

РОЗРОБКА БІОКОМПЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ГЛЮТИНУ ТА ВОЛОКОН ЛЬОНУ

В статті приведено дослідження міцності на стискання біокомпозитних матеріалів на основі водного розчину глютину та подрібнених волокон технічного льону довжиною 5 мм. Розроблено біокомпозитні матеріали з різним співвідношенням компонентів: 50% розчину глютину та 50% волокон льону; 46% розчину глютину та 54% волокон льону; 43% розчину глютину та 57% волокон льону; 40% розчину глютину та 60% волокон льону. Руйнування біокомпозитних матеріалів з різним співвідношенням компонентів за нижчих ступенів підсушування композиції (5–15%) під дією стискаючого навантаження супроводжується пластичною деформацією з утворенням зсувних тріщин. Максимальні значення міцності на стискання 71,7 МПа отримано для біокомпозитних матеріалів з вмістом 43% розчину глютину та 57% подрібнених волокон льону за ступеня підсушування композиції 20%. Подальше збільшення вмісту наповнювача або надмірне підсушування композиції погіршує змочуваність волокон в'язучим, що призводить до крихкого руйнування та розколювання матеріалу.

Ключові слова: біокомпозит, розчин глютину, подрібнені волокна льону, ступінь підсушування, міцність на стискання.

O. Sadova, Ye. Chernota

DEVELOPEMENT OF BIOMPOSITE MATERIALS BASED ON GLUTIN AND FLAX FIBER

The article presents a study on the compressive strength of biocomposite materials based on an aqueous solution of gluten and chopped technical flax fibers with a length of 5 mm. Biocomposite materials were developed with various component ratios: 50% gluten solution and 50% flax fibers; 46% gluten solution and 54% flax fibers; 43% gluten solution and 57% flax fibers; 40% gluten solution and 60% flax fibers. Under compressive load, the destruction of biocomposite materials with various component ratios at lower pre-drying degrees (5–15%) is accompanied by plastic deformation and shear cracking. The maximum compressive strength value of 71.7 MPa was obtained for biocomposite materials containing 43% gluten solution and 57% chopped flax fibers at a composition pre-drying degree of 20%. A further increase in the filler content or excessive pre-drying of the composition impairs the wettability of the fibers by the binder, leading to brittle fracture and splitting of the material.

Key words: biocomposite, gluten solution, chopped flax fiber, degree drying, compressive strength.

Постановка проблеми. Сьогодні композити, армовані льоном, дедалі активніше впроваджуються в автомобільну промисловість для виготовлення внутрішніх панелей, у виробництво спортивного інвентарю, а також у сучасне екологічне будівництво. Однією з найважливіших переваг природних матеріалів є їхній низький вуглецевий вплив. На відміну від волокон нафтового походження, рослини поглинають вуглекислий газ під час росту, компенсуючи викиди від виробництва та логістики. Широке комерційне застосування таких матеріалів обмежене низкою технологічних викликів, зокрема їхньою високою гідрофільністю, чутливістю до термічної деструкції та недостатньою адгезією на межі розділу фаз «волокно-матриця». Тому дослідження властивостей лляних волокон, оптимізація методів їхньої модифікації та створення високоефективних полімерних композитів на їхній основі є актуальним завданням матеріалознавців, що відкриває шлях до створення екологічно безпечних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробка полімерних композиційних матеріалів, армованих натуральними волокнами, останнім часом набула особливої актуальності. Це зумовлено зростанням екологічної свідомості суспільства та прагненням знизити обсяги використання викопного палива і продуктів його переробки [1]. Льон є сировиною промислових довгих та коротких волокон. Довгі волокна використовуються для виробництва високоякісних тканин. Короткі є відходами від переробки довгих волокон, які застосовують зазвичай для виготовлення матраців та килимів. Дослідження використання натуральних волокон для заміни штучних волокон, які є дорогими та дефіцитними, відкрили нові промислові можливості їх розширили сферу їх застосування. Сьогодні лляне волокно як екологічний та відновлюваний ресурс привертає значну увагу дослідників і промисловців як перспективний армувальний наповнювач для композиційних матеріалів, які придатні до рециклінгу. Очікується, що функціональні композити на основі лляного волокна відіграватимуть ключову роль в енергетичній, біомедичній та екологічній галузях. Це зумовлено їхніми унікальними характеристиками, серед яких: висока питома міцність, біосумісність, екологічна безпека, економічна ефективність, а також технологічність під час реалізації різноманітних конструкційних та виробничих завдань [2].

© О.Л. Садова, Є.Ю. Чернота

Волокна льону чудово підходять для полегшених конструкцій, пропонуючи економічно вигідні рішення без зниження механічних характеристик матеріалу. Серед усіх видів натуральних волокон лляні є найміцнішими, завдяки чому їх сьогодні активно застосовують у різноманітних механічних та термічних розробках. Поведінка цього матеріалу безпосередньо залежить від його хімічного складу та структурних особливостей. Використання таких природних волокон дозволяє покращити механічні, теплові та експлуатаційні показники матеріалів, суттєво підвищуючи їхню екологічність. Саме тому натуральні волокна та біокомпозити на їхній основі привертають дедалі більше уваги з боку багатьох галузей промисловості, що прагнуть розробляти екологічно безпечні продукти [3].

Основним структурним компонентом лляного волокна є целюлоза, вміст якої становить 64–75% (табл. 1). Целюлоза є глюкозним полімером, що формує висококристалічні, поздовжньо орієнтовані мікрофібрили. Така впорядкована організація та високий ступінь полімеризації целюлози забезпечують льону високу механічну міцність, низький розтяг, довговічність і зносостійкість. Важливу з'єднувальну роль у структурі матеріалу відіграють аморфні полісахариди – геміцелюлоза (16–20%) та пектин (2–3%). Геміцелюлоза зв'язує між собою мікрофібрили, надаючи волокнам гнучкості та помірної еластичності. Пектин забезпечує внутрішню когезію, скріплюючи окремі елементарні волокна в єдине ціле. Під час технологічного процесу мочіння стебел льону ці пектинові речовини розщеплюються, що суттєво полегшує подальше розділення та виділення технічного волокна. Захисні та експлуатаційні властивості льону зумовлені наявністю лігніну, гідрофобних сполук та мінеральних речовин. Лігнін (2–5%), який є складним ароматичним полімером, міститься в технічних волокнах у незначній кількості, проте ефективно захищає їх від біологічного руйнування та забезпечує додаткову структурну жорсткість. Поверхневі гідрофобні речовини, зокрема воски та ліпіди (менше 2%), надають матеріалу поверхневої м'якості і забезпечують первинну стійкість до дії вологи. Крім того, зола (1–2%), в якій переважно містяться кремнезем і кальцій, відіграють важливу роль у підвищенні загальної міцності та термостійкості лляного волокна [4, 5].

Табл. 1

Хімічний склад волокон льону [5]

Целюлоза, %	Геміцелюлоза, %	Пектин, %	Лігнін, %	Віск, %	Вміст вологи і золи, %
64.1	16.7	1.8	2	1.5	10
71-75	18.6-20.6	2.2	2.2	1.7	10

Стебло льону містить пучки елементарних волокон. Елементарні волокна характеризуються багатокутним перерізом із закругленими кутами та багатошаровими стінками, які оточують центральний порожнистий простір, який називається просвітом (рис. 1). Вони закриті на обох кінцях і зазвичай мають діаметр 8–51 мкм (зазвичай 19 мкм) і 8–69 мм в довжину (зазвичай 32 мм). Довжина технічних волокон, які складаються з декількох елементарних волокон, знаходиться в мажах від 0,3 до 1 м. Зазвичай, рослинні волокна відрізняються заплутаною клітинною архітектурою. Фундаментальний структурний блок, мікрофібрила, є порожнистим циліндром, що складається з первинної клітинної стінки, трьох стінок вторинних комірок і центральної порожнини [6, 7].

Останніми роками лляні волокна вважаються найкращим потенціалом для заміни скла в полімерно-матричних композитах завдяки своїм перспективним специфічним властивостям. Порівняння механічних властивостей льону та скляного волокна наведено в табл. 2 [5].

Табл. 2

Механічні властивості лляних волокон та скловолокон [5]

Волокна	Модуль (ГПа)	Міцність (МПа)	Густина (г/см³ м³)	Питомий модуль	Питома міцність
Скляні	72	3530	2,54	28,2	1390
Лляні	50–70	500–900	1,4–1,5	41	480

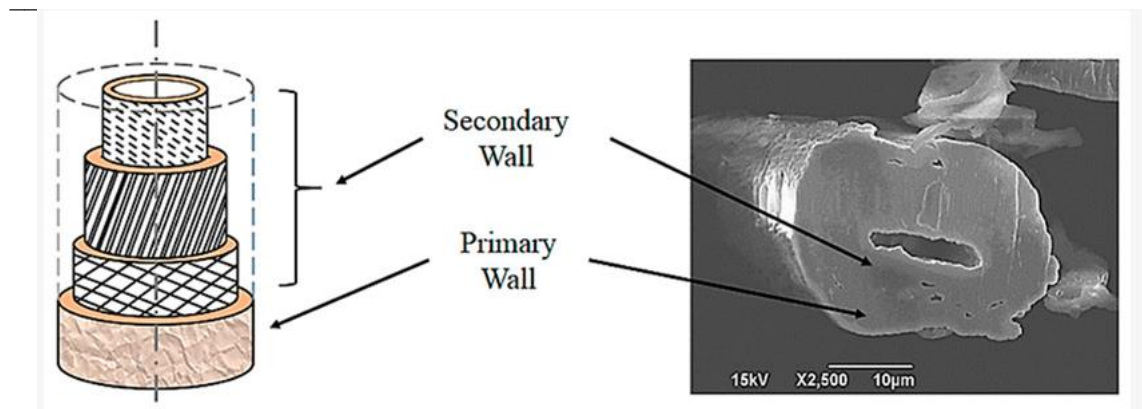


Рис. 1. Будова клітини льняного волокна [8]

Пресоване технічне волокно льону використовують для виготовлення термо- та звукоізоляційних панелей і обшивки салонів сучасних авто. Льняне волокно стрімко перетворюється на високоефективний екологічний заміник традиційного вуглецевого волокна в автомобільній промисловості. Провідні гіганти ринку, зокрема концерн BMW [9], інтегрують композити на основі льону в конструкцію кузовів і салонів своїх серійних електромобілів та експериментальних моделей автомобілів. Виробництво таких рослинних біоматеріалів дозволяє знизити викиди вуглекислого газу на 40% порівняно з енергомістким виготовленням карбонових волокон. Водночас унікальне плетіння натуральних волокон забезпечує деталям майже ідентичну міцність, жорсткість та меншу вагу. Завдяки відмінним механічним і акустичним властивостям, льон став ключовим відновлюваним ресурсом для створення екологічного та функціонального транспорту майбутнього.

Виробництво композитів з натурального волокна та полімеру значною мірою базується на технологіях виробництва, які спочатку були розроблені для синтетичних полімерів, армованих волокном. Широко використовуються такі методи виготовлення біокомпозитів, як лиття під тиском смоли, вакуумна інфузія та компресійне лиття, які продемонструють ефективність у виготовленні високоякісних синтетичних композитів. Однак внутрішні відмінності між природними та синтетичними волокнами, включаючи їх хімічні, механічні та теплові властивості, створюють значні проблеми для прямого застосування цих методів. Наприклад, гідрофільна природа численних натуральних волокон вимагає обробки поверхні для підвищення сумісності з гідрофобними смолами. Для поліпшення міжфазної адгезії між льняним волокном і полімерною матрицею проводять обробку поверхні волокон [10].

Постановка завдання. Основною метою роботи є розробка біокомпозитних матеріалів на основі глютину та подрібнених волокон льону та дослідження їх властивостей.

Викладення основного матеріалу. У роботі використано технічний льон (рис. 2). Технічний льон – це грубе, сплутане натуральне волокно, яке є побічним продуктом (відходом) первинної обробки рослин – луб'яних культур. Основним застосуванням є будівництво у вигляді стрічок та сантехніка, де відходи волокон льону використовується у вигляді тонких очищених волокон для герметизації різьбових з'єднань у трубопроводах.



Рис. 2. Подрібнені волокна технічного льону

Технологія приготування зразків полягала в наступному. Спочатку проводили дозування компонентів, враховуючи об'єм прес-форми для формування зразків. Як в'язуче використано водний розчин глютину. Як наповнювач подрібнені волокна технічного льону. До волокон льону додавали розчин глютину. Після ретельного перемішування композицію підсушували до втрати маси в кількості 5%, 10%, 15%, 20% та 25%. Отриману суміш заданого складу (табл. 3) поміщали в прес-форми. Прес-форму фіксували струбцинами для забезпечення суцільності та міцності біокомпозитного матеріалу. Далі для зразків у прес-формах проводили термічну обробку, яка полягала у нагріві до 140 °С з витримкою протягом 2 годин. Охолодження зразків проведено в прес-формах на спокійному повітрі [11].

Табл. 3

Склад біокомпозитних зразків з подрібненими волокнами технічного льону

№ зразка	Вміст розчину глютину, %	Вміст волокон льону, %
1	50	50
2	46	54
3	43	57
4	40	60

Встановлено, що низьку міцність на стискання до 8,3 МПа мають біокомпозитні зразки складів № 1-4 (рис. 3), композиції яких підсушували до втрати вологи 5%, що можна пояснити значним вмістом залишкової вологи в об'ємі матеріалу. Для біокомпозитного матеріалу зі співвідношенням 50% кісткового клею та 50% подрібнених волокон льону (зразок № 1) спостерігаються найнижчі показники міцності на стискання, значення яких знаходяться в межах 2,7...7,9 МПа у випадках формування за різних ступенів підсушування (5...25%). Дані біокомпозитні зразки характеризуються нерівною поверхнею (рис. 4, а) після їх випресовування.

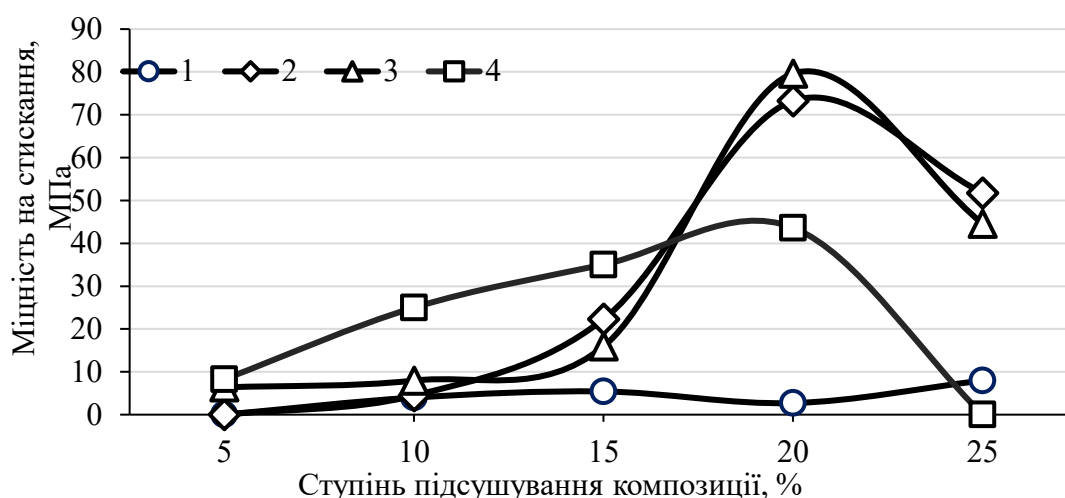


Рис. 3. Залежність міцності на стискання біокомпозитів від ступеня підсушування композиції та вмісту компонентів (табл. 3)

Під час збільшення ступеня підсушування композиції складу № 1 до 10% та 15% міцність на стискання зростає до 4,0 МПа та 5,4 МПа відповідно. Найвищого значення міцності на стискання 8,0 МПа отримано для біокомпозиту зі ступенем підсушування композиції 25% за даного співвідношення компонентів. Підвищення міцності пояснюється поступовим видаленням надлишкової вологи, ущільненням структури композиту та покращенням адгезійної взаємодії між клейовою матрицею і волокнистим наповнювачем.

Для біокомпозиту складу № 2, який містить 54% подрібнених волокон льону, за ступеня підсушування композиції 10% міцність на стискання становить 4,5 МПа, а при підвищенні ступеня підсушування композиції до 15% відбувається різке збільшення міцності до 22,3 МПа. Максимальне значення міцності на стискання 73,3 МПа отримано для зразків із ступенем підсушування композиції 20%. Про це додатково свідчить формування щільної та однорідної структури композитного матеріалу з рівною поверхнею зразків (рис. 4, б). За подальшого збільшення ступеня підсушування композиції до 25% міцність на стискання біокомпозитів знижується до 51,8 МПа, що може бути пов'язано із пересушуванням композиції та погіршенням змочування волокон льону матрицею на основі розчину глютину.

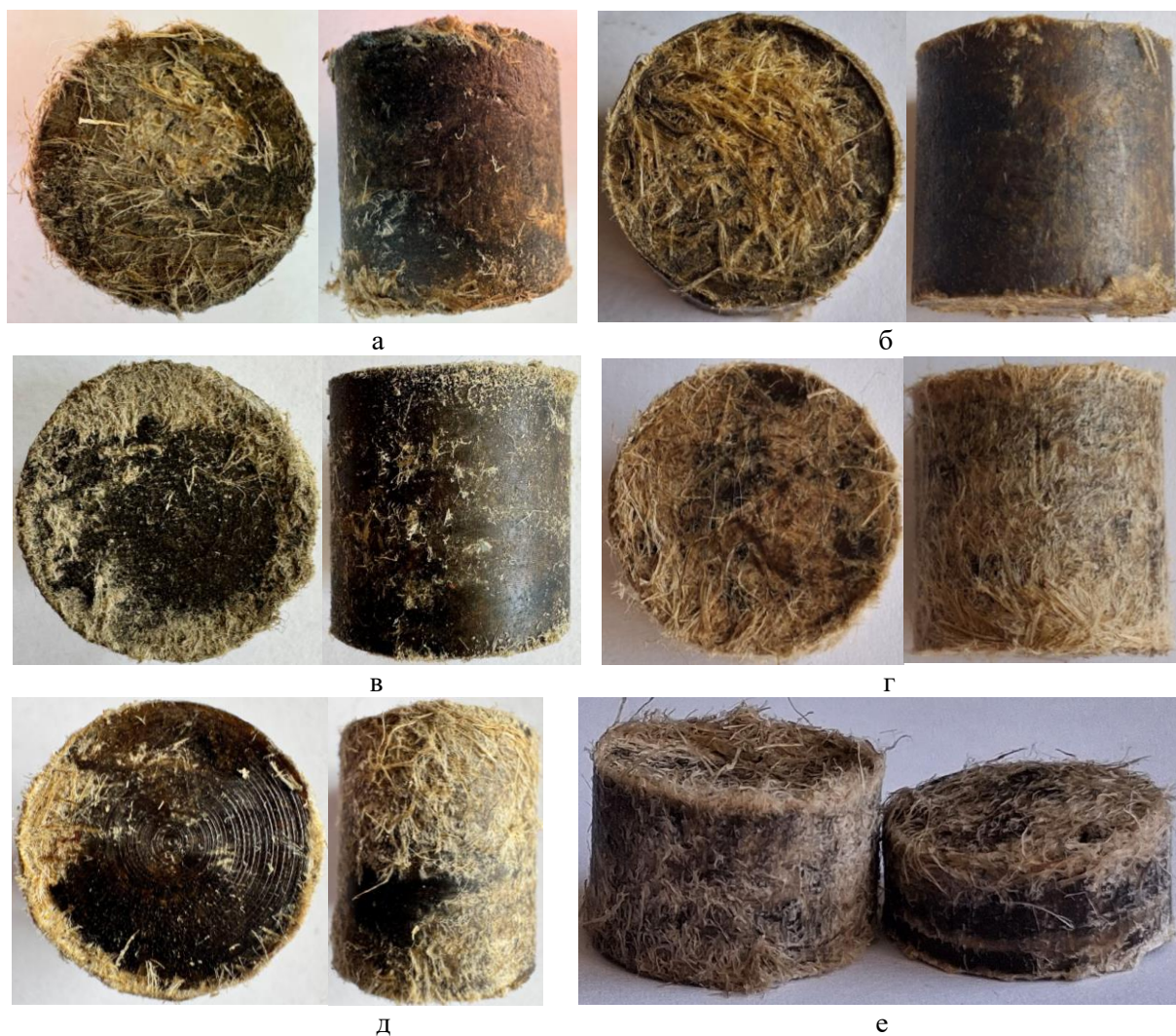


Рис. 4. Вигляд біокompозитних зразків із ступенем підсушування композиції:
а – зразок №1, 20%; б – зразок № 2, 20%; в – зразок № 3, 20%; г – зразок № 3, 25%;
д – зразок № 4, 20%; е – зразок № 4, 25%

Досліджено, що за ступеня підсушування композиції 5% міцність на стискання біокompозиту складу № 3, який містить 57% подрібнених волокон льону та 43% розчину глютину, становить 6,4 МПа. У випадку підвищення ступеня підсушування композиції до 15% міцність на стискання біокompозитів зростає до 15,9 МПа. Найвищу міцність на стискання 79,6 МПа отримано за ступеня підсушування композиції 20%, що є максимальним значенням серед усіх розроблених біокompозитних зразків. Високі показники міцності на стискання біокompозиту даного складу (рис. 4, в) пояснюються оптимальним співвідношенням між кількістю клейової матриці та волокнистого наповнювача, за якого забезпечується ефективне змочування поверхні волокон та утворення значної кількості зв'язків між компонентами біокompозитного матеріалу. За ступеня підсушування композиції 25% міцність на стискання знижується в 1,8 раз до 44,6 МПа, що вказує на крихкість матеріалу внаслідок недостатнього вмісту в'язучого на основі глютину, про що додатково вказує світлий колір зразка (рис. 4, г) порівняно із зразком аналогічного складу із меншим ступенем підсушування композиції 20% (рис. 4, в).

За ступеня підсушування 5% міцність на стискання біокompозитів складу № 4, які містять 60% подрібнених волокон льону та 40% розчину глютину, становить 8,3 МПа. У випадку підвищення ступеня підсушування композиції до 15% міцність на стискання біокompозитів зростає до 35,0 МПа. Максимальне значення міцності 43,6 МПа отримано для біокompозитів зі ступенем підсушування композиції 20%. Зниження міцності на стискання пояснюється високим вмістом наповнювача, за якого глютинова матриця не забезпечує повного змочування подрібнених волокон, що підтверджується сухими світлими ділянками на поверхні зразків (рис. 4, д). Зразок складу № 4 із ступенем підсушування композиції 25% зруйнувався під час видалення з прес-форми (рис. 4, е), що пов'язано із недостатнім вмістом в'язучого за вмісту волокон льону в кількості 60%.

Руйнування біокомпозитних матеріалів складу № 1 з вмістом 50% розчину глютину та 50% подрібнених волокон льону та ступенем підсушування композиції 5% та 10%, які мають низьку міцність на стискання, супроводжується деформацією зразка та просіданням його верхньої частини під дією навантаження (рисунк 5, а, б) внаслідок м'якого наповнювача та недостатнього ступеня підсушування композиції. Руйнування біокомпозитного зразка складу № 1 із вищим ступенем підсушування композиції 15% відбувається внаслідок деформації та поширення магістральної тріщини під кутом 45° в нижній частині зразка (рис. 5, в). Руйнування біокомпозитних зразків даного складу із вищими ступенями підсушування 20% і 25% супроводжується поширенням тріщини з відламуванням частини зразка (рис. 5, г, д).

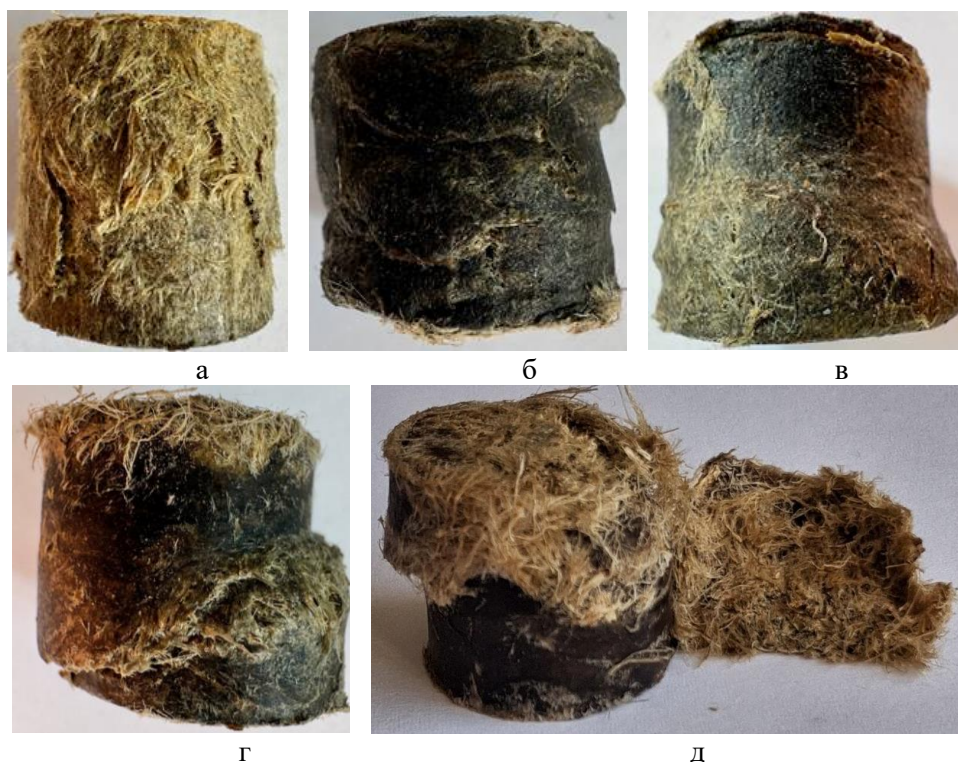


Рис. 5. Вигляд біокомпозитних зразків складу № 1 із ступенем підсушування композиції 5% (а), 10% (б), 15% (в), 20% (г), 25% (е) після руйнування

Руйнування зразків складу № 2, які містять 46% розчину глютину та 54% подрібнених волокон льону, із ступенем підсушування композиції 5%, 10% та 15% супроводжується зсувом частини зразка під кутом 30° (рис. 6, а), 28° (рис. 6, б) та 20° (рис. 6, в) відповідно під дією навантаження. За вищого ступеня підсушування композиції 20% та 25% руйнування біокомпозитних зразків відбувається шляхом утворення поперечних тріщин (рис. 6, г, д), що свідчить про вищу міцність розроблених біокомпозитних матеріалів.

Руйнування біокомпозитних зразків складу № 3 зі співвідношенням компонентів 43% розчину глютину та 57% подрібнених волокон льону та ступенем підсушування композиції 5–15% супроводжується просіданням частини матеріалу з наступним поширенням макротріщин по всьому об'єму зразків (рис. 7, а–в). Біокомпозитний зразок складу № 3 із ступенем підсушування композиції 20%, який має найвищу міцність на стискання, характеризується пластичністю, оскільки під дією навантаження лише деформується (рис. 7, г). Біокомпозит із ступенем підсушування композиції 25% характеризується значною макропористістю внаслідок високого ступеня підсушування композиції. Руйнування зразка відбувається поширенням поверхневих тріщин (рис. 7, д).

Руйнування біокомпозитних зразків складу № 4, які містять 40% розчину глютину та 60% подрібнених волокон льону, із ступенями підсушування 5–15% супроводжується поширенням декількох магістральних тріщин під кутами в межах 10–20° (рис. 8, а–в). Біокомпозитний зразок із вищим ступенем підсушування 20% під дією стискаючого навантаження зруйнувався, розламавшись на дві частини. Світлий колір в місці розлому свідчить про нестачу глютинового в'язучого в даній ділянці біокомпозиту, що полегшило руйнування матеріалу.

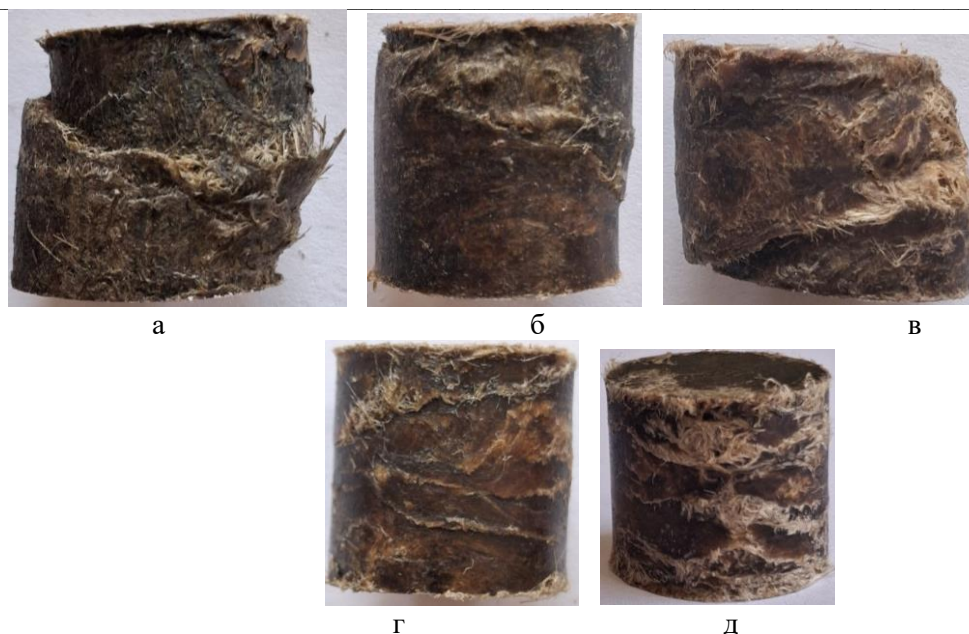


Рис. 6. Вигляд біокомпозитних зразків складу № 2 із ступенем підсушування композиції 5% (а), 10% (б), 15% (в), 20% (г), 25% (е) після руйнування



Рис. 7. Вигляд біокомпозитних зразків складу № 3 із ступенем підсушування композиції 5% (а), 10% (б), 15% (в), 20% (г), 25% (е) після руйнування

Висновки. Встановлено, що міцність на стискання біокомпозитів зростає із підвищенням вмісту подрібнених волокон льону до 57% та ступеня підсушування композиції до 20%. Максимальні значення міцності на стискання 71,7 МПа зафіксовано для біокомпозитів складу № 3 із співвідношенням компонентів 50% розчину глютину та 50% подрібнених волокон льону довжиною 5 мм за ступеня підсушування композиції 20%. Вміст в композиції 60% волокон льону та ступінь підсушування композиції 25% не дозволяє отримати біокомпозитні матеріали з високою міцністю на стискання, оскільки не відбувається повне змочування волокон через недостатній вміст в'язучого.



Рис. 8. Вигляд біокompatитних зразків складу № 4 із ступенем підсушування композиції 5% (а), 10% (б), 15% (в), 20% (г), 25% (е) після руйнування

Руйнування біокompatитних матеріалів з нижчим ступенем підсушування композиції 5–15% відбувається зазвичай із попередньою деформацією та зсувом частини матеріалу внаслідок утворення магістральної тріщин. За вищого ступеня підсушування композиції 20% руйнування біокompatитних зразків складів № 2 та № 3 супроводжується утворенням поперечних тріщин, що вказує на вищу міцність даних біокompatитних матеріалів. Біокompatитні зразки із високим вмістом подрібнених волокон льону та вищим ступенем підсушування (25%) характеризуються крихким руйнуванням із утворенням тріщини та розколюванням зразка на дві частини.

Список використаних джерел

1. Ho M. P., Wang H., Lee J. H., Ho C. K., Lau K. T., Leng J., Hui D. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. *Composites Part B: Engineering*. 2012. Vol. 43, Iss. 8. P. 3549–3562. DOI: [10.1016/j.compositesb.2011.10.001](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.001)
2. Ягелюк С. В., Дідух В. Ф. Напрямки використання продукції переробки льону олійного та льону-довгунця. *Товарознавчий вісник*. 2020. Вип. 13. С. 292–305. DOI: [10.36910/6775-2310-5283-2020-13-25](https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2020-13-25)
3. Periasamy D., Prakalathan K., Manoharan B., Shanmugam V., Khan A., Asiri A. M. Examining the performance of eco-friendly flax fiber composites: mechanical, thermal and durability properties—review. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025. Vol. 15. P. 26419–26433. DOI: [10.1007/s13399-024-06039-6](https://doi.org/10.1007/s13399-024-06039-6)
4. European flax fiber: quality and sustainability. URL: <https://www.safilin.fr/natural-flax-fiber-with-exceptional-characteristics/?lang=en>
5. Khan M. M. R., Alim M. A. Biopolymer flax (*Linum Usitatissimum* L.) and its prospects in biodegradable composite fabrication – a short review. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*. 2019. Vol. 5, Iss. 5. P. 238–241. DOI: [10.15406/jteft.2019.05.00212](https://doi.org/10.15406/jteft.2019.05.00212)
6. Huo S., Ulven C. A., Wang X. Chemical and Mechanical Properties Studies of Chinese Linen Flax and Its Composites. *Polymers and Polymer Composites*. 2013. Vol. 21, Iss. 5. P. 275–286. DOI: [10.1177/096739111302100502](https://doi.org/10.1177/096739111302100502)
7. Parodo G., Sorrentino L., Turchetta S., Moffa G. Manufacturing of Sustainable Composite Materials: The Challenge of Flax Fiber and Polypropylene. *Materials*. 2024. Vol. 17, Iss. 19. P. 4768. DOI: [10.3390/ma17194768](https://doi.org/10.3390/ma17194768)
8. Amiri A., Ulven C. A., Huo S. Effect of Chemical Treatment of Flax Fiber and Resin Manipulation on Service Life of Their Composites Using Time-Temperature Superposition. *Polymers*. 2015. Vol. 7, Iss. 10. P. 1965–1978. DOI: [10.3390/polym7101493](https://doi.org/10.3390/polym7101493)
9. Schuett L.-R. Natural Fiber Cars – Sustainable Automotive Parts at JEC World 2026. *IDTechEx Research Articles*. 2026.
10. More A. P. Flax fiber-based polymer composites: a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022. Vol. 5. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00246-9>
11. Sadova O., Kashytskyi V., Husachuk D., Vyshynskyi M., Chernota Ye. Study of mechanical properties and structure of biocomposites filled with coffee grounds. *Наукові нотатки*. 2025. Вип. 84. С. 249–256. DOI: [10.36910/775.24153966.2025.84.38](https://doi.org/10.36910/775.24153966.2025.84.38)

Дата надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.05.2026

Дата оприлюднення 28.05.2026