

<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-166-1-65-71>

УДК 678.549

В. П. Кашицький¹
О. Л. Садова¹
М. І. Вишинський¹
С. В. Мисковець¹

ФОРМУВАННЯ ГЛЮТИНОВИХ БІОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ, НАПОВНЕНИХ ПОДРІБНЕНИМИ СТЕБЛАМИ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

¹Луцький національний технічний університет

Проаналізовано результати впливу температурно-часових параметрів термічної обробки на міцність на стискання біокомпозитних матеріалів, композиції яких підсушували для регулювання вмісту вологості. Формування зразків відбувалося шляхом пресування підготовленої композиції з фіксованим вмістом вологості на основі водного розчину глютину та подрібнених стебел зернових культур. Надлишковий вміст вологості в композиції зменшували за рахунок обробки в тепловому полі за температури 50...60°C протягом 20...30 хв. Основну термічну обробку проводили для пресованої композиції в прес-формі з фіксованим закріпленням пуансонів для уникнення пружної післядії за температури 150°C протягом 30 хв з проміжним застосуванням додаткового стискання біокомпозитного матеріалу для ущільнення пористої структури, що утворюється в результаті випаровування води під впливом теплового поля. Вищу міцність на стискання мають біокомпозитні матеріали, що містять частинки стебел зернових культур з розміром фракції 0,5 мм за рахунок вищої здатності до ущільнення композиції. Визначено підвищення міцності біокомпозитних матеріалів у випадку оптимального видалення залишків води в кількості 20% під час попередньої термічної обробки. Найвищу міцність на стискання мають біокомпозитні матеріали в результаті додаткової термічної обробки за температури 50°C протягом 4 год, в результаті чого відбувається повільне видалення молекул води та формування жорсткого каркасу біополімерної матриці з максимальною кількістю фізико-хімічних зв'язків між компонентами. Підвищення температури додаткової термічної обробки до 100°C за умови зменшення тривалості витримки в тепловому полі до 3 год знижує межу міцності на стискання через деформацію ланцюгів макромолекул біополімерної матриці та часткового руйнування фізико-хімічних зв'язків. Розроблені біокомпозитні матеріали доцільно використовувати для виготовлення пакувальних елементів та тари.

Ключові слова: режим термічної обробки, біополімерна матриця, фракція, вологість, ступінь підсушування, міцність на стискання.

Вступ

На сьогодні ускладнюється ситуація з накопиченням та переробкою виробів на основі синтетичних полімерів, що призводить до збільшення об'ємів побутових відходів та зростання площ смітєвих полігонів. Це насамперед завдає значну шкоду навколишньому середовищу через виділення токсичних речовин, які призводять до змін клімату та росту кількості захворювань. Розвиток нового напрямку розробки біокомпозитних матеріалів дозволяє зменшити об'єми використання полімерної складової, що отримують з нафтопродуктів, які є обмеженою сировиною та знижують екологічну безпеку. Компоненти біокомпозитів виготовляють шляхом переробки відходів рослинного походження, що забезпечує високу біодеградабельність матеріалу у випадку потрапляння на сміттєзвалище. При цьому відбувається руйнування біокомпозитів з утворенням речовин, які не завдають шкоди навколишньому середовищу [1], [2]. Однак виникає необхідність проведення досліджень з

метою встановлення взаємозалежностей між хімічним складом, технологією формування та характером структурування біокомпозитних виробів на основі компонентів природного походження.

Біокомпозити вважають матеріалами наступного покоління, оскільки їхнє виготовлення пов'язане з використанням натуральних інгредієнтів, що визначено здатністю до відновлення та підвищенням екологічної ефективності та безпеки [3]. Висока ціна та визначені властивості біодеградабельних полімерів обмежують їхнє широке використання. Тому, щоб вирішити ці проблеми та уповільнити виснаження природних ресурсів, нещодавно започатковано різні проекти з розробки біорозкладних композитів. Розробка складу та технології отримання композитів на основі біополімерів та наповнювачів природного походження є унікальною можливістю впровадження нових конструкційних матеріалів у нові галузі виробничої сфери, особливо для аграрно розвинутих країн, які мають багато відходів рослинного походження. Цілком справедливо вважати, що біорозкладні композити є одними з найперспективніших матеріалів у різних напрямках розвитку техніки і технологій в найближчий період часу [4].

Задовільні фізико-механічні властивості біокомпозитів, що містять природні компоненти, сприяють розширенню їхньої сфери застосування в багатьох галузях промисловості, таких як енергетика, ландшафтний дизайн, автомобілебудування, меблева, будівельна та біомедична промисловість, виготовлення іграшок, спортивного інвентаря. Одночасно, для підвищення надійності та тривалості експлуатації виробів на основі біокомпозитних матеріалів необхідно дослідити вплив вмісту наповнювачів на технологічні, фізико-механічні, теплофізичні та експлуатаційні властивості біокомпозитів, провести оптимізацію складу і режимів термічної обробки, розробити технологічний процес формування виробів [5].

Використання наповнювачів у вигляді відходів рослинного походження забезпечує формування широкого асортименту виробів з різними механічними і декоративними властивостями [6]. Дискретні природні волокна здатні знизити вміст полімерної матриці, покращити механічні властивості і підвищити зносостійкість біокомпозитних виробів на основі термопластичних в'язучих; вони мають вищу стійкість до динамічних навантажень, однак є менш технологічними в процесі формування виробів з високою чистотою поверхні, складної конфігурації та тонкими стінками.

Деякі рослинні білки можуть використовувати як армувальну фазу. Одним з таких прикладів є пшенична клейковина, яка забезпечує пластифікацію за рахунок унікальної здатності утворювати міцну когезійну суміш з високими в'язкопружними властивостями [7]. Волокна листя сизалю забезпечують високу механічну міцність біокомпозитів, екстракти волокон листя ананаса м'які і багаті целюлозою, а волокна олійної пальми, що мають комірчасту структуру, тверді та жорсткі. Молекули целюлози є основними компонентами більшості цих рослинних волокон. Гідроксильні групи, які присутні в основному ланцюзі макромолекул целюлози, мають здатність утворювати внутрішньомолекулярні водневі зв'язки, де зв'язок утворюється всередині макромолекули [8], [9]. Крім целюлози природні волокна містять у великій кількості інші природні речовини, такі як лігнін. Основна функція лігніну полягає в тому, щоб діяти як в'язучий матеріал між клітинами рослинних волокон. При цьому вміст лігніну впливає на будову рослин, їхню морфологію та властивості [10]. Важливою властивістю рослинного волокна, що впливає на його армувальні властивості, є ступінь полімеризації. При цьому волокна різко відрізняються один від одного через наявність молекул целюлози з різними ступенями полімеризації. Більшість цих волокон зазвичай складається із суміші основного полімеру з конфігурацією $(C_6H_{10}O_5)_n$. Серед інших рослинних волокон найвищий ступінь полімеризації мають волокна луб'яних культур, значення яких наближаються до 10 000 [11].

В роботі [12] подано результати аналізу розробки складу та технології формування біокомпозитних матеріалів на основі розчину глютину та дисперсних наповнювачів, що отримані в результаті обробки або переробки вторинної сировини рослинного походження, зокрема кавової гущі з високою дисперсністю частинок, подрібненого механічним способом сушеного листя, койру кокосу та стебел зернових культур. Найвищі значення межі міцності на стискання мають біокомпозитні матеріали з вмістом 190 мас. ч. подрібнених стебел зернових культур, що визначається мінімальною кількістю дефектів в сформованому біокомпозиті. В результаті застосування розробленого оптимізованого процесу термічної обробки [13], що включає етап підсушування композиції, отримано біокомпозитні матеріали на основі глютину та подрібненої соломи з підвищеною міцністю (53,3 МПа) за рахунок формування однорідної структури біополімерної матриці.

Метою роботи є дослідження впливу режимів попередньої термічної обробки композиції та додаткової термічної обробки біокомпозитів на формування матеріалу та його міцність на стискання.

Результати дослідження

Для формування біокompatитних матеріалів як наповнювач вибрано подрібнені стебла зернових культур. В якості матриці використано розчин глютину, який отримали в результаті витримки гранул кісткового клею у воді протягом 1,5 години в печі за температури 50 °С.

Залежно від об'єму зразків розраховували кількісний вміст компонентів у співвідношенні на 100 мас. ч. розчину глютину. До подрібнених стебел зернових культур, які попередньо підсушили, додають в необхідній кількості розчин глютину та піддають ретельному механічному змішуванню композиції з частотою обертання лопатей змішувача $20 \cdot 10^3 \text{ хв}^{-1}$ протягом 5...7 с. Наступним етапом обробки є підсушування композиції в сушильній шафі (попередня термічна обробка) за температур 60...80 °С з метою зниження вмісту вологи на 10 %, 15 %, 20 % та 25 %. Для формування біокompatитного зразка висотою 30 мм та діаметром 20 мм в прес-форму необхідно завантажити 11 г підсушеної композиції [14], що забезпечує оптимальну щільність біокompatитного матеріалу. Після цього підсушену композицію поміщають в прес-форму та піддають стисканню за питомого навантаження 10...15 МПа. Пуансони фіксують струбцинами для уникнення розширення композиції в результаті пружної післядії та дії парів води під час основної термічної обробки (ТО₁) за встановленим режимом (табл.). Після термічної обробки (ТО₁) біокompatит випресовують з прес-форми та піддають додатковій термічній обробці в сушильній шафі в режимі ТО₂ (див. табл.).

Режими формування біокompatитів

№ режиму	ТО ₁	ТО ₂
1	ТО ($t = 150^\circ\text{C}$, $\tau = 1$ год) + додаткове стискання + ТО ($t = 150^\circ\text{C}$, $\tau = 1$ год)	—
2		$t = 50^\circ\text{C}$, $\tau = 4$ год
3		$t = 80^\circ\text{C}$, $\tau = 4$ год
4		$t = 100^\circ\text{C}$, $\tau = 4$ год

Експериментально встановлено, що найнижчу міцність на стискання 7,9 МПа і 7,2 МПа мають біокompatити (рис. 1), наповнені подрібненими стеблами зернових культур з фракцією частинок 0,5 мм та 0,7 мм відповідно та високим вмістом вологості, оскільки втрата вологості під час попередньої термічної обробки складала 10 %. Це можна пояснити надлишковим вмістом вологості в матеріалі, яка перешкоджає повному структуруванню біокompatитів. Також молекули води, що інтенсивно видаляються під час основної термічної обробки ТО₁ композиції у прес-формі, призводять до розшарувань біополімерної матриці у вигляді пустот та порожнин, що значно знижує міцність біокompatитів. Зменшення вмісту вологості композиції до 15 % викликало підвищення в 4,4...4,7 раза міцності на стискання біокompatитів, що становить 38,2 МПа і 31,8 МПа для зразків, наповнених подрібненими стеблами зернових культур фракціями 0,5 мм та 0,7 мм відповідно. Підвищення міцності зумовлено утворенням жорсткішої структури біополімерної матриці в результаті видалення надлишкового вмісту води.

У випадку зменшення вологості композиції до 20 % міцність на стискання біокompatитів підвищується в 1,3...1,7 раза порівняно з біокompatитами, композиції яких втрачали 15 % вологості. Залишковий вміст вологості є достатнім, щоб перевести глютин під час термічної обробки у гелеподібний стан, що дозволяє сформувати однорідну структуру біополімерної матриці. Макромолекули глютину в нагрітому стані адсорбуються на поверхні частинок стебел зернових культур та утворюють додаткові фізико-хімічні зв'язки в результаті видалення залишкової вологості. При цьому біокompatити, наповнені частинками стебел зернових культур з розміром фракції 0,5 мм мають вищі значення межі міцності на стискання (63,7 МПа) на 35...40 % порівняно зі значеннями

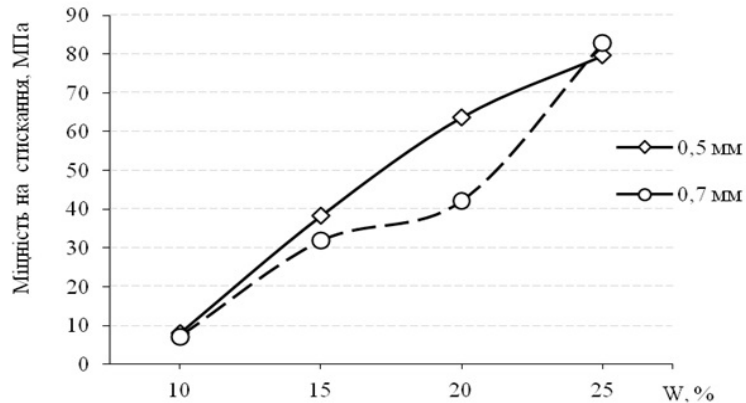


Рис. 1. Залежність межі міцності на стискання біокompatитів, наповнених частинками стебел зернових культур (фракція 0,5 мм та 0,7 мм), від зменшення вологості композиції під час попередньої термічної обробки

міцності на стискання (42,2 МПа) для біокомпозитів, які містять частинки стебел з розміром фракції 0,7 мм. Вищі значення міцності біокомпозитів зумовлені утворенням одноріднішого композиту, в якому дрібніші частинки (0,5 мм) здатні до формування структури з вищим ступенем ущільнення за рахунок їхнього компактного розташування. Крім того, волокна стебел мають фібрилярну структуру у вигляді сукупності капілярних волокон. Під час термічної обробки відбувається перехід глютину у рідкий стан, що дозволяє розчину потрапляти всередину фібрил та заповнювати їх. У випадку використання коротких волокон (0,5 мм) розчину глютину він заповнює більший об'єм порожнин волокон порівняно з волокнами довжиною 0,7 мм. Для довгих волокон розчин глютину заповнює значно менший об'єм порожнини такого волокна, що призводить до нижчих значень міцності біокомпозитів за рахунок наявності більшого об'єму порожнин. Для біокомпозитів з меншим ступенем втрати вологості (10 % та 15 %) такий ефект малопомітний, оскільки надлишкова вологість забезпечує кращу рідкоплинність розчину глютину, в результаті чого макромолекули глютину здатні заповнювати вищий об'єм порожнин фібрил волокон зернових культур.

У випадку формування біокомпозитів з вищим ступенем підсушування композиції (зменшення вологості біокомпозитної композиції на 25 % за масою) відбувається підвищення межі міцності на стискання на 50 % для композитів з вмістом частинок довжиною 0,7 мм та на 22 % для композитів з вмістом частинок довжиною 0,5 мм. Це можна пояснити відсутністю макроскопічних тріщин, що виникають в результаті зменшення вологості.

В результаті втрати вологості до 10 % формуються біокомпозитні матеріали з однорідним розподілом частинок наповнювача в об'ємі біополімерної матриці (рис. 2а). У випадку втрати вологості до 15 % на поверхні біокомпозитного матеріалу зафіксовано включення частинок стебел, які мають світлий колір, що вказує на зменшений вміст глютинової матриці в міжчастинковому просторі (рис. 2б). На поверхні біокомпозитного матеріалу, композицію якого підсушували до втрати 20 % вологості, зафіксовано хаотично розташовані частинки стебел, які містять на поверхні мінімальну кількість макромолекул глютинової матриці (рис. 2в).



Рис. 2. Загальний вигляд біокомпозитних зразків з рівнем попереднього підсушування композиції:
а — 10 %; б — 15 %; в — 20 %

З метою підвищення жорсткості глютинової матриці біокомпозитів проводять додаткову термічну обробку TO_2 за різних температур (50, 80 та 100 °С) з витримкою протягом 4 год, що сприяє видаленню залишкового вмісту води (табл., режими обробки № 2, 3, 4). Для таких досліджень композицію підсушували до втрати вологості на 10 %, 15 % та 20 %. Підсушування з рівнем втрати вологості 25 % в подальшому не застосовували через довготривалий процес видалення води та втрату технологічності композиції, коли необхідно прикладати великі зусилля стискання, що призводить до появи пружної післядії та виникнення напруженого стану.

Експериментально встановлено, що межа міцності на стискання біокомпозитів, композиції яких підсушували до зменшення на 10 % вологості за масою, становить 33,4 МПа у випадку проведення додаткової термічної обробки готових виробів за температури 50 °С (рис. 3) протягом 4 год. Формування біокомпозитів з композицій, ступінь підсушування яких складав 15 %, забезпечує підвищення межі міцності на стискання до 45,3 МПа. Це пов'язано з видаленням залишків води з об'єму біокомпозитного матеріалу, що сприяє формуванню бездефектної щільної структури.

Підвищення міри підсушування композиції до 20 % забезпечує формування біокомпозитів з ме-

жею міцності на стискання 87,6 МПа, що пов'язано з повільним видаленням незначних залишків молекул води та утворенням максимальної кількості фізико-хімічних зв'язків між біополімерною матрицею та поверхнею частинок наповнювача.

Проведення додаткової термічної обробки за температури 80 °С протягом 4 год забезпечує підвищення на 35 % межі міцності на стискання біокомпозитів, композиції яких підсушували до зменшення вологості до 10 % за масою порівняно з біокомпозитами, для яких додаткову термічну обробку проводили за температури 50 °С. Вища температура додаткової термічної обробки (80 °С) забезпечує зменшення вологості біокомпозитів, вміст якої залишається значний, оскільки під час попередньої термічної обробки втрата вологості композиції за масою становила 10 %. Формування біокомпозитів на основі композицій з рівнем підсушування 15 % не викликає зростання міцності на стискання, однак використання композицій з рівнем підсушування 20 % забезпечує зростання цієї характеристики на 35 %. Це зумовлено утворенням додаткових фізико-хімічних зв'язків [15] в результаті ущільнення біополімерної матриці, оскільки за такого режиму додаткової термічної обробки максимально зменшується ступінь вологості системи.

У випадку проведення додаткової термічної обробки за температури 100 °С зафіксовано зону оптимуму, яка є максимальним значенням межі міцності на стискання біокомпозитів, композиції яких підсушено до втрати вологості 15 %. За умови підвищення ступеня втрати вологості 20 % відбувається зниження міцності біокомпозитів, оскільки відбувається втрата еластичності ланцюгів макромолекул глютину [10], [16].

З метою вдосконалення технологічного процесу тривалість додаткової термічної обробки біокомпозитів, наповнених подрібненими стеблами зернових культур з розміром фракції 0,5 мм, скорочено до 3 год за підвищених температур (100...120 °С) (рис. 4).

Експериментально встановлено, що найнижчі значення межі міцності на стискання (49,4 МПа) мають біокомпозити зі ступенем втрати вологості композиції 10 % за температури додаткової термічної обробки 100 °С протягом 3 год. Підвищення межі міцності на стискання до 60,5 МПа відбувається для біокомпозитів у разі підвищення температури додаткової термічної обробки до 120 °С. Це пов'язано з видаленням надлишкового вмісту води в результаті дії теплової енергії, кількісний вплив якої визначається підвищенням температури (120 °С) або тривалістю витримки (4 год.).

Зі збільшенням ступеня попереднього підсушування композиції, що забезпечує зменшення вологості до 15 %, відбувається підвищення міцності на стискання біокомпозитів, оброблених додатково за температури 100 °С протягом 3 год в 1,1...1,5 раза порівняно з біокомпозитами, композиції яких підсушено до зменшення вологості на 10 %. Подальше підвищення ступеня втрати вологості до 20 % не забезпечує значного підвищення межі міцності на стискання, що визначається здатністю біополімерної матриці формувати каркас сітки макромолекул глютину з оптимальним співвідношенням параметрів структурних елементів та зберігати жорсткість та пружність скелету біополімерної матриці під впливом статичних навантажень.

Використання додаткової термічної обробки за температури 120 °С призводить до зниження на 10 % межі міцності на стискання біокомпозитів, композиції яких підсушували під час попередньої

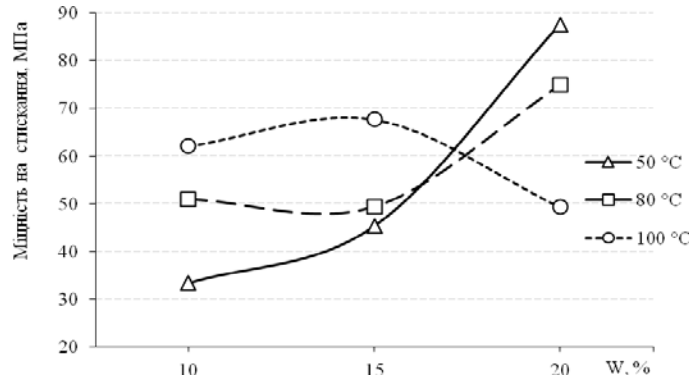


Рис. 3. Залежність межі міцності на стискання біокомпозитів, наповнених подрібненими стеблами зернових культур (фракція 0,5 мм), від зменшення вологості композиції під час попередньої термічної обробки та витримки в тепловому полі протягом 4 год в процесі додаткової термічної обробки

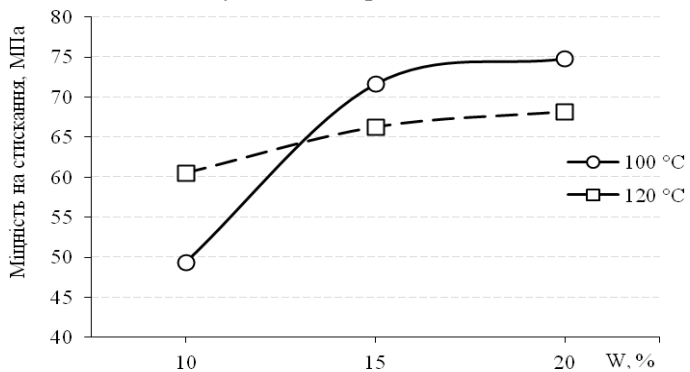


Рис. 4. Залежність межі міцності на стискання біокомпозитів, наповнених подрібненими стеблами (фракція 0,5 мм), від зменшення вологості композиції під час попередньої термічної обробки та витримки в тепловому полі протягом 3 год в процесі додаткової термічної обробки

термічної обробки до зменшення вологості до 15 % та 20 %, що зумовлено частковим руйнуванням фізико-хімічних зв'язків між компонентами біокомпозитного матеріалу.

Висновки

Біокомпозити, композиції яких підсушували для видалення 25 % вологості за масою, мають найвищу міцність на стискання порівняно з біокомпозитами, композиції яких підсушували для видалення 10...20 % вологості за масою. За такого ступеня підсушування біокомпозитні матеріали з різним наповненням за фракційним складом (0,5 та 0,7 мм) мають високі значення межі міцності на стискання (79...83 МПа). Це пояснюється переходом біополімерного в'язучого у твердий стан з невисокою рухливістю фрагментів ланцюгів макромолекул глютинової матриці та відсутністю макроскопічних тріщин, які можуть виникати під час термічної обробки біокомпозитного матеріалу.

В результаті підсушування композиції до зменшення на 20 % вологості за масою на поверхні частинок стебел зернових культур знаходиться мінімальна кількість макромолекул глютинової матриці, що забезпечує високу щільність біокомпозитного матеріалу.

Біокомпозитні матеріали, композиції яких підсушували до зменшення вологості на 20 %, після додаткової термічної обробки протягом 4 год мають високу міцність на стискання (87,6 МПа) серед інших біокомпозитів, які витримували у тепловому полі за температури 80 °C та 100 °C. За такого режиму термічної обробки відбувається повільне видалення залишків води, яка міститься в розчині глютину, та утворюються додаткові фізико-хімічні зв'язки між глютиновою матрицею та поверхнею частинок стебел зернових культур.

Формування біокомпозитів, композиції яких підсушували до рівня зменшення вологості на 15 % та 20 % відбувається підвищення на 30...35 % межі міцності на стискання порівняно з біокомпозитами, композиції яких втратили вологість на 10 %, у випадку проведення додаткової термічної обробки за температури 100 °C протягом 3 год. За такого режиму термічної обробки відбувається формування жорсткого каркасу макромолекул глютинової матриці з утворенням додаткових фізико-хімічних зв'язків між компонентами біокомпозитного матеріалу за рахунок ущільнення фрагментів амінокислот, що забезпечує високу стійкість до статичних навантажень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] B. H. Lee, H. J. Kim, and W. R. Yu, "Fabrication of Long and Discontinuous Natural Fiber Reinforced Polypropylene Biocomposites and their Mechanical Properties," *Fiber and Polymers*, vol. 10, pp. 83-90, 2009.
- [2] X. Li, S. Panigrahi, and L. G. Tabil, "A Study on Flax Fiber-Reinforced Polyethylene Biocomposites," *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 25, pp. 525-531, 2009.
- [3] G. S. Mann, L. P. Singh, and P. Kumar, "Green Composites," *A Review of Processing Technologies and Recent Applications*, vol. 33, no. 8, pp. 1017-1171, 2018.
- [4] M. R. Sanjay, G. R. Arpitha, L. L. Naik, K. Gopalakrishna, and B. Yogesha, "Experimental Investigation on Mechanical Properties of Hemp/E-Glass Fabric Reinforced Polyester Hybrid Composites," *Journal of Materials and Engineering Structures*, vol. 3, no. 3, pp. 117-128, 2016.
- [5] A. Pizzi, A. N. Papadopoulos, and F. Policardi, "Wood Composites and Their Polymer Binders," *Polymers (Basel)*, no. 12 (5), pp. 1115, May, 2020.
- [6] О. Л. Садова, В. П. Кашицький, М. Д. Мельничук, О. О. Смолянкін, і С. В. Мисковець, «Дослідження властивостей біокомпозитів, наповнених високодисперсним порошком крохмалю,» *Наукові нотатки*, № 70, с. 35-42, 2020.
- [7] A. G. Facca, M. T. Kortschot, and N. Yan, "Predicting the Tensile Strength Of Natural Fiber Reinforced Thermoplastics," *Composites Science and Technology*, vol. 67, pp. 2454-2466, 2007.
- [8] A. G. Facca, M. T. Kortschot, and N. Yan, "Predicting the Elastic Modulus of Natural Fiber Reinforced Thermoplastics, Composites," *Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, pp.1660-1671, 2007.
- [9] R. Hu, and J. K. Lim, "Fabrication and Mechanical Properties of Completely Biodegradable Hemp Fiber Reinforced Polylactic Acid Composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 41, pp. 1655-1669, 2007.
- [10] K. M. Bhat, J. Rajagopalan, R. Mallikarjunaiah, N. N. Rao and A. Sharma, *Eco-Friendly and Biodegradable Green Composites*, 2021.
- [11] A. Kaushik, M. Singh, and G. Verma, "Green nanocomposites based on thermoplastic starch and steam exploded cellulose nanofibrils from wheat straw," *Carbohydr. Polym.*, vol. 82, no. 2, pp. 337-345, 2010.
- [12] В. П. Кашицький, О. Л. Садова, О. В. Заболотний, В. М. Малець, і В. С. Мазурок, «Розробка біокомпозитів, наповнених продуктами переробки вторинної сировини рослинного походження,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 95-102, 2022.
- [13] О. Л. Садова, і М. І. Вишинський, «Оптимізація технології отримання біокомпозитів, наповнених подрібненими стеблами зернових культур,» *Товарознавчий вісник*, № 15, ч. 2, с. 72-82, 2022.
- [14] В. П. Кашицький та ін., «Оптимізація складу та технології формування біокомпозитів на основі крохмального в'язучого,» *Наукові нотатки*, № 71, с. 353-359, 2021.

[15] K. Kaewtathip, V. Tanrattanakul, and Th. Kaewtathip, "Preparation and Characterization of Thermoplastic Starch/Wheat Gluten Composites," *Key Engineering Materials*, vol. 531-532, pp. 321-324, 2012.

[16] R. Bodirlau, C. Teaca, and I. Spiridon, "Green Composites Comprising Thermoplastic Corn Starch and Various Cellulose-Based Fillers," *BioRes.* vol. 9(1), pp. 39-53, 2014.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 30.12.22.

Кашицький Віталій Павлович — канд. техн. наук, професор, професор кафедри матеріалознавства, e-mail: v.kashytskyi@lntu.edu.ua ;

Садова Оксана Леонідівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри матеріалознавства;

Вишинський Михайло Ігоревич — аспірант кафедри матеріалознавства;

Мисковець Сергій Васильович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри матеріалознавства.

Луцький національний технічний університет, Луцьк

V. P. Kashytskyi¹
O. L. Sadova¹
M. I. Vyshynskiy¹
S. V. Myskovets¹

Formation of Glutinous Biocomposite Materials Filled with Chopped Stalks of Cereal Crops

¹Lutsk National Technical University

The article presents an analysis of the influence of temperature-time parameters of heat treatment on the compressive strength of biocomposite materials, the compositions of which was dried to regulate the moisture content. The samples formed by pressing the prepared composition, based on an aqueous solution of gluten and chopped stalks of cereal crops with a fixed moisture content. Excess moisture content in the composition was reduced by processing in a thermal field at a temperature of 50...60 °C for 20...30 minutes. The main heat treatment was performed for the pressed composition in a press form with fixed fastening of punches to avoid elastic aftereffect. The heat treatment temperature was 150 °C, the exposure time was 2 hours. After 1 hour, the biocomposite material additionally compressed to seal the porous structure formed as a result of water evaporation under the influence of a thermal field. Biocomposite materials with additional heat treatment at a temperature of 50 °C for 4 hours have the highest compressive strength. Under this mode of heat treatment, water molecules slowly evaporate and a rigid framework of the biopolymer matrix with the maximum number of physical and chemical bonds between the components is formed. Increasing the temperature of additional heat treatment to 100 °C and reducing the exposure time to 3 hours reduces the compressive strength of biocomposites due to the deformation of macromolecule chains of the biopolymer matrix and the partial destruction of physicochemical bonds. It is expedient to use the developed biocomposite materials for the manufacture of packaging elements and containers.

Keywords: heat treatment mode, biopolymer matrix, fraction, moisture, degree of drying, compressive strength.

Kashytskyi Vitalii P. — Cand. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Materials Science, e-mail: v.kashytskyi@lntu.edu.ua ;

Sadova Oksana L. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Materials Science;

Vyshynskiy Mykhailo I. — Post-Graduate Student the Chair of Materials Science;

Myskovets Serhii V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Materials Science