

ІЩУК ТЕТЯНА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0009-8679-9020>e-mail: ishchuk.tetiana@khmnu.edu.ua**ІВАНІШЕНА ТЕТЯНА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3206-9307>e-mail: ivanishenat@khmnu.edu.ua

ВПЛИВ ВИДУ СИРОВИНИ НА ВИБІР МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

У роботі проаналізовано підходи до оцінки експлуатаційних характеристик текстильних матеріалів, виготовлених з первинної і вторинної сировини. Проведено критичний аналіз сучасних методів тестування та оцінювання таких характеристик, виявлено їхні суттєві обмеження, зокрема в контексті адаптації до специфіки матеріалів вторинного походження. Доведено, що традиційні підходи не враховують структурну та хімічну варіативність вторинної сировини, що знижує якість кінцевої продукції. Обґрунтовано необхідність розробки удосконалених, стандартизованих методик оцінювання, орієнтованих на принципи циркулярної економіки та сталого розвитку.

Запропоновано інтегральний підхід до визначення експлуатаційних властивостей, що включає комплексні дослідження із застосуванням аналітичних методів. Особливу увагу приділено дослідженню змін фізико-механічних характеристик у процесі експлуатації та повторної переробки текстильних матеріалів. Розглянуто методики оцінки хімічної стабільності, термостійкості, показників гігроскопічності та комфортності, які є визначальними для споживчих властивостей виробів. Проаналізовано також інноваційні підходи, зокрема застосування нанопокриттів і математичного моделювання, що підвищують точність прогнозування експлуатаційної поведінки матеріалів. Особливу увагу приділено екологічним аспектам, а також дотримання принципів сталого виробництва. Акцентовано на доцільності створення єдиної бази даних властивостей перероблених матеріалів для полегшення уніфікації методів контролю та адаптації нормативно-технічної документації. Додатково проаналізовано вплив хімічної будови волокон, зокрема функціональних груп, на експлуатаційні характеристики текстильних матеріалів. Встановлено, що тип функціональних груп (гідроксильні, аміногрупи, ефірні тощо) зумовлює такі властивості, як гігроскопічність, міцність, комфортність та зносостійкість.

Ключові слова: експлуатаційні властивості, текстильні полімерні матеріали, вторинна сировина, методи оцінки, сталий розвиток.

ISHCHUK TETIANA, IVANISHENA TETIANA

Khmelnitskyi National University

INFLUENCE OF THE TYPE OF RAW MATERIAL ON THE METHODOLOGY OF RESEARCHING THE PERFORMANCE PROPERTIES OF TEXTILE MATERIALS

The paper analyzes approaches to assessing the performance characteristics of textile materials made from primary and secondary raw materials. A critical analysis of modern methods of testing and assessing such characteristics was conducted, and their significant limitations were identified, in particular in the context of adaptation to the specifics of materials of secondary origin. It is proven that traditional approaches do not take into account the structural and chemical variability of secondary raw materials, which reduces the quality of the final product. The need to develop improved, standardized assessment methods focused on the principles of circular economy and sustainable development is substantiated.

An integrated approach to determining performance properties is proposed, which includes comprehensive studies using analytical methods. Special attention is paid to the study of changes in physical and mechanical characteristics during the operation and reprocessing of textile materials. Methods for assessing chemical stability, thermal stability, hygroscopicity and comfort, which are decisive for the consumer properties of products, are considered. Innovative approaches, in particular the use of nanocoatings and mathematical modeling, which increase the accuracy of predicting the operational behavior of materials, were also analyzed. Particular attention was paid to environmental aspects, as well as adherence to the principles of sustainable production. Emphasis was placed on the feasibility of creating a single database of properties of recycled materials to facilitate the unification of control methods and adaptation of regulatory and technical documentation. Additionally, the influence of the chemical structure of fibers, in particular functional groups, on the operational characteristics of textile materials was analyzed. It was established that the type of functional groups (hydroxyl, amino groups, ether, etc.) determines such properties as hygroscopicity, strength, comfort and wear resistance.

Keywords: performance properties, textile polymer materials, secondary raw materials, assessment methods, sustainable development.

Стаття надійшла до редакції / Received 28.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Проблематика оцінки експлуатаційних властивостей текстильних матеріалів охоплює не лише визначення показників якості, а й критичний аналіз застосовності існуючих методик щодо різних типів сировини. Традиційні методи дослідження та аналізу таких властивостей орієнтовані на матеріали з первинної сировини і не завжди забезпечують повний спектр оцінки властивостей текстильних матеріалів та кореляцію їх результатів щодо матеріалів виготовлених із вторинної сировини. Такий підхід призводить до невірних прогнозування властивостей виробів при експлуатації. Впровадження принципів сталого розвитку, зокрема

збільшення частки використання вторинної сировини у текстильній промисловості, ставить завдання удосконалення існуючих підходів до нових матеріалів, що в свою чергу, зумовлює потребу у перегляді методологічних засад оцінювання експлуатаційних властивостей, включаючи уточнення критеріїв, параметрів та умов випробувань, що є актуальним як з наукової, так і з прикладної точки зору.

Аналіз досліджень та публікацій

Як показано у попередніх дослідженнях [1], напрямки використання вторинної сировини в легкій промисловості є перспективними та потребують подальшого вдосконалення як у технологічному, так і в аналітичному аспектах. Значний внесок у вивчення методів аналізу текстильних матеріалів на основі первинної та вторинної сировини зробили Yatvitskiy, Dolez, Singh, Pereira, Jamshaid та інші дослідники [2–7]. Їхні роботи зосереджені на різних підходах до оцінювання експлуатаційних властивостей, що включають фізико-механічні, термічні, хімічні та функціональні характеристики текстильних матеріалів. Зокрема, Yatvitskiy та ін. [2] розглядають ефективність механічної переробки вторинної сировини, демонструючи вплив відновлених волокон на експлуатаційні властивості готової продукції. У свою чергу, Dolez і Vermeersch [4] пропонують інноваційний підхід до характеризації матеріалів на основі багатовимірної аналізу, що дозволяє комплексно оцінити властивості тканин. Singh і Madhu [6] зосереджують увагу на хімічній модифікації бавовняних тканин, досягаючи надання їм антимікробних, вогнезахисних та олеофобних властивостей, що істотно підвищує функціональність матеріалів. Pereira та ін. [7] застосовують термогравіметричний аналіз для визначення ступеня зносу та інтенсивності виділення мікрОВОЛОКОН, що має важливе значення в контексті екологічної безпеки та довговічності текстильних виробів.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є порівняльний аналіз існуючих методів оцінки експлуатаційних властивостей текстильних матеріалів на основі первинної та вторинної сировини, з урахуванням особливостей сировинного складу (в тому числі і хімічної будови) для прогнозування їх ефективності, обмежень для застосування, переваг та недоліків.

Виклад основного матеріалу

Сучасне текстильне виробництво дедалі більше орієнтується на принципи сталого розвитку, тому надзвичайно актуальністю набуває питання оцінки якості сировини, зокрема первинної та вторинної. Первинна сировина, у контексті текстильної промисловості, визначається як речовина, отримані безпосередньо з природних або синтетичних джерел без попереднього використання чи перероблення. Вторинна сировина охоплює волокна та матеріали, що пройшли процес рециклінгу, зокрема шляхом механічної або хімічної переробки текстильних відходів з подальшим поверненням у виробничий цикл у відновленій формі [2].

Методи дослідження експлуатаційних властивостей текстильних матеріалів, виготовлених на основі первинної сировини вирізняються сучасними підходами та всебічністю. Насамперед, вони охоплюють комплекс фізико-механічних, хімічних, термічних, структурно-аналітичних та ергономічних підходів, які реалізуються шляхом використання прецизійного лабораторного обладнання, стандартизованих протоколів, цифрових аналітичних систем, тощо. Методи оцінки цих матеріалів зосереджені на широкому спектрі властивостей: фізико-механічні властивості, хімічні властивості, теплові властивості, комфорт і довговічність.

До фізико-механічних властивостей належать міцність на розрив, видовження та модуль пружності. Наприклад, довжина згину, жорсткість та модуль пружності вимірюються для оцінки драпірувальних властивостей тканин. Випробування на розрив і подовження – це здатність матеріалу витримувати навантаження без структурних ушкоджень є забезпечуючою складовою в контексті виробництва захисного одягу, технічного текстилю та матеріалів для військових [3],[4]. Існують методи визначення компресійних та еластичних властивостей, які мають застосування у створенні медичного та побутового текстилю [5].

Наступними є хімічні властивості, зокрема випробування на хімічну стійкість, такі як вогнестійкість та антибактеріальні властивості [6]. З точки зору хімічного аналізу, визначення складу волокон методом інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є та рентгенівської енергетичної дисперсії дозволяє точно ідентифікувати хімічні компоненти, ступінь чистоти сировини та рівень функціональних добавок, що впливає на довговічність та поведінку матеріалу в екстремальних умовах експлуатації [6], [7]. Вивчення термічної деградації за допомогою методів, заснованих на деконволюції сигналів термогравіметричного аналізу, забезпечує розуміння температурних меж стабільності та сумісності компонентів у волокнистих сумішах, зокрема шляхом попереднього аналізу кривих деградації окремих сирих волокон, подальшого виявлення взаємодій між компонентами в їхніх сумішах (наприклад, ПЕТ + бавовна, ПЕТ + вовна, ПЕТ + бавовна + акрил), і, зрештою, кількісної оцінки складу на основі площ піків на відповідних графічних кривих, що дозволяє ефективно досліджувати текстильні структури та процес вивільнення волокон [8].

В контексті теплових властивостей, до яких належать тепловий опір та провідність, важливим є їх застосування у якості теплоізоляційного матеріалу [9]. Багатовісне тестування є інноваційним підходом, яке передбачає одночасне прикладання навантажень у кількох напрямках до зразка матеріалу з метою моделювання складних умов експлуатації та аналізу його поведінки під реальними механічними впливами.

Воно є перспективним в контексті дослідження композитів та текстильних матеріалів, що піддаються складним деформаціям у процесі експлуатації. Завдяки новим пристроям, які імітують мультиосеві навантаження, науковці можуть точніше передбачати поведінку матеріалів у реальних умовах, що значно

підвищує якість проєктування конструкцій текстильного походження [9]. Насамперед, активний розвиток електронних систем тестування, включно з застосуванням комп'ютеризованих приладів, забезпечує високу точність кількісного визначення параметрів матеріалу, що дозволяє уникати суб'єктивізму при оцінці результатів дослідження [10]. Не менш важливою характеристикою є комфорт і довговічність. Наприклад, випробування на паропроникність, повітропроникність та стійкість до стирання. Методи дослідження цих показників базуються на впровадженні міжнародних стандартів, таких як ISO 15496 для визначення проникності водяної пари, зокрема для спортивного та функціонального одягу [11]. Визначення паропроникності текстильних матеріалів за стандартом ISO 15496:2018 здійснюється за допомогою модифікованого інвертованого чашкового методу з використанням подвійної мембрани, що забезпечує стабільний градієнт вологості. Метод передбачає вимірювання втрати маси чашки, заповненої гігроскопічним розчином, крізь зразок тканини під впливом водяної пари, що дифундує з водяної бані через напівпроникну мембрану [11].

В текстильній промисловості на відміну від первинної сировини, вторинна — це матеріали, отримані внаслідок переробки текстильних, полімерних або змішаних відходів, тощо. Її використання є складовою концепції циркулярної економіки (зокрема, досягнення цілей сталого розвитку), яка передбачає зменшення залежності від первинних ресурсів та мінімізацію екологічного впливу виробництва (Ціль 12). Проте, вторинна сировина характеризується підвищеною варіабельністю властивостей і потенційною деградацією як на фізичному, так і на хімічному рівнях, що обумовлює необхідність розробки спеціалізованих методів дослідження експлуатаційних характеристик, які враховують специфіку походження та обробки матеріалів на їх основі. Першочерговим завданням є оцінка стабільності та якості вторинної сировини. Важливими показниками виступають механічні властивості — зокрема міцність на розрив, подовження до розриву, модуль жорсткості, зносостійкість. Для їх аналізу використовуються устаткування типу Instron 5808, яке забезпечує прецизійний контроль деформаційних навантажень і дозволяє фіксувати аномалії, викликані деградацією структури внаслідок вторинної переробки [12], [13]. До того ж, важливим аспектом досліджень є екологічна оцінка вторинної сировини: біорозкладність, токсичність, вміст залишкових забруднювачів (барвників, важких металів, мікропластиків), що можуть накопичуватись внаслідок циклів переробки. Такі дослідження проводяться за допомогою методів ICP (індуктивно зв'язана плазма), ATR/FTIR (інфрачервона спектроскопія з ослабленим повним відбиттям) та AAS (атомно-абсорбційна спектроскопія) [14], [15]. З метою порівняльної оцінки експлуатаційної придатності, вторинна сировина тестується поряд із первинною. Наприклад, фізико-механічні властивості волокна сонячної коноплі, отриманого з повторної переробки, порівнювали з джутовим волокном для виявлення їхньої еквівалентності в текстильному застосуванні [16]. У випадку нетипових матеріалів, доповнюють аналізи розширеними цифровими технологіями, такими як метод цифрової кореляції спекл-структури для аналізу локального розподілу напружень та багатовимірна регресія для прогнозування поведінки тканин в умовах експлуатації [12].

Особливе місце у дослідженнях займає математичне та комп'ютерне моделювання, яке дозволяє прогнозувати поведінку матеріалів на основі вхідних параметрів, включно з відсотковим вмістом вторинних домішок. Теорія нечіткої логіки використовується, зокрема, для моделювання когезії при розтягненні волокон з додаванням золи або технічних полієфірів. До фізичних методів випробування вторинного текстилю також входять тестування на стирання, гнучкість, термічну стабільність. Дані методи дозволяють контролювати довговічність та відповідність матеріалу до вимог кінцевого використання. У контексті інновацій, впровадження нанотехнологій — зокрема, нанопокриттів — дозволяє модифікувати поверхневі властивості переробленого текстилю, надаючи йому антибактеріальних, водо- та брудовідштовхувальних властивостей, що особливо цінне у спортивному й медичному одязі [17]. Дослідження також передбачають оптимізаційні підходи, де експериментальні дані використовуються для налаштування технологічних параметрів — температури, тиску, часу переробки, які мінімізують деградацію та забезпечують повторюваність властивостей матеріал.

Виходячи з вищенаведеного можна припустити, що, методи оцінки властивостей текстильних матеріалів на основі первинної та вторинної сировини мають ряд спільних та відмінних ознак. Порівняння методів оцінки властивостей первинної та вторинної сировини в текстильних матеріалах наведено у таблиці 1.

Порівнюючи підходи до оцінки первинної та вторинної сировини, стає очевидним, що хоча базові методи часто збігаються, їх застосування та інтерпретація суттєво різняться. По-перше, первинна сировина демонструє вищу повторюваність та точність результатів фізико-механічних випробувань, що свідчить про її стандартизованість. Хімічні аналізи первинної сировини забезпечують чітке розуміння її складу, але можуть не враховувати потенційні мікрозабруднення, які стають важливими при оцінці уже вторинної сировини. В свою чергу, вторинна сировина вимагає більш ретельного аналізу на наявність токсинів та залишків попередньої обробки. По-друге, термічний аналіз для первинної сировини дає прогноз термостійкості, але не відображає поведінку після багаторазових термічних впливів.

Структурні методи для вторинної сировини зосереджуються на виявленні дефектів, що виникли в процесі експлуатації, на відміну від первинної, де головним є точна ідентифікація структури. Оцінка комфорту та довговічності для вторинної сировини є складнішою через варіативність її стану після попереднього використання. По-третє, цифрове моделювання, хоча й корисне для обох типів сировини, але стикається зі значними труднощами при прогнозуванні поведінки вторинної сировини через її неоднорідність складу.

Таблиця 1

Порівняння методів оцінки властивостей первинної та вторинної сировини в текстильних матеріалах

Критерій / Метод	Первинна сировина	Вторинна сировина
Фізико-механічні випробування	Стандартизовані тести: міцність, видовження, жорсткість (Instron, ISO)	Ідентичні тести, але з додатковим моніторингом деградації
Хімічний аналіз	FTIR, спектроскопія для складу волокон, чистоти	Аналогічні методи, з фокусом на токсини, залишки барвників
Термічний аналіз	Аналіз сумісності у волокнистих сумішах	Аналогічний, але враховуються ознаки деградації
Структурні методи	Деконволюція спектрів, аналіз волокнистої структури	Аналіз мікропошкоджень, неоднорідностей
Екологічна безпека	Не є пріоритетною в стандартних тестах	Проводиться обов'язково (AAS, ICP, FTIR)
Теплові властивості	Теплопровідність, опір, мультиосеве тестування	Ті ж методи з корекцією на зношення волокон
Комфорт і довговічність	Випробування на паро- та повітропроникність, стирання	Ті ж самі тести + аналіз варіабельності
Цифрове моделювання	Стандартизоване комп'ютерне прогнозування	Фазова регресія, кореляція спектрів
Інновації	Комп'ютеризація, мультиосеві стенди	Нанопокриття, модифікації для довговічності

Не слід відкидати і вплив хімічного складу текстильних матеріалів, а саме, будови макромолекул, їх гнучкість, хімічна природа мономерів, наявність функціональних груп, ступінь розгалуження, тактичність. Встановлено, що існує взаємозв'язок між хімічною будовою волокон та їхніми характеристиками. Основними властивостями, які визначають функціональність текстильних матеріалів, є гігроскопічність, міцність, теплозахисна здатність, зносостійкість, еластичність, комфортність та екологічність. Вище згадані характеристики значною мірою зумовлюються наявністю у ланцюгу таких функціональних груп, як гідроксильні ($-\text{OH}$), аміногрупи ($-\text{NH}_2$), карбоксильні ($-\text{COOH}$), амідні ($-\text{CONH}-$), ефірні ($-\text{COO}-$) та інші. Порівняльний аналіз текстильних волокон різного походження (таблиця 2) дозволяє виявити специфіку впливу тих чи інших функціональних груп на властивості матеріалу. Зокрема, полярні групи забезпечують підвищену взаємодію з водою, що сприяє гігроскопічності та комфортності, тоді як гідрофобні групи навпаки – підвищують стійкість до вологи, але можуть знижувати комфорт при експлуатації.

Таблиця 2

Зв'язок між видом сировини, функціональними групами та експлуатаційними властивостями текстильних матеріалів

Джерело утворення полімеру	Приклади	Функціональні групи	Експлуатаційні властивості	Вплив функціональних груп	Посилання
Первинна сировина					
Природне	Бавовна, льон	$-\text{OH}$ (гідроксильна)	Гігроскопічність, м'якість, зминання, комфортність	$-\text{OH}$ групи забезпечують добре вологопоглинання і комфорт	[18]
	Вовна, шовк	$-\text{NH}_2$ (аміногрупа), $-\text{COOH}$ (карбоксильна), $-\text{SH}$ (тіольна)	Теплоізоляція, еластичність, чутливість до температур	Полярні групи сприяють зв'язуванню з водою, підвищують теплозберігаючі властивості	[19]
Штучне	Віскоза	$-\text{OH}$	Висока гігроскопічність, м'якість, слабкість у вологому стані	Подібний до бавовни за властивостями через наявність $-\text{OH}$ груп	[20]
	Ацетат	$-\text{OCONH}_2$ (ацетильна)	Близь, менше вологопоглинання, м'якість	Ацетильні групи зменшують гігроскопічність	[21]
Синтетичне	Поліестер (ПЕТ)	$-\text{COO}-$ (ефірна), $-\text{C}_6\text{H}_4$ (ароматичне кільце)	Висока міцність, низька гігроскопічність, електризованість	Гідрофобні групи знижують вологопоглинання	[22]
	Поліамід (нейлон)	$-\text{CONH}-$ (амідна)	Міцність, зносостійкість, помірна гігроскопічність	Амідні групи забезпечують водневі зв'язки, що підвищують міцність	[23]

Продовження таблиці 2

Джерело утворення полімеру	Приклади	Функціональні групи	Експлуатаційні властивості	Вплив функціональних груп	Посилання
Вторинна сировина					
Механічно перероблені волокна	Бавовна, вовна після подрібнення	–OH, –NH ₂ , –COOH	Зниження міцності, але збереження гігроскопічності	Групи зберігаються, але структура волокон порушена	[24]
Хімічно регенеровані волокна	Регенерований ПЕТ, віскоза	–OH, –COO–	Покращена стабільність, часткова втрата первинних властивостей	Модифікації змінюють полярність, покращують керованість властивостей	[25]
Суміші текстильних відходів	Натуральні + синтетичні волокна	–OH, –NH ₂ , –COO–, –CH ₃	Нестабільні експлуатаційні властивості, залежні від складу	Суміш гідрофільних та гідрофобних груп, як результат складне прогнозування	[26]
Перероблений пластик (ПЕТ)	Пляшки, упаковки	–COO–, –C ₆ H ₄	Висока міцність, низька гігроскопічність, стійкість	Гідрофобні групи не пропускають вологу, але забезпечують довговічність	[27]
Біокомпозити	Волокна з целюлози та органічних відходів	–OH, –COOH, –NH ₂ (залежно від складу)	Екологічність, середня зносостійкість	Органічні полярні групи підвищують біорозкладність, але зменшують стійкість	[28]

З'ясовано, що при формуванні експлуатаційних властивостей текстильних матеріалів, як з первинної, так і вторинної сировини функціональні групи виявляють значний вплив. У натуральних волокнах, таких як бавовна або вовна, наявність гідроксильних (–OH), аміногруп (–NH₂), карбоксильних (–COOH) або тиольних (–SH) забезпечує високу гігроскопічність, комфорт при носінні та теплозберігаючі властивості. У синтетичних волокнах (поліестер, поліамід) переважають гідрофобні функціональні групи, як-от ефірні (–COO–) та ароматичні кільця (–C₆H₄), що знижують вологопоглинання, але підвищують міцність, зносостійкість і довговічність матеріалів. У вторинній сировині, функціональні групи часто зберігаються, але через структурні пошкодження волокон або змішаність полімерів змінюються властивості, наприклад, знижується міцність чи стабільність. Хімічна модифікація в регенерованих волокнах дозволяє змінювати полярність і, відповідно, контролювано впливати на експлуатаційні характеристики.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальшого розвитку у даному напрямі

Результати дослідження свідчать про наявність суттєвих відмінностей у підходах до оцінки експлуатаційних властивостей текстильних матеріалів залежно від походження сировини. Методи, що ефективно застосовуються у випадку матеріалів на основі первинної сировини, виявляються недостатніми у випадку використання вторинної через їхню варіабельність, неоднорідність та потенційну деградацію. В зв'язку з цим особливої актуальності набуває впровадження розширених хімічних, термічних, структурних та екологічних методів контролю, а також цифрових технологій моделювання. Дані методи дозволяють комплексно охопити параметри, що характеризують надійність та безпечність вторинної сировини. З точки зору хімічної будови, встановлено, що саме тип і полярність функціональних груп визначають такі ключові властивості, як гігроскопічність, міцність, комфортність і біорозкладність текстильних матеріалів. Подальші наукові опрацювання мають бути зосереджені на розробці гібридних методологій аналізу, що враховуватимуть складні взаємозв'язки між структурою, складом та експлуатаційною поведінкою матеріалів із вторинної сировини. Перспективним напрямом також є формування баз даних властивостей рециклінгових матеріалів для прогнозування їхньої поведінки та створення нормативно-технічної документації, яка була б адаптована до умов циркулярної економіки.

Література

1. Іщук Т., Іванішена Т. Напрямки використання вторинної сировини у легкій промисловості / Т. Іщук, Т. Іванішена // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2025. – № 2 (349). – С. 166–170. – <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-24>
2. Yatvitskiy, M., Ludwig, K., Gupman, S., Cobb, K., Cao, H. & Clarke-Sather, A. (2025). "Innovative Methods for Secondary Material Development in Mechanical Textile Recycling." *International Textile and Apparel Association Annual Conference Proceedings*, 81(1). <https://doi.org/10.31274/itaa.18903>

3. Fogue Matchum S., Sikame Tagne N.R., Huisken Mejouyo P.W., Tido Tiwa S., Wenga B., Njeugna E., Drean J.-Y., Bistac-Brogly S., Harzallah O. (2024). Investigation of chemical, physical and morpho-mechanical properties of banana-plantain stalk fibers for ropes and woven fabrics used in composite and limited-lifespan geotextile. *Heliyon*, 10(830), e29656. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29656>
4. Dolez P.I., Vermeersch O. (2017). Introduction to advanced characterization and testing of textiles. In: *Advanced Characterization and Testing of Textiles* (pp. 3–21). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100453-1.00001-5>
5. Bak P., Wierus K., Gontarska E. (2014). New research techniques of consumer textiles in terms of assessment of their useful properties. *Przegląd Włókienniczy*, 68(1), 19–22.
6. Li P., Liu L., Sun J., Zhao Y., Shang X. (2024). Application of thermodynamic methods in enhancing the antibacterial performance of textile materials. *International Journal of Heat and Technology*, 42(6), 1983–1993. <https://doi.org/10.18280/ijht.420615>
7. Singh N., Madhu A. (2024). Multifunctional modification of cotton fabric for antimicrobial, flame-retardant and oleophobic properties. *Cellulose Chemistry and Technology*, 58(7-8), 851–863. <https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2024.58.75>
8. Pereira M., López-Beceiro J., Díaz-Díaz A.-M., Álvarez-García A., Vázquez L.S., Artiaga R. (2024). Thermogravimetry as a tool to evaluate the contribution of different fabric constituents to fibre release. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(19), 10497–10509. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13287-1>
9. Jamshaid H., Mishra R., Militky J. (2016). Thermal and mechanical characterization of novel basalt woven hybrid structures. *Journal of the Textile Institute*, 107(4), 462–471. <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1034940>
10. Wang L. (2016). *Performance testing of textiles: Methods, technology and applications*. 1–244. ISBN 978-008100578-1, 978-008100570-5.
11. Räisänen R. (2017). The measurement of textile material properties. In: *Textile and Clothing Design Technology* (pp. 461–478). <https://doi.org/10.1201/9781315156163-17>
12. Chen F., Wang G., Jiang Z., Cheng H., Chen X., Yu Z., Zhang W. (2011). A novel 3-D testing system for the mechanical properties of fiber fabrics and textile composites. In: *2011 International Conference on Textile Engineering and Materials, ICTEM 2011. Advanced Materials Research*, 332–334, 1206–1209. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.332-334.1206>
13. Dehghan-Manshadi N., Alamdar-Yazdi A., Bidoki S.M. (2014). New funnel shaped nozzle for evaluation of the mechanical properties of woven fabric by the extraction method. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 104(2), 47–52.
14. Cybulska M., Jedraszek-Bomba A., Kuberski S., Wrzosek H. (2008). Methods of chemical and physicochemical analysis in the identification of archaeological and historical textiles. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 16(5), 67–73.
15. Hardin I.R. (2017). Investigation of textiles by analytical pyrolysis. In: *Modern Textile Characterization Methods* (pp. 175–206). <https://doi.org/10.1201/9780203746684>
16. De S.S., Basu G., Chattopadhyay S.N., Day A., Goswami K. (2006). Assessment of fibre quality and physical properties of sunnhemp fibres for its suitable applications in textiles. *Man-Made Textiles in India*, 49(12), 456–463.
17. Kaounides L., Yu H., Harper T., Cientifica. (2007). Nanotechnology innovation and applications in textiles industry: Current markets and future growth trends. *Materials Technology*, 22(4), 209–237. <https://doi.org/10.1179/175355507X250014>
18. Taştan Özkan E. Comparing sensorial comfort properties of cotton, cotton/linen and linen knitted fabrics // *Journal of Natural Fibers*. – 2024. – Vol. 21. – <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2364262>.
19. Wen Q., Zhang L., Chen Y. та ін. Novel applications of silk proteins based on their interactions with metal ions // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, No. 22. – P. 16053. – <https://doi.org/10.3390/su152216053>.
20. Basit A., Latif W., Baig S. та ін. The mechanical and comfort properties of viscose with cotton and regenerated fibers blended woven fabrics // *Materials Science*. – 2018. – Vol. 24. – <https://doi.org/10.5755/j01.ms.24.2.18260>.
21. Matamá T., Cavaco-Paulo A. Enzymatic modification of polyacrylonitrile and cellulose acetate fibres for textile and other applications // *Y: Advances in Textile Biotechnology* / ред. V.A. Nierstrasz, A. Cavaco-Paulo. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2010. – P. 98–131. – <https://doi.org/10.1533/9780857090232.2.98>.
22. Grishanov S. Structure and properties of textile materials // *Y: Handbook of Textile and Industrial Dyeing*, Vol. 1 / ред. M. Clark. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2011. – P. 28–63. – <https://doi.org/10.1533/9780857093974.1.28>.
23. Farias-Aguilar J.C., Ramírez Moreno M.J., Téllez-Jurado L., Balmori-Ramírez H. Low pressure and low temperature synthesis of polyamide-6 (PA6) using Na⁰ as catalyst // *Materials Letters*. – 2014. – Vol. 136. – P. 388–392. – <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.08.071>.
24. Thapliyal D., Verma S., Sen P. та ін. Natural fibers composites: origin, importance, consumption pattern, and challenges // *Journal of Composites Science*. – 2023. – Vol. 7, No. 12. – P. 506. – <https://doi.org/10.3390/jcs7120506>.
25. Periyasamy A.P., Militky J. Sustainability in regenerated textile fibers // *Y: Sustainability in the Textile and Apparel Industries*. – 2020. – P. 63–95. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-38013-7_4.

26. Stefan D.S., Bosomoiu M., Stefan M. Methods for natural and synthetic polymers recovery from textile waste // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, No. 19. – Art. 3939. – <https://doi.org/10.3390/polym14193939>.
27. Majumdar A., Shukla S., Singh A.A., Arora S. Circular fashion: Properties of fabrics made from mechanically recycled poly-ethylene terephthalate (PET) bottles // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2020. – Vol. 161. – Art. 104915. – <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104915>.
28. Erdogan U., Duran H., Selli F. Recycling of cellulose from vegetable fiber waste for sustainable industrial applications // *Industria Textila*. – 2019. – Vol. 70. – P. 37–41. – <https://doi.org/10.35530/IT.070.01.1574>.

References

1. Ishchuk T., Ivanishena T. Napryamki vikoristannya vtorinnoyi siroviny u legkij promislivosti / T. Ishuk, T. Ivanishena // *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. – 2025. – № 2 (349). – S. 166–170. – <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-24>
2. Yativitskiy, M., Ludwig, K., Gupman, S., Cobb, K., Cao, H. & Clarke-Sather, A. (2025). “Innovative Methods for Secondary Material Development in Mechanical Textile Recycling.” *International Textile and Apparel Association Annual Conference Proceedings*, 81(1). <https://doi.org/10.31274/itaa.18903>
3. Fogue Matchum S., Sikame Tagne N.R., Huiskens Mejouyo P.W., Tido Tiwa S., Wenga B., Njeugna E., Drea J.-Y., Bistac-Brogly S., Harzallah O. (2024). Investigation of chemical, physical and morpho-mechanical properties of banana-plantain stalk fibers for ropes and woven fabrics used in composite and limited-lifespan geotextile. *Heliyon*, 10(830), e29656. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29656>
4. Dolez P.I., Vermeersch O. (2017). Introduction to advanced characterization and testing of textiles. In: *Advanced Characterization and Testing of Textiles* (pp. 3–21). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100453-1.00001-5>
5. Bak P., Wierus K., Gontarska E. (2014). New research techniques of consumer textiles in terms of assessment of their useful properties. *Przegląd Włókienniczy*, 68(1), 19–22.
6. Li P., Liu L., Sun J., Zhao Y., Shang X. (2024). Application of thermodynamic methods in enhancing the antibacterial performance of textile materials. *International Journal of Heat and Technology*, 42(6), 1983–1993. <https://doi.org/10.18280/ijht.420615>
7. Singh N., Madhu A. (2024). Multifunctional modification of cotton fabric for antimicrobial, flame-retardant and oleophobic properties. *Cellulose Chemistry and Technology*, 58(7–8), 851–863. <https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2024.58.75>
8. Pereira M., Lopez-Beceiro J., Diaz-Diaz A.-M., Alvarez-Garcia A., Vazquez L.S., Artiaga R. (2024). Thermogravimetry as a tool to evaluate the contribution of different fabric constituents to fibre release. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(19), 10497–10509. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13287-1>
9. Jamshaid H., Mishra R., Militky J. (2016). Thermal and mechanical characterization of novel basalt woven hybrid structures. *Journal of the Textile Institute*, 107(4), 462–471. <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1034940>
10. Wang L. (2016). *Performance testing of textiles: Methods, technology and applications*. 1–244. ISBN 978-008100578-1, 978-008100570-5.
11. Raisanen R. (2017). The measurement of textile material properties. In: *Textile and Clothing Design Technology* (pp. 461–478). <https://doi.org/10.1201/9781315156163-17>
12. Chen F., Wang G., Jiang Z., Cheng H., Chen X., Yu Z., Zhang W. (2011). A novel 3-D testing system for the mechanical properties of fiber fabrics and textile composites. In: *2011 International Conference on Textile Engineering and Materials, ICTEM 2011. Advanced Materials Research*, 332–334, 1206–1209. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.332-334.1206>
13. Dehghan-Manshadi N., Alamdar-Yazdi A., Bidoki S.M. (2014). New funnel shaped nozzle for evaluation of the mechanical properties of woven fabric by the extraction method. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 104(2), 47–52.
14. Cybulska M., Jedraszek-Bomba A., Kuberski S., Wrzosek H. (2008). Methods of chemical and physicochemical analysis in the identification of archaeological and historical textiles. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 16(5), 67–73.
15. Hardin I.R. (2017). Investigation of textiles by analytical pyrolysis. In: *Modern Textile Characterization Methods* (pp. 175–206). <https://doi.org/10.1201/9780203746684>
16. De S.S., Basu G., Chattopadhyay S.N., Day A., Goswami K. (2006). Assessment of fibre quality and physical properties of sunnhemp fibres for its suitable applications in textiles. *Man-Made Textiles in India*, 49(12), 456–463.
17. Kaounides L., Yu H., Harper T., Cientifica. (2007). Nanotechnology innovation and applications in textiles industry: Current markets and future growth trends. *Materials Technology*, 22(4), 209–237. <https://doi.org/10.1179/175355507X250014>
18. Tastan Ozkan E. Comparing sensorial comfort properties of cotton, cotton/linen and linen knitted fabrics // *Journal of Natural Fibers*. – 2024. – Vol. 21. – <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2364262>.
19. Wen Q., Zhang L., Chen Y. ta in. Novel applications of silk proteins based on their interactions with metal ions // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, No. 22. – P. 16053. – <https://doi.org/10.3390/su152216053>.
20. Basit A., Latif W., Baig S. ta in. The mechanical and comfort properties of viscose with cotton and regenerated fibers blended woven fabrics // *Materials Science*. – 2018. – Vol. 24. – <https://doi.org/10.5755/j01.ms.24.2.18260>.
21. Matama T., Cavaco-Paulo A. Enzymatic modification of polyacrylonitrile and cellulose acetate fibres for textile and other applications // U: *Advances in Textile Biotechnology* / red. V.A. Nierstrasz, A. Cavaco-Paulo. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2010. – P. 98–131. – <https://doi.org/10.1533/9780857090232.2.98>.
22. Grishanov S. Structure and properties of textile materials // U: *Handbook of Textile and Industrial Dyeing*, Vol. 1 / red. M. Clark. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2011. – P. 28–63. – <https://doi.org/10.1533/9780857093974.1.28>.
23. Farias-Aguilar J.C., Ramirez Moreno M.J., Tellez-Jurado L., Balmori-Ramirez H. Low pressure and low temperature synthesis of polyamide-6 (PA6) using Na⁰ as catalyst // *Materials Letters*. – 2014. – Vol. 136. – P. 388–392. – <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.08.071>.
24. Thapliyal D., Verma S., Sen P. ta in. Natural fibers composites: origin, importance, consumption pattern, and challenges // *Journal of Composites Science*. – 2023. – Vol. 7, No. 12. – P. 506. – <https://doi.org/10.3390/jcs7120506>.
25. Periyasamy A.P., Militky J. Sustainability in regenerated textile fibers // U: *Sustainability in the Textile and Apparel Industries*. – 2020. – P. 63–95. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-38013-7_4.
26. Stefan D.S., Bosomoiu M., Stefan M. Methods for natural and synthetic polymers recovery from textile waste // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, No. 19. – Art. 3939. – <https://doi.org/10.3390/polym14193939>.
27. Majumdar A., Shukla S., Singh A.A., Arora S. Circular fashion: Properties of fabrics made from mechanically recycled poly-ethylene terephthalate (PET) bottles // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2020. – Vol. 161. – Art. 104915. – <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104915>.
28. Erdogan U., Duran H., Selli F. Recycling of cellulose from vegetable fiber waste for sustainable industrial applications // *Industria Textila*. – 2019. – Vol. 70. – P. 37–41. – <https://doi.org/10.35530/IT.070.01.1574>.