

competitiveness. Cost reduction of 20 % regarding traditional UHS steels is expected (due to much lower alloying elements).

#### **Acknowledgements**

*This research is financially supported by the Slovak Research and Development Agency in the frame of the project APVV-23-0341.*

### **МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЛЮТИНОВИХ БІОКОМПОЗИТІВ, НАПОВНЕНИХ ЛІГНІНОМ**

О.Л. Садова, доцент, канд. техн. наук, Луцький національний технічний університет,  
В.П. Кашицький, професор, канд. техн. наук, Луцький національний технічний університет,  
С.Ю. Чернота, аспірант, Луцький національний технічний університет,  
Л.В. Сьомак, студентка, Луцький національний технічний університет

Сучасні напрямки розвитку матеріалознавства все більше орієнтуються на використання відновлюваних ресурсів, що зумовлено екологічними викликами. Лігнін, який є природним полімером і одним з основних компонентів лігноцелюлозної біомаси, привертає увагу науковців як потенційна сировина для створення нових екологічно безпечних матеріалів. Щороку у світі утворюються мільйони тонн лігніну як побічного продукту у процесі виробництва целюлози, проте лише незначна його частина використовується ефективно. Враховуючи високу термічну стабільність і доступність, сучасні науковці лігнін розглядають як перспективний компонент для створення композитів з покращеними механічними та експлуатаційними властивостями [1, 2].

Лігнін – це складний органічний полімер, який є основним елементом клітинних стінок багатьох рослин. Він взаємодіє з іншими компонентами клітинної стінки, такими як целюлоза і геміцелюлоза, формуючи міцну і складну структуру, що дозволяє рослинам рости та зберігати свою форму. Основною функцією лігніну в рослинах є з'єднання волокон, що забезпечує жорсткість структури. Тому використання лігніну дозволяти сформувати композитні матеріали з високою стійкістю до ударів, стиснення та згинання [1, 3].

Основні методи виробництва лігніну з деревини як сировини включають сульфатний та сульфатний (крафтовий) процеси. Внаслідок цих різних технологій отримують різні види лігнінових продуктів. Їхні властивості можуть варіюватися залежно від джерела сировини, технології приготування пульпи, а також від методів очищення та модифікації. Наприклад, сульфатний лігнін (лігносульфонат), який отримують під час сульфатного пульпування, може використовуватися як спеціалізований хімічний продукт для різноманітних промислових цілей. Крафт-лігнін, що є побічним продуктом виробництва крафт-целюлози, зазвичай спалюється для відновлення енергії та хімічних речовин. Лігнін, отриманий з органічних розчинників, добувається шляхом екстракції [4, 5].

Для дослідження сформовані біокомпозитні зразки на основі компонентів природного походження – кісткового клею та лігніну. Лігнін розділено на фракції за допомогою ситового аналізу. У роботі використано фракцію 0,14...0,5 мм.

Для біокомпозитних зразків, які знаходились в прес-формі, проведено термічну обробку за температури 100...150 °С протягом 2 годин. Охолодження біокомпозитних зразків проведено на спокійному повітрі в прес-формах з метою уникнення пружної післядії, яка спричиняє порушення суцільності матеріалу у вигляді тріщин та розшарувань. Після кожної години термічної обробки проведено додаткове підпресування біокомпозиції з метою забезпечення щільності та суцільності біокомпозитного матеріалу, оскільки під дією температури відбувається видалення залишкової вологи з об'єму матеріалу, що призводить до утворення пор та пустот. Для формування біополімерної матриці необхідно отримати водний розчин на основі кісткового клею. Це призводить до появи надлишку вологи в біокомпозиті, яка перешкоджає утворенню зв'язків між компонентами композитного матеріалу. З метою видалення надлишку вологи з композиції проведено її підсушування

перед етапом пресування. В зв'язку з цим важливим є формування високонаповнених біокомпозитних систем, що зменшує в кількісному співвідношенні вміст полімерної матриці в композитному матеріалі. Згідно аналізу попередніх досліджень біокомпозитні матеріали доцільно підсушувати до втрати вологи 15 % за масою зразка [6-7]. Після підсушування необхідно перемішати композицію з метою отримання її однорідності.

Досліджено, що біокомпозитний матеріал, який містить 120 мас. ч. лігніну та ступінь підсушування композиції 15 %, має міцність на стискання 2,23 МПа (рис. 1). За збільшення вмісту наповнювача до 130 мас. ч. відбувається підвищення міцності на стискання біокомпозитів в 3,5 рази (7,88 МПа), що вказує на більш оптимальне співвідношення компонентів матеріалу. Найвищу міцність на стискання 11,12 МПа має біокомпозитний матеріал, наповнений 140 мас. ч. лігніну. Дана міцність є вищою в 1,4 та 3,2 рази порівняно із композитними матеріалами, що містять 130 мас. ч. та 150 мас. ч. наповнювача відповідно. Підвищення міцності на стискання можна пояснити ущільненням частинок твердого наповнювача, який дозволяє утворитись більшій кількості зв'язків між компонентами матеріалу, а також оптимальним вмістом в'язучого на глютиновій основі.

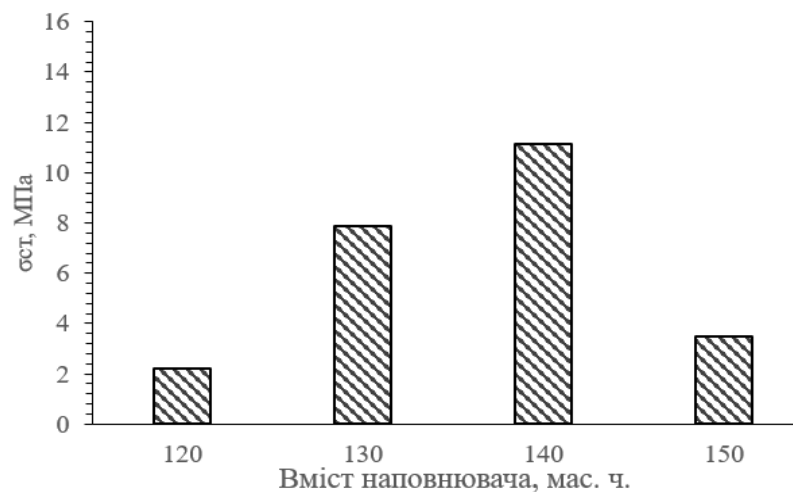


Рисунок 1 – Залежність міцності на стискання біокомпозитів, наповнених лігніном, від вмісту наповнювача

За подальшого підвищення вмісту лігніну до 150 мас. ч. відбувається зниження в 2,25 рази міцності на стискання біокомпозитів (3,5 МПа) порівняно із біокомпозитом, що містить 130 мас. ч. наповнювача. Різке зниження міцності на стискання біокомпозитів пояснюється наявністю поперечної макротріщин, яка могла утворитись внаслідок надлишкового вмісту наповнювача в матеріалі або відповідно недостатній вмістом в'язучого. В даному випадку не відбувається повне змочування всіх частинок наповнювача.

#### Список використаних джерел

1. <https://www.borregaard.com/product-areas/lignin/your-guide-to-lignin-and-lignosulfonates>
2. Fernández-Rodríguez, J., Erdocia, X., Hernández-Ramos, F., Gordobil, O., González Alriols, M., Labidi, J. (2020). Direct lignin depolymerization process from sulfur-free black liquors. *Fuel Processing Technology*, 197, 106201. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106201>
3. Deepa, A. K., & Dhepe, P. L. (2015). Lignin depolymerization into aromatic monomers over solid acid catalysts. *ACS Catalysis*, 5(1), 365–379.
4. Huang, C., Li, R., Tang, W., Zheng, Y., & Meng, X. (2022). Improve enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass by modifying lignin structure via sulfite pretreatment and using lignin blockers. *Fermentation*, 8(10), 558. <https://doi.org/10.3390/fermentation8100558>

5. Borella, M., Casazza, A. A., Garbarino, G., Riani, P., & Busca, G. (2022). The role of inorganic sulfur compounds in the pyrolysis of Kraft lignin. *Energies*, 15(3), 991. <https://doi.org/10.3390/en15030991>

6. Sadova, O., & Vyshynskiy, M. (2024). Study of mechanical properties and structure of biocomposites filled with chopped stalks of cereals crops. *Naukovi Notatky*, (79), 16–22. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.79.2>

7. Kashytskyi, V., Sadova, O., Vyshynskiy, M., Shehynskiy, O., & Marchuk, N. (2024). Development of glutinous biocomposite materials filled with coffee grounds. *Commodity Bulletin*, 17(2), 72–81. <https://doi.org/10.62763/ef/2.2024.72>

## ФОРМУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ СКЛОПЛАСТИКІВ НА ОСНОВІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

В.П. Кашицький, професор, канд. техн. наук, Луцький національний технічний університет,  
А.В. Чернов, аспірант, Луцький національний технічний університет,  
В.В. Ліщина, студент, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк

Епоксидні смоли широко використовують в різних галузях техніки для виготовлення різнофункціональних виробів та захисних покриттів завдяки високій адгезійній міцності, малій усадці та технологічності формування виробів [1, 2]. Армування епоксиполімерів волокнистим або листовим наповнювачем забезпечує покращення механічних та експлуатаційних властивостей епоксикомпозитів, а також розширює область функціонального використання епоксикомпозитних виробів. Найкраще зарекомендували себе як наповнювачі епоксиполімерів скловолокна та арамідні волокна, які мають високу міцність на розрив, високий модуль пружності та сумісність з епоксидним в'язучим [3, 4]. Враховуючи економічний аспект арамідні волокна є високовартісним наповнювачем, що обмежує їх масове використання для виготовлення армованих епоксикомпозитів з високими фізико-механічними характеристиками. Скловолокна в свою чергу характеризуються високою міцністю, гнучкістю, жорсткістю та стійкістю до хімічних пошкоджень. Застосування скловолокон забезпечує покращення механічних, триботехнічних, теплофізичних та ізоляційних властивостей ряду полімерних композитів, що армовані різними типами скловолокна.

В загальному випадку армування полімерної матриці скловолокном підвищує границю міцності на розтяг та жорсткість полімеркомпозиту, тоді як пластичність матеріалу зменшується. Встановлено, що використання товстого волокна дещо підвищує міцність на розтяг та поперечну жорсткість, однак знижує пластичність [5]. Тонке волокно забезпечує високу пластичність полімеркомпозиту порівняно з армуванням матриці товстим волокном, але дещо знижує порівняно з ненаповненим полімером. За оптимального співвідношення між вмістом та діаметром скловолокна можна забезпечити необхідну міцність та стійкість полімеркомпозиту до впливу динамічних навантажень.

Для виготовлення полімеркомпозитів зі скловолокном, які експлуатуються в різних умовах навколишнього середовища використовують різний склад та технології формування виробів [6]. Встановлено, що границя міцності на розтяг та вигин композиту зі скловолокна та поліефірної матриці збільшувалася зі збільшенням вагової частки скловолокна. Пружна деформація композиту збільшувалася за оптимального вмісту скловолокна, а потім зменшувалася з подальшим збільшенням скловолокна. Модуль Юнга та демпфуючі властивості полімеркомпозитів збільшувалися з підвищенням вмісту скловолокна. Коефіцієнт тертя полімеркомпозитів значно залежить від умов навантаження та орієнтації волокон (випадкова орієнтація дискретних волокон в тканому маті, орієнтоване розташування вздовж осі навантаження). Менший знос був виявлений за умови більшої кількості волокон, що містяться в полімерній матриці. Для покращення властивостей полімеркомпозитів волокна обробляють різними хімічними речовинами та вводять до складу матриці модифікуючі