

В. В. МИЦА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технологій і конструювання швейних виробів
Хмельницький національний університет
ORCID: 0000-0002-5453-9787

М. Л. РЯБЧИКОВ

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технологій легкої промисловості
Луцький національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-9382-7562

ЦИФРОВІ МЕТОДИ 3D ПРОТОТИПУВАННЯ ПРИ СТВОРЕННІ РОЗУМНИХ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З КЕРОВАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

У статті досліджено перспективи застосування технологій 3D-друку в текстильній промисловості, зокрема у створенні смарт-текстильних матеріалів. Проаналізовано переваги та виклики, пов'язані з інтеграцією адитивних технологій у виробництво текстильних матеріалів. Особливу увагу приділено розробці нових матеріалів, що поєднують традиційні текстильні характеристики з можливостями 3D-прототипування.

У ході дослідження підтверджено можливість синтезу тривимірних текстильних структур, здатних змінювати свої механічні та фізичні властивості залежно від умов експлуатації. Встановлено, що форма поперечного перерізу структурних елементів суттєво впливає на жорсткість матеріалу. Використання трапецієподібних або порожнистих конструкцій дозволяє керувати регулювати жорсткість, що відкриває нові можливості для створення адаптивних матеріалів.

Досліджено також методи регулювання повітропроникності текстильних структур за допомогою 3D-друкованих пелюсткових елементів, здатних змінювати свою форму під дією аеродинамічних сил. Це дає змогу розробляти матеріали з контрольованою вентиляцією, що може знайти застосування у виробництві спортивного одягу, захисного спорядження та медичних виробів.

Окрему увагу приділено використанню магнітних складових у процесі 3D-друку для створення інтелектуальних адаптивних структур, здатних змінювати свої характеристики під впливом електромагнітного поля. Такий підхід відкриває можливості для динамічного керування властивостями текстильних матеріалів у режимі реального часу.

Перспективними напрямками подальших досліджень є вдосконалення матеріалів для 3D-друку, розробка методів інтеграції електропровідних елементів у текстильні структури та оптимізація технологій швидкого прототипування для створення функціонально адаптивних текстильних виробів.

Ключові слова: 3D-друк текстильних матеріалів, адитивні технології, смарт-текстиль, повітропроникність, жорсткість.

V. V. MYTSA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Garment Technology and Design
Khmelnytskyi National University
ORCID: 0000-0002-5453-9787

M. L. RIABCHYKOV

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Consumer Industry Technology
Lutsk National Technical University
ORCID: 0000-0002-9382-7562

DIGITAL 3D PROTOTYPING METHODS FOR CREATING SMART TEXTILE MATERIALS WITH CONTROLLABLE PARAMETERS

The article explores the prospects of applying 3D printing technologies in the textile industry, particularly in the creation of smart textile materials. It analyzes the advantages and challenges associated with the integration of additive technologies into the production of textile materials. Special attention is given to the development of new materials that combine traditional textile characteristics with the capabilities of 3D prototyping.

The study confirms the possibility of synthesizing three-dimensional textile structures capable of altering their mechanical and physical properties depending on operational conditions. It is established that the cross-sectional shape of structural elements significantly affects the material's stiffness. The use of trapezoidal or hollow constructions allows for controlled adjustment of stiffness, opening new opportunities for creating adaptive materials.

Methods for regulating the air permeability of textile structures using 3D-printed petal elements that can change their shape under aerodynamic forces are also investigated. This enables the development of materials with controlled ventilation, which can be applied in the production of sportswear, protective gear, and medical products.

Particular attention is given to the use of magnetic components in the 3D printing process to create intelligent adaptive structures capable of changing their characteristics under the influence of an electromagnetic field. This approach opens possibilities for dynamic control of textile material properties in real-time.

Promising directions for further research include improving materials for 3D printing, developing methods for integrating conductive elements into textile structures, and optimizing rapid prototyping technologies to create functionally adaptive textile products.

Key words: 3D printing of textile materials, additive technologies, smart textiles, air permeability, stiffness.

Постановка проблеми

Попри стрімкий розвиток технологій 3D-друку, їхнє широкомасштабне застосування у текстильній промисловості поки що залишається обмеженим. Інтеграція тривимірного (3D) друку у виробництво текстильних матеріалів демонструє значний потенціал, однак супроводжується низкою викликів та технічних обмежень.

Однією з ключових проблем є підбір матеріалів, які відповідатимуть вимогам до м'якості, еластичності, гнучкості та повітропроникності. Більшість 3D-принтерів працюють з жорсткими або напівгнучкими полімерними матеріалами, які не забезпечують необхідних тактильних і механічних властивостей, характерних для традиційних текстильних тканин. Розробка інноваційних полімерних композитів, що поєднуюватимуть ергономічність текстилю з технологічними перевагами 3D-друку, залишається однією з основних наукових і технічних задач у цій галузі.

Окремим напрямком досліджень є розробка розумного (смарт) текстилю – матеріалів, здатних реагувати на зовнішні впливи, зокрема зміни температури, рух, тиск, електричні сигнали або біометричні показники. Використання 3D-друку у створенні смарт-текстильних матеріалів відкриває нові можливості у таких сферах, як медична реабілітація, спортивне екіпування, військова амуніція, адаптивний одяг тощо. На сьогодні дослідження технологій 3D-друку для смарт-текстилю перебувають на початковій стадії, а наявні конструкційні рішення ще не відповідають повною мірою вимогам гнучкості, довговічності та комфорту. Подальші розробки у цьому напрямку є перспективними та можуть стати основою для інноваційних рішень у текстильній інженерії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Методи тривимірного друку належать до інноваційних виробничих технологій, що дозволяють створювати структури довільної геометрії [1]. Однак їхнє впровадження у виробництво одягу поки що переважно обмежується виготовленням певних аксесуарів і декоративних елементів [2], деталей взуття [3]. Значний вплив на розвиток адитивних технологій у легкій промисловості має комплексна цифровізація виробничих процесів. В дослідженнях [4, 5] розглядається взаємозв'язок між використанням цифрових інструментів та можливостями їх інтеграції у створення текстильних матеріалів з новими функціональними властивостями.

Відповідно до закордонних досліджень, технології 3D-друку можуть стати перспективними напрямом для створення текстильних структур [6]. При цьому декоративне оздоблення виробів за допомогою адитивних технологій лише частково вирішує проблему інтеграції швидкого прототипування у текстильну промисловість [7]. У дослідженні [8] вперше запропоновано поєднати можливості 3D-прототипування з перспективами розумних текстильних систем. Традиційно смарт-текстиль передбачає створення вбудованих сенсорів, антен, провідних схем та інших електронних компонентів безпосередньо на текстильних матеріалах [9]. Однак можливості цифрового 3D друку значно ширші.

Практично необмежені можливості у формуванні довільної геометрії виробу відкривають перспективи проєктування текстильних матеріалів з керованими механічними та фізичними властивостями. Зокрема, геометричні характеристики волокон суттєво впливають на жорсткість матеріалу [10] та його повітропроникність [11, 12]. На жаль, методи швидкого прототипування поки що не набули широкого застосування у створенні структур з можливістю регулювання цих параметрів. Керованість властивостей друківаних текстильних матеріалів може забезпечуватися інтеграцією порошкових магнітних матеріалів [13, 14], що дозволяє модифікувати склад матеріалів для 3D-друку. Крім того, перспективним напрямом є вбудовування електропровідних елементів вздовж структурних текстильних компонентів безпосередньо в процесі 3D-друку [15].

Формулювання мети статті

Мета дослідження – обґрунтувати можливість синтезу тривимірних текстильних структур, орієнтованих на виробництво методами 3D-прототипування, які здатні самостійно регулювати певні параметри, зокрема жорсткість та повітропроникність.

Виклад основного матеріалу дослідження

Синтез текстильних структур для 3D-друку

Текстильні матеріали, з геометричної точки зору, зазвичай являють собою мережу комірок, що складається з певного поєднання структурних елементів, які повторюються у площині або просторі. При традиційному створенні текстильних структур використовуються структурні елементи у вигляді волокон і ниток різного походження, переріз яких зазвичай є стандартним і наближається до кола. Застосування 3D-друку вперше дозволяє створювати геометричні структури довільної форми, що відкриває нові можливості у проектуванні текстильних матеріалів. Переріз друкованих структурних елементів може мати різноманітні форми, включаючи коло, квадрат, трапецію, еліпс або інші довільні конфігурації. Формування волокон у цифровому середовищі відбувається за допомогою твердотільного моделювання, де застосовується метод віртуального екструдуювання (sweeping) плоскої геометричної фігури вздовж заданої траєкторії. Цей підхід усуває необхідність використання дорогого технологічного обладнання та забезпечує гнучкість у проектуванні. Побудована таким чином мережа віртуальних волокон створюється у цифровому середовищі, що дозволяє здійснювати її параметричне налаштування та надалі виготовляти отримані структури методом 3D-друку.

Окремим завданням при синтезі текстильних структур є розробка ефективних методів з'єднання волокон, оскільки характер взаємодії між окремими елементами може суттєво впливати на механічні характеристики матеріалу. Дане питання потребує подальших досліджень та оптимізації конструктивних рішень. На рис. 1 представлені потенційні текстильні структури, які можуть бути виготовлені за допомогою 3D-прототипування, з використанням елементів різного перерізу.

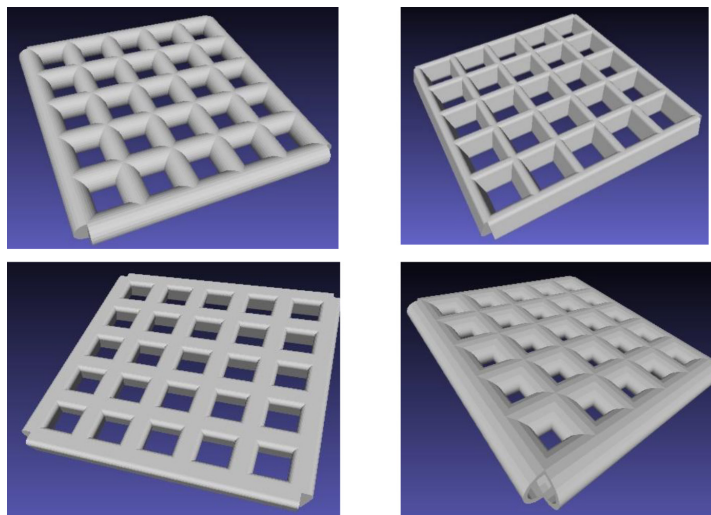


Рис. 1. Можливі структури текстильних виробів, виготовлені методами 3D-прототипування

Синтез структур з регулюванням жорсткості

Очевидно, що зміна форми поперечного перерізу структурних елементів суттєво впливає на механічні характеристики отриманих текстильних мереж. Зокрема, параметри жорсткості таких структур значною мірою визначаються жорсткістю окремих елементів, яка, у свою чергу, залежить від геометрії їхнього перерізу та моменту інерції.

Традиційно жорсткість структурних елементів оцінюється через момент інерції їхнього поперечного перерізу. Для порівняння можна розглянути моменти інерції для циліндричного елемента діаметром D та трапецієподібного елемента з більшою основою b , меншою основою a і висотою h :

$$J_c = \frac{\pi D^4}{64}, \quad (1)$$

$$J_t = \frac{h^3(b^2 + 4ba + a^2)}{36(a+b)}. \quad (2)$$

Очевидно, що при однаковій площі поперечного перерізу момент інерції I , а отже і жорсткість, має значно вищі значення для трапецієподібного перерізу. Це пояснюється нерівномірним розподілом маси відносно нейтральної осі, що збільшує опір елемента до згинальних деформацій.

Аналогічні висновки можна зробити і для порожнистих елементів, виготовлених за допомогою методів просторового прототипування. Наприклад, розглянемо переріз у вигляді кола. Якщо на таку структуру діють стискаючі

сили, то її поперечний переріз може трансформуватися в еліпс, що суттєво змінює її механічні властивості. Таким чином, використання перерізів змінної геометрії (рис. 2) дозволяє контролювати жорсткість текстильних структур, що відкриває можливості для створення адаптивних матеріалів, здатних змінювати свої механічні властивості залежно від умов експлуатації.

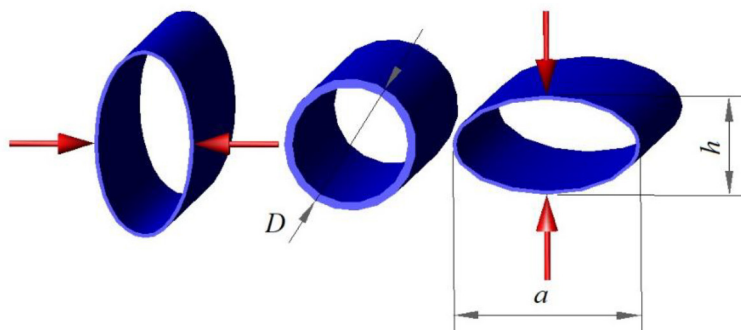


Рис. 2. Елементи текстильних структур зі змінною жорсткістю

Момент інерції еліптичного перерізу, який визначає жорсткість волокна, розраховується за формулою:

$$J = \frac{\pi ab^3}{64}, \quad (3)$$

де a – велика піввісь еліпса, b – мала піввісь.

Залежно від орієнтації еліпса щодо осі навантаження, жорсткість волокна може збільшуватися або зменшуватися. Це дозволяє керувати змінювати механічні характеристики текстильних структур у відповідь на зовнішні впливи.

Одним з ключових питань є визначення джерела сил, здатних деформувати тонкостінні волокна для зміни їхньої геометрії. Одним із перспективних підходів є включення магнітних порошоків у склад друківаних структур, що надає матеріалу магнітні властивості. Завдяки цифровим методам 3D-прототипування можливо локально змінювати вміст магнітних компонентів, що дозволяє диференційовано регулювати механічні характеристики матеріалу.

Під час 3D-друку у порожнисту структуру може бути інтегрований струмопровідний елемент (рис. 3).

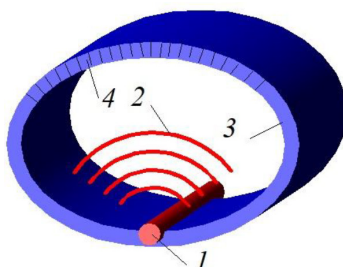


Рис. 3. Сили деформування елементів структури під дією електромагнітного поля

При проходженні електричного струму через елемент 1, навколо нього утворюється магнітне поле 2, яке впливає на тонкостінну еліптичну конструкцію 3. Вплив відбувається на зону з найбільшим вмістом магнітних складових 4, що спричиняє зміну геометрії волокна.

Внаслідок цього змінюється жорсткість структурних елементів, а отже, і механічні характеристики всього синтезованого матеріалу. Такий процес може здійснюватися як у режимі примусового регулювання, так і автоматично, створюючи адаптивну (смайт) структуру, здатну динамічно змінювати свої властивості під впливом зовнішніх факторів.

Синтез структур з регулюванням повітропроникності

Розширений аналіз 3D-друкованих текстильних матеріалів дозволяє розглядати не лише жорсткість, але й такі важливі характеристики, як повітропроникність. Повітропроникність визначає здатність матеріалу пропускати повітря під впливом перепаду тиску з обох сторін. Вона є критично важливим параметром для одягу, технічних текстильних матеріалів, медичних виробів та інших застосувань.

Стандартний підхід до визначення повітропроникності передбачає застосування методу диференційного тиску, який відповідає міжнародним стандартам ISO 9237, ASTM D737. Суть цього методу полягає у визначенні об'єму повітря, що проходить через зразок тканини під дією перепаду тиску за певний проміжок часу.

Традиційно вважається, що ключовими факторами, які впливають на повітропроникність є щільність, товщина матеріалу та структура плетіння. Однак у традиційних текстильних волокнах форма поперечного перерізу структурного елемента залишається майже незмінною, що суттєво обмежує можливості контролю опору повітряного потоку.

На відміну від традиційного підходу, використання 3D-друку дозволяє синтезувати довільні просторові форми структурних елементів, що відкриває нові можливості для регулювання повітропроникності шляхом контролю геометрії структурних елементів.

При проходженні повітряного потоку крізь отвори текстильного матеріалу виникають місцеві опори, спричинені змінами форми зовнішніх кордонів отвору. Очевидно, що найбільші газодинамічні опори у 3D-друкованих текстильних структурах спостерігаються при використанні елементів з перерізом у вигляді трапеції.

При порівнянні обтікання циліндричних і призматичних елементів важливо врахувати їхні аеродинамічні характеристики, оскільки їхня взаємодія з потоком повітря суттєво відрізняється. Втрати тиску під час обтікання перешкод визначаються рівнянням:

$$\Delta p = C_d \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4)$$

де: v – швидкість потоку, ρ – густина повітря, C_d – коефіцієнт опору, який залежить від форми поверхні.

Зокрема, для ідеального циліндра в потоці $C_d \approx 0.47$ основний внесок у втрати енергії дає тискова складова (відрив потоку за тілом). Повітряний потік обтікає циліндр, утворюючи зони низького тиску позаду, що спричиняє вихровий слід (вихори Кармана).

Для призматичних елементів коефіцієнт опору залежить від співвідношення сторін і орієнтації у потоці. Зокрема, для квадратного перерізу $C_d \approx 1.05$. При збільшенні співвідношення сторін для форми трапеції коефіцієнт опору збільшується наближаючись до $C_d \approx 2.0$. При цьому домінують лобове гальмування та турбулентний відрив потоку на гострих гранях, що створює великі зони низького тиску та суттєво підвищує опір потоку. При однакових розмірах і швидкості набігаючого потоку циліндр зазвичай має менший аеродинамічний опір.

Вимоги до повітропроникності текстильних матеріалів можуть суттєво відрізнятися залежно від призначення виробу. Для спортивного та захисного одягу, який використовується в умовах сильного вітру, важливо мати можливість регулювання параметрів проходження повітря. Оптимальним рішенням є текстильні матеріали, які можуть пропускати спокійне повітря та гальмувати потоки високої швидкості.

Сучасні технології 3D-прототипування дозволяють створювати складні геометричні структури, які неможливо отримати традиційними методами. Одна з таких концепцій – пелюсткова структура (рис. 4), що складається з поздовжніх (1) та поперечних (2) елементів, між якими формуються комірки з гнучкими пелюстками (3).

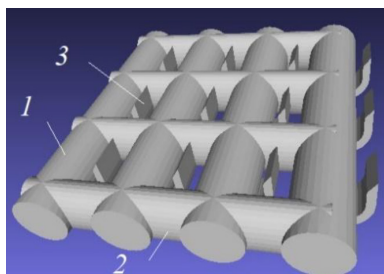


Рис. 4. Пелюсткова структура тривимірного текстильного матеріалу

Пелюстки на друкованих волокнах виконують роль гнучких елементів, які здатні деформуватися під дією зовнішніх сил (рис. 5). У випадках низької жорсткості пелюсток їхній прогин може бути порівняним з відстанню між окремими елементами текстильного матеріалу.

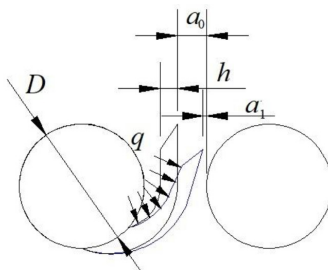


Рис. 5. Деформації пелюсткових елементів під дією стиснутого повітря

При набіганні повітряного потоку з надлишковим тиском p виникає розподілене навантаження $q = p \cdot b$, де b – ширина пелюстки, що дорівнює відстані між поперечними елементами текстильної структури.

При цьому максимальний прогин гнучкого елемента довжиною D під впливом стиснутого повітря визначається за формулою:

$$\Delta = \frac{3}{2} \frac{pD^4}{Eh^3}, \quad (5)$$

де: Δ – прогин гнучкого елемента пелюстки; p – тиск стиснутого повітря; D – довжина гнучкого елемента пелюстки; E – модуль Юнга (модуль пружності матеріалу пелюстки); h – товщина пелюстки.

Для гнучких пелюсткових елементів величина їхнього прогину може бути порівнянною з відстанню між структурними, що створює можливість саморегулювання повітропроникності матеріалу.

У випадку низької швидкості повітряного потоку пелюстки залишаються притиснутими до поверхні циліндричних елементів, не створюючи значного аеродинамічного опору. При збільшенні швидкості потоку зростає динамічний тиск, що викликає прогин пелюсток, які перекидають проміжки між структурними елементами, тим самим зменшуючи ефективний коефіцієнт повітропроникності.

Такий ефект можливий завдяки складній просторовій формі текстильної структури, яку можна реалізувати виключно методами 3D-друку (рис. 6).



Рис. 6. Пелюсткова структура, виготовлена методами 3D-прототипування

Застосування магнітних матеріалів у 3D-друкованих текстильних структурах дозволяє створити смарт-ефекти, що забезпечують адаптивне регулювання повітропроникності відповідно до заданих умов експлуатації. Зокрема, пелюстки текстильних структур можуть бути виготовлені з магнітними наповнювачами, що змінюють свої механічні властивості під впливом електромагнітного поля.

Крім того, у поздовжніх елементах можуть бути інтегровані електропровідні компоненти, через які може проходити електричний струм. Цей струм генерує магнітне поле, здатне деформувати гнучкі пелюстки. В результаті цього процесу повітропроникність текстильного матеріалу може контролюватися в реальному часі, забезпечуючи динамічну адаптацію до змінних умов навколишнього середовища.

Висновки

Технології 3D-друку демонструють значний потенціал для впровадження у текстильну промисловість, зокрема у виробництво смарт-текстилю. Однак їх широкомасштабне використання наразі обмежене технологічними та матеріалознавчими викликами, серед яких ключову роль відіграють фізико-механічні властивості матеріалів. Розробка нових полімерних композицій, що поєднують характеристики традиційних текстильних матеріалів з можливостями 3D-друку, залишається актуальним завданням для дослідників і виробників.

Проведене дослідження підтвердило можливість синтезу тривимірних текстильних структур з можливістю керованої зміни механічних та фізичних характеристики, зокрема жорсткості та повітропроникності. Було встановлено, що форма поперечного перерізу структурних елементів суттєво впливає на жорсткість матеріалу. Використання трапецієподібних або порожнистих конструкцій дозволяє контролювати жорсткість, забезпечуючи оптимальні характеристики для конкретних експлуатаційних умов.

Розглянуто можливість регулювання повітропроникності текстильних матеріалів шляхом використання 3D-друкованих пелюсткових структур, які змінюють свою форму під впливом аеродинамічних сил. Це відкриває перспективи для створення матеріалів зі змінною вентиляцією, що може бути корисним у виробництві спеціалізованого одягу для екстремальних умов, спортивного спорядження та медичних виробів.

Крім того, показано, що інтеграція магнітних компонентів у процесі 3D-друку дозволяє створювати адаптивні текстильні структури, здатні змінювати свої фізико-механічні властивості під впливом електромагнітного поля. Такий підхід розширює можливості динамічного керування характеристиками текстильних матеріалів у реальному часі.

Таким чином, результати дослідження підтверджують перспективність застосування 3D-друку в текстильній галузі. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію матеріалів для друку, розробку методів інтеграції електропровідних елементів у текстильні структури та вдосконалення технологій швидкого прототипування для створення функціонально адаптивних текстильних виробів.

Список використаної літератури

1. Бачинський В., Шкурпіт О., Гнатюк О. Розробка методу вибору моделі 3D-принтера для виготовлення деталей для ремонту і модернізації безпілотних літальних апаратів в умовах бойових дій. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія : Військові та технічні науки*. 2024. № 2. С. 150–157. <https://doi.org/10.32453/3.v95i2.1667>
2. Трегуб Н.Є., Альніков Є.М., Шиянова А.О. Сучасний стан наукової думки та досягнення технологій 3D-принтерного друку в дизайні. *Традиції та новатії у вищій архітектурно-художній освіті*. 2017. Вип. 1. С. 137–147. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tnvakho_2017_1_23
3. Polishchuk, A., Slavinska, A., Polishchuk, O., Mytsa, V. (2023). Production of details of difficult designs of footwear and clothes with use of technologies of additive production. *AIP Conference Proceedings*. 7 December 2023; 2889 (1): 040009. <https://doi.org/10.1063/5.0172971>
4. Рябчиков М.Л., Мица В. Модель комплексної цифровізації в індустрії моди. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 4(91). С. 217–225. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.28>
5. Мица В. Цифрова трансформація fashion-індустрії: ключові технологічні тренди та інновації. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 4(339). С. 296–300. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-47>
6. Zhang, J., Shen, D., Yu, Y., Bao, D., Li, C., Qin, J. (2024). Direct-print thermally responsive 4D textiles by depositing PLA on prestretched fabrics. *Rapid Prototyping Journal*. 30, 2, 277–286. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2023-0125>
7. Kechagias, J.D., Chaidas, D., Spahiu, T. (2024). Decorative 3D printing on textiles using elastomer TPU filament under different printing conditions. *Rapid Prototyping Journal*. 30, 10, 2033–2042. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2024-0106>
8. Tkac, J., Hajnys, J., Mizera, O., Molnar, V., Fedorko, G., Cepova, L. (2024). Additive technologies use to create structures for technical fabric replacement. *Journal of Industrial Textiles*. 54. <https://doi.org/10.1177/15280837241245121>
9. Mytsa, V., Riabchykov, M. (2024) Improvement of intelligent systems for creating personalized products, *CEUR Workshop proceedings*, 3896, 235–247. <https://ceur-ws.org/Vol-3896/>
10. Sadretdinova N. V., Yatsenko M. V. (2022). Wear comfort evaluation of textile from different types of raw materials using an integrated approach. *Fashion Industry / (3)*, 26–35. <https://doi.org/10.30857/2706-5898.2021.3.1/>
11. Пелик Л.В., Остапчук О.В. Дослідження повітропроникності текстильних матеріалів із використанням луб'яних волокон, *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2020. № 2, 181–184. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2020-283-2-181-184>
12. Shoaib, M., Jamshaid, H., Mishra, R.K., Iqbal, K., Müller, M., Chandan, V., Alexiou Ivanova, T. (2024). Flammability and Thermoregulation Performance of Multilayer Protective Clothing Incorporated with Phase Change Materials. *Materials*. 17(23), 5826. <https://doi.org/10.3390/ma17235826>
13. Рябчиков М., Назарчук Л., Стицюк В., Ткачук О., Каган О. Перспективи впровадження магнітних текстильних матеріалів з вмістом наноскладових на основі дво і тривалентного оксидів заліза. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2022. 311(4), 220–226. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-311-4-220-226>
14. Riabchykov, M., Alexandrov, A., Trishch, R., Nikulina, A., Korolyova, N. (2022). Prospects for the development of smart clothing with the use of textile materials with magnetic properties, *Tekstilec*. 65(1), 36–43. <https://doi.org/10.14502/tekstilec.65.2021050>
15. Zhang, Z., et al. (2025). Kongjun zhu study of the design and performance of multibody carbon fiber structural supercapacitors with superior mechanical and electrochemical properties, *ACS Applied Energy Materials*. 8, 4, 2485–2497. <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c03072>

References

1. Bachynskyi V., Shkurpit O., Hnatiuk O. Rozrobka metodu vyboru modeli 3D-pryntera dlia vyhotovlennia detalei dlia remontu i modernizatsii bezpilotnykh litalnykh aparativ v umovakh boiovykh dii. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Seriiia : Viiskovi ta tekhnichni nauky*. 2024. № 2. S. 150–157. <https://doi.org/10.32453/3.v95i2.1667>
2. Trehub N.Ye., Alnikov Ye.M., Shyianova A.O. Suchasnyi stan naukovoï dumky ta dosiahnennia tekhnolohii 3D-prynternoho druku v dyzaini. *Traditsii ta novatsii u vyshchii arkhitekturno-khudozhnii osviti*. 2017. Vyp. 1. S. 137–147. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tnvakho_2017_1_23

3. Polishchuk, A., Slavinska, A., Polishchuk, O., Mytsa, V. (2023). Production of details of difficult designs of footwear and clothes with use of technologies of additive production. *AIP Conference Proceedings*. 7 December 2023; 2889(1): 040009. <https://doi.org/10.1063/5.0172971>
4. Riabchykov M. L., Mytsa V. Model kompleksnoi tsyfrovizatsii v industrii mody. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. 2024. № 4(91). S. 217–225. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.28>
5. Mytsa V. Tsyfrova transformatsiia fashion-industrii: kluchovi tekhnologichni trendy ta innovatsii. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*. 2024. № 4(339). S. 296–300. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-47>
6. Zhang, J., Shen, D., Yu, Y., Bao, D., Li, C., Qin, J. (2024). Direct-print thermally responsive 4D textiles by depositing PLA on prestretched fabrics. *Rapid Prototyping Journal*. 30, 2, 277–286. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2023-0125>
7. Kechagias, J. D., Chaidas, D., Spahiu, T. (2024). Decorative 3D printing on textiles using elastomer TPU filament under different printing conditions. *Rapid Prototyping Journal*. 30, 10, 2033–2042. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2024-0106>
8. Tkac, J., Hajnys, J., Mizera, O., Molnar, V., Fedorko, G., Cepova, L. (2024). Additive technologies use to create structures for technical fabric replacement. *Journal of Industrial Textiles*. 54. <https://doi.org/10.1177/15280837241245121>
9. Mytsa, V., Riabchykov, M. (2024) Improvement of intelligent systems for creating personalized products, *CEUR Workshop proceedings*, 3896, 235–247. <https://ceur-ws.org/Vol-3896/>
10. Sadretdinova N. V., Yatsenko M. V. (2022). Wear comfort evaluation of textile from different types of raw materials using an integrated approach. *Fashion Industry / (3)*, 26–35. <https://doi.org/10.30857/2706-5898.2021.3.1/>
11. Pelyk L. V., Ostapchuk O. V. Doslidzhennia povitropronyknosti tekstylnykh materialiv iz vykorystanniam lubianykh volokon, *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. 2020. № 2, 181–184. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2020-283-2-181-184>
12. Shoaib, M., Jamshaid, H., Mishra, R. K., Iqbal, K., Müller, M., Chandan, V., Alexiou Ivanova, T. (2024). Flammability and Thermoregulation Performance of Multilayer Protective Clothing Incorporated with Phase Change Materials. *Materials*. 17(23), 5826. <https://doi.org/10.3390/ma17235826>
13. Riabchykov M., Nazarchuk L., Stytsiuk V., Tkachuk O., Kahan O. Perspektyvy vprovadzhennia mahnitnykh tekstylnykh materialiv z vmistom nanoskladovykh na osnovi dvo i tryvalentnoho oksydiv zaliza. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2022. 311(4), 220–226. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-311-4-220-226>
14. Riabchykov, M., Alexandrov, A., Trishch, R., Nikulina, A., Korolyova, N. (2022). Prospects for the development of smart clothing with the use of textile materials with magnetic properties, *Tekstilec*. 65(1), 36–43. <https://doi.org/10.14502/tekstilec.65.2021050>
15. Zhang, Z., et al. (2025). Kongjun zhu study of the design and performance of multibody carbon fiber structural supercapacitors with superior mechanical and electrochemical properties, *ACS Applied Energy Materials*. 8, 4, 2485–2497. <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c03072>