до підвищення продуктивності на 36 %. Припустили, що тальк мінімізує зрідження сировини низькою

об'ємною густиною, і таким чином покращує транспортування твердої фази [142].

Кремнезем (SiO_2). Рисове лушпиння містить близько 19 мас. % кремнезему. Рисове лушпиння використовується як основний наповнювач (або серед основних наповнювачів) промислових ДПК. Зазвичай використовуються три основні матеріали кремнезему: один натуральний (як кристалічний, так і аморфний); та два так звані синтетичні, продукти термообробки (сорти пірогенного кремнезему) та мокрого змішування (осаджений кремнезем). Частинки кремнезему зазвичай мають сферичну форму [12].

Мінеральні глини. Каолін застосовується у ПЕНГ в кількості 20–45 мас. % для збільшення стійкості стирання полімеру. Каолін належить до однієї з п'яти промислово доступних мінеральних глин: каолініт та галонзит, іліт, монтморілоніт та гекторит, сепіоліт та аттапульгіт, вермікуліт. Вони мають складний хімічний склад, та у загальному випадку складаються з SiO_2 (50–60 %), Al_2O_3 (25–35 %) невеликих кількостей Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , K_2O та Na_2O , всі вони становлять близько 1 % або менше [12]. Мінеральні глини відрізняються розміром часток, вологопоглинанням, формою частинок, питомою поверхнею та здатністю до міжшарової модифікації. Ці властивості суттєво впливають на взаємодію глин з полімерною матрицею, зокрема на адгезію, диспергування та механічні характеристики композиту.

Лі та ін. [143] наповнювали ДПК з ПЕВГ червоною гончарною глиною, щоб вивчити вплив дозування глини на властивості отриманого композиту. Результати показали, що як міцність при вигині, так і модуль пружності композиту збільшуються зі збільшенням вмісту глини до 5 %, але надмірний вміст глини (як правило, більше 7–10 %) негативно впливає на механічну міцність та параметри переробки ДПК.

Щоб покращити ДПК, Лі та ін. [144] вводили органічно модифікований вермикуліт у ДПК у кількості від 1 до 5 мас. %. Вивчено механічні властивості композитів. Результати показали, що композити наповнені вермикулітом мають підвищені показники міцності.

Слюда. Слюда здатна покращувати термічну стабільність і фізико-механічні властивості поліолефінів. Однак через те, що її пластинчасті частинки мають значно більші розміри, ніж тальк, і темніший колір, вона менш поширена як наповнювач у порівнянні з тальком. Незважаючи на це, для окремих сфер застосування привабливим є високий коефіцієнт форми слюди — зазвичай у межах 10–70, що забезпечує ефективне армування. Втім, великий розмір частинок слюди негативно впливає на ударну в'язкість полімерів, тому як мінеральний наповнювач у деревинно-полімерних композитах вона застосовується обмежено.. Попри це, слюда активно досліджується в модельних системах ДПК. У загальному випадку її поведінка подібна до карбонату кальцію: вона знижує модуль пружності при вигині. Наприклад, у композитах на основі орієнтованого поліпропілену, наповненого сосновим деревним борошном (розмір часток — 250 мкм, вміст — 16,7–25 мас. %), додавання 10–30 мас. % слюди призводить до зниження модуля пружності при вигині з 2 690–2 895 МПа (без слюди) до \approx 2 207 МПа (при 20–30 мас. % слюди). Також спостерігається зниження міцності при вигині з 44,8 МПа (еталонне значення) до 27,6–34,5 МПа [145].

Волластоніт. Загальний хімічний склад волластоніту це CaO (40–50 %), SiO₂ (40–50 %). Волластоніт - єдиний білий мінерал, що є волокном. Його коефіцієнт форми (відношення довжини до діаметру) - від 3 до 70, а зазвичай між 3 та 20 при довжині частинок 8–650 мкм. Волластоніт ще не використовується в промислових матеріалах ДПК, але досліджується з метою подальшого поліпшення властивостей ДПК. Мінерал використовується в усьому світі в багатьох сферах застосування полімерів, забезпечуючи

підвищення жорсткості, ударної в'язкості, стійкості до дряпання, зниження термічного коефіцієнта розширення та вогнестійкості. Унікальна морфологія волластоніта та різноманітність доступних за дисперсністю сортів може забезпечити переваги, які не досяжні для дисперсних мінеральних наповнювачів. У ряді випадків волластоніт успішно замінює тальк у полімерах, де потрібне подальше підвищення властивостей, таких як велика міцність та підвищена стійкість до дряпання [12].

Зольний пил. Зольний пил — це дрібнодисперсний порошкоподібний матеріал, що утворюється в пилозбірниках теплоенергетичних установок як побічний продукт спалювання палива. Фактично 60–90 % зольного пилу є склом. Це основний побічний продукт згоряння вугілля та утворюється у великій кількості в усьому світі. З загальної кількості від 10 до 20 % використовується як добавка до цементів. Інші можливості застосування зольного пилу – у якості наповнювача бетонних дорожніх основ та підоснов, структурного засипання, текучого засипання та цементному розчині [146], наповнювача у композитах на основі ПА та ПП [147]. Однак основна частина утвореного зольного пилу, 70–75 %, скидається на сміттєзвалища.

Дослідження терасних дошок з ДПК, наповнених зольним пилом проводилось у роботі [148]. З даних таблиці 1.5 видно, що тільки при 30 мас. % зольного пилу (ПЕВП 34 мас. % та 46 об. %) і міцність при вигині, і модуль пружності (жорсткість) помітно вище, ніж ті ж властивості для еталону. Однак вага дошок збільшилась з 2,5 кг/м (еталон) до 2,9 кг/м (30 мас. % зольного пилу).

Таблиця 1.5 – Міцність при вигині та модуль пружності при вигині порожніх терасних дошок, наповнених зольним пилом. Перші три дошки були виготовлені при збереженні ПЕВГ 39 % мас. та заміною рисового лушпиння зольним пилом за масою; другі – при збереженні ПЕВГ 46 % об. та заміною рисового лушпиння зольним пилом за масою [148]

Зольний пил, мас. %	Міцність при вигині, МПа	Модуль пружності при вигині, МПа
0	13,17	2048
10	14,11	2048
20	15,49	2020
10	13,31	1793
20	13,17	1972
30	16,11	2640

При змішуванні зольного пилу з деревинним борошном у композиції наповненого ПЕВГ використання зольного пилу дозволило отримати матеріал менш міцний та більш еластичний у порівнянні з наповненим тільки деревинним борошном ПЕВГ (таблиця 1.6). Окрім цього, зольний пил сприяє підвищенню міцності та жорсткості матеріалу у порівнянні з чистим полімером [148].

Таблиця 1.6 – Міцність при вигині та модуль пружності при вигині композицій ПЕВГ із різним співвідношенням зольного пилу та деревинного борошна при постійному 40%-му вмісті наповнювача [148]

Зольний пил, % мас.	Деревинне борошно, % мас.	Міцність при вигині, МПа	Модуль пружності при вигині, Мпа
0 (чистий ПЕВГ)	0 (чистий ПЕВГ)	31,58	883
40	0	49,51	2104
30	10	54,62	2393

Продовження таблиці 1.6

20	20	58,61	2681
10	30	62,47	3026
0	40	63,73	3010

Наведені дані у [148] показують, що зольний пил суттєво не вплинув на механічні властивості ДПК на основі ПЕВГ із деревинним борошном. Однак в'язкість розплаву композиції стала нижчою при заміні зольного пилу деревинним борошном. Також важливо, що зольний пил термостабілізував наповнений деревинним борошном ПЕВГ при нагріванні. Початок термічної деструкції для наповненого 40 мас. % деревинного борошна ПЕВГ відбувається приблизно при 240 °С, тоді як для наповненого 40 мас. % зольного пилу ПЕВГ вона починається приблизно при 300 °С. Термостабільність композиції ПЕВГ – деревинне борошно – зольний пил знаходилася у межах 280–290 °С. Таким чином зольний пил є потенційно достатньо перспективним наповнювачем, але його застосування в ДПК потребує ретельних досліджень [148].

Неметалеві мікрволокна. Неметалеві волокна також можна використовувати у складі деревинно-полімерних композитів для покращення фізико-механічних властивостей матеріалів.

Чжан та ін. [149] досліджували ДПК армований скловолокном. Результати досліджень показали, що такі ДПК характеризуються кращою спорідненістю фаз при додаванні безперервного волокна з малою об'ємною часткою в ДПК і потенційно можуть бути використані як конструкційні пластики. Херіянто та ін. [150] використовували відходи біг-бегів з ПП і тирси для виробництва ДПК та додавали змішані скляні відходи як вторинний наповнювач. Виявлено, що армований скловолокном ДПК має високу твердість, а також, додавання скляного порошку у кількості 5 мас. % може збільшити міцність при розтягу приблизно до 14,2 МПа.

Лі та ін. [151] використовували бамбукове вугілля в якості армуючого наповнювача ДПК. Вивчено вплив бамбукового вугілля на фізико-механічні властивості. Результати показують, що бамбукове вугілля має високу міжфазну спорідненість в ДПК і такі ДПК має вищі фізико-механічні властивості, ніж ДПК. Мосаві-Мірколаї та ін. [152] вивчали вплив суміші переробленого пластикового мікрОВОлокна на фізичні та механічні властивості ДПК. Суміш екструдували та розтягували для орієнтації мікрОВОлокна. Додавання мікрОВОлокна ПЕТ покращило механічні властивості зразка. Модуль пружності при вигині композитів збільшився на 9 %.

У роботі [153] використовували лляне волокно для армування композиту деревинне борошно/поліетилен низької густини. Встановлено, що механічні властивості композитів можна суттєво покращити додаванням невеликої кількості лляного волокна. Міцність при вигині та модуль пружності збільшилися на 14,6 та 51,4 % (вміст лляного волокна складав 9 мас. %) відповідно.

Інші види наповнювачів. Ван та ін. [154] вивчали вплив екстрактивних речовин каучуконосної деревини на механічні властивості та протигрибкову корозію ДПК. Результати показали, що механічні властивості композиту, отриманого з екстрагованим деревним борошном, вищі, ніж із неекстрагованим. Кумар та ін. [155] додали ПП з пилом манго/шишама/червоного дерева/бабула в різних пропорціях для поліпшення механічних властивостей композиту. ДПК з вмістом деревинної тріски від 10 % до 20 % мас. бабула і шишама характеризуються задовільними механічними властивостями.

Зонг та ін. [156] розробили новий двошаровий коекструзійний композит, у якому як серцевину використано легкий ламінований дерев'яний брус, а оболонку сформовано з водостійкого деревинно-полівінілхлоридного матеріалу. При вмісті деревного борошна в оболонці на рівні 60 мас. %,

спостерігалось зростання питомого модуля пружності при вигині на 284 % порівняно з одношаровими аналогами. Як зазначено у Хао та ін. [157], коекструзійні ДПК мають спеціальну багатофункціональну структуру оболонки, яка повністю охоплює серцевину. До складу оболонки можуть вводитися функціональні добавки (наприклад, стабілізатори, барвники, антипірени), що дозволяє підвищити механічні властивості, вологостійкість та довговічність композиту.

1.7 Процеси переробки деревинно-полімерних композитів

Основними процесами переробки деревинно-полімерних композитів є екструзія, лиття під тиском і компресійне формування або термоформування (пресування). Нові виробничі процеси для ДПК включають адитивне виробництво за допомогою моделювання наплавленим шаром та лазерного спікання [158].

Екструзія. Екструдер є центральним агрегатом виробництва профілів ДПК. В екструдері полімер плавиться і змішується з деревиною та добавками в процесі, що називається компаундуванням. В екструдері відбувається формування деревинно-полімерної суміші через формуючу головку. Існує три основні типи екструзійних агрегатів, що використовуються для переробки профілів ДПК. Це одношнекові, двошнекові, що обертаються в одному напрямку і двошнекові, що обертаються в протилежних напрямках [159].

Одношнекові екструдери. Одношнековий екструдер для виготовлення волоконного композиту - це найпростіша екструзійна система для виробництва профілів із ДПК. Типовий одношнековий екструдер має співвідношення довжини циліндра до діаметру (L/D) в діапазоні 34:1. Процес переробки включає дві стадії: плавлення та дозування, а також дегазацію для видалення летких речовин. Технологічною сировиною для одношнекового

екструдера є попередньо висушені полімерні гранули з волокнистим наповнювачем. Механізм плавлення/змішування складається з одночасного нагрівання-плавлення полімеру та транспортування шнеком в зону формування в матеріальному циліндрі. Переваги одношнекового екструдера полягають у тому, що це проста продуктивна технологія і має найнижчі капітальні витрати. До недоліків відноситься низька продуктивність, необхідність системи сушіння, полімер плавиться разом з волокном з підвищеним ризиком термічного розкладання волокна, висока швидкість шнека з підвищеним ризиком займання та нездатність утримувати розплав, низька температура з вищим тиском напору, низька ефективність змішування [160].

Двошнекова екструзія із зустрічним обертанням шнеків. Двошнекові екструдери із зустрічним обертанням ефективні для застосування, де використовуються термочутливі полімери, такі як жорсткий полівінілхлорид (ПВХ), а також для низькотемпературної екструзії волокон і пінопластів та інших матеріалів, що потребують дегазації. Механізм плавлення/змішування являє собою нагрівання в матеріальному циліндрі та шнекове змішування. Шнекове перемішування здійснюється за допомогою шнекових вирізів та зубчастих змішувачів. Видалення вологи здійснюється вакуумною дегазацією. До переваг двошнекової екструзії з протилежним обертанням відносяться низька швидкість шнека і перемішування з низьким зсувом, високий ступінь суміщення інгредієнтів ДПК. До недоліків відноситься потреба в системах сушіння, системах попереднього змішування [161].

Двошнекова система з співобертанням шнеків та одношнекова екструзія з подачею гарячого розплаву. Подвійний шнек, що обертається в одному напрямку, у поєднанні з одинарним шнеком гарячого розплаву можна використовувати для композитних деревинно-полімерних профілів. У цьому випадку паралельний двошнековий екструдер із співвідношенням L/D 40:1

з'єднується з одношнековим екструдером із співвідношенням L/D 10:1. Матеріалом для цієї системи є борошно або деревинне волокно з вологістю до 8 %, а полімер і добавки можуть знаходитися в їх природному стані. Жодної підготовки матеріалу в плані попереднього змішування компонентів не потрібно. Найбільш використовуваними системами подачі матеріалу є гравіметричні живильники та двошнекові бічні живильники. Механізм плавлення/змішування включає нагрівання циліндра і шнекове змішування. Видалення вологи здійснюється за рахунок використання атмосферних та вакуумних pomp. До переваг цієї системи можна віднести можливість обробки деревини при вологості навколишнього середовища, оскільки екструдер використовується для сушіння волокна без необхідності операцій сушіння та попереднього змішування, а також добре змішування волокна та полімеру. До недоліків відносяться необхідність використання периферійних систем подачі, висока швидкість шнека і відсутність охолодження шнека (вищий ризик займання), неможливість підтримувати низьку температуру розплаву при вищому тиску напорі [162].

Лиття під тиском. Лиття під тиском деревинно-полімерних композитів використовується для виготовлення деталей складної геометрії, що не потребують фінішної обробки. Типовим прикладом деталей з ДПК, що відлиті під тиском, є елементи інтер'єру автомобілів. Дослідження, спеціально присвячені процесу лиття під тиском ДПК, обмежені в порівнянні з екструзійною обробкою, але процеси, як правило, схожі та зосереджені на складі та властивостях матеріалів [163]. У літературі також наводяться дані щодо дослідження процесу лиття під тиском мікропористих пін ДПК [164, 165]. Лиття під тиском менше застосовується через низьку продуктивність процесу та вузький асортимент продукції.

Компресійне формування або термоформування. Компресійне формування або термоформування деревинно-полімерних композитів

досліджується вже багато років і широко використовується при виробництві автомобільних композитних деталей [166]. Також було продемонстровано використання стрічкових пресів безперервної дії для виробництва панелей ДПК та панелей ДПК, армованих скловолокном [167, 168]. TechnoPartner Samtronic GmbH, Геппінген, Німеччина може виготовляти безперервні листи ДПК шириною до 1,3 м і завтовшки 13 мм на безперервній основі [168].

На першій стадії компоненти (деревина/термопластичний полімер) змішуються, потім передаються на другий етап, де використовуються різні методи для формування ДПК у прес-формах. Щодо властивостей готових продуктів, то кожен метод має свій власний набір параметрів, переваг та недоліків [169].

1.8 Мастильні речовини

Мастильні матеріали - це технологічні добавки, які покращують якість поверхні виробу, зменшують деградацію деревини та обмежують споживання енергії на етапі формування. Щоб забезпечити рівномірний рух розплаву у матеріальному циліндрі агрегатів та формуючому інструменті, в ДПК використовуються мастильні речовини [170]. Це пов'язано з високою в'язкістю композиту. Оскільки надлишкове мастило може призвести до зменшення зв'язку між деревиною і пластиком, кількість мастила має бути зведена до необхідного мінімуму [171].

Звичайними мастилами є складні етери, стеарати та силікони, окислені та неокислені поліетиленові воски [172, 173]. На відміну від внутрішніх мастил, які знижують в'язкість, діючи як пластифікатори [174], ці сполуки мають знижену розчинність у композиції; таким чином, вони розташовуються між розплавом полімеру і металевими частинами обладнання, сприяючи ковзанню, і тому вони виступають у якості зовнішніх мастил.

Як правило, дослідження, що стосуються цієї теми, засновані на виборі конкретного типу мастильного матеріалу і зосереджені на пошуку найбільш оптимального вмісту [175], шляхом порівняння змащувальних систем [176] або оцінки різних мастильних систем [177]. Відповідне мастило знижує в'язкість [178], і цей ефект збільшується з її вмістом. Зазвичай цей показник коливається від 1 до 10 %, залежно від типу мастила [174]. Христов і Влахопулос [179] визначали в'язкість за Муні для визначення ковзання і виявили, що додавання 1 мас. % мастила приводить до значного збільшення швидкості ковзання. Цей ефект більш значний при низьких напругах зсуву і дуже зручний для переробки ДПК, який зазвичай екструдуються при низьких швидкостях та напругах зсуву.

З моменту введення малеїнізованих апретів у ДПК було встановлено, що їх ефективність значною мірою залежить від типу мастил, застосовуваних у тих самих системах. Спостерігався суперечливий вплив при додаванні малеїнізованими поліолефінами та стеаратів металів (таблиця 1.7) [180].

Таблиця 1.7 – Вплив етилен-біс-стеараміду (ЕБС)/стеарату цинку на міцність при вигині та модуль пружності при вигині ДПК (60 мас. % деревинного борошна, 40 мас. % ПЕВГ, апрети та змазки вводились у кількості 2 мас. %) [180]

Тип апрету	Тип та кількість змазки	Міцність при вигині, МПа	Модуль пружності при вигині, МПа
Відсутній	Відсутня	27,58	3585
	неметалева змазка	23,45	3551
	ЕБС/стеарат цинку	23,45	3518

Продовження таблиці 1.7

Integrate	Відсутня	57,93	3999
-----------	----------	-------	------

NE556-004	неметалева змазка	51,71	3860
	ЕБС/стеарат цинку	28,96	3518
Integrate	Відсутня	61,37	4206
NE558-004	неметалева змазка	53,10	4069
	ЕБС/стеарат цинку	28,27	3585

В таблиці 1.7 показано, що стеарат цинку зменшує міцність та жорсткість ДПК порівняно з неметалевим мастилом. Однак, якщо без апретів це зниження було незначним та становило близько 1 % для міцності та модуля пружності при вигині, у присутності кожного з апретів це зниження досягало 70–90 % для міцності при вигині, та 10–20 % для модуля пружності при вигині, при порівнянні двох видів мастил, неметалевого та металовмісного, та на 100–130 та 15–20 % за відсутності мастила зі стеаратом металу відповідно [180]. Отже, стеарат цинку пригнічує вплив малеїнізованих апретів на фізико-механічні властивості ДПК.

З іншого боку, Лі і Уолкотт [181] порівняли дві різні мастильні системи – складноестерну систему і стеарат цинку, і помітили, що зниження в'язкості при використанні мастил складноестерного типу більше, ніж при використанні системи на основі стеарату, що свідчить про те, що стеарат цинку несумісний з модифікаторами на основі малеїнізованого ангідриду.

Висновки до розділу 1

Аналіз значної кількості вітчизняних та закордонних літературних джерел, присвячених деревинно-полімерним композитам (ДПК), підтверджує їхню високу перспективність як екологічно та економічно перспективних матеріалів. Завдяки використанню вторинної деревини або деревинного борошна, ДПК демонструють конкурентоспроможні механічні та

експлуатаційні властивості за відносно низької вартості, що сприяє розвитку економіки замкненого циклу та збереженню первинних природних ресурсів.

Встановлено, що властивості ДПК можуть бути ефективно покращені та регульовані шляхом введення наповнювачів та різноманітних модифікаторів, таких як компатибілізатори (наприклад, ангідридні та карбоксильні сполуки), зв'язуючі агенти (силанові та титанові похідні), а також мастильні матеріали та поверхнево-активні речовини. Це дозволяє контролювати та оптимізувати фізико-механічні, технологічні та реологічні характеристики композитів.

Незважаючи на значні досягнення, аналіз показує, що більшість існуючих досліджень ДПК зосереджені на взаємозв'язку між технологіями переробки та характеристиками використовуваної сировини. Однак існує нагальна потреба в подальших системних дослідженнях, спрямованих на вивчення та впровадження нових матеріалів та гібридних композицій для цілеспрямованого покращення властивостей ДПК та розширення сфер їх застосування, зокрема у будівельних та оздоблювальних конструкціях. Такі дослідження є своєчасною відповіддю на виклики, пов'язані з управлінням пластиковими відходами та підвищенням екологічності промислового виробництва.

На основі проведеного огляду літератури було сформульовано наукову проблему, що полягає в необхідності покращення комплексу властивостей деревинно-полімерних композитів шляхом цілеспрямованої модифікації їх складу. Це дозволило визначити ключові задачі дослідження, серед яких: вивчення впливу стеаринової кислоти, епоксидованої соєвої олії, зольного пилу та фосфогіпсу на структуру та властивості ДПК; оцінка комбінованого ефекту модифікаторів; розробка оптимальних рецептур з урахуванням технологічної ефективності, екологічності та економічної доцільності.

Таким чином, на основі проведеного огляду літератури були чітко окреслені ключові напрями даної наукової роботи та сформульовані наукові задачі, спрямовані на досягнення мети дисертаційного дослідження.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Об'єкти дослідження

У якості об'єкта дослідження в даній роботі використано деревинно-полімерний композит на основі поліетилену високої густини. До складу композиції входили: вторинний поліетилен високої густини як матриця, деревинне борошно марки М 200 як основний наповнювач, мінеральний модифікатор кальцит, поліетилен з прищепленим малеїновим ангідридом як апрет, поліетиленовий віск для покращення технологічності, а також ультрафіолетовий стабілізатор і барвники для забезпечення стійкості до зовнішніх впливів та естетичних властивостей.

2.1.1 Вторинний поліетилен високої густини

Поліетилен високої густини (ПЕВГ) ($[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$) — термопластичний полімер білого кольору, що отримується полімеризацією етилену за низького тиску із застосуванням каталізаторів [182]. Він характеризується високою кристалічністю (70–80 %), густиною 945–955 кг/м³ та температурою плавлення 120–125 °С. ПЕВГ має низьку газо- та паропроникність, не розчиняється в органічних розчинниках за кімнатної температури, але може набрякати та розчинятися при підвищених температурах. Матеріал стійкий у вакуумі та інертному середовищі, проте на повітрі деструктує вже за 80 °С та піддається деградації під дією УФ-випромінювання [183]. Промисловий ПЕВГ здебільшого має ізотактичну будову макромолекул, що обумовлює його високі механічні характеристики [184].

У цій роботі використано вторинний поліетилен високої густини виробництва ТОВ «Черкасивторресурс», отриманий з побутових відходів (флакони) полігонного зберігання. Процес переробки включає сортування,

подрібнення (до 10–12 мм), флотаційне відмивання, сушіння та стренгову грануляцію. Фізико-механічні властивості використаного вторинного ПЕВГ наведені в Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізико-механічні властивості вторинного поліетилену високої густини

Показник	Значення
Зовнішній вигляд	Гранула темно-зеленого кольору розміром 3–5 мм
Густина, кг/м ³	956
Температура розм'якшення за Віка, °С	130
Показник текучості розплаву, г/10 хв	1,0
Міцність при вигині, МПа	50
Ударна в'язкість за Шарпі (на зразках без надрізу), кДж/м ²	зразки не руйнуються
Межа течії при розтязі, МПа	22,3
Відносне видовження при розриві, %	570

Варто зазначити, що використаний вторинний ПЕВГ демонструє властивості, порівнянні з первинним матеріалом, забезпечуючи при цьому нижчу вартість виробів та значний екологічний ефект за рахунок використання вторинних ресурсів.

2.1.2 Деревинне борошно

Деревинне борошно — це дрібнодисперсний порошок, що отримується шляхом механічного подрібнення відходів деревообробної промисловості (тирси, тріски, стружки), а також інших рослинних матеріалів, таких як солома чи шкарлупа горіхів. Виробництво є екологічно чистим процесом, який не передбачає використання хімічних реагентів, і включає такі етапи

[185]: підготовка та сортування сировини з видаленням великих включень; попереднє подрібнення для забезпечення однорідності; просушування матеріалу; фінальне подрібнення до розмірів у сотні мікрометрів; сортування та пакування готового продукту.

Хімічний склад деревинного борошна відповідає складу вихідної деревини, включаючи основні компоненти: целюлозу, геміцелюлозу та лігнін. Це робить його повністю натуральним природним матеріалом.

У поточному дослідженні використано дубове деревинне борошно марки М 200 згідно з ГОСТ 16361-87. Основні характеристики якості цього матеріалу наведено в Таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Характеристики якості деревинного борошна марки М 200

Найменування показника	Значення
1. Вологість, %, не більше	5
2. Масова частка золи, %, не більше	1,0
3. Масова частка пофарбованих домішок, %, не більше	4,0
4. Масова частка металоманітних домішок, %, не більше	0,0016
5. Насипна густина, кг/м ³	від 100 до 140
6. Масова частка залишку на сітці 0,18, %, не більше	5,0
7. Масова частка залишку на сітці 0,25, %, не більше	0,4
8. Масова частка смол та мастил, %, не більше	5,0

Головними недоліками деревинного борошна як компонента композитів є його низька волого-, тепло- та хімічна стійкість, що вимагає

відповідної модифікації композитних матеріалів для розширення їхніх експлуатаційних можливостей.

2.1.3 Кальцит

Кальцит (вапняковий шпат, крейда, CaCO_3) – це породоутворюючий мінерал, який належить до класу карбонатів і є одним з найпоширеніших мінералів на Землі [186]. Мінерал може містити домішки Co, Zn, Sr, Ba, Pb, Tr. Кальцит має тригональну сингонію, густину 2690–2720 кг/м³, та твердість за шкалою Мооса 2,75–3,50. Він переважно безбарвний або молочно-білий зі скляним блиском і є крихким [186].

Кальцит є основною складовою осадових гірських порід (вапняків, мармурів), а також зустрічається в магматичних, гідротермальних утвореннях та серед продуктів повторної мінералізації [187].

У поточному дослідженні використовувався необроблений мікрокальцит марки ММС-1 виробництва ПрАТ «Новгород-Сіверський завод будівельних матеріалів». Основні характеристики цього кальциту наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Характеристики кальциту марки ММС-1 ЧАТ «Новгород-Северський ЗБМ»

Найменування показника	Значення
Масова частка вуглекислого кальцію та вуглекислого магнію у перерахунку на вуглекислий кальцій, %, не менше	99,2
Масова частка речовин, що нерозчинні в соляній кислоті, %, не більше	1,2
Масова частка вологи, %, не більше	0,055

Продовження таблиці 2.3

Визначення розмірів (Mastersizer 2000E):	
- d50, мкм	1,93
- d97, мкм	23,29
- < 2 мкм, %	51,29
Білизна, % не менше	92,53

Як доступний наповнювач, крейда має важливі властивості для багатьох виробництв, включаючи білий колір, високу природну дисперсність, округлу форму частинок, легку диспергованість, низьку гігроскопічність та невисоку абразивність [188]. Ці характеристики роблять її ефективним компонентом у складі ДПК.

2.1.4 Поліетилен з прищепленим малеїновим ангідридом

Поліолефіни, модифіковані малеїновим ангідридом, є функціоналізованими полімерами, що широко застосовуються як зв'язувальні агенти (компатибілізатори) у композиційних матеріалах завдяки їхній високій активності та гарній перероблюваності [189, 190]. Малеїновий ангідрид — це безбарвні кристали з температурою плавлення близько 53 °С та густиною 1480 кг/м³ [190].

Поліолефіни, модифіковані малеїновим ангідридом забезпечують сумісність з полімерною матрицею та утворює міцні хімічні зв'язки з наповнювачем (зокрема, деревинним борошном) завдяки активним функціональним групам. Це запобігає розшаруванню композиту та підвищує адгезію між фазами, покращуючи механічні властивості ДПК [191].

У дослідженні використано низькомолекулярний поліетилен із прищепленим малеїновим ангідридом марки М 200 (Qingdao Sinoplas Hi-new Material Co., ltd, Китай). Основні характеристики продукту наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Характеристики низькомолекулярного поліетилену із прищепленим малеїновим ангідридом марки М 200.

Найменування показника	Значення
Вміст малеїнового ангідриду, мас. %, не менше	2
Форма випуску	Гранула
Колір	Білий
Запах	Без запаху
Температура краплепадіння, °С	103 - 117
Густина, кг/м ³	920-960
В'язкість при 140°С, Па*с	200-300

2.1.5 Стеаринова кислота

Стеаринова кислота (хімічна формула $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$) є одноосновною карбоною кислотою аліфатичного ряду. Це білий або жовтуватий твердий матеріал, що зустрічається в рослинах та тваринах. Стеаринова кислота нерозчинна у воді, але добре розчиняється в етанолі, етиловому етері, хлороформі та толуолі. Вона відома своїми відмінними змащувальними та антихроматографічними властивостями [192].

У виробництві полімерних композитів стеаринова кислота може використовуватись як агент для вулканізації, пластифікатор та хімічний стабілізатор. Вона також широко застосовується в інших галузях, включаючи виробництво свічок, косметики та як модифікатор в'язкості [192].

У поточному дослідженні була використана стеаринова кислота марки 1860 виробництва PT. DuaKuda, Індонезія. Її основні характеристики наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Характеристики стеаринової кислоти марки 1860

Найменування показника	Значення
Кислотне число, мг КОН/г	205 - 208
Число омилення, мг КОН/г	206 - 209
Йодне число, макс г I ₂ / 100 г	1,0
Температура плавлення, °С	70 – 71
Температура кипіння, °С	383
Температура застигання, °С	55 - 58
Густина, кг/м ³	870
Жирні кислоти C ₁₄ , макс. %	1,0
Жирні кислоти C ₁₆ , макс. %	44-49
Жирні кислоти C ₁₈ , макс. %	50-56

2.1.6 Поліетиленовий віск

Поліетиленовий віск — це олігомерний поліетилен із молекулярною масою до 10 000, який широко використовується в промисловості як технологічна добавка, мастильний компонент та розділювальний агент. Його популярність зумовлена низькою температурою плавлення, хорошою термічною стабільністю, гідрофобністю, а також хімічною інертністю [193].

Ключові фізичні властивості поліетиленового воску включають відносно низьку молекулярну вагу (1000–10000 г/моль), що обумовлює нижчу температуру плавлення (зазвичай 100–130 °С), густина 0,91-0,94 г/см³, та твердість за Моосом 2–4. Його висока слизькість робить його відмінним мастилом, а гідрофобність забезпечує стійкість до дії води [194, 195]. З хімічної точки зору, поліетиленовий віск є сумішшю довголанцюгових вуглеводнів, хімічно та термічно стабільний, стійкий до кислот, лугів та багатьох органічних розчинників, хоча сам розчинний в аліфатичних, хлорованих та ароматичних вуглеводнях [195].

У поточному дослідженні використовувався поліетиленовий віск марки CWN-105 виробництва Liebenzell AG Group Company, Іспанія. Його основні характеристики наведено у таблиці 2.6

Таблиця 2.6 – Характеристики поліетиленового воску марки CWN-105

Найменування показника	Значення
Температура краплепадіння, °С	105–112
Температура застигання, °С	95–102
Пенетрація (25°C), 10 ⁻¹	6–8
В'язкість за Брукфільдом (150°C), сП	15–45
Колір	білий
Кислотне число, мг КОН/г	0
Густина (25°C), кг/м ³	955

2.1.7 Зольний пил

Зольний пил — це побічний продукт високотемпературного спалювання твердого палива на ТЕС, що складається зі сферичних частинок розміром до 60 мкм [196]. Його хімічний склад залежить від типу палива, але може включати силікати, алюмінати, ферити кальцію, а також вільні оксиди кальцію та магнію [196].

Як наповнювач для пластмас (ПЕ, ПП, ПВХ), зольний пил може вводитись у великих концентраціях (до 75 мас. %). Його питома густина 2,1–3,1 г/см³, твердість 3–5,5 за Моосом, а маслоємність (15–30 г/100г) позитивно впливає на в'язкість полімерного розплаву [197].

Використаний у поточній роботі зольний пил походить із Придніпровської ТЕС та має такий склад: SiO₂ – 47–56 мас. %; Al₂O₃ – 18–25 мас. %; Fe₂O₃ + FeO – 14–20 мас. %; CaO – 2–4 мас. %; K₂O – 1,2–3,2 мас. %; TiO₂ – 0,8–1,3 мас. %; MgO – 1,0–1,6 мас. %; Na₂O – 0,2–0,6 мас. %; домішки – інше.

2.1.8. Фосфогіпс

Фосфогіпс — це багатотоннажний промисловий відхід, що утворюється при виробництві фосфатних добрив або фосфорної кислоти з фосфоритної породи. Його вихід становить 4–6 тон на 1 тону P_2O_5 , і значні обсяги фосфогіпсу накопичені у відвалах, становлячи негативний екологічний вплив [198]. У висушеному вигляді фосфогіпс є дрібнодисперсним порошком, схильним до грудкування та злежування при тривалому зберіганні, що ускладнює його відвантаження та дозування. Він також проявляє тиксотропні властивості, розріджуючись під механічним впливом [199].

Фосфогіпс, особливо свіжоутворений, є "кислим" і проявляє високу корозійну активність. Його основний компонент (понад 90 %) — кристали $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Середній вміст шкідливих фторидів становить 0,05–0,4 %, а вологість — 30–40 %. Домішки, такі як продукти недорозкладання сировини, залишки фосфорної кислоти та фториди, сумарно не перевищують 1,5–2 % P_2O_5 та фтору [200].

У цьому дослідженні використано фосфогіпс із ЗАТ «Дніпровський завод мінеральних добрив» (м. Кам'янське) з таким типовим складом (у перерахунку на оксиди): CaO – 30–36 мас. %; SO_3 – 34–39 мас. %; P_2O_5 – 1,3–3,0 мас. %; SiO_2 – 2,3–10 мас. %; Fe_2O_3 – 3,4–5,1 мас. %; H_2O крист. – 19,4–19,6 мас. %; домішки – інше. Слід зазначити, що елементний склад фосфогіпсу може відрізнятися залежно від місця відвалу та впливу природних факторів під час зберігання.

2.1.9. Епоксидована соєва олія

Епоксидована соєва олія (ЕСО) — це світло-жовта в'язка масляниста рідина, майже нерозчинна у воді, але розчинна в більшості органічних

розчинників. Вона володіє відмінною термічною та світлостійкістю, водо- та маслостійкістю, а також надає продуктам гарну механічну міцність, стійкість до атмосферних впливів та електричні властивості, при цьому будучи нетоксичною. ЕСО сумісна з різними полімерними покриттями і, діючи як акцептор кислоти, забезпечує стабільність рецептур, покращену адгезію, міцність, блиск та хімічну стійкість плівок [201].

У цьому дослідженні використовувалася епоксидована соєва олія марки Ерохол D65 виробництва FACI S.p.A (Італія). Її характеристики наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Характеристики епоксидованої соєвої олії марки Ерохол D65

Найменування показника	Значення
Кислотне число, мг КОН/г	0,14
Оксиранове число, г O ₂ /100г	6,8
Вологість, %	0,25
Йодне число, г I ₂ /100г	1,4
В'язкість 25°C, сПс	450
Зовнішній вигляд	Прозора жовтувата рідина

Епоксидована соєва олія Ерохол D65 екологічна, повністю безпечна для навколишнього середовища, дозволяється контакт з харчовими продуктами.

2.1.10 УФ-стабілізатори

УФ-стабілізатори — це добавки, призначені для захисту полімерних виробів від ультрафіолетового (УФ) випромінювання та окиснення. Вони містять високу концентрацію антиоксидантів та активних речовин типу HALS (стабілізатори на основі стерично ускладнених амінів) або УФ-абсорберів. Ці компоненти ефективно запобігають фотодеструкції пластмас,

забезпечуючи збереження кольору та збільшуючи стійкість до вицвітання під тривалим впливом сонячних променів [183].

В роботі використовувався висококонцентрований УФ-стабілізатор синергічної дії на основі поліетилену низької густини, виробництва Rotalia Masterbatches & Additives (Польща). Його характеристики наведено в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Характеристики висококонцентрованого УФ стабілізатора Rotalia

Найменування показника	Значення
Склад	Поліетилен + УФ-стабілізатор тип HALS + антиоксиданти
Густина (23°C), кг/м ³	910
ППР (2,16 кг, 190°C), г/10хв	3,0
Термостійкість, °C	300
Світлостійкість (в шкалі 1 – 8)	8
Зовнішній вигляд	Гранула 3–5 мм

2.1.11 Барвники на основі оксиду заліза

Барвники на основі оксидів заліза — це одні з найпоширеніших кольорових пігментів у світі. Вони доступні в основних кольорах — жовтому (FeOОН), чорному (Fe₃O₄) та червоному (Fe₂O₃), а також у змішаних відтінках, таких як помаранчевий, бежевий та коричневий. Синтетичні пігменти оксиду заліза, що виробляються промисловими методами (твердотільні процеси, осадження, процес Лаукс), відзначаються чистим відтінком, стабільною якістю та високою барвною здатністю порівняно з природними аналогами. Ці пігменти широко використовуються в будівельних матеріалах, фарбах, покриттях та, зокрема, у пластмасах [202].

У поточній роботі були застосовані залізоокисні барвники виробництва Zhejiang Greefield Industry Co., Ltd (Китай): червоний марки 130, жовтий марки 313 та чорний марки 330. Їхні детальні характеристики наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Характеристики барвників на основі оксиду заліза

Найменування показника	Значення		
	Червоний 130	Жовтий 313	Чорний 330
Вміст Fe ₂ O ₃ , %	≥ 96,5	≥ 0	≥ 92,0
Частка летючих речовин при 105°C, %	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
Водорозчинні солі, %	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3
Залишок на ситі 45 мкм, %	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,3
Значення рН	4,5 – 8,0	6,0 – 7,5	5,5 – 8,0
Поглинання масла, г/100г	15 - 25	25 - 35	15 - 25
Густина, кг/м ³	5050	4100	4800
Насипна густина, кг/м ³	1100	600	1000
Переважний розмір часток, мкм	0,17	0,1	0,2

2.2 Методика приготування зразків для дослідження

Приготування зразків деревинно-полімерного композиту включало такі основні етапи: підготовка сировини, змішування, грануляція, екструзія терасної дошки, охолодження, нарізка та фінішна обробка.

На підготовчій стадії проводили контроль якості та, за потреби, попереднє сушіння компонентів. Зважування та дозування сировини (загальною масою 150 кг) здійснювали на електронних вагах. Далі, за допомогою шнекового завантажувача, компоненти подавалися у лопатевий змішувач Skywinswhl 600/1200. Змішування відбувалося при 800 об/хв

протягом 45–60 хвилин до досягнення температури 100 °С для гарантованого видалення залишкової вологи.

Отримана суміш подавалася у двошнековий гранулятор Skywin SWMSZ-3. Гомогенізація композиційного матеріалу відбувалася при температурах 180–185 °С у різних зонах та обертах шнеків 250–350 об/хв. Гранульований композит завантажувався у біг-беги та транспортувався на лінію екструзії.

Екструзію терасної дошки виконували на двошнековому екструдері KraussMaffei моделі KMD-60. Параметри екструзії включали температури по зонах (125 °С), температуру адаптера (140 °С) та формуючої головки (145 °С). Швидкість обертів шнеків становила 10 об/хв, при навантаженні на головний привід екструдера 80 % (регулювалося обертами дозатора сировини). Вакуум у зоні дегазації не застосовувався. Після виходу з головки екструдат проходив через калібратор та охолоджувальну ванну з температурою води 14–16 °С для остаточного формування.

Сформовану та охолоджену дошку нарізали на задані розміри за допомогою відрізного пристрою. Для покращення зовнішнього вигляду та функціональних властивостей терасну дошку піддавали поверхневій обробці — шліфуванню та ворсуванню. Зразки для подальших досліджень відбиралися з вироблених дощок на початку, всередині та наприкінці партії.

2.3 Методи дослідження

Механічні випробування зразків, технологічні та експлуатаційні властивості визначались стандартними методиками досліджень та випробування пластмас. Статистичну обробку експериментальних даних проводили методами регресивно-кореляційного аналізу. Вимірювання властивостей кожного із зразків повторювалось по п'ять разів, довірчий інтервал отриманих значень складає 0,95.

2.3.1 Визначення густини методом гідростатичного зважування

Густину зразків визначали методом гідростатичного зважування згідно зі стандартом ISO 1183-1. Метод ґрунтується на вимірюванні виштовхувальної сили, що діє на зразок, занурений у рідину відомої густини.

Процедура включала послідовне зважування зразка на аналітичних терезах: спочатку підвішеного на дроті (діаметром до 0,5 мм) у повітрі (m_2), потім — разом з тим самим дротом, зануреного у дистильовану воду при 23 ± 2 °C (m_3). При цьому необхідно було переконатися у відсутності бульбашок повітря на зразку та дроті, а також у тому, що зразок не торкається стінок або дна посудини. Маса дроту в повітрі позначали як m_1 .

Густина зразку розраховується за формулою:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3} * \rho_0$$

де m_1 – маса дротинки на повітрі, г;

m_2 – маса зразку полімеру з дротинкою на повітрі, г;

m_3 – маса зразку полімеру з дротинкою у воді, г;

ρ_0 – густина води при 20 ° C, г/см³.

2.3.2 Визначення міцності при вигині

Міцність при вигині означає здатність матеріалу протистояти пошкодженням під час згинання, тобто максимальне напруження при вигині, яке може витримати матеріал, перш ніж він зазнає руйнівної деформації. Це важливий показник для оцінки опору матеріалу на вигин і широко використовується в будівельній інженерії та матеріалознавстві. У поточній роботі методика визначення міцності при вигині проводилась згідно зі стандартом ISO 178:2019.

Випробування проводилось на розривній машині типу FP-10 (Німеччина) конструкція якої складається з двох паралельних опор та верхньої опори для вигину, яка розташована по центру, між якими

відбувається деформація стандартного зразка. Випробування відбувалось наступним чином. На паралельні опори вільно встановлюється широкою стороною до опор підготовлений зразок (відстань між опорами визначається співвідношенням $L=16h$). Під прямим кутом до зразка прикладається сила, що його вигинає. У момент руйнування зразка на фіксуючому пристрої обладнання фіксується величина прогину і навантаження вигину.

Міцність при вигині (σ_z) в МПа обчислюють за формулою:

$$\sigma_z = \frac{M}{W}$$

де M – згинальний момент, Н*мм; W – момент опору поперечного перерізу зразка, мм³.

Згинальний момент (M) в Н*мм обчислюють за формулою:

$$M = \frac{Pl_v}{4}$$

де P – навантаження вигину, Н; l_v – відстань між опорами, мм.

Момент опору поперечного перерізу зразка (W) в мм³ обчислюють за формулою:

$$W = \frac{b * h^2}{6}$$

де b – ширина зразка, мм; h – товщина зразка, мм.

Звідси:

$$\sigma_z = \frac{3Pl_v}{2bh^2}$$

2.3.3 Визначення ударної в'язкості за Шарпі

Ударна в'язкість за Шарпі визначається згідно зі стандартом ISO 179:2017 для оцінки характеристик пластмас при високих швидкостях деформації. Цей метод передбачає удар маятником по зразку, встановленому на двох опорах. Лінія удару знаходиться посередині між опорами, навпроти надрізу (для зразків з надрізом).

Ударна в'язкість за Шарпі (a) розраховується як робота удару (A), необхідна для руйнування стандартного зразка, віднесена до одиниці площі його поперечного перетину (S), кДж/м²:

$$a=A/S.$$

Випробування проводять на маятниковому копрі. Зразок стандартних розмірів закріплюють на опорах так, щоб удар маятника припадав на його середину. Маятник, падаючи, руйнує зразок і відхиляється на певну висоту. Різниця між початковою та кінцевою висотою підйому маятника показує роботу удару, витрачену на руйнування зразка.

2.3.4 Визначення водопоглинання композиту

Водопоглинання — це здатність композиту вбирати й утримувати воду. Його визначають як відношення маси поглинутої води до маси сухого зразка.

Визначення проводиться згідно зі стандартом ISO 62:2008. Зразок матеріалу спочатку висушують до постійної маси та точно зважують (m_1). Потім його занурюють у дистильовану воду на 24 години при $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Після вилучення з води зразок витирають від надлишкової вологи та знову зважують (m_2).

Водопоглинання композиту (W_m) обчислюється за формулою:

$$W_m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100\%$$

де W_m – водопоглинання, мас. %; m_1 – маса зразка до занурення у воду; m_2 – маса зразка після 24 годин перебування зразку у воді.

2.3.5 Методика визначення технологічної усадки

Усадка — це зменшення розмірів відформованого виробу при охолодженні. Вона визначається як різниця між розміром форми при кімнатній температурі та розміром готового виробу через 16 годин після його

отримання (згідно з DIN 16901). Цей релаксаційний процес зумовлений орієнтаційними та кристалізаційними процесами під час формування і залежить від багатьох конструктивних та технологічних факторів.

Технологічна усадка (S) розраховується за формулою:

$$S = \frac{D - B}{D} * 100\%$$

де: D – ширина формуючої порожнини екструзійної головки; B – ширина сформованої дошки через 16 годин після екструзії. Вимірювання проводились штангенциркулем з точністю до 0,01 мм.

2.3.6 Визначення коефіцієнту лінійного розширення

Лінійне розширення-стиснення — це універсальне явище, притаманне всім агрегатним станам речовини. Зі збільшенням температури зростає амплітуда коливань атомів/молекул, що призводить до збільшення об'єму та розмірів матеріалу. Для виробів з ДПК це означає збільшення розмірів при високих температурах і зменшення при низьких.

Коефіцієнт лінійного розширення-стиснення (k) розраховується за формулою:

$$k = \Delta L / (L * \Delta T),$$

де ΔL – це розширення або стиснення матеріалу в температурному інтервалі ΔT , L – вихідний розмір матеріалу на початку температурного інтервалу.

Вимірювання коефіцієнту лінійного термічного розширення проводили згідно з ASTM D 696 за допомогою дилатометра з кварцовим штовхачем. Зразок (50–125 мм) поміщали в трубку, де одним кінцем він прилягав до пружинного штовхача у циліндричному термостаті. Рух зразка, спричинений зміною температури, фіксувався індикатором. Температуру зразка вимірювали пірометром з точністю до 0,1 °C. Вимірювання проводилися

спочатку при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (контрольоване середовище), а потім при $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (у термошафі).

2.3.7 Інфрачервона спектроскопія

Усі спектри записували за допомогою спектрометра Shimadzu IRSpirit-X методом порушеного повного внутрішнього відбиття за допомогою приставки QATR-S (виробництво фірми Specac), оптичний елемент – алмаз, кут падаючого променя $\theta=45^{\circ}$. Діапазон $4000\text{--}350\text{ cm}^{-1}$, кількість сканів – 24, роздільна здатність – 4 cm^{-1} . Фон записувався відносно оптичного елементу без зразку.

2.3.8 Мікроскопічний аналіз

Мікроскопічний аналіз було проведено для оцінки морфології, гомогенності та дисперсії компонентів у структурі деревинно-полімерних композитів. Дослідження проводили за допомогою мікротвердометра ПМТ-3, оснащеного оптичною системою з кратністю $\times 64$. Зображення отримували з репрезентативних ділянок кожного зразка та аналізували для оцінки дисперсії деревних частинок у полімерній матриці, наявності агломератів, якості змочування волокон, а також присутності мікропорожнин та інших структурних дефектів. Отримані зображення оброблялися за допомогою програмного забезпечення ImageJ для якісного аналізу.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі охарактеризовано матеріали та методи, застосовані у даній роботі. Детально описано досліджувані об'єкти, а саме: вторинний поліетилен високої густини, деревинне борошно, кальцит, поліетилен із вмістом малеїнового ангідриду, стеаринова кислота, поліетиленовий віск,

зольний пил, фосфогіпс, епоксидована соєва олія, УФ-стабілізатор та барвники на основі оксиду заліза. Ці компоненти обрано з огляду на їх фізико-хімічні властивості, придатність для виробництва деревинно-полімерних композитів та потенціал покращення кінцевих характеристик виробів.

Методика приготування зразків була адаптована до специфіки використаних матеріалів, що забезпечило однорідність композитів та їх відповідність технологічним вимогам. У дослідженні застосовано сучасні методи аналізу, зокрема: визначення густини матеріалу методом гідростатичного зважування, випробування міцності при вигині та на ударну в'язкість за методом Шарпі, оцінка водопоглинання, дослідження технологічної усадки, а також визначення коефіцієнта лінійного розширення.

Отримані результати дозволяють встановити вплив різних компонентів на ключові фізико-механічні властивості кінцевого композиту. Зокрема, аналіз показав, що варіація складу полімерної матриці, наповнювачів та допоміжних добавок (модифікаторів, стабілізаторів) суттєво впливає на міцність, гнучкість, а також термічну та хімічну стійкість матеріалу. Розуміння цих взаємозв'язків є вирішальним для оптимізації рецептур ДПК, забезпечуючи збалансовані властивості, необхідні для конкретних умов експлуатації [212 - 215]. Аналіз коефіцієнтів усадки, лінійного розширення, а також показників ударної в'язкості та водопоглинання дає змогу прогнозувати поведінку композитів за різних умов використання та підвищувати їх довговічність [220].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Вплив стеаринової кислоти на властивості деревинно-полімерних композитів.

Важливим аспектом у виробництві високонаповнених композитів є зниження коефіцієнта тертя під час змішування та формування композиції на екструзійному обладнанні. Цього можна досягти шляхом використання мастильних речовин, таких як стеарати металів [97] та кислі жирні ефіри [203]. Однак введення цих інгредієнтів, навіть за умови удосконалення параметрів технології екструзії, може призвести до суттєвого погіршення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей композиційного матеріалу [97]. Тому пошук ефективних мастильних добавок і оптимізація їх вмісту є актуальним завданням.

Однією з ключових технологічних проблем при переробці високонаповнених деревинно-полімерних композицій є підвищена в'язкість розплаву, що ускладнює його транспортування, змішування та формування. Високий вміст деревного борошна призводить до зниження текучості, нерівномірного розподілу наповнювача, а також зростання енергоспоживання під час екструзії. Це, своєю чергою, може спричинити перевантаження шнека, нестабільність процесу, дефекти поверхні виробу та зниження продуктивності. Крім того, деревинні частинки мають гідрофільну природу, що ускладнює їх сумісність з гідрофобною полімерною матрицею, знижуючи адгезію між фазами. Це може негативно впливати на механічну міцність та довговічність готових виробів.

У даному підрозділі досліджено вплив стеаринової кислоти у якості мастильної речовини у деревинно-полімерному композиті на основі вторинного поліетилену високої густини та дубового борошна на технологічні, фізико-механічні й експлуатаційні властивості ДПК.

У якості об'єкту дослідження використовувалась композиція такого складу:

- вторинний поліетилен високої густини (ПТР = 0,6 г/10 хв) – 30 мас.%;
- деревинне борошно марки М 200 – 54 мас. %;
- кальцит – 11 мас. %;
- Поліетилен з прищепленим малеїновим ангідридом – 0,85 мас. %;
- поліетиленовий віск – 1,1 мас. %;
- УФ стабілізатор та барвники – інше.

Вміст стеаринової кислоти у композиції змінювали від 0 до 2 мас.%.

Оскільки всі параметри, що впливають на в'язкість розплаву, в решті-решт мають відповідний вплив на крутний момент, для аналізу змащувального ефекту стеаринової кислоти під час екструзії терасної дошки було оцінено за зміною крутного моменту головного приводу екструдера. Крутний момент, необхідний для обертання шнека екструдера, залежить від швидкості шнека, ступеня заповнення циліндра екструдера і в'язкості розплаву в каналі шнека і головки [204]. Залежність крутного моменту двигуна екструдера від вмісту стеаринової кислоти в композиційному матеріалі показано на рисунку 3.1.

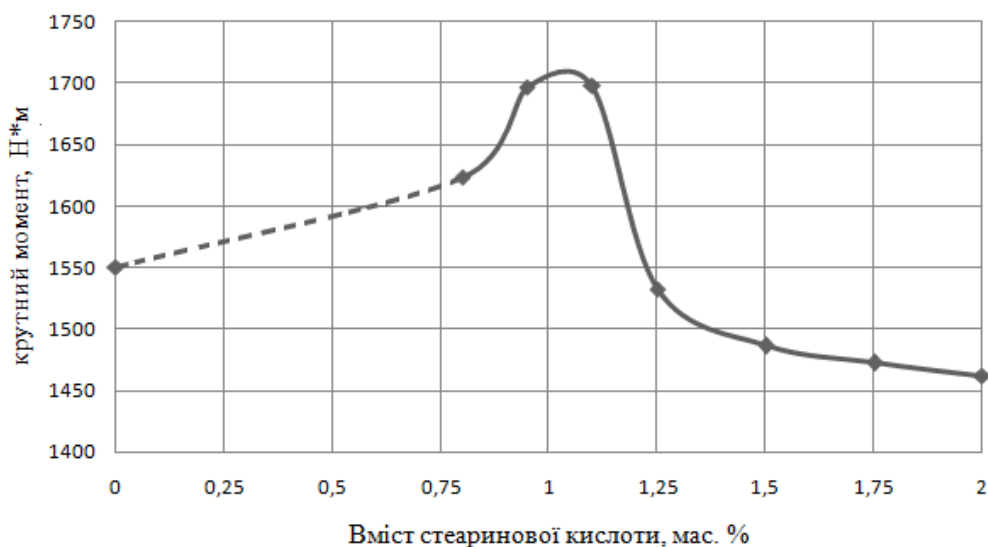


Рисунок 3.1 – Залежність крутного моменту двигуна екструдера від вмісту стеаринової кислоти

Аналіз даних рисунка 3.1 показує, що при низькому вмісті стеаринової кислоти (до 0,9 мас. %) крутний момент зростає, що вказує на збільшення в'язкості розплаву. Однак, при концентрації стеаринової кислоти понад 1,1 мас. % спостерігається зниження крутного моменту. Це свідчить про зменшення в'язкості розплаву та опору руху композиційного матеріалу в матеріальному циліндрі. Збільшення вмісту стеаринової кислоти понад певний поріг призводить до утворення надлишкового шару мастила, що полегшує ковзання матеріалу та зменшує необхідне зусилля для його переміщення. Подібні ефекти спостерігалися в інших дослідженнях полімерних композитів [205]. Важливо знайти оптимальну концентрацію стеаринової кислоти для досягнення бажаного балансу між в'язкістю розплаву та легкістю переробки ДПК.

Таким чином, стеаринова кислота може бути ефективною мастильною речовиною в деревинно-полімерних композитах при вмісті понад 1,25 мас. %. Це покращує продуктивність екструзії на 7–11 % при використанні стеаринової кислоти в кількості 1,1–2 мас. %. Слід також зазначити, що при вмісті стеаринової кислоти в композиції вище 1,5 мас. % крутний момент головного приводу екструдера дещо знижується.

Зі збільшенням вмісту стеаринової кислоти до 1,1 мас. % тиск у циліндрі екструдера також зростає внаслідок підвищення в'язкості розплаву, що підтверджується збільшенням крутного моменту. Це, своєю чергою, спричинило розбухання екструдату на виході з формуючої головки. Тому зразки для подальших випробувань властивостей композиту були виготовлені при крутному моменті 1625 Н·м, що було досягнуто регулюванням швидкості екструзії.

Матеріали ДПК широко застосовуються в будівництві та піддаються значним механічним навантаженням. Отже, міцність при вигині та ударна в'язкість є критично важливими показниками для оцінки якості цих композитів. Вплив вмісту стеаринової кислоти на міцність при вигині та

ударну в'язкість за Шарпі (на зразках з надрізом) представлено на рисунках 3.2 та 3.3 відповідно.

Аналіз даних, наведених на рисунку 3.2, показує, що збільшення вмісту стеаринової кислоти до 1,1 мас. % підвищує межу міцності при вигині матеріалу з 40,9 МПа до 51,3 МПа (збільшення на 20 %). Однак, при вмісті стеаринової кислоти понад 1,25 мас. % міцність при вигині знижується до рівня вихідного композиційного матеріалу. Подібна тенденція спостерігається і для ударної в'язкості за Шарпі на зразках з надрізом (рисунок 3.3): її значення зростає до 11,9 кДж/м² (збільшення на 37 %) при вмісті стеаринової кислоти до 1,1 мас. %, а потім знижується при подальшому збільшенні концентрації понад 1,25 мас. %.

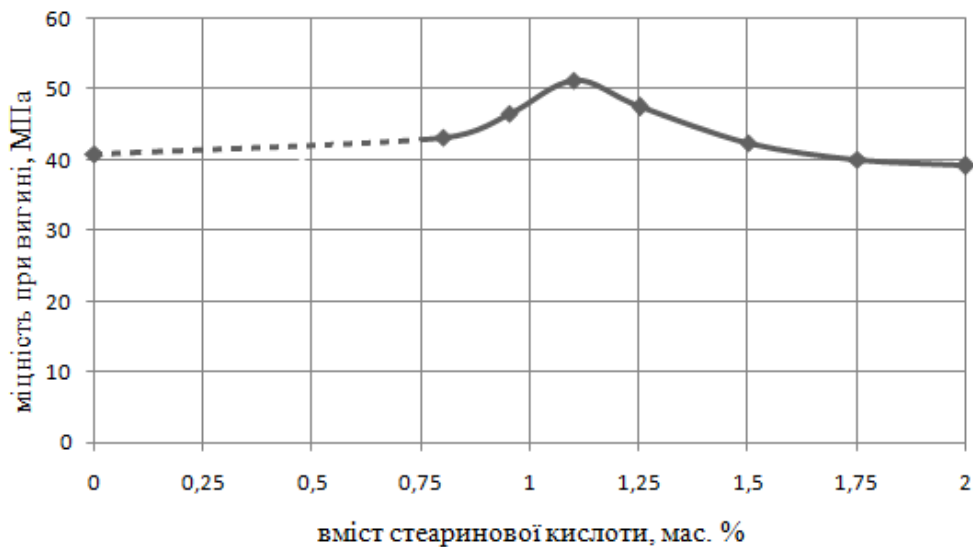


Рисунок 3.2 – Залежність міцності при вигині композиту від вмісту стеаринової кислоти

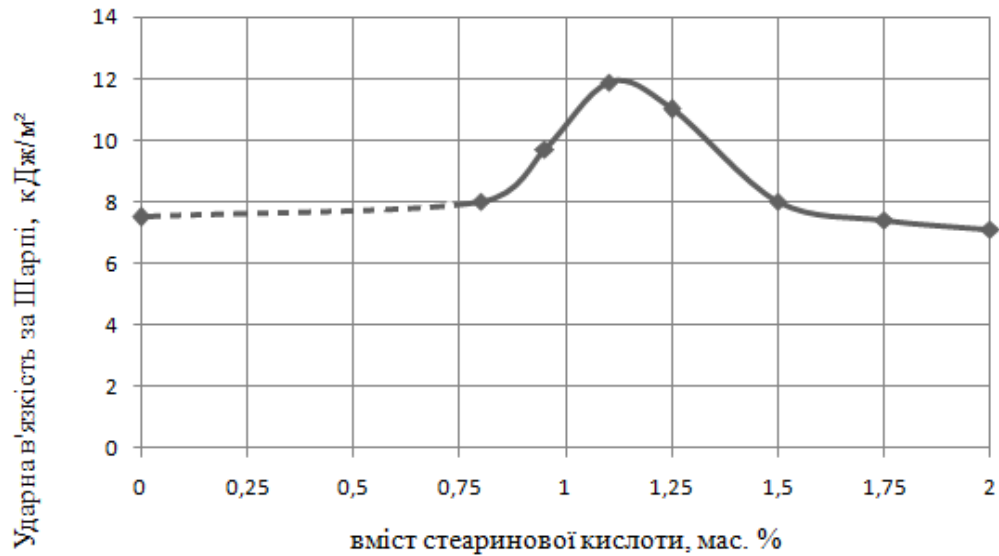


Рисунок 3.3 – Залежність ударної в'язкості за Шарпі (на зразках з надрізом) композиту від вмісту стеаринової кислоти

Ці зміни фізико-механічних властивостей можна пояснити тим, що при вмісті 0,8–1,25 мас. % стеаринова кислота діє як апрет або компатибілізатор. Вона покращує адгезію між целюлозою деревинної маси та полімерною матрицею, знижуючи внутрішні напруження між фазами під час навантаження. При подальшому збільшенні вмісту стеаринової кислоти її надлишок функціонує як мастильна речовина, що приводить до зниження в'язкості розплаву та тиску в матеріальному циліндрі екструдера. Це порушує монолітну структуру композиту, повертаючи його фізико-механічні властивості до рівня вихідного композиту без стеаринової кислоти.

Рисунок 3.4 демонструє залежність коефіцієнта лінійного термічного розширення композиту від вмісту стеаринової кислоти.

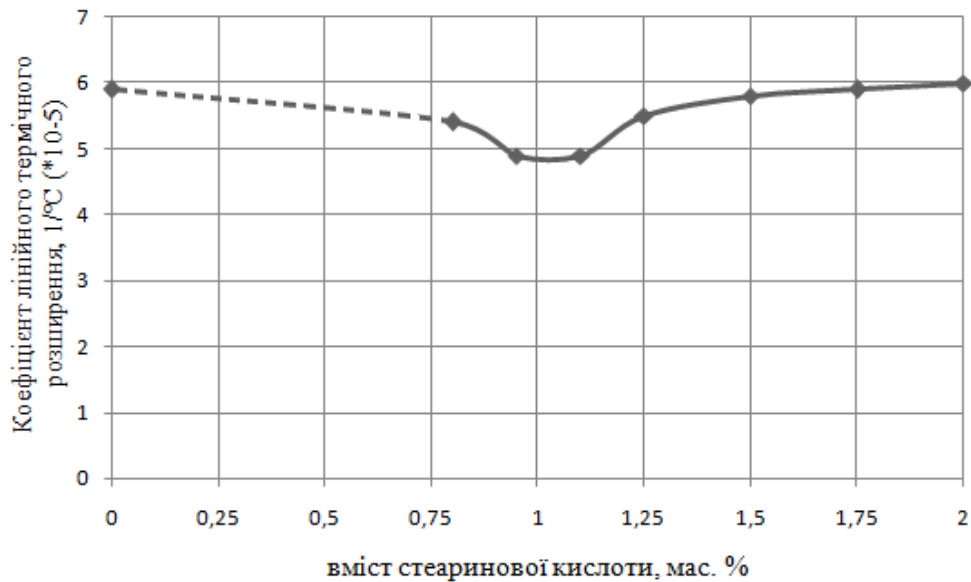


Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнту лінійного термічного розширення композиту від вмісту стеаринової кислоти

З даних рисунка 3.4 видно, що збільшення вмісту стеаринової кислоти в композиті до 1 мас. % зменшує коефіцієнт лінійного термічного розширення з $5,9 \times 10^{-5}$ до $4,9 \times 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$ (зниження на 20 %). Подальше збільшення вмісту стеаринової кислоти повертає цей коефіцієнт до рівня вихідного композиту. Це свідчить про те, що низький вміст стеаринової кислоти сприятливо впливає на експлуатаційні характеристики виробів з деревинно-полімерних композитів. Таку тенденцію можна пояснити тим, що стеаринова кислота виступає в ролі регулятора кристалізації полімерної матричної фази. При невеликих концентраціях вона формує поверхневі мономолекулярні шари на межі розділу між деревним наповнювачем і полімером, покращуючи адгезію та інтеграцію цих двох фаз. Це значно зменшує диспропорції в термічному розширенні між полімером та деревним борошном, що й спричиняє зниження коефіцієнта лінійного термічного розширення. Крім того, стеаринова кислота впливає на процес кристалізації полімеру, зменшуючи кількість центрів зростання кристалів та покращуючи кристалізаційну періодичність. При збільшенні кількості стеаринової кислоти понад оптимальний рівень відбувається перекриття поверхонь адгезії, що

призводить до формування більш хаотичної структури полімерної фази. Це, своєю чергою, повертає термічні характеристики до початкового рівня.

Однією з ключових властивостей деревинно-полімерних композитів, що забезпечує їх довговічність та стійкість до мікробіологічної деградації, є відносно низьке водопоглинання порівняно з деревиною. Водопоглинання ДПК залежить від їх пористості, яка, у свою чергу, формується вологістю сировини та умовами обробки, зокрема локальним перегрівом. Вплив вмісту стеаринової кислоти на водопоглинання ДПК ілюструє рисунок 3.5.

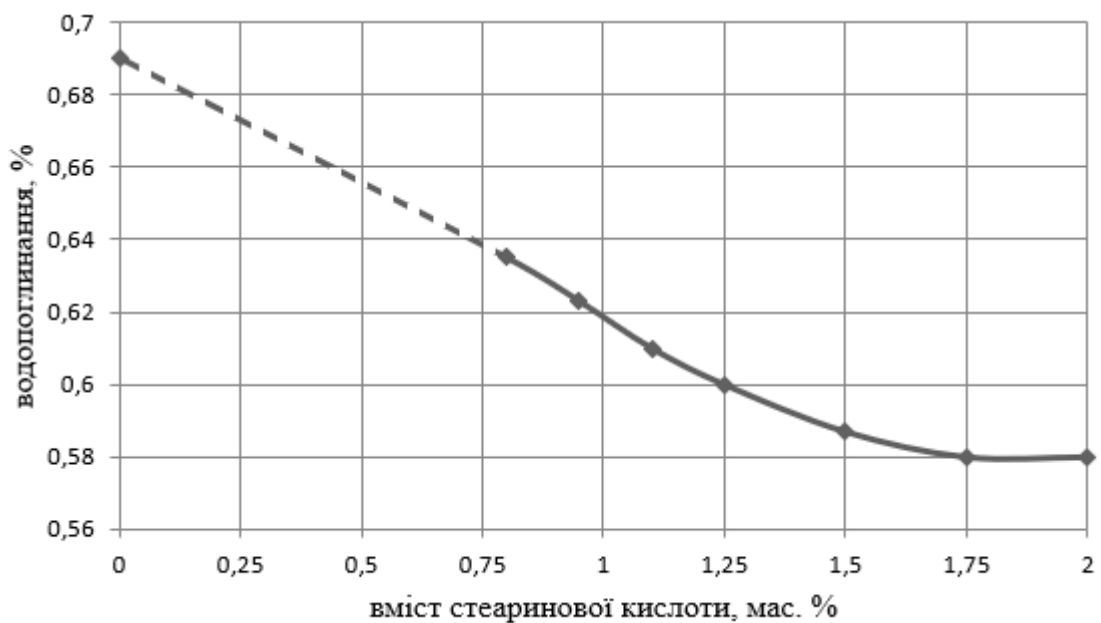


Рисунок 3.5 – Залежність водопоглинання композиту від вмісту стеаринової кислоти

Як показано на рисунку 3.5, введення понад 1,1 мас. % стеаринової кислоти до ДПК знижує водопоглинання з 0,69 % до 0,58 %. Подальше збільшення її вмісту в композиті не призводить до суттєвих змін у водопоглинанні. Це пояснюється гідрофобною природою стеаринової кислоти: її міграція до поверхні композиту утворює мікроплівку, що ефективно блокує проникнення молекул води. При концентрації стеаринової кислоти 1,5 мас. % і вище, подальше потовщення цієї плівки не впливає

значно на водопоглинання, оскільки більша частина поверхні вже покрита достатнім гідрозахисним шаром.

Для детального вивчення впливу стеаринової кислоти на внутрішню структуру деревинно-полімерних композитів було проведено мікроскопічний аналіз зразків з різним вмістом цієї добавки. На рисунку 3.6 представлено мікроскопічне зображення ДПК із вмістом стеаринової кислоти 0,8 мас. %, тоді як на рисунку 3.7 – зразок із вмістом 1,75 мас. % стеаринової кислоти. Візуальний аналіз цих зображень виявляє помітні відмінності в морфології та гомогенності композитів.

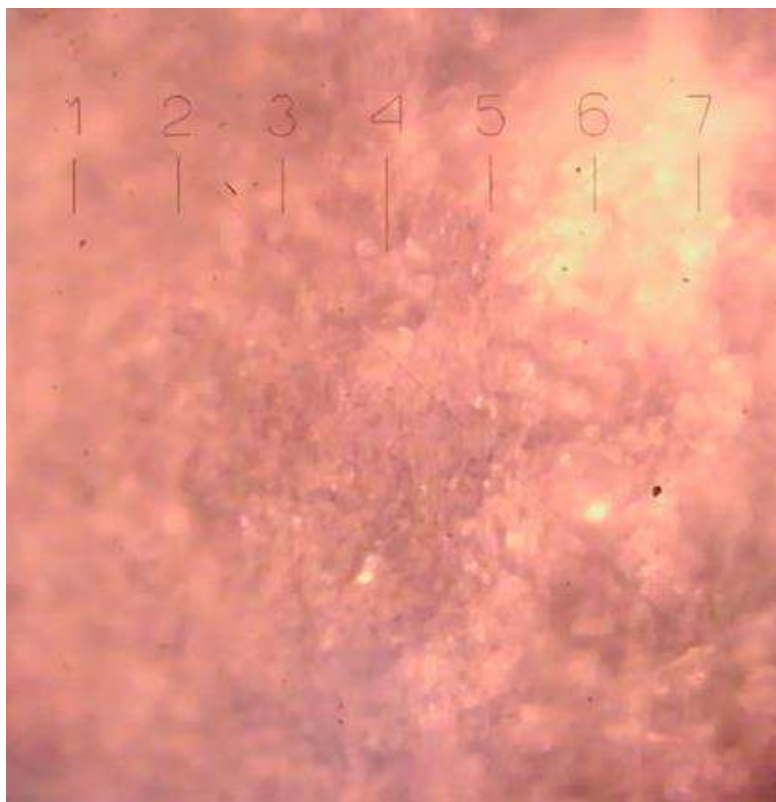


Рисунок 3.6 – Мікроскопічне зображення ДПК із вмістом стеаринової кислоти 0,8 мас. % (ціна поділки 0,3 мкм)



Рисунок 3.7 – Мікроскопічне зображення ДПК із вмістом стеаринової кислоти 1,75 мас. % (ціна поділки 0,3 мкм)

Рисунок 3.6 демонструє значно більш однорідну та гладку мікроструктуру порівняно зі зразком на рисунку 3.7. У композиті з 0,8 мас. % стеаринової кислоти спостерігається краща дисперсність деревинних частинок у поліетиленовій матриці. Це свідчить про ефективне змочування поверхні деревини полімером та мінімальну агломерацію деревних волокон. Така рівномірна структура є бажаною, оскільки вона зазвичай корелює з покращеними фізико-механічними властивостями матеріалу.

На противагу цьому, рисунок 3.7, що відповідає композиту з вищим вмістом стеаринової кислоти (1,75 мас. %), характеризується вираженою плямистістю, неоднорідністю та грубою текстурою. На ньому простежуються області більшої концентрації часток або, можливо, порожнин, що свідчить про гіршу дисперсію та потенційну агломерацію наповнювача.

Погіршення мікроструктури при підвищеній концентрації підтверджує вищезгадані фактори. Надлишок стеаринової кислоти може призвести до її

"випотівання" або міграції на поверхню міжфазного розподілу, створюючи надмірно товстий шар. Цей шар знижує адгезію між деревинними волокнами та полімерною матрицею замість її покращення, що може спричинити утворення мікропорожнин або слабких зон. Крім того, надмірна кількість лубриканта надмірно знижує в'язкість полімерного розплаву. Це негативно позначається на процесі перемішування та ущільнення матеріалу під час переробки, що призводить до утворення неоднорідностей.

Таким чином, мікроскопічний аналіз чітко вказує на існування оптимальної концентрації стеаринової кислоти для даної системи ДПК. Хоча добавка ефективно покращує дисперсію та гомогенність, її надмірне введення призводить до деградації мікроструктури, що, у свою чергу, негативно впливає на кінцеві фізико-механічні та експлуатаційні характеристики композитного матеріалу.

Для розуміння механізмів впливу стеаринової кислоти на властивості деревинно-полімерних композитів на основі поліетилену високої густини було проведено ІЧ-спектроскопічний аналіз зразків з різним вмістом стеаринової кислоти: 0,8 мас. %, 1,25 мас. % та 1,7 мас. %. ІЧ-спектри зразків представлені на рисунку 3.8, де наведено накладені спектри для візуалізації змін.

На всіх отриманих ІЧ-спектрах спостерігаються характерні смуги, притаманні компонентам ДПК:

- смуги поліетилену високої густини (ПЕВГ): Інтенсивні смуги валентних коливань (C-H) зв'язків метиленових груп (CH)₂ спостерігаються при 2917 см⁻¹ (асиметричні) та 2849 см⁻¹ (симетричні). Деформаційні коливання (CH)₂ груп проявляються при 1473 см⁻¹ та 1463 см⁻¹, а маятникові коливання – при 730 см⁻¹ та 720 см⁻¹, що є індикаторами кристалічності ПЕВГ.

- смуги деревини: Широка та інтенсивна смуга в діапазоні 3300–3400 см⁻¹ відповідає валентним коливанням гідроксильних груп (OH) целюлози, геміцелюлоз та лігніну. Смуги валентних коливань (C-O) зв'язків

целюлози та геміцелюлоз проявляються в області 1030–1050 cm^{-1} . Наявність смуг ароматичного скелета лігніну при 1600 cm^{-1} , 1510 cm^{-1} та 1460 cm^{-1} також підтверджує присутність деревного наповнювача.

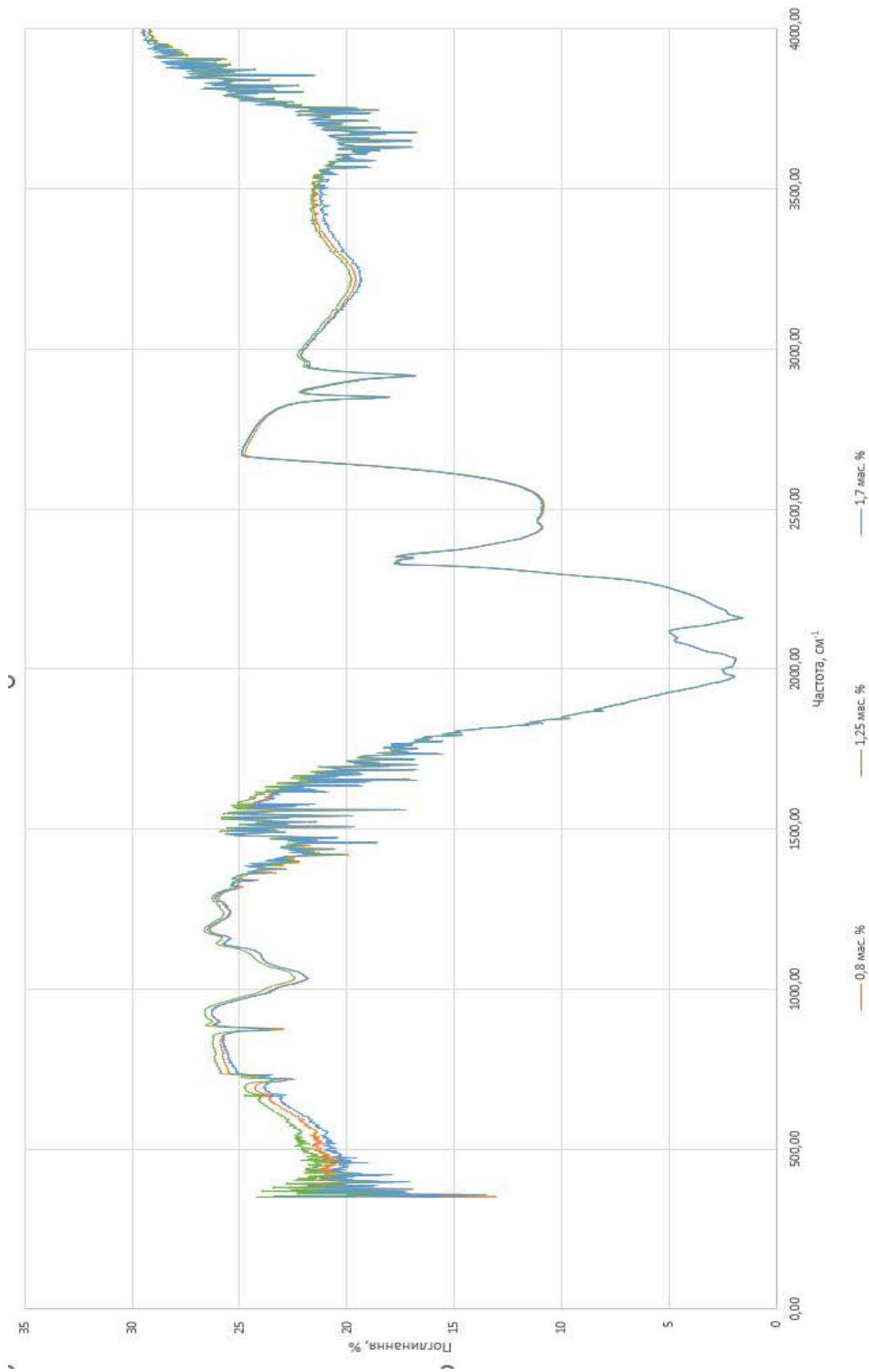


Рис 3.8. ІЧ спектри деревинно-полімерних композитів із різним вмістом стеаринової кислоти

- смуги стеаринової кислоти: Присутність стеаринової кислоти чітко підтверджується інтенсивною смугою валентних коливань карбонільної групи (C=O) при 1700–1710 cm^{-1} . Крім того, стеаринова кислота також вносить внесок у смуги валентних коливань (C-H) зв'язків у діапазоні 2800–3000 cm^{-1} за рахунок свого довгого вуглеводневого ланцюга.

Порівняльний аналіз ІЧ-спектрів зразків з різним вмістом стеаринової кислоти дозволив виявити ключові зміни, що корелюють з механізмом дії цього модифікатора:

- смуга карбонільної групи стеаринової кислоти (C=O), у діапазоні 1700–1710 cm^{-1} . Спостерігається чітке та послідовне збільшення інтенсивності даної смуги при переході від 0,8 мас. % до 1,25 мас. % та далі до 1,7 мас. % стеаринової кислоти. Це пряма індикація пропорційного зростання концентрації стеаринової кислоти в композиті. Незначні зсуви або зміни форми цієї смуги можуть вказувати на утворення водневих зв'язків між карбоксильною групою стеаринової кислоти та гідроксильними групами деревини.

- смуга гідроксильних груп деревини (OH), 3300–3400 cm^{-1} . При додаванні стеаринової кислоти від 0,8 мас. % до 1,25 мас. % спостерігається помітне зменшення інтенсивності (збільшення пропускання) та/або зміна форми широкої смуги гідроксильних груп деревини. Це свідчить про ефективну взаємодію стеаринової кислоти з полярними (OH) групами поверхні деревинних часток, що призводить до їх екранування або утворення нових водневих зв'язків. Така взаємодія сприяє покращенню змочування деревного наповнювача полімерною матрицею та підвищенню адгезії на межі розділу фаз, що є ключовим для підвищення міцності та гідрофобності композиту. При подальшому збільшенні вмісту стеаринової кислоти до 1,7 мас. %, суттєвих додаткових змін в інтенсивності або формі смуги (OH) груп деревини порівняно зі зразком з 1,25 мас. % не спостерігається. Це свідчить про те, що поверхня деревинних часток досягає стану насичення

стеариноювою кислотою, і подальша її кількість вже не бере активної участі в покращенні міжфазної взаємодії.

Також спостерігається послідовне збільшення інтенсивності цих смуг в діапазоні частоти 2900 см^{-1} зі зростанням концентрації стеариноювою кислоти (0,8 мас. % < 1,25 мас. % < 1,7 мас. %). Це пояснюється додатковим внеском (С-Н) зв'язків довгого вуглеводневого ланцюга стеариноювою кислоти.

Результати ІЧ-спектроскопії узгоджуються з раніше отриманими даними про механічні властивості та водопоглинання ДПК. Оптимальний вміст стеариноювою кислоти (1,25 мас. %) характеризується максимально вираженими ознаками ефективною хімічною взаємодією між стеариноювою кислотою та гідроксильними групами деревини, що проявляється у помітних змінах у смугі (ОН) груп. Це свідчить про досягнення оптимальної сумісності компонентів, що призводить до покращення міцності, жорсткості та зниження водопоглинання композиту. При надмірному вмісті стеариноювою кислоти (1,7 мас. %) подальше покращення взаємодії не відбувається, оскільки поверхня наповнювача вже насичена. Надлишок стеариноювою кислоти, яка не бере участі в модифікації поверхні деревини, може діяти як низькомолекулярний пластифікатор або внутрішнє мастило в полімерній матриці. Це призводить до розпушення полімерної структури, зниження адгезії між фазами та, як наслідок, погіршення механічних властивостей композиту.

Таким чином, ІЧ-спектроскопічний аналіз підтверджує, що стеаринова кислота виконує роль ефективного сумісника в деревинно-полімерних композитах, покращуючи міжфазну адгезію. Проте, її ефективність залежить від концентрації, і надлишок модифікатора може мати зворотний ефект, погіршуючи кінцеві властивості матеріалу.

Висновки до підрозділу 3.1

Виконані дослідження з модифікації деревинно-полімерних композитів (ДПК) на основі вторинного поліетилену низького тиску стеариноювою кислотою показали наступне:

1. Додавання понад 1,1 мас. % стеаринової кислоти суттєво покращує технологічний процес екструзії композиту. Це проявляється у зниженні крутного моменту головного приводу екструдера, що призводить до зменшення споживання електроенергії, зниження експлуатаційних витрат та підвищення енергоефективності. Стабілізація роботи екструдера позитивно впливає на якість кінцевого продукту та загальну продуктивність [217].

2. ІЧ-спектроскопічний аналіз підтвердив, що стеаринова кислота діє як ефективний сумісник, покращуючи міжфазну адгезію між полімерною матрицею та деревним наповнювачем. Це візуалізується чітким зростанням інтенсивності смуг C=O ($1700\text{--}1710\text{ см}^{-1}$) та C-H (2900 см^{-1}) зі збільшенням її концентрації, а також помітним зниженням інтенсивності смуги гідроксильних груп деревини ($3300\text{--}3400\text{ см}^{-1}$) при оптимальних концентраціях стеаринової кислоти, що свідчить про ефективну взаємодію з полярними групами деревини.

3. Оптимальний вміст стеаринової кислоти для ДПК становить 1,1–1,3 мас. %. Цей діапазон є ключовим для досягнення найкращих фізико-механічних властивостей, таких як міцність на вигин та ударна в'язкість за Шарпі. ІЧ-спектроскопія підтверджує, що в цих межах стеаринова кислота насичує поверхню деревини, покращуючи розподіл компонентів та знижуючи внутрішню напругу. Однак, перевищення 1,3 мас. % стеаринової кислоти може негативно впливати на адгезію та знижувати характеристики матеріалу [212].

4. Розроблені ДПК демонструють значний потенціал для успішного застосування завдяки їхнім високим механічним характеристикам, низькому коефіцієнту лінійного розширення та низькому водопоглинанню. Ці

властивості роблять їх придатними для використання в зовнішніх конструкціях. У поєднанні з низькою вартістю виробництва, ці композити є конкурентоспроможними на ринку сучасних матеріалів [216].

3.2 Вплив епоксидованої соєвої олії на властивості деревинно-полімерних композитів на основі вторинного поліетилену високої густини

Використання деревини як наповнювача в полімерах має свої особливості, головною з яких є несумісність гідрофільної природи деревних волокон (завдяки гідроксильним групам целюлози та геміцелюлози) та гідрофобної природи більшості термопластів, що застосовуються в деревинно-полімерних композитах. Ця несумісність призводить до агломерації деревних волокон під час компаундування. Як наслідок, дисперсія деревини в полімерній матриці може бути недостатньою, що знижує її армуючий ефект [58].

Для покращення адгезії на межі розділу фаз «полімер-деревинний наповнювач» традиційно застосовують апрети. Їх функціональні групи взаємодіють з поверхневими функціональними групами деревного наповнювача [72]. У ДПК використовується широкий спектр апретуєчих речовин, зокрема силікати, титанати, органічні кислоти, хлортриазини, ангідриди кислот, ізоціанати, акрилати, аміди, іміди, силани, полімерні сполуки тощо [12].

Епоксидовану соєву олію отримують хімічною модифікацією соєвої олії. Вона вирізняється високою адгезією, термостійкістю та низькою летючістю. Її застосування в композитах зумовлене екологічною безпекою та потенціалом підвищення механічних властивостей готових матеріалів.

Дослідники зазначають, що введення епоксидованої соєвої олії може позитивно впливати на взаємодію матриці та армуючих компонентів, що, у свою чергу, покращує сприйняття матеріалу до температурних коливань. Важливо підкреслити, що епоксидовані олії здатні поліпшувати термічні

характеристики композитів, але це залежить від їхньої концентрації в матриці [206].

Метою даного дослідження є вивчення впливу використання епоксидованої соєвої олії на фізичні, механічні та експлуатаційні характеристики ДПК на основі переробленого поліетилену високої густини. Епоксидована соєва олія була обрана завдяки її високій реакційній здатності, що дозволяє ефективно взаємодіяти з полімерною матрицею та покращувати адгезію між компонентами. Крім того, її широка доступність, економічна вигода, та відновлюваність відповідають принципам сталого розвитку.

У якості об'єкту дослідження був використаний композит із таким складом:

вторинний поліетилен високої густини – 30 мас. %;

деревинне борошно – 54 мас. %;

кальцит – 11 мас. %;

поліетиленовий віск – 1,1 мас. %;

стеаринова кислота – 1,25 мас. %;

УФ стабілізатор та барвники – інше.

Вміст епоксидованої соєвої олії (з епоксидним числом 6,6 %) у композиції варіювали від 0 до 3 мас. %. Цей діапазон обрано на основі попередніх пошукових досліджень сумісності добавки з полімерною матрицею та її впливу на властивості. Вищі концентрації призводили до фазового розділення, негативно впливаючи на механічну цілісність та адгезію. Також, надмірний вміст біологічних модифікаторів не дає покращення і погіршує структурну стабільність. Таким чином, обраний діапазон дозволяє систематично оцінити вплив епоксидованої соєвої олії, зберігаючи технологічність та економічну доцільність.

При оцінці деревинно-полімерних композитів для фасадних та терасних оздоблювальних матеріалів фізико-механічні параметри мають вирішальне значення. Особливу увагу слід приділяти міцності при вигині, що визначає здатність матеріалу витримувати навантаження без пошкоджень, та

ударній в'язкості, яка визначає стійкість до раптових механічних впливів. Ці параметри є ключовими для розробки ефективних рецептур композитів, що відповідають вимогам сучасного будівництва та дизайну. На рисунках 3.9 та 3.10 відповідно показано вплив вмісту епоксидованої соєвої олії на міцність при вигині та ударну в'язкість за Шарпі (на зразках з надрізом) ДПК.

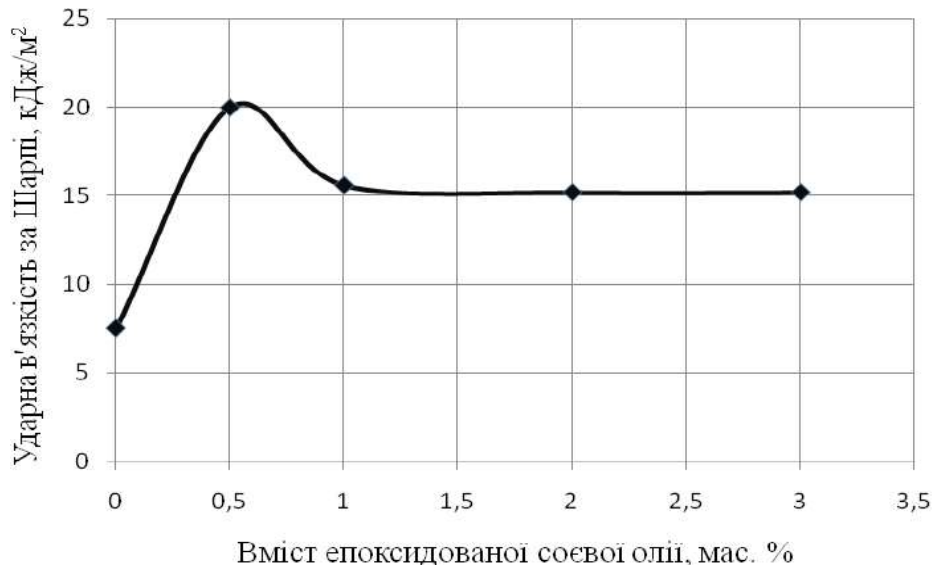


Рисунок 3.9 – Залежність ударної в'язкості за Шарпі (на зразках з надрізом) композиту від вмісту епоксидованої соєвої олії

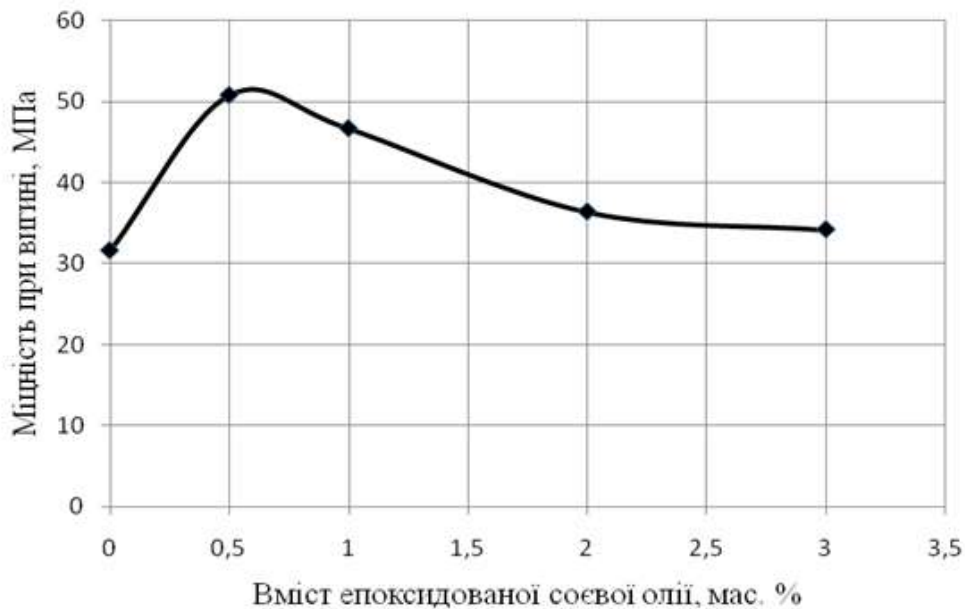


Рисунок 3.10 Залежність міцності при вигині композиту від вмісту епоксидованої соєвої олії

Аналіз даних, наведених на рисунках 3.9 та 3.10, показує, що при вмісті 0,5 мас. % епоксидованої соєвої олії в композиції ударна в'язкість за Шарпі зросла з 7,5 кДж/м² до 20,0 кДж/м² (майже втричі), а міцність при вигині збільшилася з 31,6 МПа до 50,8 МПа (збільшення на 60 %). Проте при подальшому збільшенні вмісту епоксидованої соєвої олії до 3,0 мас. % відбувається погіршення фізико-механічних властивостей: міцність при вигині зменшилася до 34,2 МПа, а ударна в'язкість за Шарпі – до 15,2 кДж/м².

Ці результати можна пояснити тим, що при низьких концентраціях епоксидована соєва олія діє як пластифікатор, покращуючи рухливість полімерних ланцюгів та сприяючи ефективнішому розподілу напружень під навантаженням [206]. Це приводить до підвищення ударної в'язкості та міцності при вигині. Однак, при збільшенні концентрації епоксидованої соєвої олії понад 1,5 мас. %, вона починає діяти як дефект, утворюючи мікроскопічні включення, що стають концентраторами напружень [207]. Це зумовлює зниження міцності при вигині та ударної в'язкості, оскільки енергія, необхідна для руйнування матеріалу, зменшується через передчасне утворення тріщин в областях концентрації напружень. Такий ефект є типовим для надмірної кількості пластифікаторів у полімерних композитах [208].

Механізм посилення полягає у взаємодії епоксидних груп епоксидованої соєвої олії з гідроксильними групами деревини, тоді як неполярні фрагменти жирних кислот у соєвій олії демонструють хорошу сумісність з поліетиленом. Це підвищує сумісність між полімером і деревиною. Проте, при збільшенні кількості епоксидованої соєвої олії в композиті відбувається пластифікація полімерної матриці: відносно малі молекули епоксидованої соєвої олії дифундують у полімер, розштовхуючи більші молекули поліетилену, оточуючи їх моношаром та екрануючи полярні групи. Це, в свою чергу, призводить до зниження міцності при вигині та ударної в'язкості за Шарпі.

Густина композиційних матеріалів значною мірою визначає термін служби та експлуатаційні характеристики виробу. Розпад полімерів і лігніну в деревині під час переробки призводить до утворення летких органічних сполук, що збільшує пористість та знижує густину композиту. На рисунку 3.11 наведено залежність густини деревинно-полімерних композитів від вмісту епоксидованої соєвої олії.

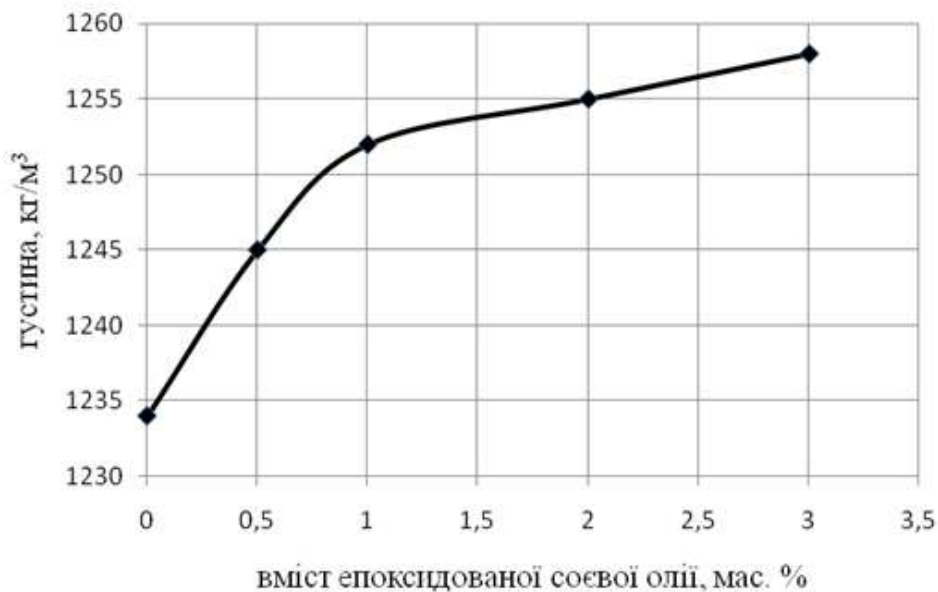


Рисунок 3.11 – Залежність густини композитів від вмісту епоксидованої соєвої олії

Як видно з даних рисунка 3.11, зі збільшенням вмісту епоксидованої соєвої олії густина композиту зростає з 1234 кг/м^3 до 1258 кг/м^3 . Це свідчить про більш впорядковану надмолекулярну структуру матеріалу, що пов'язано з досягненням оптимального ступеня диспергування. Покращене змочування частинок деревини полімерною матрицею сприяє ефективнішому перенесенню навантаження між компонентами. Спостережене збільшення густини узгоджується з очікуваним ефектом покращення сумісності між полімером і деревиною завдяки впливу епоксидованої соєвої олії, а не прямому внеску її власної маси. Враховуючи, що епоксидована соєва олія має густину, близьку до ПЕВГ ($\sim 1000 \text{ кг/м}^3$), та мінімальне випаровування

при робочих температурах, її додавання впливає переважно на розподіл частинок та однорідність матриці, а не на значну зміну загальної густини композиту.

Підвищене водопоглинання виробів із ДПК значно зменшує їх довговічність, роблячи їх використання непридатними для зовнішнього оздоблення. Основними чинниками, що сприяють збільшенню водопоглинання ДПК, є їхня пористість і слабка адгезія на межі розділу фаз «полімер – деревинний наповнювач». Залежність водопоглинання цих композитів від кількості доданої епоксидованої соєвої олії наведено на рисунку 3.12.

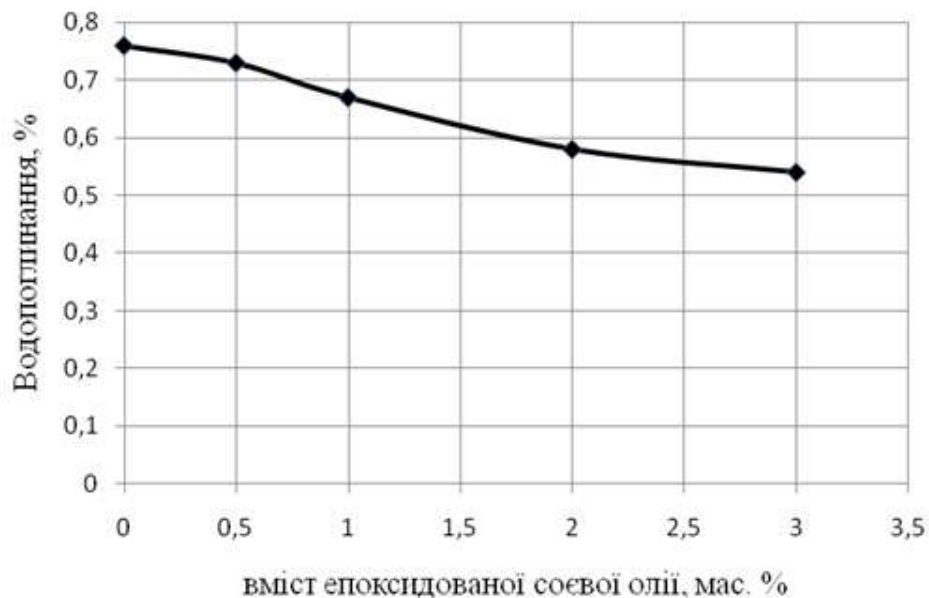


Рисунок 3.12 – Залежність водопоглинання ДПК від вмісту епоксидованої соєвої олії

На основі даних, наведених на рисунку 3.12, можна зробити висновок, що збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії у складі ДПК сприяє зниженню рівня їх водопоглинання. Зокрема, показник водопоглинання зменшується з 0,76 % (за відсутності епоксидованої соєвої олії) до 0,54 % (при вмісті 3 мас. % цієї добавки). Така позитивна динаміка може бути пояснена двома основними факторами: по-перше, утворенням більш

впорядкованої структури композиту (що підтверджується підвищенням густини), і по-друге, гідрофобними властивостями епоксидованої соєвої олії. Таким чином, епоксидована соєва олія сприяє зменшенню пористості ДПК, що знижує можливість проникнення води в матеріал.

Технологічна усадка є важливим явищем, що впливає на розмірну точність та зовнішній вигляд виробу. У цьому дослідженні проаналізовано вплив вмісту епоксидованої соєвої олії на технологічну усадку ДПК, результати чого представлено на рисунку 3.13.

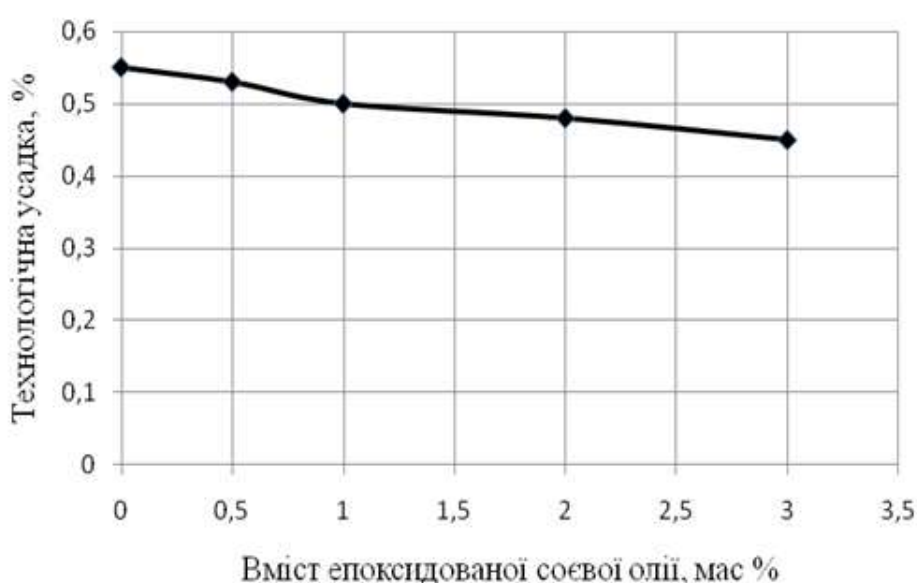


Рисунок 3.13 – Залежність технологічної усадки композиту від вмісту епоксидованої соєвої олії

Як видно з даних рисунка 3.13, збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії до 3 мас. % знижує технологічну усадку з 0,55 % до 0,45 %. Ця тенденція пояснюється збільшенням густини композиту, що зменшує переорієнтацію макромолекул полімеру під час охолодження. Крім того, покращується взаємодія між компонентами завдяки здатності епоксидованої олії утворювати міцніші зв'язки з полімерною матрицею, підвищуючи її стабільність. Додатково, епоксидована соєва олія діє як пластифікатор, знижуючи внутрішні напруження та, відповідно, усадку. Це також корелює з

поліпшенням фізико-механічних властивостей, таких як міцність при вигині та ударна в'язкість за Шарпі.

Термічне розширення та стиснення — характерні явища для всіх твердих тіл. Підвищення температури середовища збільшує амплітуду коливань атомів і молекул, що призводить до зростання ефективного об'єму та розмірів матеріалів. Залежність коефіцієнта лінійного термічного розширення ДПК від вмісту епоксидованої соєвої олії зображено на рисунку 3.14.

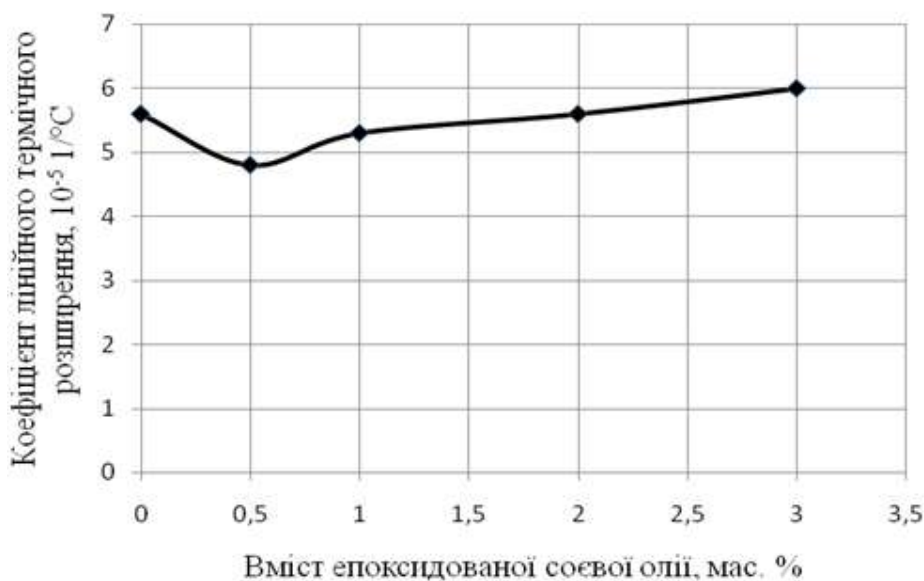


Рисунок 3.14 – Залежність коефіцієнту лінійного термічного розширення композиту від вмісту епоксидованої соєвої олії

Аналіз даних рисунка 3.14 показує, що додавання 0,5 мас. % епоксидованої соєвої олії до складу композиту знижує коефіцієнт лінійного термічного розширення на 15 %. Проте подальше збільшення її концентрації спричиняє зростання цього коефіцієнта.

Така поведінка може пояснюватися кількома факторами. Висока здатність епоксидованої соєвої олії до зчеплення з іншими компонентами покращує взаємодії між полімером та наповнювачем, зменшуючи загальний рівень термічного розширення та внутрішні напруги при нагріванні. Крім

того, епоксидована соєва олія знижує водопоглинання композиту, що позитивно впливає на термічні характеристики, зменшуючи ймовірність об'ємних змін, викликаних нагріванням. Вона також змінює еластичність композиту, що забезпечує більшу стабільність до термічних змін і, як наслідок, знижує коефіцієнт лінійного термічного розширення. Однак, подальше збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії викликає порушення структури матриці та зменшення адгезії між компонентами. Частки епоксидованої соєвої олії діють як "розриви" в безперервній матриці, підвищуючи рухливість молекул. Надмірна кількість добавки також призводить до появи внутрішніх напружень, що негативно позначається на термічних властивостях ДПК.

З метою з'ясування механізму взаємодії між епоксидними групами епоксидованої соєвої олії та гідроксильними групами деревини було проведено дослід ІЧ спектрів епоксидованої соєвої олії, ДПК без епоксидованої соєвої олії та ДПК із вмістом епоксидованої соєвої олії 0,5 мас. %.

На рисунку 3.15 представлені ІЧ-спектри епоксидованої соєвої олії (1), ДПК без епоксидованої соєвої олії (2) та ДПК із вмістом епоксидованої соєвої олії 0,5 мас.% (3):

Спектр 1 (епоксидована соєва олія) містить характерні піки С-Н ($3000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$), С=О ($1740\text{--}1700\text{ см}^{-1}$, найінтенсивніший), С-О (1241 см^{-1} , 1160 см^{-1}) та епоксидного кільця (822 см^{-1}).

Спектр 2 (базовий ДПК) демонструє смуги О-Н деревини (3300 см^{-1}), С-Н поліетилену (2920 см^{-1} , 2850 см^{-1}), С=О геміцелюлоз (1740 см^{-1}), а також пік 1423 см^{-1} та С-О деревини (1030 см^{-1}).

Спектр 3 (ДПК з 0,5 мас. % олії), порівняно зі спектром 2, демонструє помітне збільшення інтенсивності піків характерних для епоксидованої соєвої олії, зокрема С=О (1740 см^{-1}), С-О (1241 см^{-1} , 1160 см^{-1}) та аліфатичних С-Н. Важливо, що пік епоксидного кільця при 822 см^{-1} чітко проявляється, підтверджуючи присутність добавки.

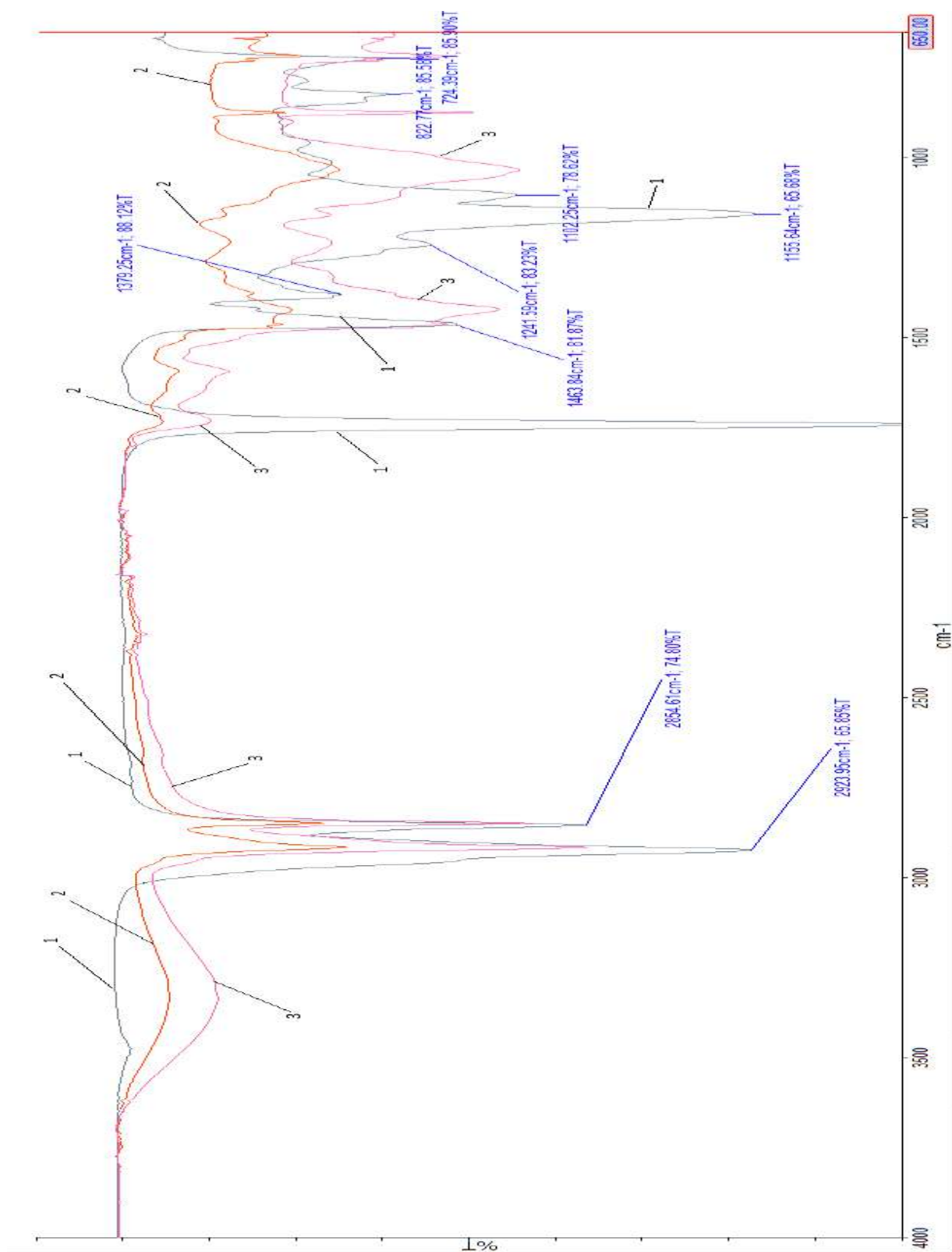


Рисунок 3.15 – ІЧ спектри епоксидованої соєвої олії (1), ДПК без епоксидованої соєвої олії (2) та ДПК із вмістом епоксидованої соєвої олії 0,5 мас.% (3).

Ключовим є зміщення піка з $1423,03 \text{ см}^{-1}$ на $1420,98 \text{ см}^{-1}$ (на $2,05 \text{ см}^{-1}$ у довгохвильовий бік) у спектрі модифікованого ДПК. Це зміщення, пов'язане з наявністю гідроксильних фрагментів целюлози і свідчить про блокування або модифікацію взаємодій О-Н груп деревини. Найімовірніше, це результат реакції між епоксидними кільцями олії та гідроксильними групами деревини, що формують нові етероспиртові фрагменти та змінює енергетичне положення водневих зв'язків.

Таким чином, ІЧ-спектроскопічний аналіз чітко підтверджує успішне включення епоксидованої соєвої олії до ДПК (0,5 мас. %). Ці дані узгоджуються з покращенням фізико-механічних властивостей, підтверджуючи, що епоксидована соєва олія діє як реакційний сумішник, покращуючи міжфазну адгезію та експлуатаційні властивості матеріалу.

Висновки до підрозділу 3.2

За результатами проведених досліджень по впливу епоксидованої соєвої олії на властивості ДПК на основі вторинного поліетилену високої густини встановлено:

1. Використання епоксидованої соєвої олії у деревинно-полімерних композитах веде до значного зниження технологічної усадки, коефіцієнта лінійного термічного розширення та сприяє зменшенню пористості ДПК, що в свою чергу знижує можливість проникнення води в матеріал. Це позитивно позначається на довговічності та експлуатаційних властивостях композиту, зменшуючи ризик деформацій, тріщин та інших пошкоджень, пов'язаних з впливом вологи.

2. раціональний вміст епоксидованої соєвої олії, який забезпечує найбільш високі фізико-механічні та експлуатаційні показники у ДПК становить 0,5 мас. %. За цієї концентрації спостерігається покращення таких фізико-механічних характеристик, як міцність при вигині, ударна в'язкість, що свідчить про ефективне зміцнення структури композиту. Однак, надмірне

збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії може мати негативні наслідки, з огляду на зміну структурних характеристик та адгезійних взаємодій. Тому, для досягнення оптимальних фізико-механічних властивостей ДПК необхідно підтримувати баланс між вмістом деревинного борошна, полімерної матриці та епоксидованої соєвої олії. Розуміння цих процесів є критично важливим для розробки нових композитних матеріалів з покращеними характеристиками в умовах постійних температурних змін та підвищеної вологи [214].

3. Оскільки соєва олія належить до продуктів рослинного походження, її використання у деревинно-полімерних композитах сприятливо позначається на екології та довкіллі. Це також дає можливість виготовляти продукцію з низькою собівартістю, забезпечуючи при цьому високі фізико-механічні та експлуатаційні характеристики.

4. Використання епоксидованої соєвої олії не тільки покращує фізико-механічні властивості деревинно-полімерних композитів, але й відкриває нові перспективи для їхнього застосування в різних галузях промисловості, таких як автомобільна, будівельна та електротехнічна промисловість [221].

3.3 Вплив зольного пилу на властивості деревинно-полімерних композитів на основі вторинного поліетилену високої густини

У сучасному світі зростає потреба в нових матеріалах, що поєднують екологічність, міцність та високу продуктивність. Деревинно-полімерні композити складаються з полімерної матриці (поліетилен високої густини, що надає міцності та вологостійкості) та деревного наповнювача (деревинне борошно, що забезпечує природність і впливає на механічні властивості). Сумісність цих компонентів є ключовою для досягнення оптимальних характеристик.

Зольний пил, як додаткова складова, може доповнити ці властивості. Його вплив на структуру ДПК може бути як позитивним, так і негативним,

залежно від концентрації, розміру частинок та технології виготовлення. Дослідження впливу зольного пилу на характеристики ДПК відкриває нові горизонти в матеріалознавстві, оскільки використання промислових відходів сприяє не лише зменшенню викидів, а й виробництву матеріалів з новими функціональними властивостями.

Одним із аспектів, що сприяють успішній взаємодії між полімерною матрицею та деревними наповнювачами, є адгезія. Існує гіпотеза, що додавання зольного пилу може змінити поверхневу енергію полімеру, сприяючи кращій адгезії та, відповідно, кращим фізико-механічним характеристикам за рахунок покращення міжфазної взаємодії, зменшення кількості мікропорожнин на межі розділу фаз та формування більш однорідної структури композиту. Зміни у структурі композиту можуть спричинити збільшення міцності та зменшення водопоглинання і коефіцієнта лінійного термічного розширення.

Метою даного дослідження є вивчення впливу зольного пилу як наповнювача деревинно-полімерного композиту на основі вторинного поліетилену високої густини та дубового борошна на технологічні, фізико-механічні та експлуатаційні властивості ДПК.

У якості модельного об'єкту дослідження у даному дослідженні був використаний композит на основі поліетилену високої густини із наступним вмістом:

вторинний поліетилен високої густини – 30 мас. %;

деревинне борошно марки М 200 – 54 мас. %;

кальцит – 11 мас. %;

стеаринова кислота – 1,25 мас. %;

поліетилен з прищепленим малеїновим ангідридом – 0,85 мас. %;

поліетиленовий віск – 1,1 мас. %;

УФ стабілізатор та барвники – інше.

Для оцінки впливу зольного пилу на властивості композиту проводили часткову заміну кальциту на зольний пил у таких пропорціях: зразок № 0 –

кальцит – 11 мас. %, зола – 0 мас. %; зразок № 1 – кальцит – 8,25 мас. %, зола – 2,75 мас. %; зразок № 2 – кальцит – 5,5 мас. %, зола 5,5 мас. %; зразок № 3 – кальцит – 2,75 мас. %, зола – 8,25 мас. %; зразок № 4 – кальцит – 0 мас. %, зола – 11 мас. %.

Густина деревинно-полімерного композиту — критично важливий показник, оскільки вища густина часто корелює з покращеними фізико-механічними властивостями та підвищеною витривалістю під час експлуатації. Оптимальні показники густини роблять матеріали стійкішими до вологи, вітру, УФ-випромінювання та інших зовнішніх факторів, що впливають на їх довговічність. Густина також може впливати на вартість матеріалів, енергоємність їх виробництва та транспортування. Правильний баланс між густиною та іншими фізичними властивостями значно підвищує довговічність і надійність виробів з ДПК. Вплив вмісту зольного пилу на густину ДПК показано на рисунку 3.16

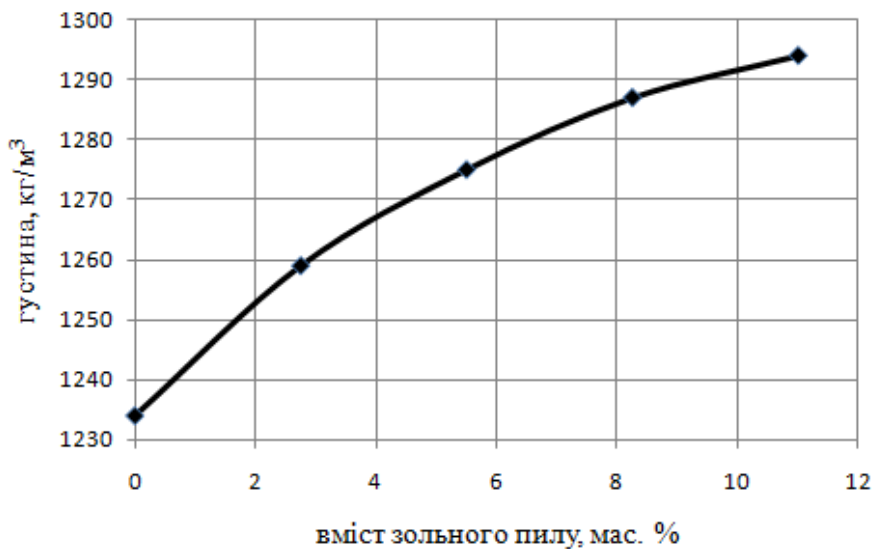


Рисунок 3.16 – Залежність густини композиту від вмісту зольного пилу

Аналізуючи дані рисунка 3.16, можна констатувати, що при збільшенні вмісту зольного пилу в композиті густина матеріалу зростає з 1234 кг/м^3 до 1294 кг/м^3 . Це явище пояснюється кількома аспектами. По-перше, зольний пил має більшу густину, ніж деревина. Складаючись з

мінеральних частин, він додає маси до загальної структури матеріалу, збільшуючи загальну густину при зростанні його співвідношення до полімеру та деревини. По-друге, зольний пил може заповнювати пори та простори між волокнами деревини, сприяючи більш щільному пакуванню часток і підвищенню загальної густини композиту.

Коли зольний пил заповнює зазори між деревинними волокнами, він забезпечує краще зчеплення між компонентами, покращуючи стабільність структури матеріалу. Крім того, зольний пил може взаємодіяти з полімерною матрицею, формуючи міцніші зв'язки з деревинними волокнами. Два важливі показники, що характеризують фізико-механічні властивості цих матеріалів, — це ударна в'язкість за Шарпі та міцність при вигині. Вплив вмісту зольного пилу на ці показники показано на рисунках 3.17 та 3.18 відповідно.

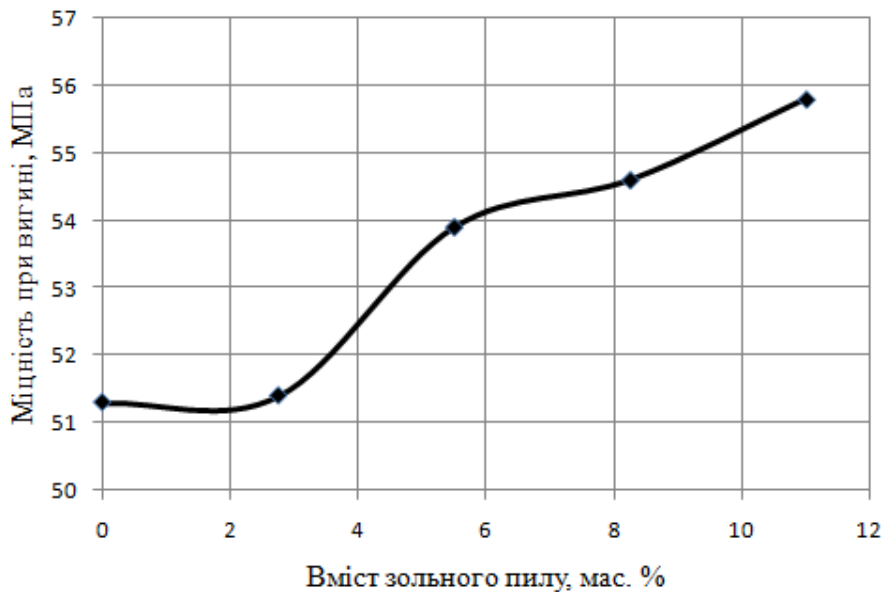


Рисунок 3.17 – Залежність міцності при вигині композиту від вмісту зольного пилу

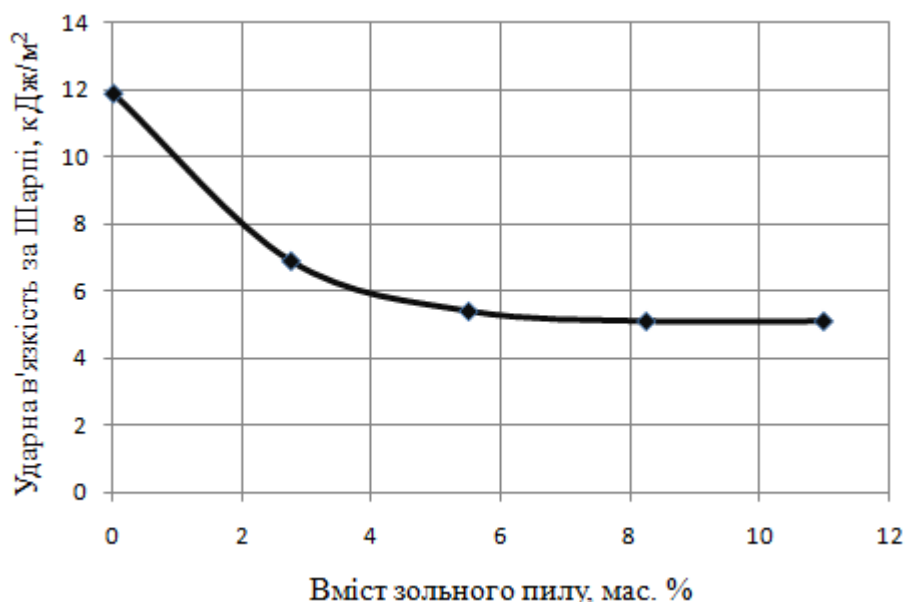


Рисунок 3.18 – Залежність ударної в'язкості за Шарпі (на зразках з надрізом) композиту від вмісту зольного пилу

Аналіз даних рисунка 3.17 показує, що при заміщенні кальциту зольним пилом у ДПК міцність при вигині зростає з 51,3 МПа до 55,8 МПа (приріст на 9 %). Це зростання пояснюється тим, що зольний пил, маючи більшу насипну густину та іншу морфологію порівняно з кальцитом, покращує розподіл навантаження та заповнює пори в матриці, що призводить до більш однорідної структури. Це також підтверджується зростанням густини композиту.

Однак, одночасно зі зростанням міцності, спостерігається різке зниження ударної в'язкості за Шарпі з 11,9 кДж/м² до 5,1 кДж/м² (більш ніж двократне зниження, див. рисунок 3.18). Це зниження пояснюється зміною структури композиту: зольний пил, на відміну від кальциту, може не забезпечувати достатньої еластичності та енергоємності при деформації. Наявність зольного пилу призводить до швидшого розвитку тріщин під ударним навантаженням. Як наслідок, композит стає більш жорстким, але менш здатним поглинати удари. Додатково, різний хімічний склад зольного пилу та наявність мікроелементів також можуть впливати на взаємодію компонентів і загальні механічні характеристики.

Стійкість до вологи — одна з ключових переваг деревинно-полімерних композитів, особливо важлива для будівельних матеріалів, де волога може спричинити гниття та псування деревини. Зольний пил як наповнювач також може впливати на водопоглинання композиту. Залежність водопоглинання ДПК від вмісту зольного пилу показано на рисунку 3.19.

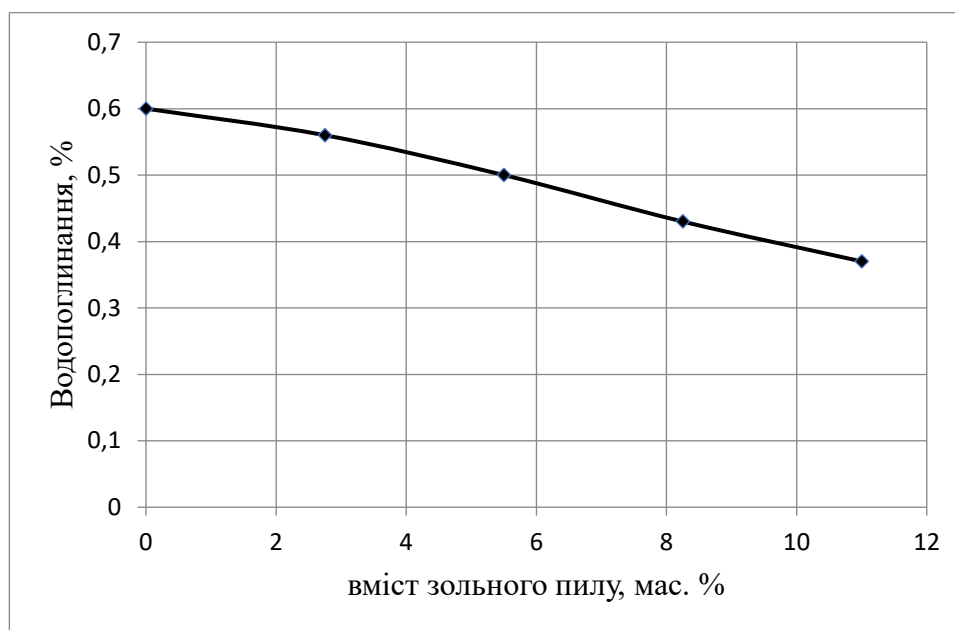


Рисунок 3.19 – Залежність водопоглинання композиту від вмісту зольного пилу

Аналізуючи дані рисунка 3.19, можна зробити висновок, що при заміщенні кальциту зольним пилом у ДПК спостерігається суттєве зниження водопоглинання. Показник водопоглинання зменшується з 0,6 % (за відсутності зольного пилу) до 0,37 % (при повному заміщенні кальциту зольним пилом). Це зниження пояснюється кількома факторами. По-перше, зольний пил, як правило, має менший розмір частинок і більшу поверхневу площу, що сприяє кращій інтеграції в матрицю композиту. Це зменшує пористість матеріалу, знижуючи можливість проникнення води. По-друге, зольний пил може взаємодіяти з полімерною матрицею, утворюючи щільнішу структуру. Ця взаємодія між компонентами може формувати нові зв'язки, що підвищують механічну міцність і водостійкість матеріалу.

Зменшення водопоглинання є відчутним і має важливі практичні наслідки, оскільки безпосередньо впливає на механічні властивості та довговічність композитів.

Технологічна усадка, яка визначається як зменшення розмірів готового виробу після охолодження, є ключовою характеристикою полімерних композиційних матеріалів. У цьому дослідженні було проаналізовано вплив вмісту зольного пилу на технологічну усадку ДПК. Результати представлено на рисунку 3.20.

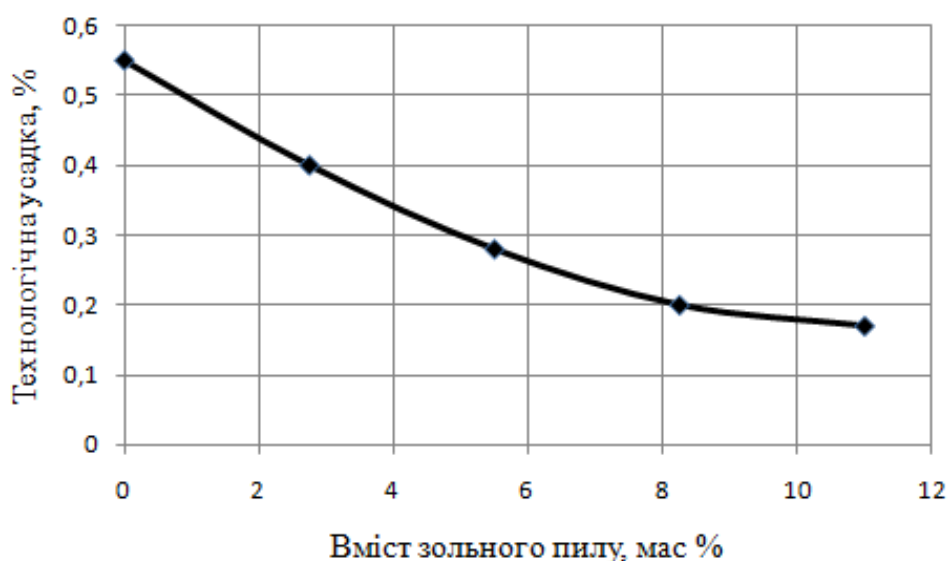


Рисунок 3.20 – Залежність технологічної усадки композиту від вмісту зольного пилу

Заміщення кальциту зольним пилом у ДПК суттєво впливає на технологічну усадку. Дослідження показали, що при відсутності зольного пилу технологічна усадка становить 0,55 %, проте при повному заміщенні кальциту зольним пилом цей показник зменшується до 0,17 % (рисунок 3.20). Таке зниження усадки пояснюється збільшенням густини композиційного матеріалу, що зменшує переорієнтацію та рекристалізацію макромолекул полімеру під час охолодження екструдату. Крім того, зольний пил має менший об'ємний коефіцієнт усадки порівняно з кальцитом, а також завдяки своїй пористій структурі може взаємодіяти з іншими компонентами

композиту, що забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження та зменшує деформації під час висихання.

На відміну від незворотної технологічної усадки, термічне розширення та стиснення є зворотними процесами, що залежать від температури експлуатації виробів із деревинно-полімерних композитів. Залежність коефіцієнта лінійного термічного розширення ДПК від вмісту зольного пилу зображено на рисунку 3.21.

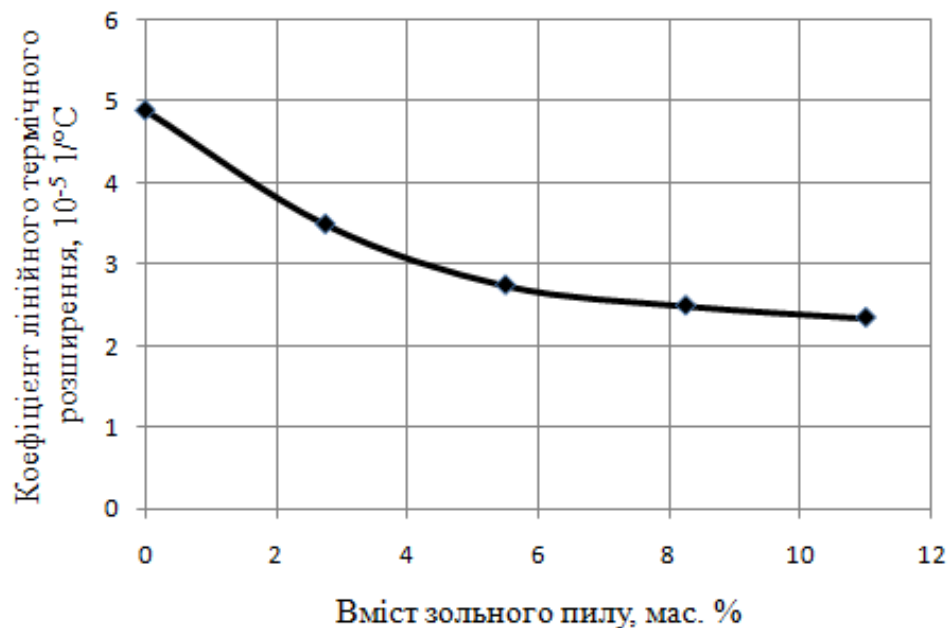


Рисунок 3.21 – Залежність коефіцієнту лінійного термічного розширення композиту від вмісту зольного пилу

Як можна побачити з даних рисунка 3.21, при збільшенні вмісту зольного пилу у деревинно-полімерному композиті спостерігається значне зменшення коефіцієнта лінійного термічного розширення. Зокрема, цей коефіцієнт знижується з $4,9 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ до $2,35 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ (на 50 %). Таку зміну властивостей можна пояснити кількома факторами. По-перше, зольний пил має високу густину та низьку теплопровідність, що впливає на загальні термічні характеристики композиту. Його додавання змінює структуру, зменшуючи пористість матеріалу та, відповідно, його здатність до термічного розширення. По-друге, зольний пил може взаємодіяти з полімерною

матрицею, утворюючи міцніші зв'язки. Це знижує рухливість полімерних ланцюгів при нагріванні, що зменшує обсяг, який матеріал може займати при підвищенні температури, і, як наслідок, знижує коефіцієнт лінійного термічного розширення.

Для поглибленого розуміння впливу зольного пилю на структуру деревинно-полімерних композитів було проведено мікроскопічні дослідження зразків. На рисунку 3.22 представлена мікрофотографія композиту із вмістом 2,5 мас. % зольного пилю та на рисунку 3.23 – із вмістом 11 мас. % зольного пилю.

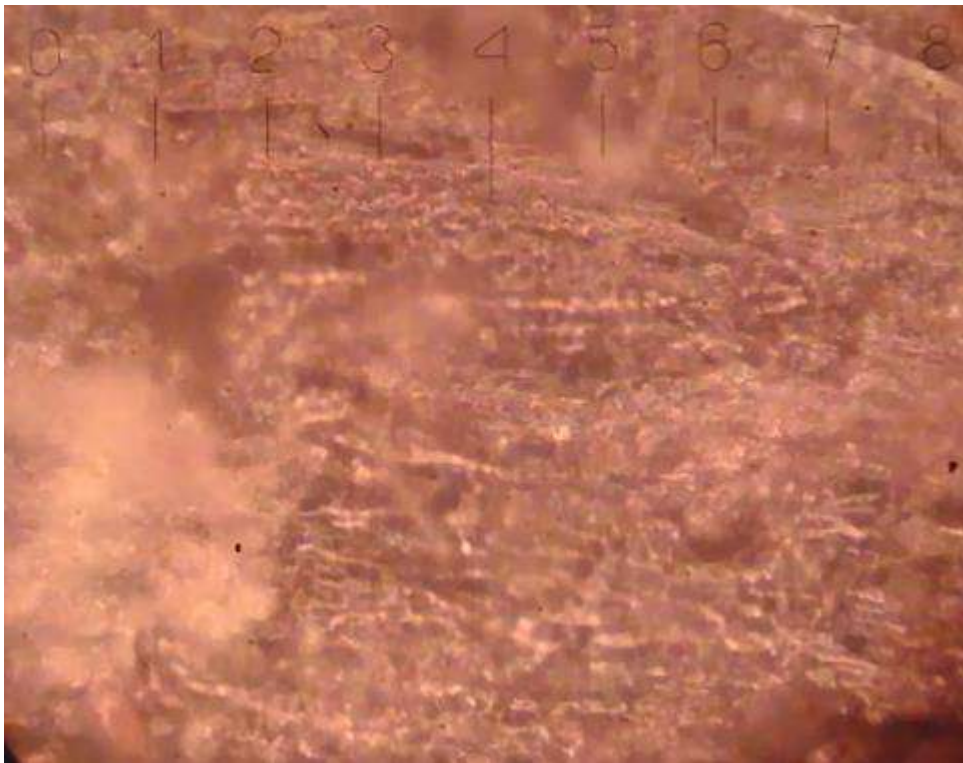


Рисунок 3.22 – Мікрофотографія деревинно-полімерного композиту із вмістом 2,5 мас. % зольного пилю(ціна поділки 0,3 мкм).

На мікрофотографії 3.22 (2,5 мас. % зольного пилю), спостерігається відносно однорідна структура матеріалу. Частинки зольного пилю виглядають рівномірно розподіленими в полімерній матриці, без значних скупчень або агрегатів. Ця гомогенність розподілу наповнювача свідчить про ефективне змочування та добру взаємодію між компонентами при цій концентрації.

Візуально структура виглядає досить щільною з мінімальною кількістю видимих пор або дефектів. Такий мікроструктурний стан корелює з висновками щодо покращення експлуатаційних та технологічних властивостей, а також збільшення міцності при згині, що спостерігається при оптимальних концентраціях зольного пилу. Добре розподілений наповнювач сприяє ефективнішому перерозподілу напружень у матеріалі, підвищуючи його механічні характеристики.

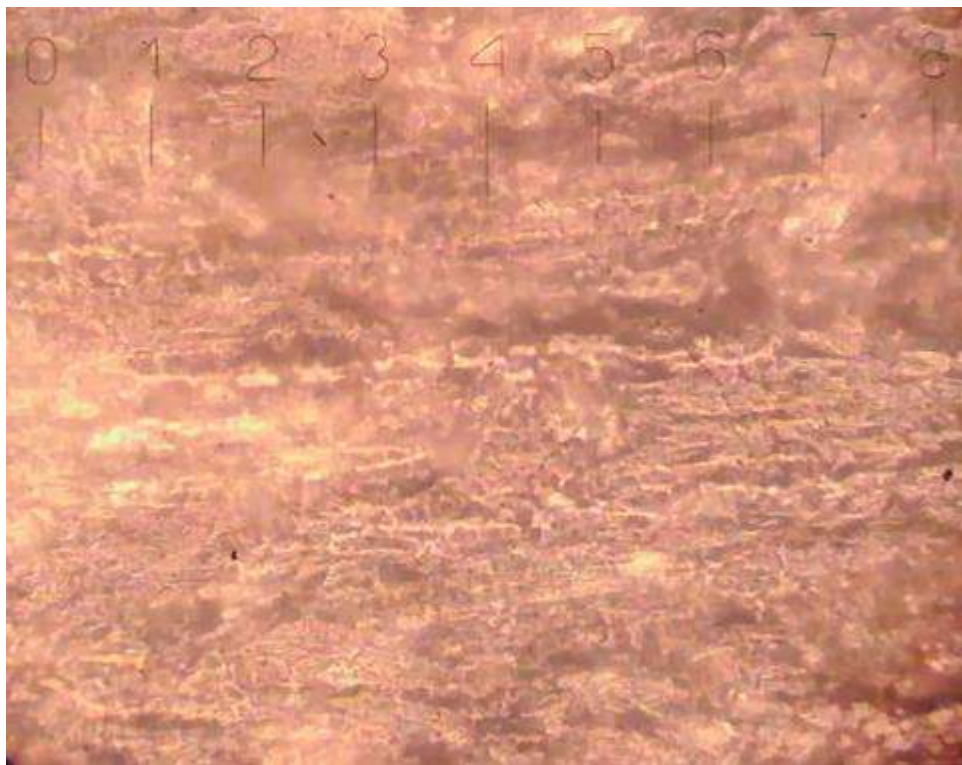


Рисунок 3.23 – Мікрофотографія деревинно-полімерного композиту із вмістом 11 мас. % зольного пилу(ціна поділки 0,3 мкм).

На мікрофотографії 3.23 (11 мас. % зольного пилу), спостерігається значно більша неоднорідність структури порівняно зі зразком з меншим вмістом зольного пилу. Чітко видно зони з підвищеною концентрацією частинок зольного пилу, що вказує на формування агрегатів. Ці скупчення наповнювача можуть діяти як дефекти або концентратори напружень у матеріалі, що негативно впливає на його механічні властивості. Крім того, можливо, присутні більші або численніші порожнини/дефекти, що свідчить

про ускладнення змочування поверхні частинок зольного пилу полімерною матрицею при високих концентраціях. Дані мікроструктурні особливості повністю узгоджуються з виявленим зменшенням ударної в'язкості (більше ніж у 2 рази) для композитів з високим вмістом зольного пилу. Агрегати зольного пилу можуть перешкоджати ефективному поглинанню енергії удару, що призводить до крихкого руйнування матеріалу.

Таким чином, мікрофотографічний аналіз підтверджує, що оптимальний розподіл зольного пилу при менших концентраціях сприяє формуванню однорідної та більш цілої структури, тоді як надмірне введення наповнювача призводить до агрегації та структурних дефектів, що негативно впливає на ударну в'язкість за Шарпі композитів.

Висновки до підрозділу 3.3

На основі проведених досліджень, спрямованих на визначення впливу зольного пилу на характеристики деревинно-полімерного композиту, виготовленого з вторинного поліетилену високої густини, було встановлено наступне:

1. Застосування зольного пилу в деревинно-полімерних композитах дозволяє суттєво зменшити технологічну усадку, водопоглинання та коефіцієнт лінійного термічного розширення. Це відкриває можливість виготовляти вироби з більш точними розмірами, здатними витримувати значні коливання температур і рівня вологості під час експлуатації.

2. Заміщення кальциту зольним пилом в деревинно-полімерному композиті демонструє компроміс між підвищенням міцності при вигині та зниженням ударної в'язкості, що є важливим аспектом при розробці нових матеріалів для використання в різних галузях промисловості. Цей компроміс є критично важливим, оскільки в залежності від призначення матеріалу, можуть бути різні вимоги до механічних властивостей. Наприклад, у конструкціях, де важлива міцність і стійкість до навантажень, підвищення

міцності при вигині може бути пріоритетом. Однак у випадках, коли матеріал піддається динамічним навантаженням або ударам, зниження ударної в'язкості може стати серйозною проблемою [213, 218].

3. Оскільки зольний пил є відходом енергетичної галузі, його використання як наповнювача у виробництві деревинно-полімерних композитів дозволяє не лише зменшити собівартість продукції, але й сприятливо впливає на екологічний стан навколишнього середовища.

4. Відзначаючи позитивний вплив на механічну міцність, стійкість до вологи та коливань температур, можна стверджувати, що зольний пил може стати інноваційним доповненням до складу ДПК, при умові ретельного контролю за технологічними параметрами при його виготовленні [219].

3.4 Вплив фосфогіпсу на властивості деревинно-полімерних композитів

Фізико-механічні властивості деревинно-полімерних композитів значною мірою залежать від використовуваних наповнювачів. Органічні наповнювачі, такі як подрібнена деревина, лушпиння рису, костриця льону чи стебла конопель, знижують вартість продукту та покращують деякі властивості, наприклад, ударну в'язкість. Однак вони більш схильні до біологічного руйнування та поглинання вологи, що може негативно вплинути на довговічність ДПК.

Змішані наповнювачі поєднують переваги органічних та неорганічних матеріалів. Наприклад, невелика кількість мінерального наповнювача може підвищити термічні властивості та знизити водопоглинання ДПК. Вибір наповнювача залежить від бажаних властивостей кінцевого продукту, доступності матеріалів та економічних міркувань, дозволяючи оптимізувати характеристики ДПК. Серед відомих неорганічних наповнювачів — кальцит, тальк, слюда та воластоніт.

На сьогодні залишається невирішеним питання переробки та утилізації фосфогіпсу — побічного продукту виробництва екстракційної

фосфорної кислоти [209]. Щорічно у світі утворюється близько 120–130 млн тонн фосфогіпсу, проте лише до 10 % цього об'єму утилізується [210]. Накопичення фосфогіпсу, що містить значну кількість сульфату кальцію та потенційно небезпечні елементи, призводить до забруднення ґрунтів і водних ресурсів. Багато країн стикаються з труднощами у пошуку ефективних методів переробки цього відходу, що ускладнює екологічну ситуацію.

Серед можливих шляхів вирішення цієї проблеми — розробка технологій перетворення фосфогіпсу на корисні продукти, такі як будівельні матеріали чи добрива. Наприклад, його можна використовувати у виробництві гіпсових плит, зменшуючи потребу в природних ресурсах. Значні обсяги фосфогіпсу зберігаються у відвалах, які іноді досягають висоти до 15 метрів [211]. З огляду на це, надзвичайно актуальною є не лише проблема його видалення, транспортування та зберігання, а й розробка нових способів ефективного використання цього матеріалу.

Метою даного підрозділу є дослідження впливу фосфогіпсу як наповнювача композиту на основі вторинного поліетилену високої густини та дубового борошна на технологічні, фізико-механічні та експлуатаційні властивості ДПК.

У якості об'єкту дослідження у даній роботі був використаний композит на основі поліетилену високої густини із наступним складом:

вторинний поліетилен високої густини – 30 мас. %;

деревинне борошно марки М 200 – 54 мас. %;

кальцит – 11 мас. %;

стеаринова кислота – 1,25 мас. %;

поліетилен з прищепленим малеїновим ангідридом – 0,85 мас. %;

поліетиленовий віск – 1,1 мас. %;

УФ стабілізатор та барвники – інше.

Для оцінки впливу фосфогіпсу на властивості композиту проводили часткову заміну кальциту на фосфогіпс у таких пропорціях: зразок № 0 – кальцит – 11 мас. %, фосфогіпс – 0 мас. %; зразок № 1 – кальцит –

8,25 мас. %, фосфогіпс – 2,75 мас. %; зразок № 2 – кальцит – 5,5 мас. %, фосфогіпс 5,5 мас. %; зразок № 3 – кальцит – 2,75 мас. %, фосфогіпс – 8,25 мас. %; зразок № 4 – кальцит – 0 мас. %, фосфогіпс – 11 мас. %.

Густина деревинно-полімерних композитів — ключовий показник якості, що впливає на їхню міцність, жорсткість, стійкість до деформацій і довговічність. Висока густина зазвичай пов'язана з кращою міцністю, але може свідчити й про надлишок наповнювачів (наприклад, кальциту), що знижує вміст полімеру та потенційно негативно впливає на гнучкість. Низька густина, навпаки, вказує на недостатню щільність структури, що може знизити міцність та довговічність. Точний контроль густини критично важливий для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик ДПК. На рисунку 3.24 зображено залежність густини деревинно-полімерного композиту від вмісту фосфогіпсу.

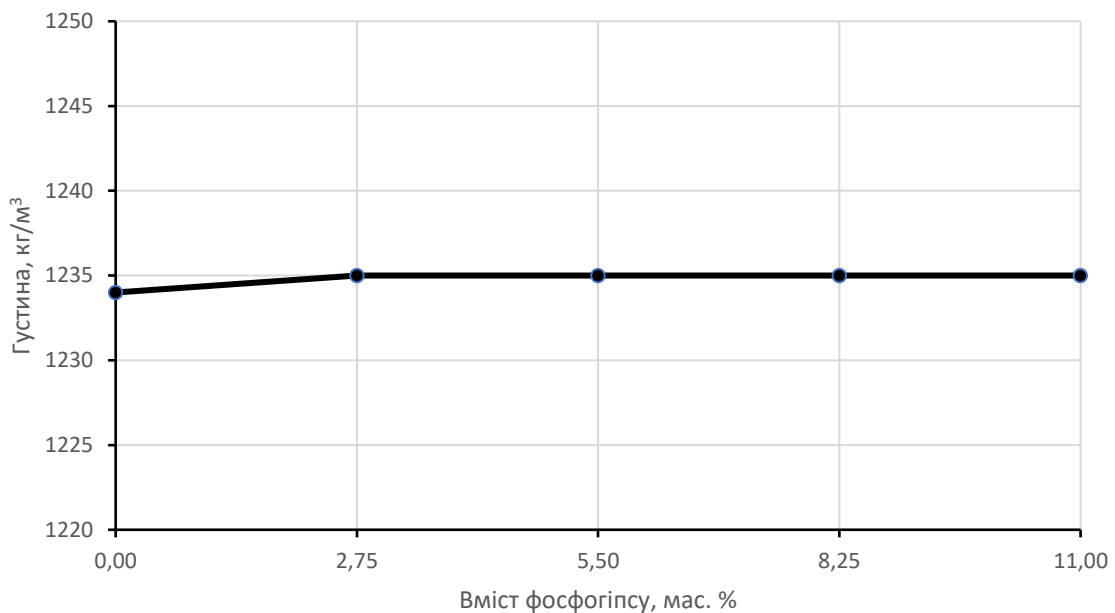


Рисунок 3.24 – Залежність густини деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу

Аналізуючи дані рисунка 3.24, можна констатувати, що при збільшенні вмісту фосфогіпсу в композиті густина матеріалу залишається незмінною — 1235 кг/м³. Це пояснюється двома основними факторами. По-

перше, кальцит і фосфогіпс мають приблизно однакову густину. Хоча точні значення можуть дещо відрізнятися, їхня незначна різниця не призводить до помітних змін загальної густини композиту. По-друге, частки фосфогіпсу мають подібну структуру зерна та однаковий розмір з частками кальциту.

Стійкість оздоблювальних матеріалів для зовнішнього застосування до ударних і статичних навантажень оцінюється за показниками ударної в'язкості за Шарпі та міцності при вигині. Вища ударна в'язкість свідчить про стійкість матеріалу до ударів (наприклад, падіння гілок, граду), тоді як низька вказує на його крихкість. Висока міцність при вигині свідчить про здатність матеріалу витримувати деформації під статичними навантаженнями (вага, сніг, вітер). Залежність цих показників від вмісту фосфогіпсу в деревинно-полімерних композитах зображено на рисунках 3.25 та 3.26 відповідно.

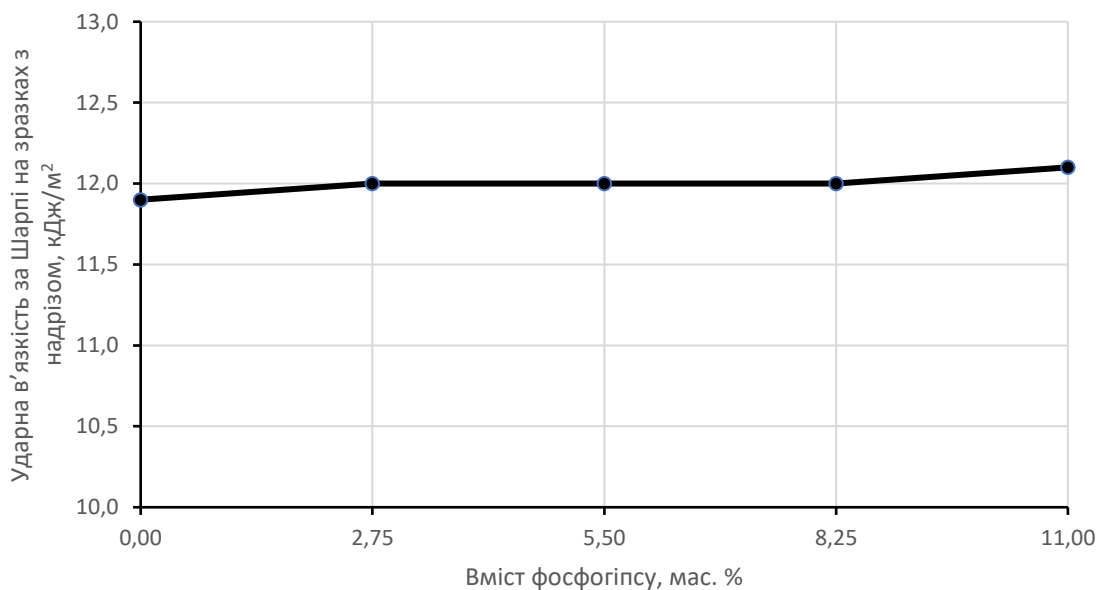


Рисунок 3.25 – Залежність ударної в'язкості за Шарпі (на зразках з надрізом) деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу

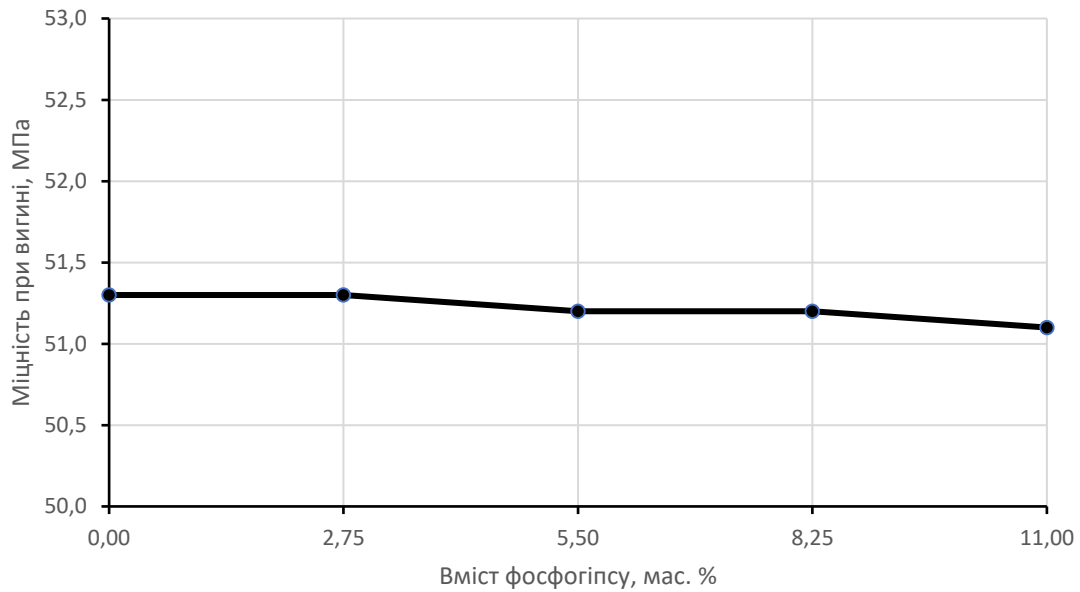


Рисунок 3.26 – Залежність міцності при вигині деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу

Аналізуючи дані рисунків 3.25 та 3.26, можна стверджувати, що при заміщенні кальциту фосфогіпсом у ДПК зміни ударної в'язкості за Шарпі та міцності при вигині практично не відбуваються. Ці показники становлять відповідно 12 кДж/м^2 та $51,2 \text{ МПа}$. Це можна пояснити кількома факторами. По-перше, фосфогіпс, як і кальцит, має подібну структуру та фізико-хімічні властивості, що дозволяє йому ефективно інтегруватися в матрицю композиту без порушення його механічних характеристик. Це означає, що заміна одного наповнювача на інший не призводить до суттєвих змін у поведінці матеріалу під навантаженням. По-друге, фосфогіпс може позитивно впливати на адгезію між деревинними волокнами та полімерною матрицею, що також сприяє збереженню стабільності механічних властивостей композиту. Висока адгезія забезпечує кращу передачу навантаження між компонентами, зберігаючи ударну в'язкість та міцність при вигині. Крім того, можливо, що вміст фосфогіпсу в композиті не перевищує критичного рівня, при якому починають проявлятися негативні ефекти. Таким чином, досягнуті значення фізико-механічних характеристик

свідчать про те, що фосфогіпс може бути ефективним заміником кальциту без втрат у якості матеріалу.

Окрім міцності та ударної в'язкості, для зовнішніх оздоблювальних матеріалів важливим є водопоглинання — здатність матеріалу абсорбувати воду з навколишнього середовища. Високе водопоглинання може призвести до руйнування матеріалу взимку через замерзання води в порах та збільшення об'єму льоду. Тому для зовнішніх робіт краще використовувати матеріали з низьким водопоглинанням. Залежність водопоглинання деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу зображено на рисунку 3.27.

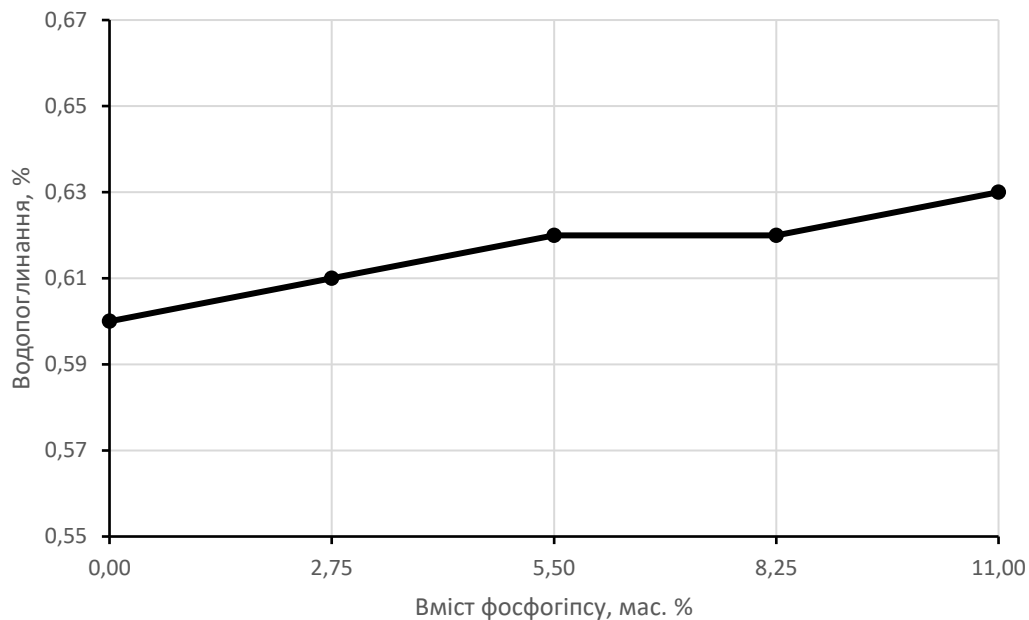


Рисунок 3.27 – Залежність водопоглинання деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу

З даних рисунка 3.27 можна зробити висновок, що при заміщенні кальциту фосфогіпсом у ДПК спостерігається незначне збільшення водопоглинання. Однак це збільшення залишається в межах довірчого інтервалу вимірювань, що свідчить про його статистичну незначущість. Таку поведінку можна пояснити кількома факторами. По-перше, фосфогіпс має

іншу хімічну структуру та фізичні властивості порівняно з кальцитом, що може впливати на взаємодію з водою. Проте, оскільки обидва матеріали є мінеральними наповнювачами, їхня здатність до водопоглинання може бути схожою, що й призводить до незначних змін у показниках. По-друге, ДПК мають складну структуру, де полімерна матриця та деревинні волокна взаємодіють між собою. Заміна одного наповнювача на інший може незначно змінити пористість або гідрофільність композиту, але ці зміни можуть бути недостатніми для суттєвого впливу на загальне водопоглинання. Отже, незначне збільшення водопоглинання при заміщенні кальциту фосфогіпсом є результатом комплексної взаємодії різних факторів, які впливають на фізико-хімічні властивості композиту. Важливо також зазначити, що навіть незначні зміни в характеристиках можуть мати практичне значення, особливо в специфічних застосуваннях.

Коефіцієнт лінійного розширення-стиснення є ключовим параметром при проектуванні конструкцій, адже він визначає, наскільки матеріал змінює розміри під впливом температурних коливань. Для деревинно-полімерних композитів, що активно застосовуються в будівництві та меблевій промисловості, цей коефіцієнт особливо важливий для оцінки їх стійкості до зовнішніх умов. ДПК поєднують властивості деревини та полімерів, роблячи їх легкими, міцними та вологостійкими, однак їх температурна поведінка може відрізнятися від традиційних матеріалів. На рисунку 3.28 зображено залежність коефіцієнту лінійного термічного розширення ДПК від вмісту фосфогіпсу.

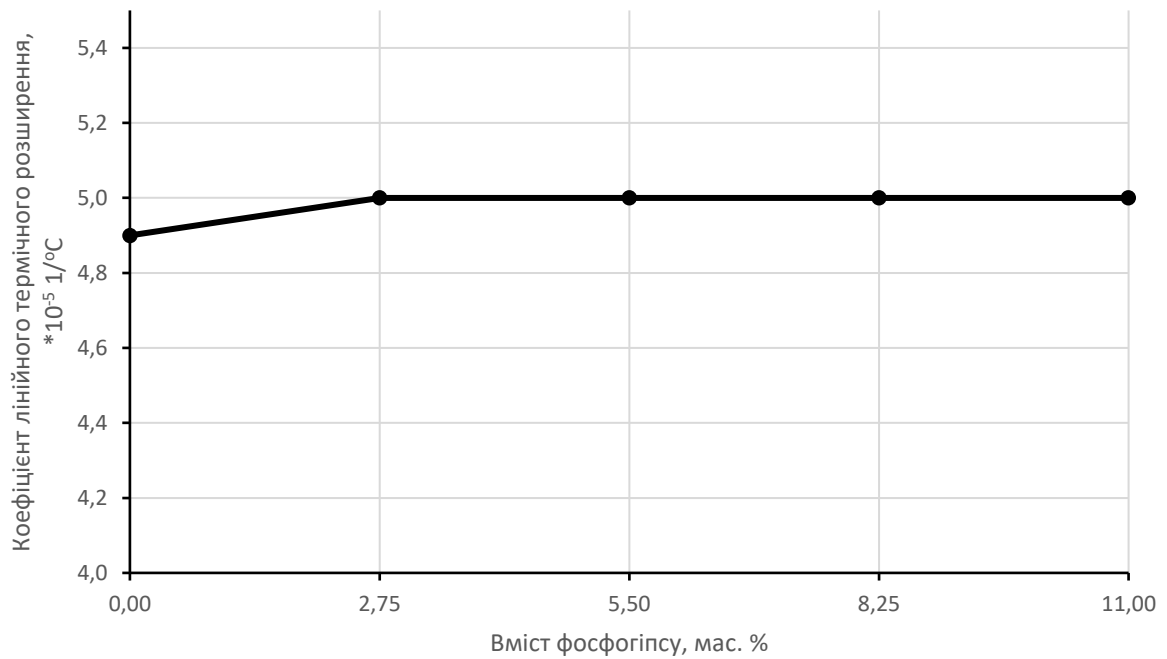


Рисунок 3.28 – Залежність коефіцієнту лінійного термічного розширення деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу

Аналіз даних рисунка 3.28 показує, що коефіцієнт лінійного термічного розширення композиту залишається стабільним, незалежно від того, чи використовується кальцит, чи фосфогіпс як наповнювач. Це явище можна пояснити кількома факторами. По-перше, обидва наповнювачі мають схожі фізико-хімічні властивості, що впливають на термічну поведінку композиту. Кальцит і фосфогіпс, будучи мінеральними наповнювачами, мають відносно низькі коефіцієнти термічного розширення, що дозволяє зберігати стабільність розмірів композиту при зміні температури. По-друге, складна структура ДПК, що складається з полімерної матриці та наповнювача, може забезпечувати певну компенсацію термічних деформацій. Хоча полімерна матриця зазвичай має вищий коефіцієнт термічного розширення, наявність наповнювача зменшує загальну деформацію матеріалу. Крім того, технологічні процеси виготовлення, такі як змішування та екструзія, сприяють однорідному розподілу наповнювача в матриці, що також впливає на термічні властивості. Таким чином, незалежно від типу наповнювача (кальцит чи фосфогіпс), кінцевий коефіцієнт

термічного розширення композиту залишається стабільним, що робить його придатним для використання в умовах коливань температури.

Технологічна усадка — це зміна розмірів матеріалів або виробів, яка виникає під час їхнього виробництва під впливом температури, вологості або інших технологічних факторів. Для деревинно-полімерних композитів це критично важливий аспект, який необхідно враховувати на всіх етапах їхнього виготовлення та експлуатації. Нехтування усадкою під час проектування може призводити до деформацій, тріщин або руйнування виробів. Для зменшення технологічної усадки ДПК застосовують різні методи, зокрема контроль вологості сировини, оптимізацію температурних режимів обробки, а також додавання спеціальних стабілізуючих добавок. Залежність технологічної усадки деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу зображено на рисунку 3.29.

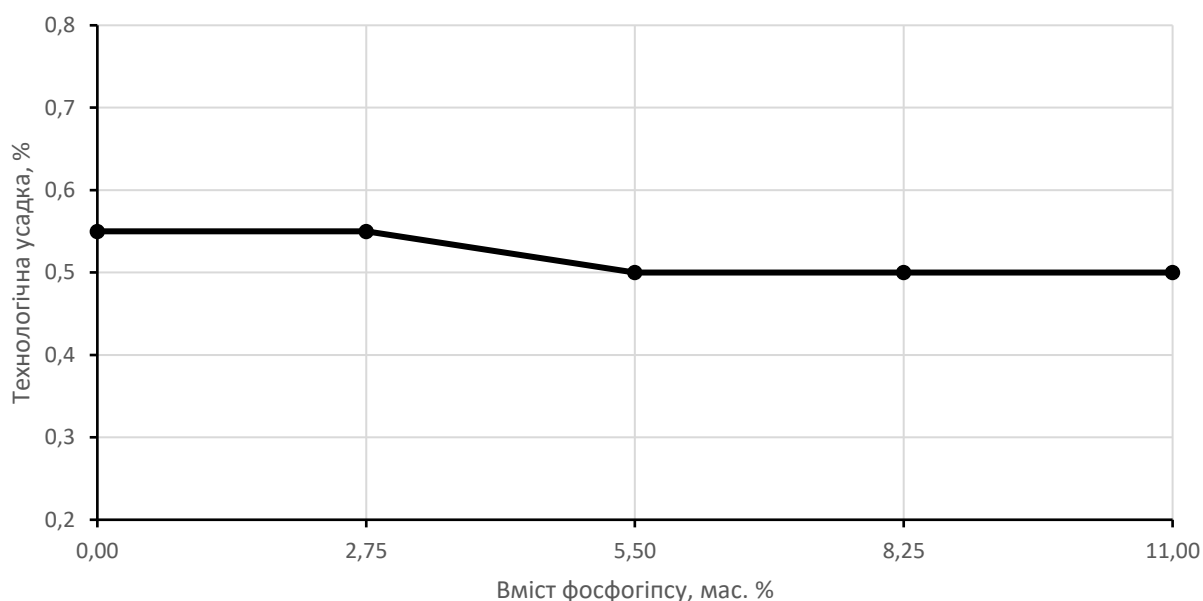


Рисунок 3.29 – Залежність технологічної усадки деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу

Аналіз даних рисунка 3.29 свідчить, що заміщення кальциту фосфогіпсом у ДПК не впливає на технологічну усадку. Це можна пояснити схожими фізико-хімічними властивостями матеріалів, оскільки фосфогіпс та

кальцит мають подібні властивості, що забезпечує стабільність структури композиту під час затвердіння. Обидва матеріали надають необхідну міцність та жорсткість, не змінюючи основних характеристик ДПК. Також технологічна усадка композиту переважно залежить від співвідношення компонентів, їхньої вологості та умов обробки. Заміна одного наповнювача іншим не спричиняє суттєвих змін у цих параметрах, що підтримує стабільність усадки. Крім того, фосфогіпс може позитивно впливати на взаємодію між деревиною та полімерною матрицею, знижуючи ризик деформацій під час висихання. Отже, заміщення кальциту фосфогіпсом не лише не впливає на технологічну усадку, а й потенційно покращує експлуатаційні характеристики композиту.

З метою визначення впливу фосфогіпсу на гомогенність та дисперсію компонентів у полімерній матриці композитів було досліджено вплив наповнювача на мікроструктуру деревинно-полімерних композитів. Результати представлені на рисунках 3.30 – 3.33.



Рисунок 3.30 – Мікроскопічне зображення ДПК із вмістом 8,25 мас. % кальциту та 2,75 мас % фосфогіпсу (ціна поділки 0,3 мкм)



Рисунок 3.31 – Мікроскопічне зображення ДПК із вмістом 5,5 мас. % кальциту та 5,5 мас % фосфогіпсу (ціна поділки 0,3 мкм)



Рисунок 3.32 – Мікроскопічне зображення ДПК із вмістом 2,75 мас. % кальциту та 8,25 мас % фосфогіпсу (ціна поділки 0,3 мкм)



Рисунок 3.33 – Мікроскопічне зображення ДПК із вмістом 0 мас. % кальциту та 11 мас % фосфогіпсу (ціна поділки 0,3 мкм)

Мікроскопічні зображення, наведені на рисунках 3.30 – 3.33, візуально підтверджують ключовий висновок: заміщення кальциту фосфогіпсом не призводить до негативних змін у внутрішній структурі ДПК. На всіх етапах заміщення – від початкового введення фосфогіпсу до його повного використання як єдиного неорганічного наповнювача – мікрофотографії демонструють рівномірний розподіл деревних частинок та наповнювача в полімерній матриці. Відсутність значних агломератів, мікропорожнеч або ознак розшарування свідчить про хорошу сумісність фосфогіпсу з ПЕВГ та ефективну дисперсію під час переробки. Ці мікроструктурні дані корелюють з експериментальними висновками щодо збереження фізико-механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей композиту. Це підтверджує потенціал фосфогіпсу як перспективного, екологічно чистого та економічно вигідного наповнювача для ДПК.

Для дослідження хімічного складу та ідентифікації функціональних груп у розроблених ДПК застосовано метод інфрачервоної спектроскопії з

перетворенням Фур'є (ІЧ-Фур'є). На рисунках 3.34 – 3.37 представлено ІЧ-спектри зразків ДПК з різними співвідношеннями наповнювачів

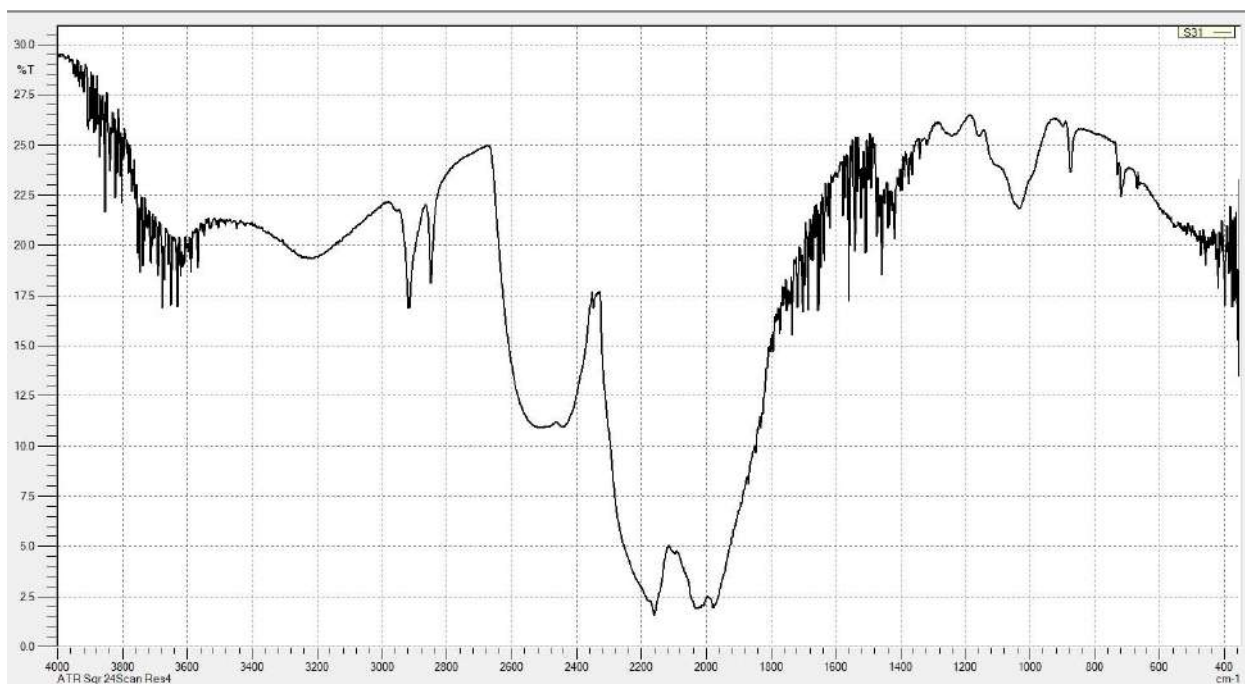


Рисунок 3.34 – ІЧ-спектр зразка 1: 8,25 % мас. кальциту та 2,75 % мас. фосфогіпсу.

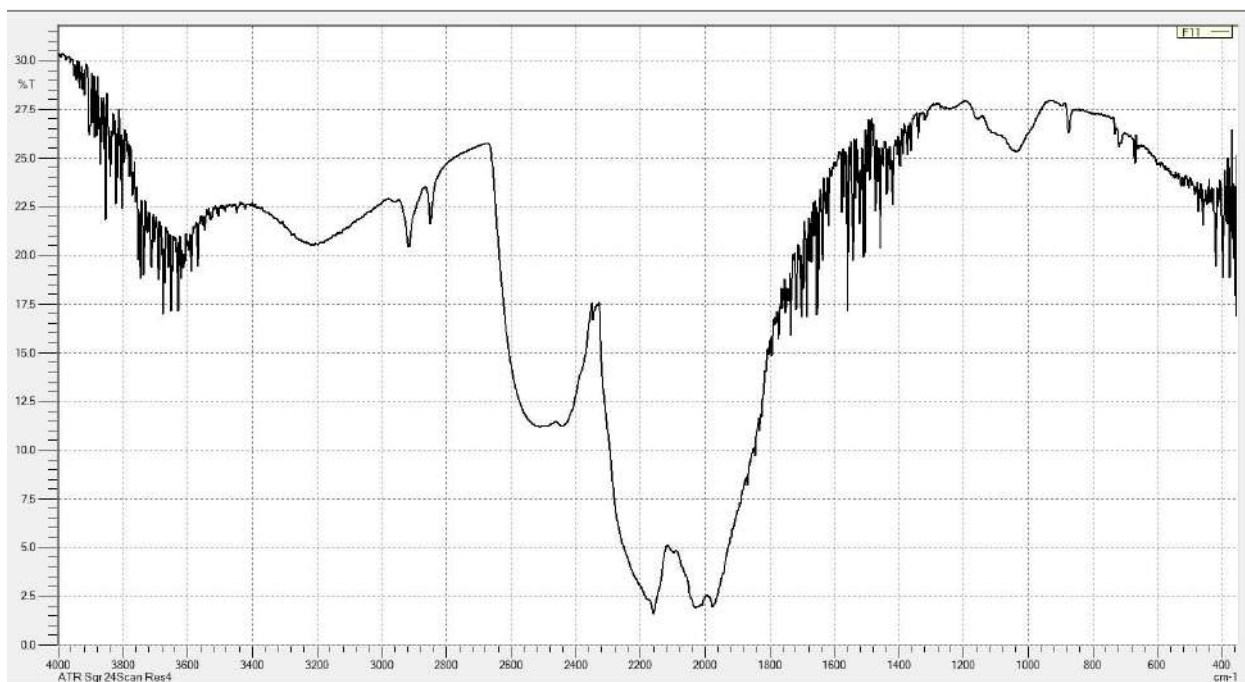


Рисунок 3.35 – ІЧ-спектр зразка 2: 5,5 % мас. кальциту та 5,5 % мас. фосфогіпсу.

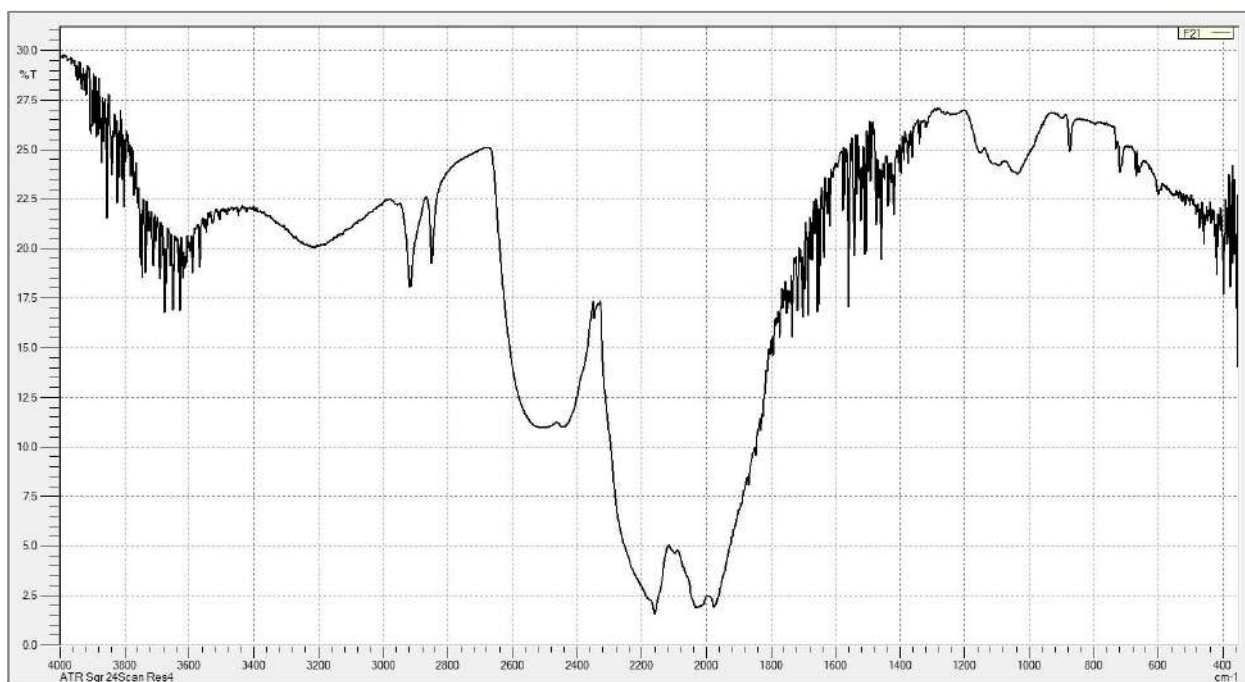


Рисунок 3.36 – ІЧ-спектр зразка 3: 2,75 % мас. кальциту та 8,25 % мас. фосфогіпсу.

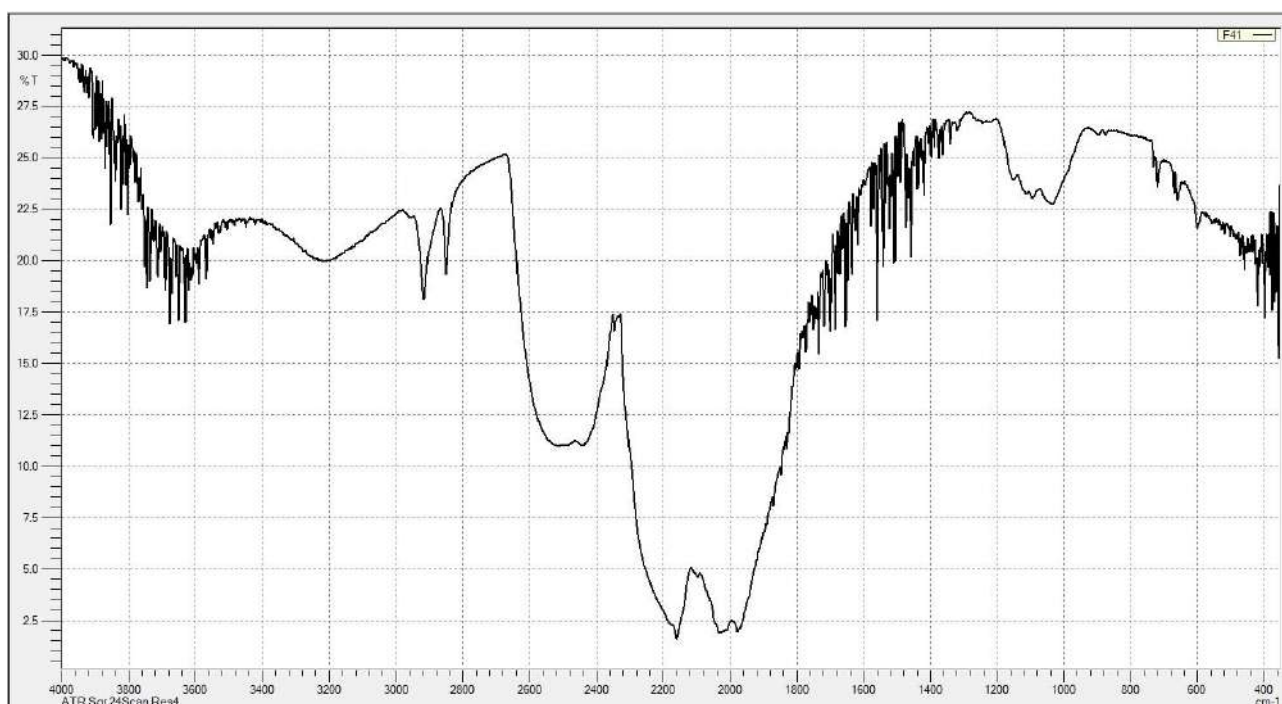


Рисунок 3.37 – ІЧ-спектр зразка 4: 0 % мас. кальциту та 11 % мас. фосфогіпсу.

На всіх спектрах чітко ідентифікуються характерні смуги полімерної матриці ПЕВГ (валентні коливання $(\text{CH})_2$ -груп при 2920 см^{-1} та 2850 см^{-1} , деформаційні коливання при 1465 см^{-1} та 720 см^{-1}). Їх стабільне положення та інтенсивність підтверджують відсутність значних хімічних змін ПЕВГ під впливом наповнювачів.

Присутність широкої смуги в діапазоні $3600\text{--}3200\text{ см}^{-1}$ вказує на валентні коливання гідроксильних груп (ОН) деревини та кристалізаційної води фосфогіпсу. Смуги СН-груп деревини (близько 2900 см^{-1}), $\text{C}=\text{O}$ карбонільних груп (1730 см^{-1}) та С-О коливань ($1000\text{--}1100\text{ см}^{-1}$) залишаються стабільними завдяки постійному вмісту деревини.

На спектрах, зображених на рис. 6.11, 6.12 та 6.13, спостерігаються характерні смуги карбонат-іона (CO_3^{2-}), зокрема сильна смуга при $1420\text{--}1450\text{ см}^{-1}$ та при 875 см^{-1} . Зменшення їх інтенсивності зі зменшенням вмісту кальциту та практична відсутність у зразку 4 (11 мас. % фосфогіпсу, 0 мас. % кальциту) підтверджує повне заміщення.

Зі збільшенням вмісту фосфогіпсу пропорційно зростає інтенсивність характерних смуг сульфат-іона (SO_4^{2-}), зокрема інтенсивна смуга при $1100\text{--}1140\text{ см}^{-1}$ та смуги при 670 см^{-1} та 600 см^{-1} . Це зростання досягає максимуму в зразку з 11 мас. % фосфогіпсу. Збільшення інтенсивності смуги ОН-груп ($3600\text{--}3200\text{ см}^{-1}$) у зразках з вищим вмістом фосфогіпсу зумовлено присутністю кристалізаційної води у фосфогіпсі.

Аналіз ІЧ-спектрів підтверджує успішне контрольоване введення фосфогіпсу та заміщення ним кальциту. Важливо, що відсутність нових значних піків або суттєвих зсувів на спектрах свідчить про відсутність хімічних реакцій або утворення нових ковалентних зв'язків між компонентами композиту (ПЕВГ, деревина, фосфогіпс). Ці дані узгоджуються з мікроструктурними дослідженнями та підтверджують, що фосфогіпс функціонує як інертний наповнювач у ДПК на основі ПЕВГ.

Висновки до підрозділу 3.4

За результатами проведених досліджень щодо впливу фосфогіпсу на властивості деревинно-полімерного композиту на основі вторинного поліетилену високої густини встановлено:

1. Мікроскопічні дослідження підтвердили, що заміщення кальциту фосфогіпсом не призводить до негативних змін у внутрішній структурі ДПК. Мікрофотографії демонструють рівномірний розподіл компонентів та відсутність агломератів чи розшарування, що свідчить про хорошу сумісність фосфогіпсу з ПЕВГ та його ефективну дисперсію.

2. Аналіз ІЧ-Фур'є спектрів підтвердив успішне та контрольоване заміщення кальциту фосфогіпсом. Відсутність нових піків або суттєвих зсувів смуг вказує на відсутність хімічних реакцій між компонентами композиту (ПЕВГ, деревина, фосфогіпс), підтверджуючи, що фосфогіпс функціонує як інертний наповнювач.

3. Заміщення кальциту фосфогіпсом дозволяє зберегти фізико-механічні, експлуатаційні та технологічні властивості ДПК на рівні, співставному з композитами, що містять кальцит. Ці дані корелюють з мікроскопічними та ІЧ-спектроскопічними дослідженнями, підтверджуючи потенціал фосфогіпсу як перспективного, екологічно чистого та економічно вигідного наповнювача для ДПК [215].

4. Використання фосфогіпсу як великотоннажного побічного продукту сприяє зниженню собівартості виробів та ефективному вирішенню проблеми утилізації промислових відходів, відкриваючи нові можливості для його промислового застосування.

5. Заміщення кальциту фосфогіпсом значно покращує екологічний аспект виробництва, сприяючи збереженню природних ресурсів та зменшенню антропогенного впливу. Це узгоджується з принципами циркулярної економіки та сталого розвитку, створюючи додаткові економічні та соціальні переваги [222].

3.5 Комбінований вплив епоксидованої соєвої олії та зольного пилу на властивості деревинно-полімерних композитів

У підрозділі 3.2 було встановлено, що епоксидована соєва олія може виступати як ефективний сумішник, покращуючи деякі механічні характеристики композиту. У свою чергу, зольний пил, як доступний промисловий відхід, показав себе як наповнювач, що впливає на міцність при вигині та інші властивості композитів (підрозділ 3.3). Однак, для повного розуміння їхнього впливу та оптимізації композицій, критично важливим є дослідження комбінованого впливу цих модифікаторів та виявлення можливих синергетичних чи антагоністичних ефектів.

Даний розділ присвячений комплексному вивченню взаємодії та комбінованого впливу епоксидованої соєвої олії та зольного пилу на ключові фізико-механічні властивості деревинно-полімерних композитів на основі ПЕВГ. Комплексне розуміння їхнього індивідуального та комбінованого впливу дозволить оптимізувати склад ДПК, розширити сфери їхнього застосування та сприяти створенню більш досконалих, сталих та конкурентоспроможних композиційних матеріалів.

У якості об'єкту дослідження був використаний композит із таким складом:

вторинний поліетилен високої густини – 30 мас. %;

деревинне борошно – 54 мас. %;

кальцит – 11 мас. %;

поліетиленовий віск – 1,1 мас. %;

стеаринова кислота – 1,25 мас. %;

УФ стабілізатор та барвники – інше.

Для всебічної оцінки синергетичного або адитивного впливу обох модифікаторів було застосовано методологію планування експерименту. Як фактори, що досліджувалися, були обрані вміст епоксидованої соєвої олії

(X_1) та вміст зольного пилу (X_2). Основний рівень (центр плану) був визначений як 1,25 мас. % для епоксидованої соєвої олії та 5,5 мас. % для зольного пилу (часткова заміна кальциту, описаного у підрозділі 3.3). Інтервал варіювання для епоксидованої соєвої олії становив 0,75 мас. %, що дозволило дослідити діапазон від 0,5 мас. % до 2,0 мас. %. Для зольного пилу інтервал варіювання склав 2,75 мас. %, охоплюючи діапазон від 2,75 мас. % до 8,25 мас. %.

Матриця планування експерименту була сформована як двофакторний повний факторний експеримент (2^2) з доданою центральною точкою, що дозволило оцінити лінійні ефекти факторів та їх взаємодію, а також перевірити адекватність лінійної моделі. Для кожної експериментальної точки, включаючи центральну, було виготовлено та випробувано по 5 зразків.

Дослідження густини є ключовим етапом оцінки мікроструктури та ущільнення полімерних композиційних матеріалів. В таблиці 3.1. представлені результати вимірювань густини досліджуваних зразків.

Таблиця 3.1 – Густина ДПК при комбінованому введенні епоксидованої соєвої олії та зольного пилу

Номер досліду	Вміст ЕСО, мас. %	Вміст зольного пилу, мас. %	Густина, кг/м ³					Середнє
			Номер зразка					
			1	2	3	4	5	
1	0,5	2,75	1260	1265	1262	1267	1266	1264
2	2,0	2,75	1270	1275	1272	1274	1269	1272
3	1,25	5,5	1278	1283	1280	1282	1277	1280
4	0,5	8,25	1270	1276	1273	1277	1274	1274
5	2,0	8,25	1295	1300	1297	1299	1294	1297

Аналіз отриманих даних показує, що комбіноване введення епоксидованої соєвої олії та зольного пилу продовжує тенденцію до підвищення густини композитів, що спостерігалася в індивідуальних дослідженнях.

Вплив ЕСО при фіксованому вмісті зольного пилу:

- при 2,75 мас. % зольного пилу, збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії з 0,5 мас. % (зразок 1, густина 1264 кг/м³) до 2,0 мас. % (зразок 2, густина 1272 кг/м³) призводить до зростання густини;
- аналогічно, при 8,25 мас. % зольного пилу, збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії з 0,5 мас. % (зразок 4, густина 1274 кг/м³) до 2,0 мас. % (зразок 5, густина 1297 кг/м³) також підвищує густину. Ця тенденція узгоджується з механізмом ущільнення, що приписується епоксидованій соєвій олії, яка, незважаючи на свою нижчу густину, ефективно заповнює мікропорожнини та покращує взаємодію компонентів.

Вплив зольного пилу при фіксованому вмісті епоксидованої соєвої олії:

- при 0,5 мас. % епоксидованої соєвої олії, збільшення вмісту зольного пилу з 2,75 мас. % (зразок 1, густина 1264 кг/м³) до 8,25 мас. % (зразок 4, густина 1274 кг/м³) призводить до зростання густини;
- при 2,0 мас. % епоксидованої соєвої олії, збільшення вмісту зольного пилу з 2,75 мас. % (зразок 2, густина 1272 кг/м³) до 8,25 мас. % (зразок 5, густина 1297 кг/м³) також підвищує густину. Це підвищення густини є очікуваним, оскільки зольний пил має значно вищу густину (3100 кг/м³) порівняно з іншими компонентами композиту, і його збільшення у відсотковому співвідношенні логічно веде до зростання загальної густини матеріалу.

Для кількісної оцінки впливу ЕСО та зольного пилу, а також їхньої взаємодії на густину ДПК, було проведено регресійний аналіз. На основі отриманих середніх значень густини факторних точок та центральної точки побудовано лінійну регресійну модель у кодованих змінних:

$$Y_{\text{густина}} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (1)$$

Де:

X_1 (кодоване) – вміст епоксидованої соєвої олії (мас. %) – 1,25 / 0,75;

X_2 (кодоване) – вміст зольного пилю (мас. %) – 5,5 / 2,75;

b_i - коефіцієнти регресії.

Розрахунок коефіцієнтів регресії:

Коефіцієнт b_0 відповідає середньому значенню відгуку в центральній точці плану, або усередненому відгуку по всіх факторних точках, якщо план є ортогональним. У даному випадку, ми можемо взяти значення з центральної точки: $b_0=Y_3=1280$ кг/м³.

Коефіцієнти b_i для повноцінного факторного експерименту 2^k :

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{1}{N_{\text{факт}}} \sum Y_i X_{1i} = \\ &= \frac{1}{4} [(-1 \times 1264) + (+1 \times 1272) + (-1 \times 1274) + (+1 \times 1297)] \\ &= 7,75 \end{aligned}$$

Де:

$N_{\text{факт}}$ – кількість факторних точок;

Y_i – значення вихідного параметра.

$$\begin{aligned} b_2 &= \frac{1}{N_{\text{факт}}} \sum Y_i X_{2i} = \\ &= \frac{1}{4} [(-1 \times 1264) + (-1 \times 1272) + (+1 \times 1274) + (+1 \times 1297)] \\ &= 8,75 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{12} &= \frac{1}{N_{\text{факт}}} \sum Y_i X_{1i} X_{2i} \\ &= \frac{1}{4} [(+1 * 1264) + (-1 * 1272) + (-1 * 1274) + (+1 * 1297)] \\ &= 3,75 \end{aligned}$$

Отже, отримана регресійна модель має вигляд:

$$Y_{\text{густина}}=1280+7,75X_1+8,75X_2+3,75X_1X_2 \quad (2)$$

Статистична значущість коефіцієнтів та адекватність моделі:

Для підтвердження статистичної значущості отриманих коефіцієнтів та адекватності побудованої моделі, розраховано дисперсію відтворюваності ($S_{\text{відт}}^2$) для кожної експериментальної точки.

Розрахунок дисперсій для кожної точки:

Вибіркова дисперсія

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

де $n=5$ (кількість повторень).

Точка 1: Густина ($\text{кг}/\text{м}^3$): 1260, 1265, 1262, 1267, 1266.

Середнє (\bar{x}_1) = 1264.

$$S_1^2 = \frac{1}{5-1} ((1260 - 1264)^2 + (1265 - 1264)^2 + (1262 - 1264)^2 + (1267 - 1264)^2 + (1266 - 1264)^2) = 8,5 (\text{кг}/\text{м}^3)^2$$

Аналогічно розрахунок для інших точок:

$$\text{Точка 2: } S_2^2 = 6,5 (\text{кг}/\text{м}^3)^2$$

$$\text{Точка 3 (Центральна): } S_3^2 = 6,5 (\text{кг}/\text{м}^3)^2$$

$$\text{Точка 4: } S_4^2 = 7,5 (\text{кг}/\text{м}^3)^2$$

$$\text{Точка 5: } S_5^2 = 6,5 (\text{кг}/\text{м}^3)^2$$

Усереднена дисперсія відтворюваності ($S_{\text{відт}}^2$) розраховується як середнє арифметичне дисперсій по всіх точках:

$$S_{\text{відт}}^2 = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k S_j^2 = \frac{8,5+6,5+6,5+7,5+6,5}{5} = 7,1 (\text{кг}/\text{м}^3)^2 \quad (4)$$

Кількість ступенів свободи для $S_{\text{відт}}^2$ складає

$$df_{\text{відт}} = k \times (n - 1) = 5 \times (5 - 1) = 20 \quad (5)$$

На основі $S_{\text{відт}}^2$ розраховано стандартну помилку коефіцієнтів (S_{bi}) та використано t-критерій Стьюдента для перевірки їхньої значущості.

Стандартна помилка коефіцієнта

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_{\text{відт}}^2}{N_{\text{факторних точок}} \times n}} = \sqrt{\frac{7,1}{4 \times 5}} \approx 0,596 \text{ кг}/\text{м}^3 \quad (6)$$

При рівні значущості $\alpha=0,05$ та $df_{\text{відт}}=20$, табличне значення $t_{\text{табл}}(20;0,05) \approx 2,086$.

Для $b_1=7,75$:

$$t_1 = \frac{|b_1|}{S_{bi}} = \frac{|7,75|}{0,596} \approx 13,00 \quad (7)$$

Оскільки $13,00 > 2,086$, коефіцієнт b_1 є статистично значущим.

Для $b_2=8,75$:

$$t_2 = \frac{|b_2|}{S_{bi}} = \frac{|8,75|}{0,596} \approx 14,68 \quad (8)$$

Оскільки $14,68 > 2,086$, коефіцієнт b_2 є статистично значущим.

Для $b_{12}=3,75$:

$$t_{12} = \frac{|b_{12}|}{S_{bi}} = \frac{|3,75|}{0,596} \approx 6,29 \quad (9)$$

Оскільки $6,29 > 2,086$, коефіцієнт b_{12} також є статистично значущим.

Для перевірки адекватності всієї регресійної моделі використано F-критерій Фішера. Спочатку розраховуємо суму квадратів відхилень, що пояснюються моделлю ($SS_{\text{модель}}$):

$$\begin{aligned} SS_{\text{модель}} &= n \times (b_1^2 + b_2^2 + b_{12}^2) = 5 \times (7,75^2 + 8,75^2 + 3,75^2) = \\ &= 753,4375 \end{aligned} \quad (10)$$

Кількість ступенів свободи для моделі ($df_{\text{модель}}$) = 3 (для b_1, b_2, b_{12}).

Дисперсія моделі

$$MS_{\text{модель}} = \frac{SS_{\text{модель}}}{df_{\text{модель}}} = \frac{753,4375}{3} \approx 251,146 \quad (11)$$

F-критерій Фішера:

$$F_{\text{розр}} = \frac{MS_{\text{модель}}}{S_{\text{відт}}^2} = \frac{251,146}{7,1} \approx 35,37 \quad (12)$$

Табличне значення $F_{\text{табл}}(df_{\text{модель}}; df_{\text{відт}}; \alpha) = F_{\text{табл}}(3; 20; 0,05) \approx 3,10$.

Оскільки розраховане значення $F_{\text{розр}}$ (35,37) значно перевищує табличне значення $F_{\text{табл}}$ (3,10), це підтверджує, що побудована регресійна модель є статистично адекватною та ефективно описує експериментальні дані в досліджуваному діапазоні факторів. Значне значення F-критерію вказує на те, що варіабельність густини, пояснювана моделлю (тобто впливом факторів), є суттєво більшою, ніж варіабельність, зумовлена випадковими експериментальними похибками.

Результати комбінованого дослідження густини ДПК чітко демонструють, що обидва модифікатори – епоксидована соєва олія та зольний пил – мають сильний і статистично значущий вплив на густину композитів. Більше того, виявлений статистично значущий коефіцієнт взаємодії (b_{12}) свідчить про те, що спільне використання цих модифікаторів призводить до синергетичного ефекту – їхній сукупний вплив на густину є більшим, ніж проста сума їхніх індивідуальних впливів. Це вказує на потенціал для оптимізації складу ДПК з метою досягнення бажаних показників густини та, відповідно, мікроструктурних властивостей.

Контроль водопоглинання є одним із найважливіших аспектів при розробці деревинно-полімерних композитів, оскільки він безпосередньо впливає на їхню довговічність, розмірну стабільність та механічні властивості в умовах підвищеної вологості або контакту з водою. Результати вимірювань водопоглинання комбінованих зразків представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Водопоглинання ДПК при комбінованому введенні епоксидованої соєвої олії та зольного пилу

Номер дослід-ду	Вміст ЕСО, мас. %	Вміст зольного пилу, мас. %	Водопоглинання, %					Середнє
			Номер зразка					
			1	2	3	4	5	
1	0,5	2,75	0,48	0,55	0,50	0,54	0,50	0,514
2	2,0	2,75	0,44	0,50	0,46	0,49	0,48	0,474
3	1,25	5,5	0,40	0,48	0,45	0,42	0,48	0,444
4	0,5	8,25	0,37	0,44	0,39	0,42	0,40	0,404
5	2,0	8,25	0,30	0,38	0,34	0,37	0,33	0,344

Аналіз експериментальних даних комбінованого введення епоксидованої соєвої олії та зольного пилу демонструє їх позитивний, адитивний вплив на зниження водопоглинання ДПК.

Вплив епоксидованої соєвої олії при фіксованому вмісті зольного пилу:

- при 2,75 мас. % зольного пилу, збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії з 0,5 мас. % (середнє водопоглинання 0,514 %) до 2,0 мас. % (середнє водопоглинання 0,474 %) призводить до зниження водопоглинання;
- аналогічно, при 8,25 мас. % зольного пилу, збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії з 0,5 мас. % (середнє водопоглинання 0,404 %) до 2,0 мас. % (середнє водопоглинання 0,344 %) також викликає зниження водопоглинання. Ця тенденція узгоджується з індивідуальним впливом епоксидованої соєвої олії на водопоглинання композиту, підтверджуючи її здатність до покращення гідрофобності.

Вплив зольного пилу при фіксованому вмісті епоксидованої соєвої олії:

- при 0,5 мас. % епоксидованої соєвої олії, збільшення вмісту зольного пилу з 2,75 мас. % (середнє водопоглинання 0,514 %) до 8,25 мас. % (середнє водопоглинання 0,404 %) призводить до значного зниження водопоглинання;
- при 2,0 мас. % епоксидованої соєвої олії, збільшення вмісту зольного пилу з 2,75 мас. % (середнє водопоглинання 0,474 %) до 8,25 мас. % (середнє водопоглинання 0,344 %) також викликає значне зниження водопоглинання. Ці результати підтверджують високу ефективність зольного пилу у зменшенні водопоглинання композиту.

Для кількісної оцінки впливу епоксидованої соєвої олії та зольного пилу, а також їхньої взаємодії на водопоглинання ДПК, було проведено регресійний аналіз. Побудовано лінійну регресійну модель у кодованих змінних:

$$Y_{\text{водопоглинання}} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (13)$$

Де:

$$X_1 \text{ (кодоване)} = (\text{Вміст епоксидованої соєвої олії (мас.\%) - 1,25} / 0,75);$$

X_2 (кодоване) = (Вміст зольного пилу (мас.%) – 5,5 / 2,75);

b_i - коефіцієнти регресії.

Розрахунок коефіцієнтів регресії відбувався за аналогією із попередніми розрахунками та отримана регресійна модель має вигляд:

$$Y_{\text{водопоглинання}} = 0,444 - 0,02X_1 - 0,055X_2 - 0,01X_1X_2 \quad (14)$$

Для оцінки значущості коефіцієнтів та адекватності моделі аналогічно як і для густини розраховано дисперсію відтворюваності ($S_{\text{відт}}^2 = 0,00065$), стандартну помилку коефіцієнта ($S_{b_i} \approx 0,0057$) та використано t-критерій Стьюдента для перевірки значущості коефіцієнтів (при рівні значущості $\alpha = 0,05$ та 20 ступенях свободи, табличне значення $t_{\text{табл}}(20; 0,05) \approx 2,086$).

Для $b_1 = -0,02$: $t_1 \approx 3,51$. Оскільки $3,51 > 2,086$, коефіцієнт b_1 є статистично значущим.

Для $b_2 = -0,055$: $t_2 \approx 9,65$. Оскільки $9,65 > 2,086$, коефіцієнт b_2 є статистично значущим.

Для $b_{12} = -0,01$: $t_{12} \approx 1,75$. Оскільки $1,75 < 2,086$, коефіцієнт b_{12} є статистично незначущим. Це означає, що взаємодія між факторами є мінімальною або відсутня.

Оскільки коефіцієнт взаємодії b_{12} виявився незначущим, ми можемо розглядати спрощену модель без члена взаємодії:

$$Y_{\text{водопоглинання}} = 0,444 - 0,02X_1 - 0,055X_2 \quad (15)$$

Аналогічним чином розраховувалась сума квадратів відхилень, що пояснюються моделлю ($SS_{\text{модель}} = 0,017125$), кількість ступенів свободи для моделі ($df_{\text{модель}} = 2$ (для b_1 і b_2)), дисперсія моделі ($MS_{\text{модель}} = 0,0085625$) та F-критерій Фішера: $F_{\text{розр}} \approx 13,17$. Табличне значення $F_{\text{табл}}(2; 20; 0,05) \approx 3,49$.

Оскільки $13,17 > 3,49$, побудована регресійна модель є статистично адекватною та добре описує експериментальні дані в досліджуваному діапазоні факторів.

Комбіноване введення епоксидованої соєвої олії та зольного пилу демонструє значний позитивний вплив на зниження водопоглинання ДПК. Обидва модифікатори ефективно зменшують водопоглинання, причому

зольний пил має більш виражений вплив. Епоксидована соєва олія покращує змочування деревини та заповнює мікропорожнини, тоді як зольний пил діє як гідрофобний заповнювач, що ущільнює структуру та обмежує проникнення води.

Отримана математична модель $Y_{\text{водопоглинання}}=0,444-0,02X_1-0,055X_2$ є статистично значущою та адекватною. Відсутність значущого коефіцієнта взаємодії (b_{12}) спрощує оптимізацію, оскільки вплив кожного модифікатора на водопоглинання є переважно незалежним. Найнижче водопоглинання (середнє 0,344 %) було досягнуто при високих концентраціях обох модифікаторів (2,0 мас. % епоксидованої соєвої олії та 8,25 мас. % зольного пилу), що підкреслює ефективність комбінованого підходу для значного підвищення вологостійкості ДПК.

Контроль коефіцієнта лінійного термічного розширення є важливим аспектом при розробці полімерних композиційних матеріалів, оскільки він безпосередньо впливає на розмірну стабільність виробу в умовах температурних змін. Для оцінки взаємодії та комбінованого впливу модифікаторів на коефіцієнт лінійного термічного розширення ДПК було проведено експерименти згідно з двофакторним повним факторним планом (2^2) з доданою центральною точкою. Основний рівень вмісту епоксидованої соєвої олії становив 1,25 мас. %, зольного пилу – 5,5 мас. %, з інтервалом варіювання 0,75 мас. % для епоксидованої соєвої олії та 2,75 мас. % для зольного пилу. Для кожної експериментальної точки було виготовлено та випробувано по 5 зразків. Значення коефіцієнта лінійного термічного розширення для цих комбінацій представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Коефіцієнт лінійного термічного розширення деревинно-полімерного композиту при комбінованому введенні епоксидованої соєвої олії та зольного пилу

Номер досліду	Вміст ЕСО, мас. %	Вміст зольного пилу, мас. %	Коефіцієнт лінійного термічного розширення, $\times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$					
			Номер зразка					Середнє
			1	2	3	4	5	
1	0,5	2,75	3,7	3,9	3,8	3,8	3,7	3,8
2	2,0	2,75	4,6	4,8	4,7	4,7	4,6	4,7
3	1,25	5,5	3,1	3,3	3,2	3,2	3,1	3,2
4	0,5	8,25	2,9	3,1	3,0	3,0	2,9	3,0
5	2,0	8,25	3,4	3,6	3,5	3,5	3,4	3,5

Аналіз експериментальних даних комбінованого введення епоксидованої соєвої олії та зольного пилу демонструє їх антагоністичний вплив на коефіцієнт лінійного термічного розширення ДПК та дозволяє ефективно його контролювати, враховуючи протилежний вплив цих модифікаторів.

Вплив ЕСО при фіксованому вмісті зольного пилу:

- при низькій концентрації зольного пилу (2,75 мас. %), збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії з 0,5 мас. % (зразок 1, коефіцієнт лінійного термічного розширення $3,8 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$) до 2,0 мас. % (зразок 2, коефіцієнт лінійного термічного розширення $4,7 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$) призводить до помітного зростання коефіцієнта лінійного термічного розширення. Це узгоджується з роллю епоксидованої соєвої олії як пластифікатора, що підвищує рухливість полімерних ланцюгів;

- аналогічно, при високій концентрації зольного пилу (8,25 мас. %), збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії з 0,5 мас. % (зразок 4, коефіцієнт лінійного термічного розширення $3,0 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$) до 2,0 мас. % (зразок 5, коефіцієнт лінійного термічного розширення $3,5 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$) також демонструє

підвищення коефіцієнта лінійного термічного розширення. Однак, слід зазначити, що загальні значення коефіцієнта лінійного термічного розширення залишаються нижчими порівняно з композитами з меншою кількістю зольного пилу.

Вплив зольного пилу при фіксованому вмісті епоксидованої соєвої олії:

- при низькій концентрації епоксидованої соєвої олії (0,5 мас. %), збільшення вмісту зольного пилу з 2,75 мас. % (зразок 1, коефіцієнт лінійного термічного розширення $3,8 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) до 8,25 мас. % (зразок 4, коефіцієнт лінійного термічного розширення $3,0 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) приводить до зниження коефіцієнта лінійного термічного розширення;

- при високій концентрації епоксидованої соєвої олії (2,0 мас. %), збільшення вмісту зольного пилу з 2,75 мас. % (зразок 2, коефіцієнт лінійного термічного розширення $4,7 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) до 8,25 мас. % (зразок 5, коефіцієнт лінійного термічного розширення $3,5 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) також викликає зниження коефіцієнта лінійного термічного розширення. Ці результати підтверджують ефективність зольного пилу як інгібітора термічного розширення, що узгоджується з його високою жорсткістю та низьким власним коефіцієнтом лінійного термічного розширення. Частинки зольного пилу діють як обмежувачі для термічного руху полімерної матриці, підвищуючи розмірну стабільність композиту.

Для кількісної оцінки впливу епоксидованої соєвої олії та зольного пилу, а також їхньої взаємодії на коефіцієнт лінійного термічного розширення деревинно-полімерних композитів, було проведено регресійний аналіз. Побудовано лінійну регресійну модель у кодованих змінних:

$$Y_{\text{КЛТР}} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (16)$$

Де:

X_1 (кодоване) = (Вміст епоксидованої соєвої олії (мас. %) – 1,25 / 0,75);

X_2 (кодоване) = (Вміст зольного пилу (мас. %) – 5,5 / 2,75);

b_i - коефіцієнти регресії.

Розрахунок коефіцієнтів регресії проводився аналогічним чином, як і попередні. Отримана регресійна модель має вигляд:

$$Y_{\text{КЛТР}} = 3,2 + 0,35X_1 - 0,5X_2 - 0,1X_1X_2 \quad (17)$$

Для оцінки значущості коефіцієнтів та адекватності моделі, аналогічним чином розраховано дисперсію відтворюваності ($S_{\text{відт}}^2 \approx 0,025$), та стандартну помилку коефіцієнта ($S_{b_i} \approx 0,0354$). При рівні значущості $\alpha = 0,05$ та 20 ступенях свободи, табличне значення $t_{\text{табл}}(20; 0,05) \approx 2,086$.

Для $b_1 = 0,35$: $t_1 \approx 9,89$. Оскільки $9,89 > 2,086$, коефіцієнт b_1 є статистично значущим.

Для $b_2 = -0,5$: $t_2 \approx 14,12$. Оскільки $14,12 > 2,086$, коефіцієнт b_2 є статистично значущим.

Для $b_{12} = -0,1$: $t_{12} \approx 2,82$. Оскільки $2,82 < 2,086$, коефіцієнт b_{12} є статистично незначущим.

Для перевірки адекватності моделі (F-критерій) розрахована сума квадратів відхилень ($SS_{\text{модель}} = 0,19125$), та дисперсія моделі ($MS_{\text{модель}} \approx 0,6375$). Таким чином F-критерій Фішера: $F_{\text{розр}} \approx 25,5$. Табличне значення $F_{\text{табл}}(3; 20; 0,05) \approx 3,10$. Оскільки $25,5 > 3,10$, то модель є статистично адекватною і добре описує експериментальні дані.

Комбіноване введення епоксидованої соєвої олії та зольного пилу демонструє антагоністичний вплив на коефіцієнт лінійного термічного розширення деревинно-полімерних композитів: епоксидована соєва олія підвищує його, тоді як зольний пил значно знижує. Ця протилежна дія дозволяє досягти балансу властивостей та оптимізувати рецептуру для конкретних застосувань. Наприклад, для підвищеної стабільності розмірів доцільно використовувати вищі концентрації зольного пилу, компенсуючи потенційне зростання коефіцієнта лінійного термічного розширення за рахунок епоксидованої соєвої олії.

Отримана математична модель $Y_{\text{КЛТР}} = 3,2 + 0,35X_1 - 0,5X_2 - 0,1X_1X_2$ є статистично значущою та адекватною. Найнижчий коефіцієнт лінійного термічного розширення ($3,0 \times 10^{-5}$ 1/С) було отримано для зразка з низьким

вмістом епоксидованої соєвої олії (0,5 мас. %) та високим вмістом зольного пилу (8,25 мас. %), що свідчить про ефективність комбінованого підходу для поліпшення розмірної стабільності деревинно-полімерних композитів.

Контроль технологічної усадки є критично важливим для виробництва полімерних композиційних матеріалів, оскільки вона безпосередньо впливає на точність розмірів, форму виробів, відсутність внутрішніх напружень та дефектів. Неконтрольована усадка може призвести до викривлення, розтріскування та відшарування, особливо в складних геометричних виробах.

Для оцінки взаємодії та комбінованого впливу модифікаторів на технологічну усадку ДПК було проведено експерименти згідно з двофакторним повним факторним планом (2^2). Основний рівень вмісту епоксидованої соєвої олії становив 1,25 мас. %, зольного пилу – 5,5 мас. %, з інтервалом варіювання 0,75 мас. % для епоксидованої соєвої олії та 2,75 мас. % для зольного пилу. Для кожної експериментальної точки було виготовлено та випробувано по 5 зразків. Експериментальні значення технологічної усадки для цих комбінацій представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Технологічна усадка ДПК при комбінованому введенні епоксидованої соєвої олії та зольного пилу

Номер досліду	Вміст ЕСО, мас. %	Вміст зольного пилу, мас. %	Технологічна усадка, %					Середнє
			Номер зразка					
			1	2	3	4	5	
1	0,5	2,75	0,35	0,40	0,38	0,43	0,37	0,386
2	2,0	2,75	0,30	0,36	0,34	0,32	0,33	0,33
3	1,25	5,5	0,23	0,28	0,27	0,24	0,26	0,256
4	0,5	8,25	0,16	0,22	0,20	0,18	0,21	0,194
5	2,0	8,25	0,10	0,15	0,13	0,11	0,12	0,122

Аналіз експериментальних даних комбінованого введення епоксидованої соєвої олії та зольного пилу демонструє їх адитивний вплив на зниження технологічної усадки ДПК.

Вплив епоксидованої соєвої олії при фіксованому вмісті зольного пилу:

- при 2,75 мас. % зольного пилу, збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії з 0,5 мас. % (середня усадка 0,386 %) до 2,0 мас. % (середня усадка 0,330%) приводить до зниження усадки;

- аналогічно, при 8,25 мас. % зольного пилу, збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії з 0,5 мас. % (середня усадка 0,194 %) до 2,0 мас. % (середня усадка 0,122 %) також викликає зниження усадки. Це узгоджується з індивідуальним впливом епоксидованої соєвої олії, підтверджуючи її здатність зменшувати внутрішні напруження та сприяти більш стабільній структурі.

Вплив зольного пилу при фіксованому вмісті епоксидованої соєвої олії:

- при 0,5 мас. % епоксидованої соєвої олії, збільшення вмісту зольного пилу з 2,75 мас. % (середня усадка 0,386 %) до 8,25 мас. % (середня усадка 0,194 %) приводить до значного зниження усадки;

- при 2,0 мас. % епоксидованої соєвої олії, збільшення вмісту зольного пилу з 2,75 мас. % (середня усадка 0,330 %) до 8,25 мас. % (середня усадка 0,122 %) також викликає значне зниження усадки. Ці результати підтверджують високу ефективність зольного пилу як інгібітора усадки, що узгоджується з його жорсткістю та здатністю обмежувати рухливість полімерної матриці.

Для кількісної оцінки впливу епоксидованої соєвої олії та зольного пилу, а також їхньої взаємодії на технологічну усадку деревинно-полімерних композитів, було проведено регресійний аналіз. Побудовано лінійну регресійну модель у кодованих змінних:

$$Y_{\text{усадка}} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (18)$$

Де:

$$X_1 \text{ (кодоване)} = (\text{Вміст епоксидованої соєвої олії (мас. \%)} - 1,25 / 0,75);$$

$$X_2 \text{ (кодоване)} = (\text{Вміст зольного пилю (мас. \%)} - 5,5 / 2,75);$$

b_i - коефіцієнти регресії.

Розрахунок коефіцієнтів регресії на основі середніх значень факторних відбувався аналогічним чином, як і попередні розрахунки. Отримана регресійна модель має вигляд:

$$Y_{\text{усадка}} = 0,2576 - 0,032X_1 - 0,1X_2 - 0,004X_1X_2 \quad (19)$$

Для оцінки значущості коефіцієнтів та адекватності моделі розраховано дисперсію відтворюваності ($S_{\text{відт}}^2 = 0,0025$), стандартну помилку коефіцієнта ($S_{b_i} \approx 0,01118$). При рівні значущості $\alpha = 0,05$ та 20 ступенях свободи, табличне значення $t_{\text{табл}}(20; 0,05) \approx 2,086$. Таким чином:

Для $b_1 = -0,032$: $t_1 \approx 2,86$. Оскільки $2,86 > 2,086$, коефіцієнт b_1 є статистично значущим.

Для $b_2 = -0,1$: $t_2 \approx 8,94$. Оскільки $8,94 > 2,086$, коефіцієнт b_2 є статистично значущим.

Для $b_{12} = -0,004$: $t_{12} \approx 0,36$. Оскільки $0,36 < 2,086$, коефіцієнт b_{12} є статистично незначущим. Це свідчить про відсутність суттєвої взаємодії між факторами в досліджуваному діапазоні значень.

Оскільки коефіцієнт взаємодії b_{12} виявився незначущим, ми можемо розглядати спрощену модель без члена взаємодії:

$$Y_{\text{усадка}} = 0,2576 - 0,032X_1 - 0,1X_2. \quad (20)$$

Також, аналогічно, розрахована сума квадратів відхилень, що пояснюються моделлю ($SS_{\text{модель}} = 0,05512$), дисперсія моделі ($MS_{\text{модель}} = 0,02756$).

Таким чином, F-критерій Фішера: $F_{\text{розр}} \approx 11,02$.

Табличне значення $F_{\text{табл}}(2; 20; 0,05) \approx 3,49$.

Оскільки $11,02 > 3,49$, побудована регресійна модель є статистично адекватною та добре описує експериментальні дані в досліджуваному діапазоні факторів.

Комбіноване введення епоксидованої соєвої олії та зольного пилю демонструє значний позитивний вплив на зниження технологічної усадки

деревинно-полімерних композитів. Обидва модифікатори ефективно зменшують усадку, що є надзвичайно важливою властивістю для забезпечення розмірної стабільності та якості готових виробів. Епоксидована соєва олія покращує технологічні властивості полімерної маси, а зольний пил діє як жорсткий наповнювач, що обмежує усадку.

Отримана математична модель $Y_{\text{усадка}}=0,2576-0,032X_1-0,1X_2$ є статистично значущою та адекватною. Важливо зазначити, що коефіцієнт взаємодії (b_{12}) виявився статистично незначущим. Це вказує на те, що вплив епоксидованої соєвої олії та зольного пилу на технологічну усадку є переважно адитивним у даному діапазоні вимірювань, і їхня спільна дія не створює значущого додаткового ефекту. Найнижча технологічна усадка (середнє 0,122 %) була досягнута при високих концентраціях обох модифікаторів (2,0 мас. % епоксидованої соєвої олії та 8,25 мас. % зольного пилу), що підкреслює ефективність комбінованого підходу для значного підвищення розмірної стабільності деревинно-полімерних композитів.

Міцність при вигині є одним з найважливіших механічних показників для деревинно-полімерних композитів, оскільки вона визначає їхню здатність витримувати навантаження без руйнування в умовах згину, що є типовим для багатьох конструкційних застосувань. Ця властивість прямо впливає на експлуатаційну надійність та довговічність виробів.

Для оцінки взаємодії та комбінованого впливу модифікаторів на міцність при вигині було проведено експерименти згідно з двофакторним повним факторним планом (2^2) з центральною точкою. Основний рівень вмісту епоксидованої соєвої олії становив 1,25 мас. %, зольного пилу – 5,5 мас. %, з відповідними інтервалами варіювання. Для кожної експериментальної точки було виготовлено та випробувано по 5 зразків. Значення міцності при вигині для комбінованих зразків представлені в таблиці 3.5

Таблиця 3.5 – Міцність при вигині ДПК при комбінованому введенні епоксидованої соєвої олії та зольного пилу.

Номер досліду	Вміст ЕСО, мас. %	Вміст зольного пилу, мас. %	Міцність при вигині, МПа					Середнє
			Номер зразка					
			1	2	3	4	5	
1	0,5	2,75	49,3	50,8	48,9	51,3	49,9	50,0
2	2,0	2,75	40,2	42,2	40,9	41,5	40,0	41,0
3	1,25	5,5	46,2	48,0	46,6	47,4	47,1	47,1
4	0,5	8,25	52,5	54,1	51,9	53,6	53,2	53,1
5	2,0	8,25	45,3	47,2	46,0	46,6	45,2	46,1

Аналіз експериментальних даних комбінованого введення епоксидованої соєвої олії та зольного пилу демонструє їхній вплив на міцність при вигині деревинно-полімерних композитів.

Вплив епоксидованої соєвої олії при фіксованому вмісті зольного пилу:

- при 2,75 мас. % зольного пилу, збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії з 0,5 мас. % (середня міцність 50,0 МПа) до 2,0 мас. % (середня міцність 41,0 МПа) призводить до зниження міцності при вигині;

- при 8,25 мас. % зольного пилу, збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії з 0,5 мас. % (середня міцність 53,1 МПа) до 2,0 мас. % (середня міцність 46,1 МПа) також викликає зниження міцності при вигині. Ця тенденція узгоджується з індивідуальним впливом епоксидованої соєвої олії при перевищенні оптимальної концентрації (починаючи з 0,5 мас. %).

Вплив зольного пилу при фіксованому вмісті епоксидованої соєвої олії:

- при 0,5 мас. % епоксидованої соєвої олії, збільшення вмісту зольного пилу з 2,75 мас. % (середня міцність 50,0 МПа) до 8,25 мас. % (середня міцність 53,1 МПа) призводить до підвищення міцності при вигині;

- при 2,0 мас. % епоксидованої соєвої олії, збільшення вмісту зольного пилу з 2,75 мас. % (середня міцність 41,0 МПа) до 8,25 мас. % (середня

міцність 46,1 МПа) також викликає підвищення міцності при вигині. Це підтверджує позитивний вплив зольного пилю на міцність при вигині.

Для кількісної оцінки впливу епоксидованої соєвої олії та зольного пилю, а також їхньої взаємодії на міцність при вигині, проведено регресійний аналіз. Побудовано лінійну регресійну модель у кодованих змінних:

$$Y_{\text{міцність}} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (21)$$

Де:

$$X_1 \text{ (кодоване)} = (\text{Вміст епоксидованої соєвої олії (мас. \%)} - 1,25 / 0,75);$$

$$X_2 \text{ (кодоване)} = (\text{Вміст зольного пилю (мас. \%)} - 5,5 / 2,75);$$

b_i - коефіцієнти регресії.

Розрахунок коефіцієнтів регресії на основі середніх значень факторних точок відбувався таким самим чином як і попередні розрахунки. Отже, отримана регресійна модель має вигляд:

$$Y_{\text{міцність}} = 47,46 - 4,00 X_1 + 2,05 X_2 + 0,50 X_1 X_2 \quad (22)$$

Для оцінки значущості коефіцієнтів та адекватності моделі розраховано дисперсію відтворюваності ($S_{\text{відт}}^2 = 4$) та стандартну помилку коефіцієнта: ($S_{b_i} \approx 0,447$). При рівні значущості $\alpha = 0,05$ та 20 ступенях свободи, табличне значення $t_{\text{табл}}(20; 0,05) \approx 2,086$. Таким чином:

Для $b_1 = -4,00$: $t_1 \approx 8,95$. Оскільки $8,95 > 2,086$, коефіцієнт b_1 є статистично значущим. Це підтверджує значний негативний вплив епоксидованої соєвої олії в досліджуваному діапазоні (де її концентрація вже перевищує оптимальну).

Для $b_2 = 2,05$: $t_2 \approx 4,59$. Оскільки $4,59 > 2,086$, коефіцієнт b_2 є статистично значущим. Це підтверджує позитивний вплив зольного пилю.

Для $b_{12} = 0,50$: $t_{12} \approx 1,12$. Оскільки $1,12 < 2,086$, коефіцієнт b_{12} є статистично незначущим. Це вказує на те, що взаємодія між епоксидованою соєвою олією та зольним пилом щодо міцності при вигині є незначною або відсутня.

Оскільки коефіцієнт взаємодії b_{12} виявився незначущим, ми розглядаємо спрощену модель без члена взаємодії:

$$Y_{\text{міцність}}=47,46-4,00X_1+2,05X_2 \quad (23)$$

Сума квадратів відхилень, що пояснюються моделлю також розраховано аналогічним чином ($SS_{\text{модель}}=101,0125$), а також дисперсія моделі ($MS_{\text{модель}}=50,50625$). F-критерій Фішера: $F_{\text{розр}}=12,6265625$

Табличне значення $F_{\text{табл}}(2;20;0,05)\approx 3,49$.

Оскільки $12,627 > 3,49$, побудована регресійна модель є статистично адекватною та добре описує експериментальні дані в досліджуваному діапазоні факторів.

Вплив епоксидованої соєвої олії та зольного пилу на міцність при вигині ДПК є значущим. Епоксидована соєва олія демонструє нелінійний вплив: початкове додавання (до 0,5 мас. %) значно підвищує міцність, діючи як сумісник, тоді як подальше збільшення її концентрації призводить до зниження міцності через надмірну пластифікацію. Зольний пил лінійно збільшує міцність при вигині, виконуючи роль жорсткого наповнювача.

Побудована регресійна модель $Y_{\text{міцність}}=47,46-4,00X_1+2,05X_2$ є статистично адекватною. Важливо, що коефіцієнт взаємодії між епоксидованою соєвою олією та зольним пилом виявився статистично незначущим. Це свідчить про те, що їхній вплив на міцність при вигині є переважно адитивним у досліджуваному діапазоні концентрацій, і окремі ефекти не посилюються або не послаблюються значно при їх комбінуванні. Для оптимізації міцності при вигині необхідно знайти баланс між вмістом епоксидованою соєвою олією (прагнучі до її оптимальної початкової концентрації) та зольного пилу (збільшуючи його для підвищення жорсткості).

Ударна в'язкість є критично важливою характеристикою для полімерних композитів, що використовуються в умовах ударних або динамічних навантажень. Вона відображає здатність матеріалу поглинати енергію до руйнування, що безпосередньо впливає на його стійкість до крихкого руйнування, довговічність та безпеку експлуатації.

Для оцінки взаємодії та комбінованого впливу модифікаторів на ударну в'язкість деревинно-полімерних композитів було проведено експерименти згідно з двофакторним повним факторним планом (2^2) з центральною точкою. Основний рівень вмісту епоксидованої соєвої олії також становив 1,25 мас. %, зольного пилу – 5,5 мас. %, з відповідними інтервалами варіювання. Для кожної експериментальної точки було виготовлено та випробувано по 5 зразків. Значення ударної в'язкості для комбінованих зразків представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Ударна в'язкість за Шарпі на зразках з надрізом ДПК при комбінованому введенні епоксидованої соєвої олії та зольного пилу

Номер дослі-ду	Вміст ЕСО, мас. %	Вміст зольного пилу, мас. %	Ударна в'язкість за Шарпі, кДж/м ²					Середнє
			Номер зразка					
			1	2	3	4	5	
1	0,5	2,75	11,7	12,5	11,8	12,2	12,4	12,14
2	2,0	2,75	9,1	10,0	9,7	9,4	9,8	9,60
3	1,25	5,5	7,6	8,3	8,1	7,8	8,2	8,02
4	0,5	8,25	8,0	7,5	7,7	7,7	7,2	7,62
5	2,0	8,25	5,8	6,6	6,0	6,3	6,4	6,22

Аналіз експериментальних даних комбінованого введення епоксидованої соєвої олії та зольного пилу демонструє їхній вплив на ударну в'язкість ДПК.

Вплив епоксидованої соєвої олії при фіксованому вмісті зольного пилу:

- при 2,75 мас. % зольного пилу, збільшення вмісту епоксидованої соєвої олії з 0,5 мас. % (середня ударна в'язкість 12,14 кДж/м²) до 2,0 мас. % (середня ударна в'язкість 9,60 кДж/м²) призводить до зниження ударної в'язкості. Це узгоджується з тим, що оптимальна концентрація епоксидованої

соєвої олії для пікового підвищення в'язкості знаходиться близько до 0,5 мас. %, а подальше збільшення може призвести до її зменшення;

- при 8,25 мас. % зольного пилю, збільшення вмісту епокидкованої соєвої олії з 0,5 мас. % (середня ударна в'язкість 7,62 кДж/м²) до 2,0 мас. % (середня ударна в'язкість 6,22 кДж/м²) також викликає зниження ударної в'язкості.

Вплив зольного пилю при фіксованому вмісті епокидкованої соєвої олії:

- при 0,5 мас. % епокидкованої соєвої олії, збільшення вмісту зольного пилю з 2,75 мас. % (середня ударна в'язкість 12,14 кДж/м²) до 8,25 мас. % (середня ударна в'язкість 7,62 кДж/м²) призводить до значного зниження ударної в'язкості;

- при 2,0 мас. % епокидкованої соєвої олії, збільшення вмісту зольного пилю з 2,75 мас. % (середня ударна в'язкість 9,60 кДж/м²) до 8,25 мас. % (середня ударна в'язкість 6,22 кДж/м²) також викликає значне зниження ударної в'язкості. Це підтверджує негативний вплив зольного пилю на ударну в'язкість композиту.

Для кількісної оцінки впливу епокидкованої соєвої олії та зольного пилю, а також їхньої взаємодії на ударну в'язкість, було проведено регресійний аналіз. Побудовано лінійну регресійну модель у кодованих змінних:

$$Y_{\text{ударна в'язкість}} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (24)$$

Де:

$$X_1 \text{ (кодоване)} = (\text{Вміст епокидкованої соєвої олії (мас. \%)} - 1,25 / 0,75);$$

$$X_2 \text{ (кодоване)} = (\text{Вміст зольного пилю (мас. \%)} - 5,5 / 2,75);$$

b_i - коефіцієнти регресії.

Розрахунок коефіцієнтів регресії на основі середніх значень факторних точок відбувався аналогічно з попередніми розрахунками. Отримана регресійна модель має вигляд:

$$Y_{\text{ударна в'язкість}} = 8,72 - 0,985 X_1 - 1,975 X_2 + 0,285 X_1 X_2 \quad (25)$$

Для оцінки значущості коефіцієнтів та адекватності моделі розраховано дисперсію відтворюваності ($S_{\text{відт}}^2 = 0,64$) та стандартну помилку коефіцієнта

($S_{b_i} \approx 0,1789$). При рівні значущості $\alpha=0,05$ та 20 ступенях свободи, табличне значення $t_{\text{табл}}(20;0,05) \approx 2,086$. Отже:

Для $b_1 = -0,985$: $t_1 \approx 5,50$. Оскільки $5,50 > 2,086$, коефіцієнт b_1 є статистично значущим.

Для $b_2 = -1,975$: $t_2 \approx 11,04$. Оскільки $11,04 > 2,086$, коефіцієнт b_2 є статистично значущим.

Для $b_{12} = 0,285$: $t_{12} \approx 1,59$. Оскільки $1,59 < 2,086$, коефіцієнт b_{12} є статистично незначущим. Це вказує на те, що загальний ефект впливу епоксидованої соєвої олії та зольного пилу на ударну в'язкість за Шарпі досліджених деревинно-полімерних композитів є переважно адитивним.

Оскільки коефіцієнт взаємодії b_{12} виявився незначущим, ми розглядаємо спрощену модель без члена взаємодії:

$$Y_{\text{ударна в'язкість}} = 8,72 - 0,985X_1 - 1,975X_2 \quad (26)$$

Сума квадратів відхилень, що пояснюються моделлю ($SS_{\text{модель}} = 24,35425$), дисперсія моделі ($MS_{\text{модель}} \approx 12,177125$). Таким чином, F-критерій Фішера: $F_{\text{розр}} \approx 19,03$. Табличне значення $F_{\text{табл}}(2;20;0,05) \approx 3,49$.

Оскільки $19,03 > 3,49$, побудована регресійна модель є статистично адекватною та добре описує експериментальні дані в досліджуваному діапазоні факторів.

Вплив епоксидованої соєвої олії та зольного пилу на ударну в'язкість за Шарпі на зразках з надрізом деревинно-полімерних композитів є значним та протилежним. Епоксидована соєва олія є ефективним модифікатором для підвищення ударної в'язкості, особливо при низьких концентраціях (оптимум близько 0,5 мас. %), діючи як пластифікатор та сумісник. Натомість, зольний пил суттєво знижує ударну в'язкість, що пояснюється його роллю жорсткого наповнювача, що створює концентратори напружень.

Побудована регресійна модель $Y_{\text{ударна в'язкість}} = 8,72 - 0,985X_1 - 1,975X_2$ є статистично адекватною. Важливо відзначити, що коефіцієнт взаємодії між епоксидованою соєвою олією та зольним пилом (b_{12}) виявився статистично незначущим. Це свідчить про те, що їхній спільний вплив на ударну в'язкість

за Шарпі у досліджуваному діапазоні концентрацій є переважно адитивним, а окремі ефекти не посилюються або не послаблюються значно при їх комбінуванні з урахуванням природної мінливості вимірювань. Для досягнення оптимальної ударної в'язкості необхідно ретельно балансувати їхні концентрації, прагнучі до низьких концентрацій зольного пилу та оптимальних концентрацій епоксидованої соєвої олії.

Висновки до підрозділу 3.5

Проведені дослідження комплексного впливу епоксидованої соєвої олії та зольного пилу на фізико-механічні властивості деревинно-полімерних композитів продемонстрували їхній значний та різноспрямований вплив, що дозволяє цілеспрямовано модифікувати характеристики матеріалу. Результати експериментів та побудовані регресійні моделі дозволили зробити наступні ключові висновки:

1. Введення як епоксидованої соєвої олії, так і зольного пилу призводить до збільшення густини ДПК. Цей ефект переважно зумовлений зольним пилом, який має вищу густину, тоді як епоксидована соєва олія покращує сумісність компонентів та зменшує пористість, сприяючи щільнішій структурі. Регресійна модель адекватно описує адитивний характер цього впливу.

2. Обидва модифікатори, епоксидована соєва олія та зольний пил, ефективно знижують водопоглинання ДПК. Епоксидована соєва олія діє як гідрофобізуючий агент, а зольний пил, який є негігроскопічним матеріалом, фізично перешкоджає проникненню води та ущільнює структуру. Їхній спільний адитивний вплив значно підвищує вологостійкість ДПК.

3. Встановлено антагоністичний вплив модифікаторів на коефіцієнт лінійного термічного розширення. Епоксидована соєва олія підвищує рухливість полімерних ланцюгів, збільшуючи коефіцієнт лінійного термічного розширення, тоді як зольний пил, завдяки своїй високій

жорсткості та низькому коефіцієнту лінійного термічного розширення, ефективно знижує його. Ця протилежна дія дозволяє контролювати розмірну стабільність виробів. Регресійна модель показала, що найнижчий коефіцієнт лінійного термічного розширення досягається при низькому вмісті епоксидованої соєвої олії та високому вмісті зольного пилу.

4. Як епоксидована соєва олія, так і зольний пил ефективно знижують технологічну усадку ДПК. Епоксидована соєва олія зменшує внутрішні напруження, а зольний пил фізично обмежує усадку матриці. Їхній вплив переважно адитивний, а найнижчі значення усадки отримано при комбінації високих концентрацій обох модифікаторів.

5. Вплив епоксидованої соєвої олії на міцність при вигині є нелінійним: початкове додавання (до 0,5 мас. %) підвищує міцність, але подальше збільшення концентрації знижує її через надмірну пластифікацію. Зольний пил лінійно збільшує міцність як жорсткий наповнювач. Взаємодія між епоксидованою соєвою олією та зольним пилом щодо міцності є статистично незначущою, що вказує на адитивний характер.

6. Епоксидована соєва олія ефективно підвищує ударну в'язкість (оптимум близько 0,5 мас. %), покращуючи еластичність та опір крихкому руйнуванню. Проте зольний пил суттєво знижує ударну в'язкість, діючи як концентратор напружень. Взаємодія між модифікаторами є статистично незначущою, що свідчить про адитивний характер.

7. Комбіноване використання епоксидованої соєвої олії та зольного пилу відкриває широкі можливості для цілеспрямованої модифікації властивостей ДПК. Розуміння як антагоністичного, так і адитивного впливу є критичним для оптимізації рецептур. Отримані регресійні моделі є надійним інструментом для прогнозування властивостей та розробки матеріалів із заданими експлуатаційними характеристиками, забезпечуючи оптимальний баланс між розмірною стабільністю, фізико-механічними показниками та вологостійкістю [220].

3.6 Впровадження результатів дослідження у виробничу практику

У сучасних умовах розвитку матеріалознавства та екологічно орієнтованих технологій особливого значення набуває практична реалізація наукових розробок, спрямованих на створення ефективних, ресурсозберігаючих та екологічно безпечних матеріалів. Результати досліджень, викладені у підрозділах 3.1–3.5, мають не лише теоретичну цінність, але й підтверджену прикладну значущість, що дозволяє інтегрувати їх у реальні виробничі процеси.

Впровадження нових рецептур деревинно-полімерних композитів на основі вторинного поліетилену високої густини, модифікованих стеариновою кислотою, епоксидованою соєвою олією, зольним пилом та фосфогіпсом, здійснено на базі підприємства ТОВ «НВП Сервіс комплект». Це дало змогу оцінити ефективність запропонованих технологічних рішень у промислових умовах, а також підтвердити їхню відповідність вимогам до сучасних будівельних матеріалів.

Практична реалізація результатів дослідження охоплює повний цикл: від розробки рецептури та оптимізації технологічних параметрів екструзії — до виготовлення експериментальної партії продукції, її випробування, економічного аналізу та оцінки екологічної доцільності. Такий підхід дозволяє не лише апробувати наукові напрацювання, але й створити основу для їх масштабного впровадження у виробництво.

У період з 4 лютого по 7 серпня 2025 року на дільниці екструзії деревинно-полімерних композитів підприємства ТОВ «НВП Сервіс комплект» було виготовлено експериментальну партію терасної дошки з використанням рецептури, розробленої автором дисертаційного дослідження. Технологічні параметри процесу екструзії були адаптовані у співпраці з працівниками кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів (ТПП та ПМ) Українського державного університету науки і технологій.

Для виготовлення продукції застосовано наступну рецептуру композиту (у мас. %):

- вторинний поліетилен високої густини (ПЕВГ): 30,0;
- деревинне борошно: 54,0;
- стеаринова кислота: 1,25;
- епоксидована соєва олія: 0,5;
- зольний пил: 8,25;
- фосфогіпс: 2,5;
- поліетиленовий віск: 1,1;
- УФ стабілізатор та барвники – інше.

Зазначене співвідношення компонентів було визначено на основі попередніх експериментальних досліджень, описаних у підрозділах 3.1–3.5, з урахуванням оптимального балансу між фізико-механічними властивостями, розмірною стабільністю та вологостійкістю матеріалу.

Процес виготовлення експериментальної партії терасної дошки включав стандартні етапи: підготовку сировини, змішування, грануляцію, екструзію, охолодження, нарізку та фінішну обробку. Компоненти (загальною масою 150 кг) зважували на електронних вагах, після чого подавали у лопатевий змішувач Skywin SWHL 600/1200. Змішування здійснювали при 800 об/хв протягом 45–60 хв до температури 100 °С для видалення залишкової вологи.

Гомогенізовану суміш гранулювали на двошнековому грануляторі Skywin SWMSZ-3 при 180–185 °С та 250–350 об/хв. Далі гранулят транспортували на лінію екструзії, де формування терасної дошки здійснювали на екструдері KraussMaffei KMD-60. Температурні режими: зони – 125 °С, адаптер — 140 °С, екструзійна головка — 145 °С; оберти шнеків — 10 об/хв; навантаження — 80 %; дегазація — не застосовувалась.

Після екструзії дошка проходила через калібратор та охолоджувальну ванну (14–16 °С), після чого її розрізали на задані розміри та піддавали

фінішній обробці — шліфуванню й ворсуванню для покращення зовнішнього вигляду та експлуатаційних властивостей.

Виготовлена терасна дошка призначена для зовнішнього оздоблення, що передбачає експлуатацію в умовах змін температури, вологості та механічного навантаження. Візуальний огляд, контроль якості та фізико-механічні випробування підтвердили відповідність виробів заявленим характеристикам, що свідчить про ефективність запропонованої рецептури та технології.

За результатами контролю якості та фізико-механічних випробувань експериментальної партії терасної дошки, виготовленої на базі ТОВ «НВП Сервіс комплект», встановлено, що основні технічні характеристики продукції знаходяться в межах таких значень:

- Густина: 1268–1280 кг/м³
- Водопоглинання: 0,19–0,22 %
- Коефіцієнт лінійного термічного розширення: $(2,8–3,1) \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
- Технологічна усадка: 0,18–0,21 %
- Міцність при вигині: 51,7–54,2 МПа
- Ударна в'язкість за Шарпі (з надрізом): 7,4–7,8 кДж/м²

Зазначені показники узгоджуються з результатами лабораторних досліджень, наведеними у підрозділах 3.1–3.5, що підтверджує стабільність властивостей матеріалу при масштабуванні технології. Незначні коливання параметрів є допустимими та обумовлені особливостями сировини, умовами екструзії та сезонними факторами.

Отримані характеристики свідчать про високу якість продукції, її відповідність вимогам до зовнішніх оздоблювальних матеріалів, а також підтверджують ефективність запропонованої рецептури та технології виробництва.

Оцінка економічної ефективності впровадження нової рецептури деревинно-полімерного композиту здійснювалась відповідно до «Методичних рекомендацій з визначення прибутку від використання об'єктів

промислової власності» (наказ Держпатенту України № 80 від 26.08.1998). У розрахунках враховано зміну собівартості продукції, капітальних витрат та продуктивності виробництва.

Основними джерелами економічного ефекту стали:

- зниження собівартості продукції за рахунок використання доступних вторинних компонентів (зольного пилу, фосфогіпсу, епоксидованої соєвої олії), що заміщують більш дорогі первинні ресурси;
- підвищення продуктивності екструзійного процесу, зменшення енергоспоживання та стабілізація роботи обладнання завдяки використанню стеаринової кислоти як технологічного модифікатора;
- мінімальні капітальні витрати, пов'язані з адаптацією технології: закупівля ємностей для зберігання епоксидованої соєвої олії, облаштування місця на складі, встановлення допоміжних пристроїв для завантаження рідких компонентів у змішувач.

Розрахунок приросту прибутку здійснено за формулою:

$$\text{Пр} = [(\text{Сб} - \text{Сн}) + \text{Ен} * (\text{Кпб} - \text{Кпн})] * \text{Вн}$$

де:

- Пр — приріст прибутку, грн;
- Сб, Сн — собівартість одиниці продукції у базовому та новому варіантах (848,74 грн/м² та 791,27 грн/м² відповідно);
- Кпб, Кпн — питомі капітальні витрати (0 та 0,076 грн/м²);
- Ен — нормативний коефіцієнт ефективності (0,15);
- Вн — обсяг продукції у розрахунковому періоді (19828,8 м²).

Після підстановки:

$$\text{Пр} = [(848,74 - 791,27) + 0,15 * (0 - 0,076)] * 19828,8 = 1\,139\,423,5 \text{ грн}$$

Таким чином, впровадження нової рецептури забезпечило економічний ефект у розмірі понад 1,1 млн грн за пів року виробництва. Це свідчить про високу рентабельність розробленого матеріалу та його конкурентоспроможність на ринку оздоблювальних будівельних виробів.

Варто зазначити, що продукція, виготовлена за новою рецептурою, зберігає свою функціональну нішу – терасна дошка для зовнішнього оздоблення – але має покращені фізико-механічні та експлуатаційні характеристики, що дозволяє підвищити її якість без зміни асортименту.

Крім прямого фінансового ефекту, слід також враховувати непрямі вигоди, зокрема зменшення витрат на утилізацію промислових відходів та підвищення екологічної репутації підприємства.

Запропонована рецептура деревинно-полімерного композиту базується на використанні вторинної сировини та побічних продуктів промисловості, що відповідає сучасним вимогам до екологічно орієнтованого виробництва. Застосування зольного пилу, фосфогіпсу, вторинного поліетилену та модифікаторів рослинного походження дозволяє зменшити обсяг промислових відходів, скоротити споживання первинних ресурсів і знизити енергетичні витрати на виробництво.

Екологічна значущість впровадження полягає у зменшенні навантаження на навколишнє середовище за рахунок утилізації великотоннажних відходів (зольного пилу, фосфогіпсу), скороченні використання невідновлюваних мінеральних ресурсів (заміщення кальциту), а також у зниженні енергоспоживання в процесі екструзії завдяки технологічній стабілізації рецептури.

Соціальний аспект впровадження проявляється передусім у підвищенні технологічної культури виробництва. Впровадження нової рецептури вимагало тісної співпраці між науковцями та виробничим персоналом, що сприяло обміну знаннями, підвищенню кваліфікації працівників та формуванню навичок роботи з новими типами сировини.

Крім того, впровадження стало прикладом успішної інтеграції наукових розробок у промислову практику, що сприяє зміцненню зв'язків між університетами та підприємствами, стимулює розвиток прикладної науки та формує позитивний імідж інноваційної діяльності.

Таким чином, реалізація запропонованої технології має не лише техніко-економічне, але й екологічне та соціальне значення, що відповідає принципам сталого розвитку та сучасним підходам до управління ресурсами.

Факт впровадження результатів дослідження підтверджено Актом про виготовлення експериментальної партії деревинно-полімерного композиту (Додаток Б), підписаним представниками підприємства та університету. Документ засвідчує успішне застосування розробленої рецептури, відповідність отриманої продукції технічним вимогам і відсутність зауважень щодо її якості. Виготовлена терасна дошка пройшла апробацію в умовах реального виробництва, що підтверджує готовність технології до серійного впровадження. Це свідчить про прикладну значущість дисертаційної роботи, її відповідність сучасним вимогам до інноваційних розробок та потенціал масштабування результатів у промислових умовах.

Висновки до підрозділу 3.6

1. Розроблена рецептура деревинно-полімерного композиту успішно впроваджена у виробництво на базі ТОВ «НВП Сервіс комплект», що підтверджено актом апробації.

2. Експериментальна партія терасної дошки продемонструвала стабільні фізико-механічні характеристики, відповідні лабораторним даним, що засвідчує готовність технології до серійного застосування.

3. Впровадження забезпечило економічний ефект понад 1,1 млн грн за пів року, зумовлений зниженням собівартості, енергоспоживання та мінімальними капітальними витратами.

4. Застосування вторинної сировини та промислових відходів сприяє екологічній стійкості виробництва та зменшенню навантаження на довкілля.

5. Проєкт має соціальну значущість: сприяє підвищенню кваліфікації персоналу, розвитку прикладної науки та зміцненню зв'язків між університетом і виробництвом.

ВИСНОВКИ

1. На підставі систематизації та критичного аналізу літературних даних з питань отримання та застосування високонаповнених деревинно-полімерних композитів зроблено висновок про актуальність застосування комплексу модифікаторів для підвищення продуктивності процесу екструзії композитів, підвищення сумісності компонентів композиції, заміни частини деревинної фази на дрібнодисперсні мінеральні наповнювачі – відходи теплових електростанцій та хімічних підприємств. Отримані ДПК характеризуються підвищеним комплексом фізико-механічних властивостей у порівнянні з промисловими аналогами.

2. Встановлено позитивний вплив додавання стеаринової кислоти в ДПК на в'язкість композиту в процесі екструзії. Оптимальна концентрація стеаринової кислоти складає 1,1 – 1,3 мас. %. При такому вмісті стеаринової кислоти швидкість екструзії збільшується на 10 – 12 % при фіксованій потужності головного приводу екструдера. При цьому спостерігається поліпшення фізико-механічних та експлуатаційних характеристик ДПК. Так, міцність при вигині зростає на 20 % і складає 51,3 МПа, ударна в'язкість на 37 % і складає 11,9 кДж/м², спостерігається зменшення коефіцієнта лінійного термічного розширення на 20 % та водопоглинання на 16 %.

3. Вперше виявлено, що введення епоксидованої соєвої олії з оптимальною концентрацією 0,5 мас.% покращує фізико-механічні властивості ДПК – міцність при вигині зростає на 20 % до 50,8 МПа, ударна в'язкість на майже 200 % до 20,0 кДж/м². Спостерігається зменшення коефіцієнта лінійного термічного розширення на 15 % та водопоглинання на 30 %.

4. Розроблено методологію отримання ДПК будівельного призначення на основі деревинної сировини та вторинного поліетилену високої густини, яка полягає у первісному змішуванні компонентів

композиції у лопатовому змішувачі Skywinswhl 600/1200, гранулюванні у двошнековому грануляторі Skywin SWMSZ-3 та наступній екструзії на екструдері KraussMaffei KMD-60. Оптимальний склад ДПК наступний:

- вторинний поліетилен високої густини (ПЕВГ): 30,0 мас. %;
- деревинне борошно: 54,0 мас. %;
- стеаринова кислота: 1,1 – 1,3 мас. %;
- епоксидована соєва олія: 0,3 – 0,7 мас. %;
- мінеральний наповнювач: 11 мас. %;
- поліетиленовий віск: 1,1 мас. %;
- УФ стабілізатор та барвники – інше.

5. Експериментально підтверджено можливість часткової заміни деревинного борошна (до 11 мас. %) на зольний пил – відходи теплових електростанцій. При цьому зменшуються водопоглинання, коефіцієнт термічного розширення та технологічна усадка, що підвищує стабільність матеріалів під час експлуатації, а також спостерігається зростання міцності при вигині до 9 % і незначне зниження ударної в'язкості до 7 %.

6. Вперше досліджено використання фосфогіпсу – побічного продукту виробництва фосфорної кислоти у ДПК. Показано, що використання фосфогіпсу до 11 мас. % не супроводжується зниженням фізико-механічних та експлуатаційних характеристик ДПК. При цьому знижується собівартість виробів, скорочується використання природних ресурсів, що позитивно позначається на екологію виробництва та покращує сталий розвиток галузі.

7. Розроблено комплекс рецептур з рекомендаціями щодо технологічних процесів отримання виробів з ДПК. Результати досліджень впроваджено у виробництво на підприємстві ТОВ «НВП Сервіс комплект» при виготовленні терасної дошки для зовнішнього оздоблення. За результатами отримано патент України на винахід № 129141.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rowell R. M., Konkol P. Treatments that enhance physical properties of wood. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1987. 12 p. (General Technical Report FPL-GTR-55). DOI: [10.2737/FPL-GTR-55](https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-55).
2. Gordon J. E. The new science of strong materials: or why you don't fall through the floor. Princeton University Press, 2006. 328 p.
3. Коршун О.А, Романов Н.М, Наназашвили И.Х., Бикбау М.Я. Экологически чистые древеснонаполненные пластмассы // Строительные материалы. 1997. № 5. С. 8–11.
4. Forest Products Laboratory (US). Wood handbook: wood as an engineering material. The Laboratory, 1987. № 72. 466 p.
5. Simonds H. R., Weith A. J., Schack W. Extrusion of Plastics, Rubber, and Metals. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1952. 454 p.
6. Ashori A. Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries // Bioresource Technology. 2008. № 99 (11). P. 4661–4667.
7. Anastas, P. T., Warner, J. C. Green Chemistry: Theory and Practice. Oxford, UK: Oxford University Press, 1998. 75 p.
8. Jian B., Mohrmann S., Li H., Li Y., Ashraf M., Zhou J., Zheng X. A Review on flexural properties of wood-plastic composites // Polymers. 2022. № 14. P. 3942–3964. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14193942>.
9. Olonisakin K., et al. Influence of stacking sequence on mechanical properties and moisture absorption of epoxy-based woven flax and basalt fabric hybrid composites // Sustain. Struct. 2022. Vol. 2. P. 16.
10. Hamel S. E., Hermanson J. C., Cramer S. M. Predicting the flexure response of wood-plastic composites from uni-axial and shear data using a finite-element model // Journal of Materials in Civil Engineering. 2014. Vol. 26. № 12. P. 04014098. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001018](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001018).

11. Binhussain M. A., El-Tonsy M. M. Palm leave and plastic waste wood composite for out-door structures // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47. P. 1431–1435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.031>.
12. Клесов А.А. Древесно-полимерные композиты / пер. с англ. А. Чмеля. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 735 с.
13. Englund K., Villechevrolle V. Flexure and water sorption properties of wood thermoplastic composites made with polymer blends // *Journal of applied polymer science*. 2011. Vol. 120. № 2. P. 1034–1039. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.33237>.
14. Wu M. et al. A composite obtained from waste automotive plastics and sugarcane skin flour: Mechanical properties and thermo-chemical analysis // *Powder Technology*. 2019. Vol. 347. P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.02.039>.
15. Chan C. M. et al. Composites of wood and biodegradable thermoplastics: A review // *Polymer reviews*. 2018. Vol. 58. № 3. P. 444–494. DOI: <https://doi.org/10.1080/15583724.2017.1380039>.
16. Rowell R. M., LeVan-Green S. Thermal properties // *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites* / ed. by R. M. Rowell. Boca Raton: CRC Press, 2005. P. 289–306.
17. Jiang H., Kamdem D. P. Development of poly (vinyl chloride)/wood composites. A literature review // *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2004. Vol. 10. № 2. P. 59–69. DOI: <https://doi.org/10.1002/vnl.20009>.
18. Adhikary K. B., Pang S., Staiger M. P. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE) // *Composites Part B: Engineering*. 2008. Vol. 39. № 5. P. 807–815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.10.005>.
19. Espert A., Vilaplana F., Karlsson S. Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties // *Composites Part A*:

Applied science and manufacturing. 2004. Vol. 35. № 11. P. 1267–1276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.04.004>.

20. Poletto M. et al. Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour // Waste Management. 2011. Vol. 31. № 4. P. 779–784. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.027>.

21. Kumar B. et al. Optical, morphological, thermal, mechanical, and fungal characterization of wood polymethyl methacrylate composites // Instrumentation Science and Technology. 2006. Vol. 34. № 1–2. P. 67–83. DOI: [10.1080/10739140500373908](https://doi.org/10.1080/10739140500373908).

22. Binhussain M. A., El-Tonsy M. M. Palm leave and plastic waste wood composite for out-door structures // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. P. 1431–1435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.031>.

23. Ratanawilai T., Taneerat K. Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 172. P. 349–357. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.03.266](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.266).

24. Hartmann R., Koch M. Wood chip plastic composite—a novel bio-based material with high mechanical properties // Polimery. 2017. Vol. 62. № 7–8. P. 556–559. DOI: <https://doi.org/10.14314/polimery.2017.556>.

25. Абушенко А.В., Воскобойников И.В, Кондратюк В.А. Производство изделий из древесно-полимерных композитов // Деловой журнал по деревообработке. 2008. №4. С. 88–94.

26. Аскадский, А. А., Мацеевич, Т. А., Попова, М. Н. Вторичные полимерные материалы (механические и барьерные свойства, пластификация, смеси и нанокompозиты): Монография. М.: Издательство АСВ, 2017. 496 с.

27. Мацеевич Т.А., Аскадский А.А. Механические свойства террасной доски на основе полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида // Строительство: наука и образование. 2017. Т. 7. Вып. 3 (24). С 48–59.

28. Chen J., Gardner D. J. Dynamic mechanical properties of extruded nylon–wood composites // *Polymer Composites*. 2008. Vol. 29. № 4. P. 372–379. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.20400>.

29. Lei Y., Wu Q. Wood plastic composites based on microfibrillar blends of high density polyethylene/poly (ethylene terephthalate) // *Bioresource technology*. 2010. Vol. 101. № 10. P. 3665–3671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.069>

30. Simonsen J., Jacobsen R., Rowell R. Wood-fiber reinforcement of styrene–maleic anhydride copolymers // *Journal of Applied Polymer Science*. 1998. Vol. 68. № 10. P. 1567–1573.

31. Han Y., Gardner D. Foamed styrene-based WPC using physical blowing agent created during reactive extrusion // *Proceedings of the 10th International Conference on Wood and Biofiber Plastic Composites and Cellulose Nanocomposites Symposium*. Madison, WI: Forest Products Society, May 2010. Proceedings No. 7218-09. P. 27–35.

32. Mahfoudh A., Cloutier A., Rodrigue D. Characterization of UHMWPE/wood composites produced via dry-blending and compression molding // *Polymer composites*. 2013. Vol. 34. № 4. P. 510–516. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.22455>.

33. Chotirat L., Chaochanchaikul K., Sombatsompop N. On adhesion mechanisms and interfacial strength in acrylonitrile–butadiene–styrene/wood sawdust composites // *International journal of adhesion and adhesives*. 2007. Vol. 27. № 8. P. 669–678. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2007.02.001>.

34. Gregorova A. et al. Poly (lactide acid) composites reinforced with fibers obtained from different tissue types of *Picea sitchensis* // *Journal of Applied Polymer Science*. 2009. Vol. 114. № 5. P. 2616–2623. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.30819>.

35. Râpă M. et al. Degradation study by *trichoderma* spp. of poly (3-hydroxybutyrate) and wood fibers composites // *Romanian Biotechnological Letters*. 2014. Vol. 19. № 3. P. 9391–9400.

36. Singh S., Mohanty A. K. Wood fiber reinforced bacterial bioplastic composites: Fabrication and performance evaluation // *Composites Science and Technology*. 2007. Vol. 67. № 9. P. 1753–1763. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.11.009>.
37. Jose J., Nag A., Nando G. B. Environmental ageing studies of impact modified waste polypropylene // *Iranian Polymer Journal*. 2014. Vol. 23. № 8. P. 619–636. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13726-014-0256-5>.
38. Quintero M. A. M., Tam C. P. T., Li H. Structural analysis of a Guadua bamboo bridge in Colombia // *Sustainable Structures*. 2022. Vol. 2. P. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.54113/j.sust.2022.000020>.
39. Захаров В.П., Фахретдинов Р.К., Галиев Л.Р., Садритдинов А.Р., Лаздин Р.Ю., Кулиш Е.И. Физико-механические свойства вторичного полипропилена, наполненного древесной мукой // *Пластические массы*. 2018. № 7–8. С. 62–64.
40. Mu B. et al. Morphology, mechanical properties and dimensional stability of biomass particles/high density polyethylene composites: Effect of species and composition // *Polymers*. 2018. Vol. 10. № 3. P. 308–320. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym10030308>.
41. Xu J., Hao X., Zhou H., Sun L., Liu T., Wang Q., Ou R. High and low temperature performance of ultra-high filled polypropylene-based wood plastic composite // *Acta Materiae Compositae Sinica*. 2021. Vol. 38. № 12. P. 4106–4122. DOI: [10.13801/j.cnki.fhclxb.20210317.002](https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210317.002).
42. Xu H., Cao Y., Yang X., Gao H., Shan W., Hao, J. Mechanical properties and Simulation of wood plastic composites // *Plast. Ind.* 2020. № 48. P. 132–135.
43. Turku I., Kärki T. Reinforcing wood–plastic composites with macro- and micro-sized cellulosic fillers: Comparative analysis // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2013. Vol. 32. № 22. P. 1746–1756. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684413496574>.

44. Leu S. Y. et al. Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood–plastic composites (WPCs) // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 29. P. 120–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.013>.

45. Chaudemanche S. et al. Properties of an industrial extruded HDPE-WPC: The effect of the size distribution of wood flour particles // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 162. P. 543-552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.061>.

46. Файзуллин И.З, Мусин И.Н., Вольфсон С.И. Влияние размера частиц наполнителя на свойства древесно-полимерных композитов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. т 16. № 5. С. 106–109.

47. Спиглазов А.В. Влияние размеров древесных частиц и степени наполнения на текучесть композиций с полипропиленом // *Пластические массы*. 2004. № 12. С. 50–52.

48. Wang H. G. et al. Effects of Geometrical Shapes of Wood Particles on the Mechanical and Water-Uptake Properties of the Resulting Wood/High Density Polyethylene Composites // *Advanced Materials Research*. 2010. Vol. 113. P. 674–678. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.113-116.674>.

49. Schirp A., Mannheim M., Plinke B. Influence of refiner fibre quality and fibre modification treatments on properties of injection-moulded beech wood–plastic composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. Vol. 61. P. 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.03.003>.

50. Delviawan A. et al. The effect of wood particle size distribution on the mechanical properties of wood–plastic composite // *Journal of Wood Science*. 2019. Vol. 65. № 1. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1846-9>.

51. Barbos J. D. V. et al. Development and characterization of WPCs produced with high amount of wood residue // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. № 5. P. 9684–9690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.073>.

52. Pakeyangkoon P., Ploydee B. Mechanical properties of acrylate-styrene-acrylonitrile/bagasse composites // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 747. P. 355–358. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.747.355>.
53. Mertens, O.; Krause, K.C.; Weber, M.; Krause, A. Performance of thermomechanical wood fibers in polypropylene composites // *Wood Mater. Sci. Eng.* 2018. № 15. P. 114–122. <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1500494>.
54. Arnandha Y. et al. Physical and mechanical properties of WPC board from sengon sawdust and recycled HDPE plastic // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 171. P. 695–704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.412>.
55. Ali S. et al. Flat pressed wood plastic composites made of milled foam core particleboard residues // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2013. Vol. 71. № 6. P. 805–813. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0745-9>.
56. Hosseinihashemi S.K., Shamspour M., Safdari V., Pourmousa S., Ayrilmis N. The influences of poplar inner and outer bark content on mechanical properties of wood/polypropylene composites // *Journal of the Chilean Chemical Society*. 2017. Vol. 62. № 1. P. 3365–3369. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0717-97072017000100012>.
57. Ayrilmis N., Kaymakci A., Güleç T. Potential use of decayed wood in production of wood plastic composite // *Industrial Crops and Products*. 2015. Vol. 74. P. 279–284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.024>.
58. Gardner D.J., Han Y., Wang L. Wood–Plastic Composite Technology. // *Curr Forestry Reports*. 2015. Vol. 1. P. 139–150. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0016-6>.
59. Ling, Z., Lai, C., Huang, C., Xu, F., & Yong, Q. Research progress in variations of cellulose supramolecular structures via biomass pretreatment // *Journal of Bioresources and Bioprocessing*. 2021. № 6. P. 24–34.
60. Hietala M. et al. The effect of pre-softened wood chips on wood fibre aspect ratio and mechanical properties of wood–polymer composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011. Vol. 42. № 12. P. 2110–2116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.09.021>.

61. Farsi M. Effect of nano-SiO₂ and bark flour content on the physical and mechanical properties of wood–plastic composites // Journal of Polymers and the Environment. 2017. Vol. 25. № 2. P. 308–314. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0813-4>.

62. Zhang L. et al. Effect of hydrophobic modification of wood flour on properties of HDPE based wood plastic composites // Chemical Industry and Engineering Progress. 2020. Vol. 39. № 9. P. 3487–3493.

63. Acosta A. et al. Juvenile and Mature Pinewoods Treated by in situ Polymerization with Poly (vinyl acetate) // Fibers and Polymers. 2021. Vol. 22. P. 745–750. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12221-021-0005-2>.

64. Grubbström G., Holmgren A., Oksman K. Silane-crosslinking of recycled low-density polyethylene/wood composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2010. Vol. 41. № 5. P. 678–683. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.01.018>.

65. Pelaez-Samaniego M. R. et al. Hot water extracted wood fiber for production of wood plastic composites (WPCs) // Holzforschung. 2013. Vol. 67. № 2. P. 193–200. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2012-0071>.

66. Andrusyk L, Oporto GS, Gardner DJ, Neivandt DJ. Wood plastic composites manufactured from hot water extracted wood. Part I: mechanical evaluation // Proceedings of the 51st international convention of society of wood science and technology. 2008. November.

67. Hosseinaei O. et al. Effects of hemicellulose extraction on properties of wood flour and wood–plastic composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2012. Vol. 43. № 4. P. 686–694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.01.007>.

68. Pelaez-Samaniego M. R. et al. A review of wood thermal pretreatments to improve wood composite properties // Wood Science and Technology. 2013. Vol. 47. P. 1285–1319. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0574-3>.

69. Файзуллин И.З., Вольфсон С.И. Мусин И.Н., Грачев А.Н., Пушкин С.А., Яруллин Р.С. Влияние термического и механохимического способов

модификации измельченной древесины на реологические и эксплуатационные свойства древесно-полимерных композитов // Вестник Казанского технологического университета, Казань, КНИТУ. 2014. № 24. С 449 – 452.

70. Lou C. W. et al. Compatibility and mechanical properties of maleicanhydride modified the wood plastic composite // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2013. Vol. 32. № 11. P. 802–810.

71. Ma Y. et al. In situ fabrication of wood flour/nano silica hybrid and its application in polypropylene-based wood-plastic composites // Polymer Composites. 2020. Vol. 41. № 2. P. 573–584. <https://doi.org/10.1002/pc.25389>.

72. Li X., Tabil L. G., Panigrahi S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review // Journal of Polymers and the Environment. 2007. Vol. 15. P. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>.

73. Lu J. Z., Wu Q., McNabb H. S. Chemical coupling in wood fiber and polymer composites: A review of coupling agents and treatments // Wood and fiber science. 2000. Vol. 32, No. 1. P. 88–104.

74. Shen F., Jia R. Research progress and Development prospect of wood plastic composite // Plast. Addit. 2010. Vol. 1. P. 5–9.

75. W.S. Gutowski. Physical model of interface and interphase performance in composite materials and bonded polymers // Second International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, Germany, June 28 – 29. 1999. P. 6–11.

76. Li Y. Study on mechanical properties of glass fiber/wood plastic composites reinforced by surface modifier. Plast // Sci. Technol. 2021. Vol. 49. P. 32–36.

77. Dányádi L. et al. Wood flour filled PP composites: Compatibilization and adhesion // Composites Science and Technology. 2007. Vol. 67. № 13. P. 2838–2846. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.01.024>.

78. Murayama K. et al. The effects of different types of maleic anhydride-modified polypropylene on the physical and mechanical properties of polypropylene-based wood/plastic composites // Journal of wood chemistry and technology. 2018. Vol. 38. № 3. P. 224–232. DOI: <https://doi.org/10.1080/02773813.2018.1432655>.

79. Мусин И.Н., Файзуллин И.З., Вольфсон С.И. Влияние добавок на свойства древесно-полимерных композитов // Вестник Казанского технологического университета, Казань, КНИТУ. 2012. Т. 15 № 24. С. 97–99.

80. Zhou Z. et al. Effect of maleic anhydride grafted polyethylene on the properties of chopped carbon fiber/wood plastic composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2014. Vol. 33. № 13. P. 1216–1225. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684414531633>.

81. Hao X. et al. Interfacial adhesion mechanisms of ultra-highly filled wood fiber/polyethylene composites using maleic anhydride grafted polyethylene as a compatibilizer // Materials & Design. 2021. Vol. 212. P. 110182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110182>.

82. Gao H. et al. Properties of Highly Filled Wood Fiber-Maleic Anhydride Grafted Thermoplastic Blends Composites // Advanced Materials Research. – 2010. Vol. 113. P. 1856–1860. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.113-116.1856](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.113-116.1856).

83. Perisic S. D. et al. Processing of hybrid wood plastic composite reinforced with short PET fibers // Materials and Manufacturing Processes. 2018. Vol. 33. № 5. P. 572–579. DOI: [10.1080/10426914.2017.1364854](https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1364854).

84. J. Gassn and A.K. Bledzki. Dynamic-mechanical properties of natural fiber-reinforced plastics: the effect of coupling agents // Fourth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites, Madison, WI, May 12–14, 1997. P. 76–80.

85. M. Bengtsson, N.M. Stark, and K. Oksman. Crosslinked wood-thermoplastic composites – profile extrusion and properties. // Progress in Wood

Fibre Plastic Composites 2006 International Conference, Toronto, Canada, May 1–2, 2006. P. 1–10.

86. Bengtsson M., Oksman K. Silane crosslinked wood plastic composites: Processing and properties // *Composites science and technology*. 2006. Vol. 66. № 13. P. 2177–2186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.12.009>.

87. Gao X. et al. Effects of impulse-cyclone drying and silane modification on the properties of wood fiber/HDPE composite material // *Carbohydrate polymers*. 2019. Vol. 207. P. 343–351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.078>.

88. Dányádi L., Móczó J., Pukánszky B. Effect of various surface modifications of wood flour on the properties of PP/wood composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010. Vol. 41. № 2. P. 199–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.10.008>.

89. Mbarek T. B. et al. Effect of acetylation and additive on the tensile properties of wood fiber–high-density polyethylene composite // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2013. Vol. 32. № 21. P. 1646–1655. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684413505256>.

90. Wei L. et al. Effects of wood fiber esterification on properties, weatherability and biodurability of wood plastic composites // *Polymer Degradation and Stability*. 2013. Vol. 98. № 7. P. 1348–1361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2013.03.027>.

91. L. Manolis Sherman. Wood-filled plastics – they need the right additives for strength, good looks and long life // *Plastic Technology*, July 2004.

92. Li R. Study on preparation and properties of weather-resistant pe based wood plastic composite // *Plast Sci Technol*. 2021. Vol. 49. P. 47–51.

93. C. Zhang, K. Li, and J. Simonsen. Improvement of interfacial adhesion between wood and polypropylene in wood-polypropylene composites // *J. Adhesion Sci. Technol*. 2004. Vol. 18. № 14. P. 1603 – 1612. DOI: <https://doi.org/10.1163/1568561042411330>.

94. C. Zhang, K. Li, and J. Simonsen. A novel wood-binding domain of a wood-coupling agent: development and characterization // *J. Appl. Polym. Sci.* 2003. Vol. 89. № 4. P. 1078–1084. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.12257>.
95. Leng W. et al. Research progress and thoughts on the modification mechanism of wood furfurylation // *Journal of Forestry Engineering.* 2021. Vol. 6. № 6. P. 35–43. DOI: [10.13360/j.issn.2096-1359.202012001](https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202012001).
96. Li T. Q., Wolcott M. P. Rheology of wood plastics melt, part 2: Effects of lubricating systems in HDPE/maple composites // *Polymer Engineering & Science.* 2006. Vol. 46. № 4. P. 464–473. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.20501>.
97. Botros M. G. Development of new generation coupling agents for wood-plastic composites // *Proceedings of The Global Outlook for Natural Fiber and Wood Composites.* New Orleans, December 3–5, 2003.
98. Adhikary K. B., Pang S., Staiger M. P. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE) // *Composites Part B: Engineering.* 2008. Vol. 39, № 5. P. 807–815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.10.005>.
99. Qiang T. et al. Polylactide-based wood plastic composites toughened with SBS // *Polymer-Plastics Technology and Engineering.* 2012. Vol. 51. № 2. P. 193–198. DOI: <https://doi.org/10.1080/03602559.2011.618518>.
100. Marathe D. S., Joshi P. S. Characterization of highly filled wood flour–PVC composites: morphological and thermal studies // *Journal of applied polymer science.* 2009. Vol. 114. № 1. P. 90–96. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.30452>.
101. Yasemin A., Dogan M., Bayramlı E. The effect of red phosphorus on the fire properties of intumescent pine wood flour–LDPE composites // *Finnish-Swedish Flame Days 2009.* 2009. Paper 4B.
102. Li F. et al. Modified lignin reinforced wood plastic composite and its properties // *J. For. Eng.* 2020. Vol. 5. P. 45–51.
103. Li F. et al. Study on the properties of lignin and coffee shell powder to prepare wood-plastic composite // *J. Southwest For. Univ.* 2021. Vol. 41. P. 139–146.

104. Geng Y., Li K., Simonsen J. Effects of a new compatibilizer system on the flexural properties of wood–polyethylene composites // Journal of Applied Polymer Science. 2004. Vol. 91. № 6. P. 3667–3672. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.13618>.

105. Geng Y., Li K., Simonsen J. A combination of poly (diphenylmethane diisocyanate) and stearic anhydride as a novel compatibilizer for wood–polyethylene composites // Journal of adhesion science and technology. 2005. Vol. 19. № 11. P. 987–1001. DOI: <https://doi.org/10.1163/1568561054951013>.

106. Muasher M., Sain M. The efficacy of photostabilizers on the color change of wood filled plastic composites // Polymer degradation and stability. 2006. Vol. 91. № 5. P. 1156–1165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.06.024>

107. Chaochanchaikul K., Sombatsompop N. Stabilizations of molecular structures and mechanical properties of PVC and wood/PVC composites by Tinuvin and TiO₂ stabilizers // Polymer Engineering & Science. 2011. Vol. 51. № 7. P. 1354–1365. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.21893>.

108. Chaochanchaikul K., Rosarpitak V., Sombatsompop N. Structural and thermal stabilizations of PVC and wood/PVC composites by metal sterates and organotin // BioResources. 2011. Vol. 6. № 3. P. 3115–3131. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.6.3.3115-3131>.

109. Stark N. M. et al. Evaluation of various fire retardants for use in wood flour–polyethylene composites // Polymer Degradation and Stability. 2010. Vol. 95. № 9. P. 1903–1910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.04.014>.

110. Garcia M. et al. Wood–plastics composites with better fire retardancy and durability performance // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2009. Vol. 40. № 11. P. 1772–1776. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.08.010>.

111. Li T. Q., Wolcott M. P. Rheology of wood plastics melt, part 2: Effects of lubricating systems in HDPE/maple composites // *Polymer Engineering & Science*. 2006. Vol. 46. № 4. P. 464–473. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.20505>.

112. Dawson-Andoh B., Matuana L. High density polyethylene-wood flour composite lumber: efficacy of two proprietary biocides in the control of fungal colonization and discoloration // *Holz Als Roh-und Werkstoff*. 2007. Vol. 65. № 5. P. 331–334. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-007-0182-8>.

113. Faruk O., Bledzki A. K., Matuana L. M. Microcellular foamed wood-plastic composites by different processes: A review // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2007. Vol. 292. № 2. P. 113–127. DOI: <https://doi.org/10.1002/mame.200600406>.

114. Bledzki A. K., Faruk O. Effects of the chemical foaming agents, injection parameters, and melt-flow index on the microstructure and mechanical properties of microcellular injection-molded wood-fiber/polypropylene composites // *Journal of Applied Polymer Science*. 2005. Vol. 97. № 3. P. 1090–1096. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.21685>.

115. Zhang H., Rizvi G. M., Park C. B. Development of an extrusion system for producing fine-celled HDPE/wood-fiber composite foams using CO₂ as a blowing agent // *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*. 2004. Vol. 23. № 4. P. 263–276. DOI: <https://doi.org/10.1002/adv.20016>.

116. Bledzki A. K., Faruk O. Microcellular wood fibre reinforced PP composites: a comparative study between extrusion, injection moulding and compression moulding // *International Polymer Processing*. 2006. Vol. 21. № 3. P. 256–262.

117. Gonsalves, K.E. Inorganic nanostructured materials / K.E. Gonsalves, X. Chen // *Nanostructured materials*. 1996. Vol. 5. P. 3256–3262.

118. Benthien J. T., Thoemen H. Effects of raw materials and process parameters on the physical and mechanical properties of flat pressed WPC panels //

Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2012. Vol. 43. № 4. P. 570–576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.12.028>.

119. Kaymakci A. Effect of sepiolite clay nanofibers on physical, mechanical, and thermal properties of wood-plastic nanocomposites // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2022. Vol. 35. № 10. P. 1647–1659. DOI: <https://doi.org/10.1177/0892705720939171>.

120. Wang F. Aluminium/Wood Plastic Composite and SLS Parts Mechanical Properties and Microwave Processing Research. PhD thesis. Northeast Forestry University, Harbin, China, 2021.

121. Chen Y., Shi C., Zhang Z. Effect of surface modification of multi-walled carbon nanotubes on the properties of wood-plastic composites // For. Ind. 2020. Vol. 57. P. 15–21.

122. Zhang Y. et al. The effect of carbon nanotubes on the mechanical properties of wood plastic composites by selective laser sintering // Polymers. 2017. Vol. 9. № 12. P. 728–735. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym9120728>.

123. Mariano M., El Kissi N., Dufresne A. Cellulose nanocrystals and related nanocomposites: Review of some properties and challenges // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. 2014. Vol. 52. № 12. P. 791–806. DOI: <https://doi.org/10.1002/polb.23490>.

124. Siró I., Plackett D. Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review // Cellulose. 2010. Vol. 17. P. 459–494. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9405-y>.

125. Xu X. et al. Cellulose nanocrystals vs. cellulose nanofibrils: a comparative study on their microstructures and effects as polymer reinforcing agents // ACS applied materials & interfaces. 2013. Vol. 5. № 8. P. 2999–3009. DOI: <https://doi.org/10.1021/am302624t>.

126. Malainine M. E., Mahrouz M., Dufresne A. Thermoplastic nanocomposites based on cellulose microfibrils from *Opuntia ficus-indica* parenchyma cell // Composites Science and Technology. 2005. Vol. 65. № 10. P. 1520–1526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.01.003>.

127. Peng Y. et al. Maleic anhydride polypropylene modified cellulose nanofibril polypropylene nanocomposites with enhanced impact strength // Polymer composites. 2016. Vol. 37. № 3. P. 782–793. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.23235>.

128. Leitner J. et al. Sugar beet cellulose nanofibril-reinforced composites // Cellulose. 2007. Vol. 14. P. 419–425. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-007-9131-2>.

129. Siqueira G., Bras J., Dufresne A. Cellulosic bionanocomposites: a review of preparation, properties and applications // Polymers. 2010. Vol. 2. № 4. P. 728–765. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym2040728>.

130. S.-K. Yeh, A. Al-Mulla, and R.K. Gupta. Influence of the coupling agent of polypropylene/clay nanocomposite-based wood-plastic composites // ANTEC. Society of Plastic Engineers, Brookfield, CT, 2005. P. 1290–1294.

131. Файзуллин А.З., Вольфсон С.И., Файзуллин И.З., Голубчикова К.Е., Хафизова Д.Р. Исследование влияния органофицированного монтмориллонита на физико-механические и эксплуатационные свойства древесно-полимерных композиционных материалов // Технология органических веществ: материалы докладов 83-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 4–15 февраля 2019 г. Минск : БГТУ, 2019. С. 133–134.

132. Файзуллин И.З. Древесно-полимерные композиционные материалы на основе полипропилена и модифицированного древесного наполнителя: дис. канд. техн. наук: 05.17.06. Казань, 2016. 123 с.

133. Мусин И.Н., Файзуллин И.З., Вольфсон С.И. Модификация древесно-полимерных композитов на основе полиолефинов монтмориллонитом // Вестник Казанского технологического университета, Казань, КНИТУ. 2012. № 14. С. 135 – 138.

134. Мусин И.Н., Волков И.В. Кимельблат В.И., Вольфсон С.И. Изучение влияния содержания наполнителей на механические свойства

термопластичных эластомеров // материалы Всероссийской научно-технической конференции: Композиционные материалы в авиастроении и народном хозяйстве, 2000. С. 35 – 40.

135. Dombrowski T. Carbonate minerals in wood polymer composites (WPC) // WPCs 2006, The Changing Technology in WPCs. The First World Congress on Wood Fiber / Plastics and Related Composites, San Francisco, CA, April 2–4, 2006.

136. Жданова Т.В., Чайка Е.М., Мацеевич Т.А., Афанасьев Е.С., Аскадский А.А. Влияние агрессивных сред на механические свойства древесно-полимерных композитов // Пластические массы. 2020. №7–8. С. 16–20.

137. Маския Л. Добавки для пластических масс. М: Химия, 1978. 184 с.

138. Тураев Э.Р., Бекназаров Х.С., Ахмедов У.К., Джалилов А.Т. Влияние размеров частиц талька на межфазные взаимодействия композиционных материалов на основе полипропилена // Universum: химия и биология. 2018. №12 (54). С 53-57.

139. T. Dombrowski. Phyllosilicates in WPC applications: Talc and MinFlextm // WPCs 2006, The Changing Technology in WPCs. The First World Congress on Wood fiber / Plastics and Related Composites, San Francisco, CA, April 2–4, 2006.

140. O. Noel and R. Clark. The use talc in wood-plastic composites // Progress in Woodfibre-Plastic Composites, Canadian Natural Composites Council, University of Toronto, Canada, Toronto, 2004.

141. O. Noel and R. Clark. Recent advances in the use of talc in wood-plastic composites // The Global Outlook for Natural Fiber Wood Composites, Intertech, Portland, ME, New Orleans, LA, December 8–10, 2004.

142. O. Noel and R. Clark. Recent advances in talc-reinforced wood-plastic composites // Intertech’s 4th Conference of for Natural Fiber Wood Composites, Intertech, Portland, ME, Orlando, FL, 2005.

143. Li Q. et al. Preparation and performance of high-density polyethylene-based wood–plastic composites reinforced with red pottery clay // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2017. Vol. 36. № 12. P. 853–863. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684417693698>.

144. Li X. et al. The utilization of organic vermiculite to reinforce wood–plastic composites with higher flexural and tensile properties // *Industrial crops and products*. 2013. Vol. 51. P. 310–316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.09.019>.

145. T. Dombrowski. Mica in oriented polypropylene WPC // *WPCs 2006, The Changing Technology in WPCs. The First World Congress on Wood fiber / Plastics and Related Composites, ECM, Plymouth, MI, San Francisco, CA, April 2–4, 2006*.

146. Герасимова Н.П. Зола уноса как сырье для производства бетонных блоков при решении экологической проблемы утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ // *Вестник ИрГТУ*. 2016. № 6 (113). С. 122–127.

147. Electric Power Research Institute, Report CS-4765, September 1986.

148. J.J. Balatinecz, M.I. Khavkine, S. Law, and V. Kovac. Properties of polyolefin composites with blends of wood flour and coal ash // *Fifth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites, Forest Products Society, Madison, WI, May 26–27, 1999*, P. 235–240.

149. Zhang J. et al. Reinforcement of continuous fibers for extruded wood-flour/HDPE composites: Effects of fiber type and amount // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 228. P. 116718. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116718>.

150. Pahlevani F. et al. Waste glass powder – Innovative value-adding resource for hybrid wood-based products // *Journal of cleaner production*. 2018. Vol. 195. P. 215–225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.205>.

151. Li X. et al. The utilization of bamboo charcoal enhances wood plastic composites with excellent mechanical and thermal properties // *Materials &*

Design. 2014. Vol. 53. P. 419–424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.028>.

152. Mosavi-Mirkolaei S. T., Najafi S. K., Tajvidi M. Physical and mechanical properties of wood-plastic composites made with microfibrillar blends of LDPE, HDPE and PET // *Fibers and Polymers*. 2019. Vol. 20. P. 2156–2165. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12221-019-1089-9>.

153. Zhang J. et al. The properties of flax fiber reinforced wood flour/high density polyethylene composites // *Journal of forestry research*. 2018. Vol. 29. № 2. P. 533–540. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0461-0>.

154. Wang Z. et al. Effects of extractives on mechanical properties and durability of rubberwood-HDPE composites // *Holzforschung*. 2020. Vol. 74. № 11. P. 1061–1070. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0180>.

155. Kumar S., Vedrtnam A., Pawar S. J. Effect of wood dust type on mechanical properties, wear behavior, biodegradability, and resistance to natural weathering of wood-plastic composites // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2019. Vol. 13. P. 1446–1462. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0568-9>.

156. Zong G. et al. High-strength, lightweight, co-extruded wood flour-polyvinyl chloride/lumber composites: Effects of wood content in shell layer on mechanical properties, creep resistance, and dimensional stability // *Journal of cleaner production*. 2020. Vol. 244. P. 118860. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118860>.

157. Hao X. et al. Research progress and application of co-extruded wood plastic composites // *Journal of Forestry Engineering*. 2021. № 6. P. 27–38.

158. Jiang K., Guo Y., Bourell D.L. Study on the microstructure and binding mechanisms of selective laser sintered wood plastic composite // *Proceedings of the 24th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*. Austin, TX, USA, August 2013. P. 902–913. Accessed 31 May 2015.

159. Gephardt A. Understanding additive manufacturing. Cincinnati: Hanser Publications. 2012. 164 pp.

160. Mohankumar D. et al. Extraction of plant based natural fibers—A mini review // IOP conference series: materials science and engineering. – IOP Publishing. 2021. Vol. 1145. № 1. P. 012023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1145/1/012023>.

161. Wolcott M. P., Englund K. A technology review of wood-plastic composites // 33rd International particleboard/composite materials symposium. 1999. P. 103–111.

162. Sykacek E. et al. Extrusion of five biopolymers reinforced with increasing wood flour concentration on a production machine, injection moulding and mechanical performance // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2009. Vol. 40. № 8. P. 1272–1282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.05.023>.

163. Kuo P. Y. et al. Effects of material compositions on the mechanical properties of wood–plastic composites manufactured by injection molding // Materials & Design. 2009. Vol. 30. № 9. P. 3489–3496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.03.012>.

164. Gosselin R., Rodrigue D., Riedl B. Injection molding of postconsumer wood–plastic composites I: morphology // Journal of thermoplastic composite materials. 2006. Vol. 19. № 6. P. 639–657. DOI: <https://doi.org/10.1177/0892705706067484>.

165. Gosselin R., Rodrigue D., Riedl B. Injection molding of postconsumer wood–plastic composites II: mechanical properties // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2006. Vol. 19. № 6. P. 659–669. DOI: <https://doi.org/10.1177/0892705706067486>

166. Holbery J., Houston D. Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications // Jom. 2006. Vol. 58. № 11. P. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0234-2>.

167. Gardner, DJ, Y Han. Towards structural wood plastic composites: technical innovations // Proceedings of the 6th Annual Meeting of the Nordic-Baltic Network in Wood Material Science and Engineering, October 21–22, Tallinn, Estonia, 2010. P. 7–22.

168. Gardner D. J., Han Y., West C. FRP-reinforced wood plastic composite panels for structural applications // Proceedings of the 11th international conference on wood and biofiber plastic composites and nanotechnology in wood composites symposium, USDA Forest Products Laboratory, Madison, 2011.

169. Wilczyński K. et al. Rheological basics for modeling of extrusion process of wood polymer composites // Polymers. 2021. Vol. 13. № 4. P. 622–635. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13040622>.

170. Concu G. (ed.). Wood in Civil Engineering. Norderstedt: BoD – Books on Demand, 2017.

171. Ramesh M. et al. A critical review on wood-based polymer composites: Processing, properties, and prospects // Polymers. 2022. Vol. 14. № 3. P. 589–612. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14030589>.

172. Mazzanti V., Mollica F. A review of wood polymer composites rheology and its implications for processing // Polymers. 2020. Vol. 12. № 10. P. 2304–2325. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12102304>.

173. Chauhan V., Kärki T., Varis J. Review of natural fiber-reinforced engineering plastic composites, their applications in the transportation sector and processing techniques // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2019. Vol. 35. № 8. P. 1169–1209. DOI: <https://doi.org/10.1177/0892705719889095>.

174. Adhikary K. B. et al. Effects of lubricant content on extrusion processing and mechanical properties of wood flour-high-density polyethylene composites // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2011. Vol. 24. № 2. P. 155–171. DOI: <https://doi.org/10.1177/0892705710388590>.

175. Kajaks J., Kalnins K., Matvejs J. Rheological properties of wood-plastic composites based on polypropylene and birch wood plywood production

residues // Key Engineering Materials. 2018. Vol. 762. P. 226–230. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.762.226>.

176. Santi C. R. et al. Rheology and processing of HDPE/wood flour composites // International Polymer Processing. 2009. Vol. 24. № 4. P. 346–353. DOI: <https://doi.org/10.3139/217.2238>.

177. Sapsrithong P. et al. The influence of fiber surface treatment and SBR as impact modifier on rheological behavior and mechanical properties of wood plastic composite from acrylate-styrene-acrylonitrile and bagasse // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 737. P. 281–286. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.737.281>.

178. Hristov V. Melt flow instabilities of wood polymer composites // Composite Interfaces. 2009. Vol. 16. № 7–9. P. 731–750. DOI: <https://doi.org/10.1163/092764409X12477434799525>.

179. Hristov V., Vlachopoulos J. Thermoplastic silicone elastomer lubricant in extrusion of polypropylene wood flour composites // Advances in Polymer Technology. 2007. Vol. 26. № 2. P. 100–108. DOI: <https://doi.org/10.1002/adv.20090>.

180. Botros M.G. Development of new generation coupling agents for wood-plastic composites // Proceedings of The Global Outlook for Natural Fiber and Wood Composites, December 3–5, 2003, New Orleans, USA.

181. Li T. Q., Wolcott M. P. Rheology of wood plastics melt, part 2: Effects of lubricating systems in HDPE/maple composites // Polymer Engineering & Science. 2006. Vol. 46. № 4. P. 464–473. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.20505>.

182. Черних В.П., Зіменковський Б.С., Гриценко І.С. Органічна хімія / За заг. ред. В.П. Черних. Х., 2008. 752 с.

183. Суровцев Б.О. Хімічна технологія виробництва полімерів: Навчальний посібник / О.Б. Суровцев, І.А. Мандзюк. Хмельницький: ТУП, 2003. 250 с.

184. Уайт Дж., Чой Д. Поліетилен і поліпропілен / Пер. з англ. — К.: Професія, 2006. — 240 с. — (Серія «Полімери та полімерні матеріали»).

185. Цывин М.М., Котцов С.Г., Шмаков И.В. Производство древесной муки. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 134 с.
186. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. / За ред. В. С. Білецького. Донецьк: Східний видавничий дім, 2004–2013.
187. Кальцит // Мінералого-петрографічний словник: в 2 т. / Уклад.: В. С. Білецький, В. Г. Суярко, Л. В. Іщенко. Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; Київ: ФОП Халіков Р. Х., 2018. Т. 1: Мінералогічний словник. 444 с.
188. Курта С.А. Наповнювачі – синтез, властивості та використання: навчальний посібник / С. А. Курта .– Івано-Франківськ: Вид-во Прикарпат. нац. ун-ту ім. В. Стефаника, 2012. 296с.
189. А.Н. Зеленецкий, В.П. Волков, Л.О. Бунина, А.А. Кечекьян. Особенности механического поведения ПЭНП, модифицированного малеиновым ангидридом в твердом состоянии, и композитов на его основе // Пластические массы. 2004. №7. С.24–27.
190. Zhang, Y.; Fan, Z.; Wu, B.; Rong, Y. Grafting of Peroxide-Initiated Maleic Anhydride on Spherical PE/PP in-Reactor Blend Granules // Chin. J. Polym. Sci. 2004. № 22. P. 231–238.
191. Суберляк О. В. Основи хімії полімерів / О.В. Суберляк, Є.І. Сембай. Л.: НУ „Львівська політехніка”, 2004. 235с
192. Шидловський М.С., Бабенко А.Є., Боронко О.О., Заховайко О.П., Трубачев С.І. Нові матеріали: ч.2 - Експериментальні методи досліджень механічних властивостей конструкційних полімерів та пластмас. Навчальний посібник. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 265 с.
193. G. Wu and D. Yu. Preparation of a novel infrared low-emissive coating from the Cu powder modified by the polyethylene wax // Infrared Physics & Technol. 2012. Vol. 55. P. 26–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2011.08.002>.

194. H.S. Mpanzaand A.S. Luyt. Influence of Different Waxes on the Physical Properties of Linear Low-density Polyethylene // South African Journal of Chemistry. 2006. № 59. P 48–54.

195. S. Yetgin, M. Gonen, S. Atakul-Savrik, D. Balkose. Characterization and Identification of a Commercial Polyethylene Wax by Property Comparison with a Paraffin Wax, Sorbitan Monostearate and Myristic Acid // Proceedings of the 4th International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition, Marmaris, Turkey, 2019. P. 57–61.

196. Ковальський В. П.; Сідлак О. С. Використання золи виносу у будівельних матеріалах // Сучасні Технології у Будівництві. 2014. № 16. С. 35–40.

197. Hemmings R.T., Hill R.L., Cornelius B.J. Filler comprising fly ash for use in polymer composites: U.S. Patent No. 6,916,863. 2005.

198. Сердюк, В. Р.; Сідлак, О. С. Сучасні підходи комплексної утилізації фосфогіпсу та золи-виносу. Сучасні Технології у Будівництві. 2016. № 20. С. 11-16.

199. Иваницкий В. В. Фосфогипс и его использование / Иваницкий В. В., Классен П. В., Новиков А. А., и др. М.: Химия, 1990. 222 с.

200. А. М. Камисов, О. Е. Леонова, Ю. А. Кононов. Утилизация фосфогипса с получением материала для производства вяжущих // Международная конференция «Сотрудничество для решения проблемы отходов», 2008. С. 1–5.

201. Gamage P.K., O'Brien M., Karunanayake I., Epoxidation of some vegetable oils and their hydrolysed products with peroxyformic acid – optimized to industrial scale // J. Natn. Set. Foundation Sri Lanka. 2009. Vol. 37. № 4. P. 229–240. DOI: [10.4038/jnsfsr.v37i4.1469](https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v37i4.1469).

202. Pfaff Gerhard. Iron oxide pigments // Physical Sciences Reviews. Vol. 6. № 10. 2021. P. 535–548. DOI: [10.1515/psr-2020-0179](https://doi.org/10.1515/psr-2020-0179).

203. Файзуллин И.З., Имамутдинов И.В., Хамидов В.Я., Мусин И.Н., Вольфсон С.И. Влияние наполнителей и технологических добавок на

реологические свойства древесно–полимерных композитов // Вестник Казанского технологического университета, Казань, КНИТУ. 2013. Т. 16. №10. С. 148–150.

204. Фролов Д.И., Долгов М.В. Анализ влияния температуры матрицы и влажности сырья на крутящий момент двигателя экструдера // Инновационная техника и технология. 2020. № 4 (25). С. 40–45.

205. Jones, C.D., et al. Effect of Lubricants on the Rheological Properties of Polymer Composites // Composites Science and Technology. 2008. № 1. vol. 68. P. 123–134. DOI: [10.1002/app.47667](https://doi.org/10.1002/app.47667)

206. Choo J.E., Lee S.H., Kim H.J., et al. The Effect of Epoxidized Soybean Oil on the Physical and Mechanical Properties of PLA/PBAT/PPC Blends by Reactive Compatibilization // Journal of Polymers and the Environment. 2023. Article 02862. DOI: [10.1007/s10924-023-02862-6](https://doi.org/10.1007/s10924-023-02862-6)

207. Zhang J., Liu T., Yu J., Wang H. Stress concentration and its effect on mechanical properties of polymer composites with micro-defects // Composites Part B: Engineering. 2020. Vol. 195. Article 107844. DOI: [10.1016/j.compositesb.2020.107844](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107844)

208. Rahman M., Brazel C.S. The plasticizer market: An assessment of traditional plasticizers and research trends to meet new challenges // Progress in Polymer Science. 2004. Vol. 29. P. 1223–1248. DOI: [10.1016/j.progpolymsci.2004.10.001](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2004.10.001)

209. Керівництво з охорони навколишнього середовища, здоров'я і праці. Загальне керівництво з ОНЗП: охорона навколишнього середовища. Виробництво фосфорних добрив / Міжнародна фінансова корпорація (IFC), Група Світового банку. Вашингтон, 30 квітня 2007. 28 с.

210. Малик Н.Ю., Мальований М.С., Малик Ю.О. Двостадійна хімічна переробка фосфогіпсу в нітрат амонію // Хімія, технологія речовин та їх застосування. 2005. № 536. С. 207–211.

211. Мирка Г.Е., Рудой Н.Г. Проблемы утилизации техногенных отходов промышленных предприятий Сумской области // Материалы 3-й

Международной конференции «Сотрудничество для решения проблемы отходов», 2006. С. 101–102.

212. Криволапов Д.С., Сухий К.М., Баштаник П.І., Третьяков А.О., Безрукавий В.О. Дослідження впливу стеаринової кислоти на властивості деревинно-полімерних композитів // Питання хімії та хімічної технології. 2023. № 5. С. 50–54. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2023-150-5-50-54>.

213. Криволапов Д.С., Сухий К.М., Баштаник П.І., Третьяков А.О., Безрукавий В.О. Вплив зольного пилу на властивості деревинно-полімерних композитів // Питання хімії та хімічної технології. 2024. № 3. С. 83–88. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2024-154-3-83-88>.

214. Kulikov, A.; Kryvolapov, D.; Sukhyu, K.; Yeromin, O.; Fedak, M.; Prokopenko, O.; Sukha, I.; Musaiio, A.; Hrebik, T. Study of the Impact of Epoxidized Soybean Oil on the Characteristics of Wood-Polymer Composites // Materials. 2025. 18. 2455. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18112455>

215. Д.С. Криволапов, К.М. Сухий, П.І. Баштаник, І.В. Суха, О.В. Савченко. Влив фосфогіпсу на властивості деревинно-полімерних композитів // Питання хімії та хімічної технології. 2025. № 2. С. 144–149. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-159-2-144-149>.

216. Криволапов Д.С., Сухий К.М., Баштаник П.І., Третьяков А.О., Беляновська О.А. Деревинно-полімерна композиція : пат. 129141 Україна / ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» ; заявл. 10.07.2024 ; опубл. 22.01.2025, Бюл. № 4.

217. Криволапов Д.С., Баштаник П.І., Сухий К.М. Дослідження процесу переробки деревинно-полімерних композитів // Тези доповідей II Міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» м. Дніпро, Україна. 20 травня 2023 р. С. 16–18.

218. Криволапов Д.С., Романченко І.С., Баштаник П.І., Третьяков А.О., Сухий К.М. Вплив зольного пилу на властивості деревинно-полімерного композиту // Тези доповідей XI Міжнародної науково-

практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Хімія і сучасні технології» м. Дніпро, Україна. 06-07 грудня 2023. том II. С. 117–118.

219. Криволапов Д.С., Сухий К.М., Баштаник П.І., Третьяков А.О. Вплив зольного пилу на властивості деревинно-полімерного композиту // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології забезпечення параметрів комфорту, енергоефективності і екологічності житлових будівель на основі смарт-технологій» м. Дніпро, Україна. 20–21 лютого 2024. С 133–134.

220. Д.С. Криволапов, П.І. Баштаник, К.М. Сухий. Вивчення впливу технологічних факторів на властивості термопластичних деревинно-полімерних композитів // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні полімерні матеріали та технології» м. Львів, Україна. 24-26 вересня 2024. С 43.

221. Криволапов Д.С., Романченко І.Ю., Баштаник П.І., Сухий К.М. Вплив епокидваної соєвої олії на властивості деревинно-полімерного композиту // Тези доповідей III Міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» м. Дніпро, Україна. 20 травня 2024 р. С. 48–49.

222. Криволапов Д.С., Баштаник П.І., Сухий К.М. Вплив фосфогіпсу на властивості деревинно-полімерних композитів // Тези доповідей IV Міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» м. Дніпро, Україна. 20 травня 2025 р. С. 9–12.

ДОДАТОК А

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Криволапов Д.С., Сухий К.М., Баштаник П.І., Третьяков А.О., Безрукавий В.О. Дослідження впливу стеаринової кислоти на властивості деревинно-полімерних композитів // Питання хімії та хімічної технології. 2023. № 5. С. 50–54. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2023-150-5-50-54> (**Scopus + фахове видання**);
2. Криволапов Д.С., Сухий К.М., Баштаник П.І., Третьяков А.О., Безрукавий В.О. Вплив зольного пилу на властивості деревинно-полімерних композитів // Питання хімії та хімічної технології. 2024. № 3. С. 83–88. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2024-154-3-83-88> (**Scopus + фахове видання**);
3. Kulikov, A.; Kryvolapov, D.; Sukhyu, K.; Yeromin, O.; Fedak, M.; Prokopenko, O.; Sukha, I.; Musaiio, A.; Hrebik, T. Study of the Impact of Epoxidized Soybean Oil on the Characteristics of Wood-Polymer Composites // Materials. 2025. 18. 2455. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18112455> (**Scopus + Web of Science + фахове видання**);
4. Д.С. Криволапов, К.М. Сухий, П.І. Баштаник, І.В. Суха, О.В. Савченко. Влив фосфогіпсу на властивості деревинно-полімерних композитів // Питання хімії та хімічної технології. 2025. № 2. С. 144–149. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-159-2-144-149> (**Scopus + фахове видання**);
5. Криволапов Д.С., Сухий К.М., Баштаник П.І., Третьяков А.О., Беляновська О.А. Деревинно-полімерна композиція : пат. 129141 Україна / ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»; заявл. 10.07.2024; опубл. 22.01.2025, Бюл. № 4. (**патент на винахід**)

6. Криволапов Д.С., Баштаник П.І., Сухий К.М. Дослідження процесу переробки деревинно-полімерних композитів // Тези доповідей II Міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» м. Дніпро, Україна. 20 травня 2023 р. С. 16–18.

7. Криволапов Д.С., Романченко І.С., Баштаник П.І., Третьяков А.О., Сухий К.М. Вплив зольного пилу на властивості деревинно-полімерного композиту // Тези доповідей XI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Хімія і сучасні технології» м. Дніпро, Україна. 06-07 грудня 2023. том II. С. 117–118.

8. Криволапов Д.С., Сухий К.М., Баштаник П.І., Третьяков А.О. Вплив зольного пилу на властивості деревинно-полімерного композиту // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології забезпечення параметрів комфорту, енергоефективності і екологічності житлових будівель на основі смарт-технологій» м. Дніпро, Україна. 20–21 лютого 2024. С 133–134.

9. Д.С. Криволапов, П.І. Баштаник, К.М. Сухий Вивчення впливу технологічних факторів на властивості термопластичних деревинно-полімерних композитів // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні полімерні матеріали та технології» м. Львів, Україна. 24-26 вересня 2024. С 43.

10. Криволапов Д.С., Романченко І.Ю., Баштаник П.І., Сухий К.М. Вплив епокидваної соєвої олії на властивості деревинно-полімерного композиту // Тези доповідей III Міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» м. Дніпро, Україна. 20 травня 2024 р. С. 48–49.

11. Криволапов Д.С., Баштаник П.І., Сухий К.М. Вплив фосфогіпсу на властивості деревинно-полімерних композитів // Тези доповідей IV Міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» м. Дніпро, Україна. 20 травня 2025 р. С. 9–12.

ДОДАТОК Б

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «НВП Сервіс комплект»

Безрукавий В.О.



2025 р.

АКТ

Про виготовлення експериментальної партії деревинно-полімерного композита на основі вторинного поліетилену високої густини

Ми, що нижче підписалися: від ТОВ «НВП Сервіс комплект» - директор Безрукавий В.О., начальник виробництва Мельниченко М.В.; від Українського державного університету науки і технологій – доцент кафедри технології природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції (ТПСПЖ та ХП) Суха І.В., аспірант кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів (ТПП та ПМ) Криволапов Д.С. склали даний акт про те, що на дільниці екструзії ДПК в період з 4.02.2025 по 7.08.2025 виготовлялась терасна дошка з використанням розробленої аспірантом Криволаповим Д.С рецептури та технології процесу. Вироблена терасна дошка призначена для зовнішнього оздоблення.

Технологічні параметри процесу екструзії для формування терасної дошки з запропонованого композиту відпрацьовані експериментально на кафедрі ТПП та ПМ конкретизовані для даного виробу у співпраці з працівниками підприємства.

Технічні характеристики продукції:

- густина: 1274 кг/м³;
- водопоглинання: 0,204 %;
- коефіцієнт лінійного термічного розширення: $3,0 \cdot 10^{-5}$ 1/°C;
- технологічна усадка: 0,194 %;
- міцність при вигині: 53,1 МПа;
- ударна в'язкість за Шарпі (на зразках з надрізом): 7,62 кДж/м².

Фахівці ТОВ «НВП Сервіс комплект» провели візуальний огляд, контроль якості та фізико-механічних властивостей продукції, що підтверджують відповідність заявленим технічним характеристикам. Претензій щодо якості продукції немає

На основі проведених випробувань зроблені наступні висновки:

- виготовлена експериментальна партія терасної дошки відповідає всім встановленим вимогам якості, має високі експлуатаційні показники та підтверджує можливість і доцільність серійного виробництва даного виду продукції;
- впровадження запропонованої рецептури дозволило ефективно використовувати відходи полімерних, лісозаготівельних, енергетичних та хімічних галузей промисловості, що повністю відповідає принципам циркулярної економіки та сталого розвитку;
- впровадження нової рецептури дозволило знизити собівартість продукції за рахунок інтеграції доступних вторинних складових, підвищуючи її конкурентоспроможність.

Для розрахунку економічного ефекту використані «Методичні рекомендації з визначення прибутку від використання об'єктів промислової власності (Затверджено наказом Держпатенту України № 80 від 26.08.1998). У разі створення нових технологій, засобів механізації та автоматизації виробництва на базі ОПВ приріст прибутку у розрахунковому періоді визначається за формулою:

$$Pr = [(C_6 - C_n) + E_n * (K_{пб} - K_{пн})] * V_n, \quad (1)$$

де Пр - приріст прибутку, гривень;

C_6, C_n - собівартість одиниці виробу при використанні відповідно базового і нового техпроцесу, гривень;

$K_{пб}, K_{пн}$ - питомі (на одиницю виробу) капітальні вкладення відповідно у базовому і розрахунковому періодах, гривень/од. продукції;

E_n - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень (норма дисконту);*

V_n - продуктивність нового техпроцесу у розрахунковому періоді, натуральних одиниць (штуки, тонни, кубічні метри тощо).

Зведені економічні показники експлуатації впроваджених матеріалів та технологій представлені в таблиці.

Таблиця – Зведені економічні показники впровадженої рецептури та технологічного процесу виробництва терасної дошки

№	Показники	Одиниця виміру	Базовий варіант	Новий варіант
1	Досліджуваний період	місяць	6	6
2	Капітальні витрати	грн/м ²	0	0,076
3	Собівартість	грн/м ²	848,74	791,27
4	Продуктивність та обсяги	м ²	-	19828,8
5	Нормативний коефіцієнт		0,15	0,15

Після підстановки результатів в формулу (1), отримано приріст прибутку у розрахунковому періоді:

$$Pr = [(848,74 - 791,27) + 0,15(0 - 0,076)] * 19828,8 = 1139423,5 \text{ грн}$$

Впровадження нової рецептури для терасної дошки ДПК забезпечило економічний ефект у розмірі 1 139 423,5 гривень за пів року. Це значний приріст прибутку, отриманий завдяки зниженню собівартості сировини та збільшенню продуктивності екструзії.

Цей акт є підставою для подальшого впровадження результатів досліджень у промисловість, а також для використання у якості підтвердження практичної цінності дисертаційної роботи аспіранта Криволапова Д.С.

Директор

ТОВ «НВП Сервіс комплект»



Безрукавий В.О.

Начальник виробництва

ТОВ «НВП Сервіс комплект»

Мельниченко М.В.

Доцент кафедри ТПСЖ та ХП

Суха І.В.

Аспірант кафедри ТПП та ПМ

Криволапов Д.С.

