

В. П. Кашицький¹
О. Л. Садова¹
О. В. Заболотний¹
В. М. Малець¹
В. С. Мазурок¹

РОЗРОБКА БІОКОМПОЗИТІВ, НАПОВНЕНИХ ПРОДУКТАМИ ПЕРЕРОБКИ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

Луцький національний технічний університет

Подано результати аналізу розробки складу та технології формування біокомпозитних матеріалів на основі клеючої речовини (кістковий клей марки К_{3,5}) та дисперсних наповнювачів, отриманих в результаті обробки або переробки вторинної сировини рослинного походження, зокрема кавової гуші з високою дисперсністю частинок, подрібненого механічним способом сушеного листа, койру кокосу та стебел зернових культур. Вміст наповнювачів в біокомпозитних матеріалах варіювався в межах 80...130 мас. ч., що відповідало оптимальному вмісту частинок в біополімерній матриці. Формування зразків відбувалося шляхом суміщення розчину кісткового клею з обробленим наповнювачем в результаті механічного змішування компонентів та наступного пресування в прес-формі. Забезпечення однорідності та суцільності біополімерної матриці відбувається завдяки поетапному режиму термічної обробки біокомпозитних матеріалів. Оптимальний вміст наповнювачів визначали за результатами аналізу експериментальних досліджень межі міцності на стискання циліндричних зразків. Встановлено, що найвищі значення межі міцності на стискання (78,02 МПа) мають біокомпозитні матеріали, що містять частинки стебел зернових культур в кількості 190 мас. ч. Проаналізовано макроструктуру розроблених біокомпозитних матеріалів. Біокомпозитні матеріали, які наповнені частинками подрібненого сушеного листа, мають найбільшу кількість макроскопічних дефектів після термічної обробки. В цих зразках виявлено велику кількість пор та тріщин. Найменшу кількість дефектів мають біокомпозити, наповнені частинками подрібнених стебел зернових культур, що підтверджується отриманими значеннями межі міцності на стискання. Розроблені біокомпозитні матеріали можна застосовувати для виготовлення елементів меблів та підлоги, деталей декору салону транспортних засобів, тари, корпусів приладів.

Ключові слова: біокомпозитний матеріал, структура, пора, тріщина, міцність на стискання.

Вступ

Завдяки європейським виробникам сьогодні значно розширився асортимент виробів на основі композитних матеріалів, які містять наповнювачі природного походження. Це зумовлено в основному проблемою критичного забруднення пластиком планети та спрямовано на покращення екологічної ситуації в цілому. Тому розробка біокомпозитів, наповнених продуктами переробки вторинної сировини рослинного походження, є актуальним напрямком сучасного матеріалознавства, що додатково дозволить використовувати вторинну сировину, а також зменшити використання полімерів, які забруднюють навколишнє середовище та формуються на основі сировини з вичерпних ресурсів, оскільки отримані із нафтопродуктів.

Суттєвою перевагою біокомпозитів, що містять в складі продукти переробки вторинної сировини рослинного походження, є їх висока біодеградабельність. Це забезпечує здатність виробів

розкладатися на безпечні компоненти порівняно з класичними полімерами, які потребують застосування спеціальних технологій переробки. Полімери, отримані з нафтопродуктів, потрапляючи на сміттєві звалище, розкладаються тривалий час (окремі протягом декількох тисяч років), забруднюючи під час розкладу воду та ґрунт своїми шкідливими складовими. У випадку використання біокомпозитів, наповнених продуктами природного походження, їх утилізація є простою з розкладанням на екологічно безпечні для навколишнього середовища і людини компоненти, термін розкладання яких становить приблизно 5...7 років.

Автомобільна, аерокосмічна, приладобудівна та електронна промисловість зацікавлена в застосуванні біокомпозитів, армованих природними волокнами, де вони розглядаються як замітники класичних композитних матеріалів на металевій та полімерній основі. Впровадження композитів, що містять натуральні волокна, у різні галузі промисловості сприяло підвищенню уваги до вдосконалення структури та покращення властивостей біокомпозитів, які формують новий напрям в галузі матеріалознавства [1].

Вироби на основі біокомпозитів є відносно дешевими та мають високу біодеградабельність, відносяться до класу матеріалів з відновлюваних джерел, легко піддаються утилізації з отриманням енергії (спалювання) або переробці (термопластичних матриць) без завдання шкоди навколишньому середовищу. Матеріали такого класу є високотехнологічними, а тому знаходять застосування у виготовленні елементів упаковки, у будівництві (конструкції даху, вікна, двері), в автомобільній та аерокосмічній галузях, військовому комплексі, електроніці тощо [2], [3].

Впровадження біокомпозитів в автомобільній галузі зумовлене низькою питомою густиною матеріалів, що забезпечило доцільність виготовлення конструкцій декору салонів транспортних засобів. Виробники автомобілів Mercedes, BMW, Audi та Volkswagen є лідером у використанні композитів з натуральних волокон для внутрішнього та зовнішнього застосування. Внутрішні дверні панелі автомобіля Mercedes-Benz S-класу 1999 року виробництва складаються з 35 % напівтвердого еластомеру та 65 % суміші волокон льону, конопель та сизалю. Виробник Mercedes-Benz використовував епоксидну матрицю з додаванням джуту в облицюванні дверних панелей своїх автомобілів E-класу, починаючи з 1996 року. В 2000 році виробник Audi випустив автомобіль середнього класу, де елементи облицювання панелей дверей виготовлялися з поліуретану, армованого змішаними волокнами льону або сизалю. Фірма Toyota розробила екопластик, виготовлений із цукрової тростини, для виробництва елементів декору салонів автомобілів [4].

В роботі [5] досліджено вплив дискретних волокон технічної коноплі та льону на фізико-механічні властивості та структуру біокомпозитів на основі епоксидної смоли. Встановлено, що оптимальний вміст дискретних волокон природного походження у біокомпозитних матеріалах становить 25...30 мас. ч. За меншого вмісту наповнювача когезійна міцність біокомпозитів є дещо вищою, що визначається високою адгезійною міцністю епоксидного полімеру, однак за високого вмісту епоксидного в'язучого знижується біодеградабельність, яка забезпечує екологічну безпеку біокомпозитів на етапі утилізації.

Дослідження впливу вмісту вискодисперсного порошку крохмалю на фізичні, хімічні та механічні властивості біокомпозитів з середнім та високим ступенем наповнення системи описано в роботі [6]. Оптимальний вміст крохмалю для біокомпозитних виробів становить 70 мас. ч., що забезпечує підвищення межі міцності на стискання та ударної в'язкості. Біокомпозити з вищим ступенем наповнення (60...80 мас. ч.) характеризуються високим водопоглинанням, що зумовлено більшим вмістом порошку крохмалю, який має гідрофільні властивості та легко поглинає воду.

Введення оптимального вмісту деревного борошна до складу біокомпозиту, що сформований в прес-формі дозволило отримати зразки циліндричної форми без розшарувань та дефектів структури за рахунок прикладання одновісного навантаження стиснення [7]. В роботі досліджено вплив деревного борошна на в'язкість композицій на основі крохмального гелю та визначено оптимальний вміст водного розчину глютину в композиції, що забезпечило підвищення твердості біокомпозитних матеріалів. Розроблено технологію отримання крохмального гелю та водного розчину глютину, а також оптимізовано режим формування біокомпозитів під впливом термомеханічної обробки з подальшою термічною обробкою біокомпозитних зразків, що забезпечило формування щільної та однорідної структури біокомпозитів. Встановлено, що за оптимального вмісту модифікатора (розчин глютину) 70 мас. ч. формується однорідна та щільна структура біокомпозитного матеріалу.

Метою роботи є розробка складу та технології формування високонаповненого біокомпозитного матеріалу на основі біополімерної матриці та продуктів переробки вторинної сировини рослинного походження.

Результати дослідження

Формування біокомпозитних зразків проведено з використанням як біополімерної матриці кісткового клею марки К_{3,5} та наповнювачів рослинного походження. В якості наповнювачів використано продукти переробки вторинної сировини: високодисперсні частинки кавової гущі, подрібнене сушене листя, кокосовий койр та подрібнені стебла зернових культур. Вміст наповнювачів в біокомпозитному матеріалі варіювався в межах 80...130 мас. ч. на 100 мас. ч. розчину кісткового клею.

Перший етап формування біокомпозитів полягає в приготуванні 40 %-го розчину кісткового клею в камері сушильної шафи за температури 40...50 °С протягом 1 год. з доведенням в'язучого до рідкого стану [7]. Залежно від об'єму зразків розраховували кількісний вміст компонентів у співвідношенні на 100 мас. ч. розчину кісткового клею та механічно змішували компоненти. Наступним етапом є забезпечення оптимальної вологості композиції шляхом підсушування суміші в сушильній шафі за температури 40 °С протягом 30 хв (режим Т₀, табл. 1). Надалі підготовлену суміш поміщують у порожнину прес-форми, пресують та проводять термічну обробку за режимом Т₁, після чого зразок дістають з прес-форми та піддають термічній обробці за режимом Т₂ (табл. 1).

Таблиця 1

Режим термічної обробки біокомпозитів

Т ₀	Т ₁	Т ₂
Температура Т = 40 °С (витримка τ = 30 хв)	Температура Т = 150 °С (витримка τ = 1 год) + додаткове пресування + Т = 150 °С (витримка τ = 1 год)	Температура Т = 150 °С (витримка τ = 2 год)

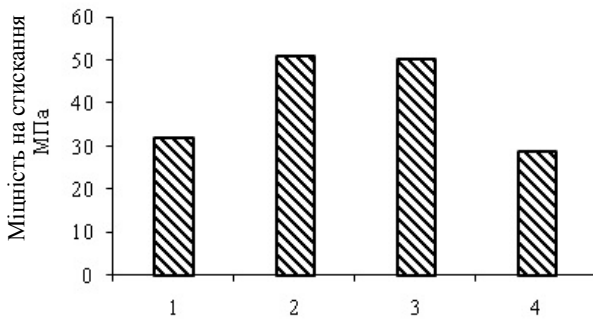


Рис. 1. Залежність межі міцності на стискання біокомпозитів, наповнених високодисперсними частинками кавової гущі, від вмісту наповнювача: 1 — 200 мас. ч.; 2 — 210 мас. ч.; 3 — 220 мас. ч.; 4 — 230 мас. ч.

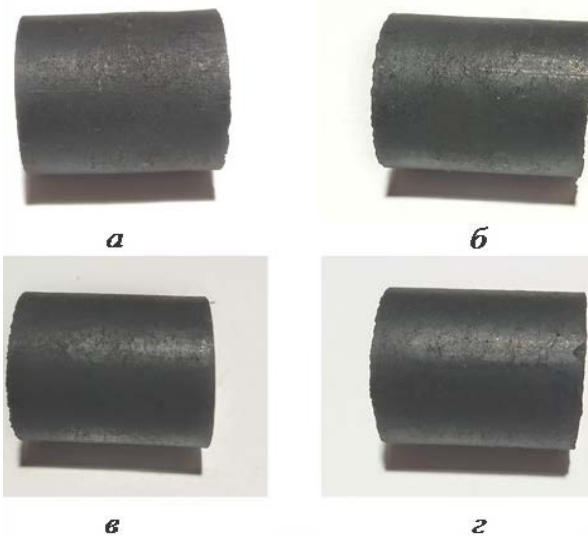


Рис. 2. Загальний вигляд біокомпозитних зразків, наповнених високодисперсними частинками кавової гущі: а — 200 мас. ч.; б — 210 мас. ч.; в — 220 мас. ч.; г — 230 мас. ч.

Експериментально встановлено, що міцність на стискання біокомпозитів, наповнених високодисперсними частинками кавової гущі, зростає у 1,6 разів (рис. 1) зі збільшенням вмісту наповнювача від 200 мас. ч. (31,85 МПа) до 210 мас. ч. (50,95 МПа). На поверхні зразка біокомпозиту, що містить 200 мас. ч. наповнювача, присутні дефекти у вигляді пор та тріщин (рис. 2а), поява яких зумовлена інтенсивним видаленням вологи у прес-формі. Очевидно режим термічної обробки (Т₁, табл. 1) для біокомпозитів з таким вмістом наповнювача 200 мас. ч. не дозволяє сформувати щільну структуру у прес-формі через недостатню кількість наповнювача та надлишковий вміст вологи в композиції.

Підвищення вмісту наповнювача до 210...220 мас. ч. дозволяє отримати біокомпозитні матеріали з вищою конструкційною міцністю. Про це свідчить значно менша кількість макроскопічних дефектів (рис. 2б, в) на поверхні біокомпозитних зразків порівняно з матеріалом, що містить 200 мас. ч. наповнювача. На поверхні біокомпозитного зразка з вмістом 220 мас. ч. частинок кавової гущі, зафіксовано декілька мікротріщин, які знижують міцність розробленого матеріалу. Вміст вологи у вихідній композиції за вищих ступенів наповнення є нижчим, крім того волога видаляється під час термічної обробки, що дозволяє утворитись більшій кількості зв'язків між матрицею і наповнювачем, а, отже, отримати матеріал з вищою адгезійною та когезійною міцністю.

Найвищу міцність на стискання (50,95 МПа) мають біокомпозитні матеріали, наповнені висо-

кодисперсними частинками кавової гущі в кількості 210 мас. ч. (рис. 1), що пояснюється оптимальним співвідношенням компонентів біокомпозитної системи, в результаті чого відбувається формування однорідної структури з невеликою кількістю макроскопічних дефектів. Підвищення вмісту наповнювача до 220 мас. ч. супроводжується незначними зниженням (на 2 %) міцності на стискання і становить 50,16 МПа.

Подальше підвищення вмісту кавової гущі до 230 мас. ч. спричиняє різке зниження міцності на стискання в 1,8 разів (28,66 МПа), що пов'язано з формуванням системи з надлишковим вмістом наповнювача. За більшого вмісту частинки кавової гущі коагулюють, що пов'язано з недостатнім змочуванням наповнювача біополімерним в'язучим, в результаті чого відбувається утворення концентраторів напружень та розшарування матеріалу під впливом зовнішнього навантаження.

На поверхні біокомпозитного зразка, який містить 230 мас. ч. високодисперсних частинок кавової гущі, зафіксовано тріщини та багато пор різного діаметра (рис. 2 ϵ). Також на торцевій поверхні зразка виявлено дефект у вигляді сколювання, що утворився під час видалення біокомпозитного брикету з прес-форми через недостатню міцність матеріалу, оскільки через недостатнє змочування частинок наповнювача в'язучим не утворилось в достатній кількості фізико-хімічних зв'язків.

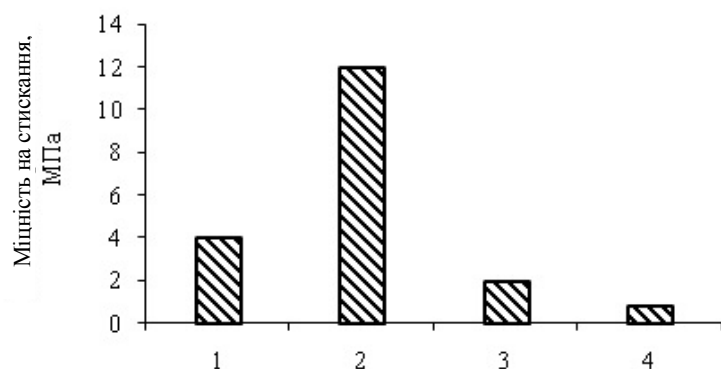


Рис. 3. Залежність межі міцності на стискання біокомпозитів, наповнених подрібненим сушеним листям, від вмісту наповнювача: 1 — 200 мас. ч.; 2 — 210 мас. ч.; 3 — 220 мас. ч.; 4 — 230 мас. ч.

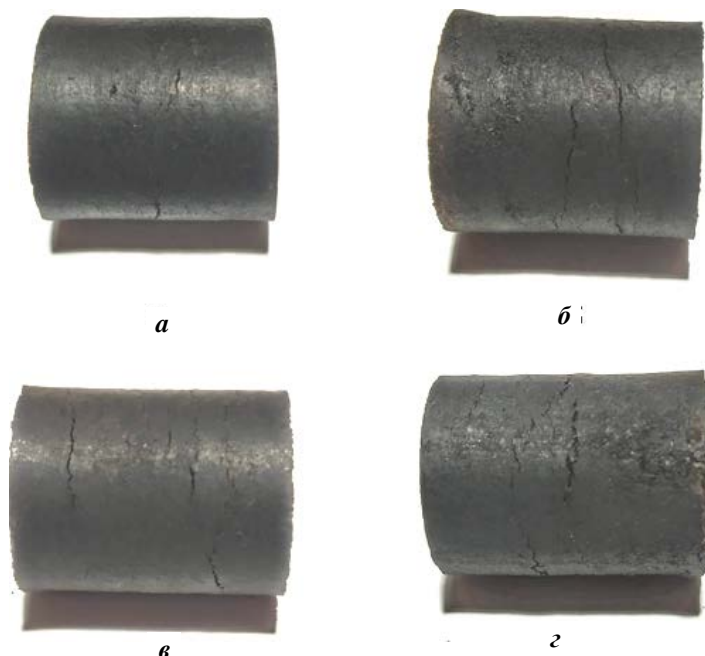


Рис. 4. Загальний вигляд біокомпозитних зразків, наповнених подрібненим сушеним листям: а — 200 мас. ч.; б — 210 мас. ч.; в — 220 мас. ч.; г — 230 мас. ч.

Розроблені біокомпозитні матеріали, що містять в складі подрібнене листя (рис. 3), мають значно нижчу міцність на стискання порівняно з біокомпозитами, які наповнені високодисперсними частинками кавової гущі (рис. 1), що зумовлено вищою дисперсністю частинок, отриманих в результаті подрібнення сухого листя. Частинок такого наповнювача не здатні чинити опір зміщенню локальних об'ємів біополімерної матриці під дією механічного навантаження через низьку міцність та твердість.

Встановлено, що міцність на стискання біокомпозитів, наповнених подрібненим сушеним листям, зростає у 3 рази в результаті збільшення вмісту наповнювача до 210 мас. ч. (11,94 МПа) порівняно з біокомпозитами (рис. 3), що містять високодисперсні частинки сухого листя в кількості 200 мас. ч. (3,98 МПа). Низька міцність біокомпозитного матеріалу з вмістом наповнювача (частинки сухого листя) 200 мас. ч. зумовлена низькою твердістю частинок, а також недостатнім його вмістом в біокомпозитному матеріалі. На поверхні такого біокомпозитного зразка в центральній частині присутні макротріщини (рис. 4а), які значно знижують когезійну міцність матеріалу.

Найвищу міцність на стискання мають біокомпозити (11,94 МПа), що містять частинки подрібненого листя в кількості 210 мас. ч. На поверхні біокомпозитного зразка зафіксовано більшу кількість тріщин (рис. 4б), які

виникають через інтенсивне видалення вологи під час проведення термічної обробки (T_1) порівняно зі зразком, що містить 200 мас. ч наповнювача. У випадку вищого вмісту наповнювача зменшується вміст в'язучого, в результаті чого зменшується товщина прошарків біополімерної матри-

ці, що призводить до усадки біополімерної матриці та руйнування когезійних зв'язків з утворенням розшарувань у вигляді тріщин. Вищу міцність на стискання такого біокомпозиту можна пояснити оптимальним вмістом наповнювача, в результаті чого формується однорідна структура з утворенням найвищої кількості зв'язків між компонентами системи.

Подальше підвищення вмісту подрібненого сушеного листа до 220 мас. ч. призводить до різкого (в 6,2 рази) зниження міцності на стискання біокомпозитів, що становить 2,12 МПа. На поверхні біокомпозитного зразка такого складу виявлено більше тріщин (рис. 4в) порівняно зі зразком, що містить 210 мас. ч. наповнювача, оскільки погіршується ліофільна здатність біополімерного в'язучого. Зниження міцності на стискання можна пояснити формуванням системи з надлишковим вмістом наповнювача, дрібні частинки якого схильні до агломерації, в результаті чого формується дефектна структура з нерівномірним розподілом частинок наповнювача.

Формування біокомпозитів з вмістом наповнювача 230 мас. ч. і вище ускладнено, оскільки зростає в'язкість композиції і знижується технологічність, що пов'язано з недостатнім змочуванням частинок наповнювача в'язучим. Міцність на стискання біокомпозитів, наповнених подрібненим листям в кількості 230 мас. ч., є досить низькою і становить 0,93 МПа. Біокомпозитні зразки, що містять високодисперсні частинки сушеного листа в кількості 230 мас. ч. (рис. 4з), порівняно зі зразками з вмістом наповнювача 220 мас. ч. мають пори більшого діаметра (рис. 4в), а також розшарування у вигляді макротріщин. Відстань між краями тріщин є значно більшою у випадку формування зразків з вищим вмістом наповнювача, що пов'язано з недостатнім змочуванням.

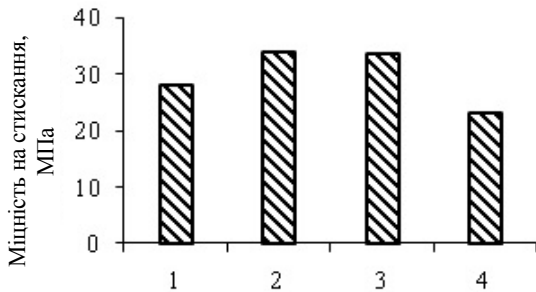


Рис. 5. Залежність міцності на стискання біокомпозитів, наповнених койром кокосу, від вмісту наповнювача: 1 — 180 мас. ч.; 2 — 190 мас. ч.; 3 — 200 мас. ч.; 4 — 210 мас. ч.

Експериментально встановлено, що міцність на стискання біокомпозитів, наповнених койром кокосу, зростає у 1,2 рази (рис. 5) у випадку збільшення вмісту наповнювача від 180 мас. ч. до 190 мас. ч. і становить 28,02 МПа і 33,66 МПа, відповідно. На поверхні біокомпозитних зразків з такими ступенями наповнення не зафіксовано тріщин (рис. 6а, б), що свідчить про утворення максимальної кількості фізико-хімічних зв'язків. Однак на поверхні присутня незначна кількість мікропор, що пов'язано з недостатнім тиском пресування або підвищеним вмістом наповнювача. Зафіксовано, що поверхня зразків є рівною, без розшарувань, оскільки наповнювач являє собою короткі волокна, які забезпечують високу когезійну міцність розроблених біокомпозитних матеріалів.

За подальшого збільшення вмісту койру кокосу до 200 мас. ч. відбувається незначне зниження міцності на стискання (33,24 МПа). На поверхні зразків (рис. 6в) присутні кратери, які утворюються через локальне викришування частинок в результаті агломерації наповнювача. Також на поверхні присутні макро- та мікропори, які утворюються через недостатній вміст в'язучого, що призводить до зниження міцності на стискання.

Підвищення вмісту кокосового койру до 210 мас. ч. призводить до зниження міцності на стискання в 1,4 рази (24,54 МПа), що вказує на надлишковий вміст наповнювача в біокомпозитній системі. Це призводить до формування матеріалу з недостатнім змочуванням частинок наповнювача в'язучим, в результаті чого зростає кількість дефектів структури, які виступають концентраторами напружень. На поверхні зразків присутні дрібні пори та розшарування у вигляді тріщини (рис. 6г), які знижують когезійну міцність біокомпозитів.

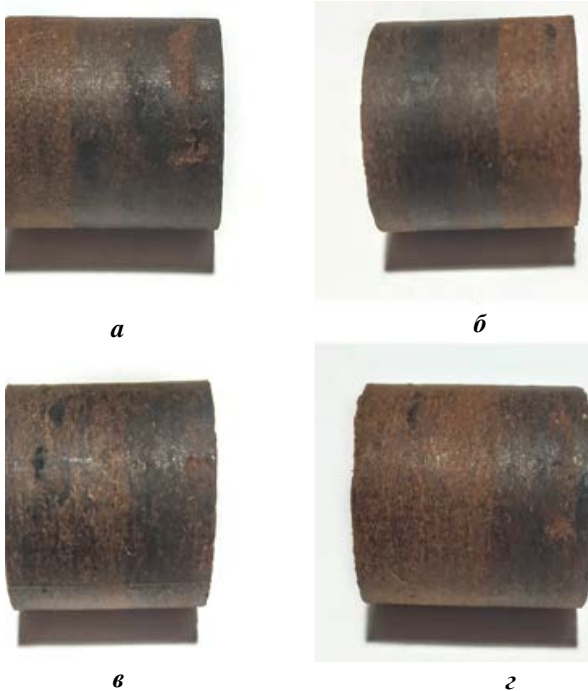


Рис. 6. Загальний вигляд біокомпозитних зразків, наповнених койром кокосу: а — 180 мас. ч.; б — 190 мас. ч.; в — 200 мас. ч.; г — 210 мас. ч.

пори та розшарування у вигляді тріщини (рис. 6г), які знижують когезійну міцність біокомпозитів.

Найвищу міцність на стискання мають біокомпозити, які наповнені сумішшю подрібнених стебел зернових культур в кількості 190 мас. ч. (78 МПа), що пояснюється оптимальним вмістом біополімерної матриці (рис. 7), яка рівномірно розподілена в об'ємі біокомпозитного матеріалу і забезпечує заповнення міжчастинкового простору. Тобто частинки стебел зернових культур контактують безпосередньо з матрицею, яка має адгезійну міцність за рахунок утворення фізичних зв'язків між поверхнею наповнювача та макромолекулами глютину. Бічна поверхня зразка є однорідною з рівномірним розподілом включень у вигляді частинок подрібнених стебел зернових культур (рис. 8а).

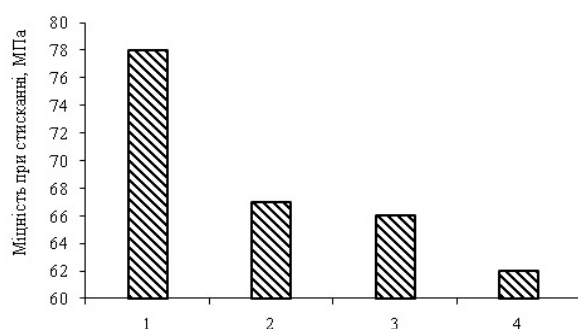


Рис. 7. Залежність міцності на стискання біокомпозитів, наповнених сумішшю подрібнених стебел зернових культур, від вмісту наповнювача: 1 — 190 мас. ч.; 2 — 200 мас. ч.; 3 — 210 мас. ч.; 4 — 220 мас. ч.

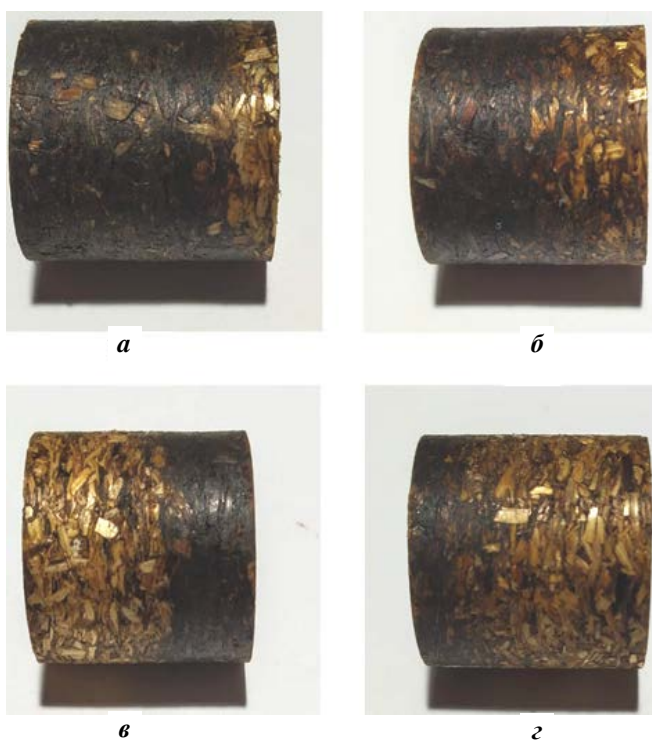


Рис. 8. Загальний вигляд біокомпозитних зразків, наповнених подрібненою соломомою: а — 190 мас. ч.; б — 200 мас. ч.; в — 210 мас. ч.; г — 220 мас. ч.

Збільшенням вмісту подрібнених стебел зернових культур від 190 мас. ч. до 200 мас. ч. відбувається зниження міцності на стискання на 14,7 % і становить 67,4 МПа, що пов'язано з формуванням неоднорідної системи з меншим вмістом біополімерної матриці. Підвищення вмісту наповнювача до 200 мас. ч. супроводжується формуванням структури біокомпозитного зразка з нерівномірним розподіленням компонентів (рис. 8б) через осідання в'язучого під час термічної обробки, яка підвищує рідкоплинність біополімерного розплаву. Подальше підвищення наповнювача до 210 мас. ч. призводить до незначного зниження міцності на стискання на 1,6 % і становить 66,2 МПа. Підвищення вмісту наповнювача призводить до формування біокомпозиту з чітко вираженим розподілом частинок подрібнених стебел зернових культур у верхній частині зразка відносно матриці зразка під час пресування (рис. 8в). Відповідно, в нижній частині зразка після пресування та термічної обробки зафіксовано локалізацію біополімерної матриці у співвідношенні 1:3, що вказує на недостатній вміст в'язучого компонента, який забезпечує формування біокомпозитного матеріалу конструкційного призначення. Підвищення вмісту подрібнених стебел зернових культур до 220 мас. ч. призводить до подальшого зниження міцності на стискання біокомпозитів на 20 %, що становить 62,5 МПа. На бічній поверхні біокомпозитного зразка з вмістом 220 мас. ч. подрібнених стебел зернових культур зафіксовано чітко виражену орієнтацію частинок наповнювача (рис. 8г), які розташовані у двох взаємно перпендикулярних напрямках відносно осі, вздовж якої прикладено навантаження стиску. В основному частинки пластинчастої форми розташовані перпендикулярно до осі навантаження, що пов'язано з компактним розташуванням частинок під час пресування та призводить до появи анізотропії властивостей. Можна стверджувати, що максимально можливий вміст подрібнених стебел зернових культур в біокомпозитному матеріалі становить 220...230 мас. ч., що забезпечує формування виробу з високою міцністю за рахунок достатнього змочування поверхні наповнювача в'язкою матрицею, яка перебуває у рідкоплинному стані. За вищого вмісту наповнювача міцність біокомпозитів різко знижується через відсутність біополімерного прошарку між частинками.

Висновки

Використання порошкоподібних наповнювачів природного походження дозволяє сформувати біокомпозитні матеріали конструкційного призначення, що переважають у 1,8...3,9 рази за міцністю на стискання аналогічні матеріали, зокрема деревинностружкові плити, максимальна міцність яких становить 20 МПа. Це вказує на перспективність використання компонентів органічного походження як компонентів для виготовлення конструкційних або декоративних виробів, що мають високі показники міцності та мають високу екологічну безпеку в процесі виготовлення та експлуатації біокомпозитних виробів.

Найдоцільнішим є введення оптимального вмісту суміші частинок подрібнених стебел зернових культур в кількості 190 мас. ч., що мають високу міцність порівняно з іншими порошкоподібними наповнювачами. Частинки орієнтовані в двох взаємно перпендикулярних напрямках, що ускладнює зміщення локальних ділянок під впливом механічного навантаження стиску та забезпечує відносно високі значення міцності на стискання біокомпозитних матеріалів. За оптимального вмісту прошарки між частинками подрібнених стебел зернових культур заповнені біополімерною матрицею, яка утворює фізичні зв'язки між поверхнею частинок та макромолекулами глютину.

Введення кавової гущі в кількості 210...220 мас. ч. дозволяє отримати біокомпозитні матеріали з високою конструкційною міцністю в межах 51...53 МПа, що пов'язано з формуванням однорідної системи з оптимальним співвідношенням компонентів. Це забезпечує рівномірне адсорбування частинками кавової гущі водного розчину глютину, який в процесі термічної обробки здатний підвищувати рідкоплинність, що дозволяє рівномірно заповнити міжфазовий простір між частинками наповнювача та сформувати біополімерну матрицю, і тим самим забезпечити високу адгезійну та когезійну міцність біокомпозитного матеріалу.

Використання як наповнювача койру кокосу забезпечує отримання досить високих значень міцності на стискання (32...34 МПа) за рахунок наявності в структурі біокомпозитів мікрОВОЛОКОН, однак є малоперспективним через відсутність розвинутої сировинної бази.

Частинки подрібненого листя не здатні суттєво підвищувати міцність біокомпозитного матеріалу через низькі фізико-механічні характеристики наповнювача, однак за його допомогою можна регулювати в'язкість композиції та використовувати як інертний наповнювач, який має низьку вартість.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] M. R. Sanjay, G. R. Arpitha, L. Laxmana Naik, K. Gopalakrishna, and B. Yogesha, "Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview," *Natural Resources*, vol. 7, no. 3, March, 2016.
- [2] M. R. Sanjay, G. R. Arpitha, L. Laxmana Naik, K. Gopalakrishna, and B. Yogesha, "Experimental Investigation on Mechanical Properties of Hemp/E Glass Fabric Reinforced Polyester Hybrid Composites," *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 3, no. 3, 2016.
- [3] M. M. Thwe, and K. Liao, "Effects of environmental aging on the mechanical properties of bamboo-glass fibre reinforced polymer matrix hybrid composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, no 1, 2002, pp. 43-52. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00071-9](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00071-9).
- [4] G. E. Zaikov, and A. Jiménez, "Polymer Analysis, Degradation, and Stabilization," *Nova Publishers*, 176 p., 2005.
- [5] П. П. Савчук, О. Л. Садова, В. П. Кашицький, Є. М. Кальба, і О. Б. Климовець, «Дослідження властивостей біокомпозитів, наповнених дискретними волокнами природного походження.» *Наукові нотатки*, Луцьк, вип. 69, с. 75-81, 2020. <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2020.69.11>.
- [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*, Луцьк, вип. 70, с. 35-42, 2020. <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2020.70.5>.
- [7] В. П. Кашицький, О. Л. Садова, П. П. Савчук, В. М. Малець, В. С. Мазурок, і С. В. Мисковець, «Оптимізація складу та технології формування біокомпозитів на основі крохмального в'язучого.» *Наукові нотатки*, Луцьк, вип. 71, с. 353-359, 2021.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 2.12.2021

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;

Заболотний Олег Васильович — канд. техн. наук, доцент, проректор з науково-педагогічної роботи та досліджень;

Малець Вікторія Михайлівна — канд. техн. наук, старший викладач кафедри матеріалознавства;

Мазурок В'ячеслав Сергійович — аспірант кафедри матеріалознавства.

Луцький національний технічний університет, Луцьк

V. P. Kashytskyi¹
O. L. Sadova¹
O. V. Zabolotnyi¹
V. M. Malets¹
V. S. Mazurok¹

Development of Biocomposites Filled with Products of Recycling of Secondary Raw Materials of Plant Origin

¹Lutsk National Technical University

The article presents the results of the analysis of the composition and forming technology of biocomposite materials based on an adhesive (bone glue K3,5) and disperse fillers obtained by processing of secondary raw materials of plant origin (coffee grounds with high dispersion of particles, mechanically crushed dried leaves, coconut coir and grains stalks). The content of fillers in biocomposite materials varied in the range of 80...130 wt. parts. This is the optimal content of particles in the biopolymer matrix. Samples formed by mechanically mixing a solution of bone glue with the processed filler. Then the resulting biocomposition pressed into a mold. Homogeneity and continuity of the biopolymer matrix is ensured by a step-by-step heat treatment of biocomposite materials. The optimal content of fillers was determined by the results of analysis of experimental studies of the compressive strength of cylindrical samples. The highest values of the compressive strength (78,02 MPa) have biocomposite materials containing 190 wt. parts of particles of grain stalks. The macrostructure of the developed biocomposite materials analyzed. Biocomposite materials filled with particles of crushed dried leaves have the largest number of macroscopic defects after heat treatment. A large number of pores and cracks were found in these samples. The least number of defects have biocomposites filled with particles of crushed grains stalks, which confirmed by the obtained values of the compressive strength. The developed biocomposite materials can use for fabrication elements of furniture and floor, elements of a decor of salon of vehicles, containers and cases of devices.

Keywords: biocomposite material, structure, pore, crack, 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;

Zabolotnyi Oleh V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work and Research;

Malets Viktoriia M. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of materials Science;

Mazurok Viacheslav S. — Post-Graduate Student the Chair of Materials Science