

ІЩУК ТЕТЯНА

Хмельницький національний університет, Україна

e-mail: ishchuk.tetiana@khnmu.edu.ua<https://orcid.org/0009-0009-8679-9020>

ІННОВАЦІЇ ТА ЦИФРОВІЗАЦІЯ У ХІМІЧНІЙ І ТЕКСТИЛЬНІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ: ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета. Комплексний аналіз сучасних інноваційних і цифрових технологій у хімічній та текстильній промисловості з акцентом на їхню роль у створенні спеціальних текстильних матеріалів (захисного, медичного та функціонального призначення) із заданими експлуатаційними властивостями та можливістю їх цілеспрямованого проєктування.

Методи дослідження ґрунтуються на бібліометричному аналізі наукових публікацій, індексованих у базі даних Scopus за 2010–2025 рр., за сімома тематичними пошуковими запитами, а також контент-аналізі відібраних літературних джерел. Оцінювали абсолютну кількість результатів, їх відносну представленість і часову динаміку за досліджуваними тематичними напрямками.

Результати. Встановлено суттєві відмінності у масштабах і динаміці публікаційної активності за досліджуваними тематичними напрямками. Найбільшу частку в сумарній кількості результатів пошуку становили напрями «advanced textile materials» (44,9%) та «digital transformation of manufacturing» (21,0%). Після 2020 року найбільш виражене зростання публікаційної активності спостерігалось у сфері цифрової трансформації виробництва. Контент-аналіз літературних джерел підтвердив зростання ролі штучного інтелекту, машинного навчання, цифрових двійників, наноматеріалів і цифрового проєктування у створенні функціональних та спеціальних текстильних матеріалів.

Наукова новизна полягає у поєднанні порівняльного аналізу публікаційної динаміки за сімома тематичними пошуковими запитами Scopus із контент-аналізом сучасних цифрових технологій та встановленні їх ролі у прогнозуванні й цілеспрямованому формуванні властивостей спеціальних текстильних матеріалів захисного, медичного та функціонального призначення.

Практичне значення полягає у можливості застосування отриманих результатів для інженерного проєктування текстильних матеріалів із керованими функціональними характеристиками, оптимізації технологічних процесів їх виробництва та підвищення ефективності впровадження інновацій у промислову практику.

Ключові слова: цифровізація; текстильні матеріали; smart-текстиль; наноматеріали; хімічна інженерія.

INNOVATIONS AND DIGITALIZATION IN THE CHEMICAL AND TEXTILE INDUSTRIES: PROSPECTS FOR SPECIAL TEXTILE MATERIALS

ISHCHUK TETIANA

Khmelnytskyi National University, Ukraine

Purpose. The purpose of the study is a comprehensive analysis of modern innovative and digital technologies in the chemical and textile industries with a focus on their role in the development of special textile materials for protective, medical, and functional applications with predetermined performance properties and the possibility of their targeted design.

Methodology. The study is based on a bibliometric analysis of scientific publications indexed in the Scopus database from 2010 to 2025 using seven thematic search queries, combined with a content analysis of selected literature sources. The absolute number of search results, their relative representation, and temporal dynamics across the investigated thematic areas were evaluated.

Results. Significant differences were identified in the scale and dynamics of publication activity across the investigated thematic areas. The largest shares of the total search results were recorded for “advanced textile materials” (44.9%) and “digital transformation of manufacturing” (21.0%). After 2020, the most pronounced increase in publication activity was observed in the field of digital transformation of manufacturing. The content analysis confirmed the growing role of artificial intelligence, machine learning, digital twins, nanomaterials, and digital design in the development of functional and special textile materials.

Scientific novelty. The scientific novelty lies in combining a comparative analysis of publication dynamics across seven thematic Scopus search queries with a content analysis of contemporary digital technologies, as well as in determining their role in predicting and purposefully tailoring the properties of special textile materials for protective, medical, and functional applications.

Practical significance. The practical significance of the research consists in the possibility of applying the obtained results for engineering design of textile materials with controlled functional characteristics, optimization of technological production processes, and increasing the efficiency of innovation implementation in industrial practice.

Keywords: digitalization; textile materials; smart textiles; nanomaterials; chemical engineering.

Вступ. Сучасна хімічна та текстильна промисловість розвивається в умовах глибокої цифрової трансформації, що формує нову парадигму матеріалознавства, орієнтовану на створення функціональних та інтелектуальних текстильних систем. Smart-текстиль еволюціонує як міждисциплінарна галузь, що поєднує матеріалознавство, хімічну інженерію, електроніку та комп'ютерні науки, забезпечуючи розширення функцій традиційних текстильних матеріалів від пасивних до адаптивних і інтерактивних систем [1, 2].

Практичні виклики сучасної промисловості включають необхідність підвищення ефективності виробництва, зниження енергоспоживання, екологізацію технологічних процесів та скорочення циклу розробки нових матеріалів. У цьому контексті цифровізація виробництва, впровадження

цифрових двійників та інтелектуальних систем керування стають ключовими інструментами оптимізації життєвого циклу текстильних матеріалів [3], [4].

Актуальність теми зумовлена експоненціальним зростанням наукових досліджень у сфері smart-textiles, де середній темп приросту публікацій становить близько 22% щорічно, що свідчить про високу динаміку розвитку та міждисциплінарний характер галузі [1]. Після 2020 року спостерігається суттєве посилення інтеграції технологій Industry 4.0, включаючи штучний інтелект, машинне навчання та цифрові двійники, у процеси проектування та виробництва функціональних матеріалів [5, 6]. Особливу роль відіграє концепція data-driven materials science, яка дозволяє здійснювати прогнозування властивостей матеріалів на основі великих масивів даних та чисельного моделювання, що

істотно підвищує точність інженерних рішень і скорочує час інноваційного циклу [3]. Таким чином, доцільність дослідження визначається необхідністю переходу від емпіричних методів до цифрово-інтегрованих підходів у матеріалознавстві.

У роботах [7–9] показано широке застосування наноматеріалів, зокрема оксидів металів і вуглецевих наноструктур, для функціоналізації та створення smart-текстильних систем. Паралельно цифрова трансформація текстильної галузі супроводжується впровадженням технологій Industry 4.0, штучного інтелекту та інтелектуальних виробничих систем [3, 5, 6]. Окремим напрямом є впровадження цифрових двійників у текстильне виробництво, що забезпечує підвищення ефективності процесів, зниження дефектності продукції та енергозбереження [3, 4]. Разом із тим, попри значний науковий прогрес, зберігається ряд невирішених проблем, серед яких: обмежена масштабованість лабораторних рішень до промислового рівня, недостатня довготривала стабільність функціональних покриттів, відсутність уніфікованих стандартів оцінювання smart-текстилю та недостатня інтеграція багаторівневого моделювання у виробничі цифрові платформи [1].

Таким чином, дана робота присвячена системному аналізу інноваційних і цифрових технологій у хімічній та текстильній промисловості з акцентом на роль комп'ютерного моделювання у створенні спеціальних текстильних матеріалів із заданими функціональними властивостями.

Постановка завдання. Метою статті є комплексний аналіз інноваційних і цифрових технологій у хімічній та текстильній промисловості та визначення їх впливу на процеси створення спеціальних текстильних матеріалів із прогнозованими функціональними властивостями.

Основними завданнями дослідження є:

1. Аналіз сучасних напрямів цифровізації текстильної та хімічної галузей;
2. Дослідження ролі штучного інтелекту та машинного навчання у прогнозуванні властивостей матеріалів;
3. Оцінка ефективності цифрових двійників у моделюванні текстильних систем;

4. Аналіз наноматеріалів та їх впливу на функціональні характеристики тканин;

5. Визначення перспектив розвитку smart-textiles у контексті Industry 4.0.

Результати досліджень та їх обговорення.

Результати бібліометричного аналізу публікацій Scopus. У межах виконаного дослідження здійснено бібліометричний аналіз наукових публікацій, індексованих у базі даних Scopus за період 2010–2025 рр., з метою ідентифікації ключових напрямів цифрової трансформації хімічної та текстильної промисловості. Бібліометричний пошук здійснювали в базі даних Scopus за публікаціями 2010–2025 рр. Пошукові запити формували за тематичними ключовими словами, що характеризують основні напрями цифровізації та інноваційного розвитку текстильного матеріалознавства. Пошук проводили за полями назви публікації, анотації та ключових слів (TITLE-ABS-KEY). До аналізу включали наукові статті, оглядові публікації та матеріали конференцій, тематично пов'язані з хімічною технологією, текстильними матеріалами, матеріалознавством і цифровими технологіями. Результати пошуку систематизували за роком публікації та тематичним пошуковим запитом. Із результатів виключали публікації, зміст яких за назвою, анотацією та ключовими словами не відповідав предметній області дослідження, а також дубльовані записи в межах кожного тематичного пошукового запиту. Перехресне дублювання публікацій між різними тематичними пошуковими запитом не усували, оскільки одиницею порівняльного аналізу були результати кожного окремого запиту; відповідно, розраховані частки характеризують структуру сукупності результатів пошуку за сформованими запитом, а не розподіл унікальних публікацій між взаємовиключними тематичними категоріями. Остаточний пошук та верифікацію бібліографічних записів проведено 20 травня 2026 року.

Для аналізу сформовано сім тематичних пошукових запитів: «materials for smart textiles», «chemical finishing of textiles», «nanomaterials in textile applications», «advanced textile materials», «digital

transformation of manufacturing», «Industry 4.0 in textile», «artificial intelligence in materials science», які сукупно охоплюють основні напрями розвитку цифрово орієнтованого матеріалознавства. Для забезпечення порівнянності результатів кожен тематичну фразу використовували як окремий пошуковий запит у полі TITLE-ABS-KEY з однаковими часовими та документальними обмеженнями. Отримані кількісні показники характеризують представленість публікацій за конкретними сформованими пошуковими запитами та не повинні інтерпретуватися як абсолютна оцінка обсягу відповідного наукового напрямку.

Аналіз часової динаміки публікацій після 2020 року виявив відмінності між

досліджуваними тематичними напрямками. Найбільш виражене зростання публікацій спостерігається за запитом «digital transformation of manufacturing», особливо у 2022-2025 рр. Для напрямку «materials for smart textiles» характерні відносно стабільні показники з окремими міжрічними коливаннями, тоді як за запитами «advanced textile materials» та «chemical finishing of textiles» після 2020 року простежується тенденція до зменшення кількості публікацій. Напрями «artificial intelligence in materials science», «Industry 4.0 in textile» та «nanomaterials in textile applications» характеризуються невеликими абсолютними значеннями, проте наприкінці досліджуваного періоду демонструють зростання публікаційної активності (рис. 1).

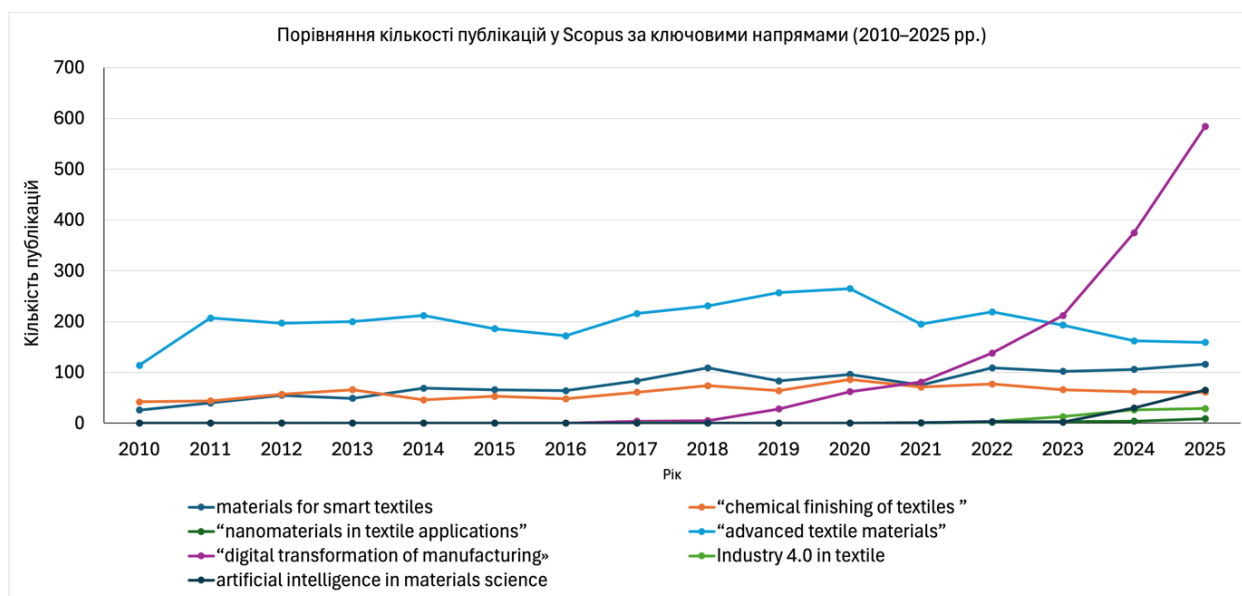


Рис. 1. Порівняння кількості публікацій за ключовими напрямками (2010–2025 рр.) у Scopus

Кількісна оцінка показала суттєву асиметрію розподілу публікацій між досліджуваними тематичними напрямками. Найбільшу кількість публікацій зафіксовано за пошуковим запитом «advanced textile materials» – 3185 публікацій, що становить 44,9% від сумарної кількості результатів за сімома тематичними пошуковими запитами. Другу позицію займає напрям «digital transformation of manufacturing» – 1489 публікацій (21,0%). Значну представленість також мають напрями «materials for smart textiles» – 1248 публікацій (17,6%) та

«chemical finishing of textiles» – 978 публікацій (13,8%), що свідчить про стійкий науковий інтерес до розроблення текстильних матеріалів нового покоління, функціоналізації текстильних систем та цифровізації виробничих процесів. Найменшу кількість публікацій зафіксовано за запитом «artificial intelligence in materials science» – 101 публікація (1,4%), «Industry 4.0 in textile» – 73 публікації (1,0%) та «nanomaterials in textile applications» – 19 публікацій (0,3%) (рис. 2).

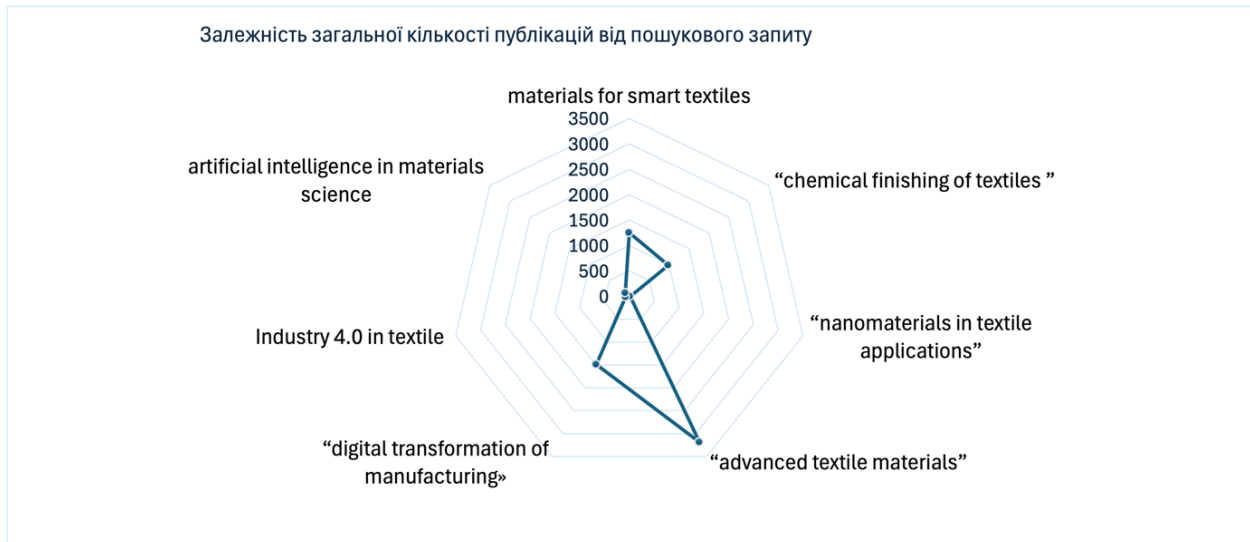


Рис. 2. Співвідношення кількості наукових публікацій за ключовими напрямками (2010–2025 рр.) за даними Scopus

Таблиця 1

Бібліометричний аналіз напрямів цифрової трансформації хімічної та текстильної промисловості (Scopus, 2010-2025 рр.)

№	Пошуковий запит	Кількість публікацій	Частка, %	Динаміка після 2020 р.	Наукова інтерпретація
1	advanced textile materials	3185	44,9	тенденція до зниження після 2020 р.	Домінування досліджень матеріалів нового покоління та функціональних текстильних систем
2	digital transformation of manufacturing	1489	21,0	стрімко зростаюча	Цифровізація виробничих процесів та інтеграція Industry 4.0
3	materials for smart textiles	1248	17,6	відносно стабільна, з міжрічними коливаннями	Розвиток багатофункціональних адаптивних текстильних систем
4	chemical finishing of textiles	978	13,8	помірна, з тенденцією до зниження	Перехід до керованих та екологічно орієнтованих хіміко-технологічних процесів
5	artificial intelligence in materials science	101	1,4	зростаюча наприкінці досліджуваного періоду	Формування напрямку прогностного матеріалознавства на основі штучного інтелекту
6	Industry 4.0 in textile	73	1,0	зростаюча наприкінці досліджуваного періоду	Рання стадія цифрової інтеграції у текстильній промисловості
7	nanomaterials in textile applications	19	0,3	зростаюча за низьких абсолютних значень	Перспективність подальшого розвитку нанофункціоналізації текстилю

Примітка. Частку результатів за кожним тематичним пошуковим запитом розраховано як відношення кількості результатів за відповідним запитом до сумарної кількості результатів за сімома тематичними запитами ($n = 7093$), помножене на 100 %. Значення округлено до одного десяткового знака.

Узагальнені результати бібліометричного аналізу досліджуваних напрямів цифрової трансформації хімічної та текстильної промисловості наведено в таблиці 1.

Контент-аналіз сучасних технологічних підходів. Окрім бібліометричного оцінювання публікаційної активності, у роботі проведено контент-аналіз відібраних наукових джерел з метою узагальнення сучасних технологічних підходів до створення та цифрового проєктування спеціальних текстильних матеріалів. Наведені нижче характеристики ефективності окремих технологій, функціональних матеріалів, методів машинного навчання та цифрового моделювання ґрунтуються на результатах опублікованих досліджень і не є безпосередніми результатами бібліометричного аналізу Scopus.

Аналіз структури smart-textiles підтверджує їх багатокомпонентну організацію, яка включає текстильну матрицю (волокна та тканини), функціональні модифікатори (наночастинки, полімерні покриття) та інтегровані електронні компоненти (сенсори, провідні шари). За даними літературних джерел [7–9], склад і вміст функціональних компонентів у smart-текстильних системах суттєво залежать від типу модифікатора, способу його введення та цільового призначення матеріалу.

Аналіз літературних джерел, присвячених хімічному оздобленню текстильних матеріалів, свідчить про розвиток технологій, спрямованих на зменшення ресурсоемності традиційних «мокрих» процесів. Серед перспективних підходів розглядають плазмове оброблення, ензиматичну функціоналізацію та контрольоване нанесення функціональних покриттів. У літературі повідомляється про можливість зменшення водо- та енергоспоживання порівняно з традиційними технологічними процесами [10].

За результатами контент-аналізу літературних джерел [7–9, 11] встановлено широке використання TiO_2 , ZnO , Ag та вуглецевих наноструктур для функціоналізації текстильних матеріалів. Їх застосування спрямоване на формування антимікробних, фотокаталітичних, гідрофобних та інших спеціальних властивостей.

Контент-аналіз літературних джерел свідчить про активне застосування методів машинного навчання для прогнозування фізико-хімічних і функціональних властивостей матеріалів [12]. Серед використовуваних підходів представлені регресійні алгоритми, нейронні мережі та ансамблеві моделі, які дають змогу встановлювати залежності між складом матеріалу, структурними характеристиками, технологічними параметрами та прогнозованими властивостями [2, 3, 12, 13]. Застосування таких підходів потенційно сприяє зменшенню обсягу емпіричних досліджень та прискоренню процесу проєктування матеріалів.

Окремим напрямом цифрової трансформації є використання цифрових двійників. За даними літературних джерел [3, 4, 14], цифрові двійники розглядаються як інструмент інтеграції даних про матеріал, технологічний процес і експлуатаційні характеристики у цифровому середовищі. Такий підхід створює можливості для моделювання поведінки системи, прогнозування її характеристик та оптимізації технологічних параметрів ще на етапі проєктування. Для текстильної галузі перспективним є застосування цифрових двійників для моделювання технологічних процесів, контролю якості та проєктування функціональних текстильних систем.

У сучасних підходах до цифрового проєктування CAD/CAE- та FEM-інструменти можуть використовуватися для геометричного й чисельного моделювання текстильних структур та оцінювання впливу структурних параметрів на їх прогнозовані характеристики [5, 15].

Окремим напрямом розвитку текстильної промисловості є впровадження принципів циркулярної економіки, зокрема повторне використання матеріалів, перероблення полімерних волокон та зменшення споживання первинної сировини [16]. Для поліестерних і поліамідних матеріалів розглядаються механічні та хімічні способи рециклінгу, ефективність яких залежить від типу полімеру, складу вихідної сировини та технологічних умов процесу.

Практичне значення цифрового проєктування особливо проявляється при створенні спеціальних текстильних матеріалів, для

яких необхідне одночасне забезпечення декількох функціональних характеристик. Для матеріалів захисного призначення цифрове моделювання може використовуватися для прогнозування механічних, термічних і бар'єрних властивостей текстильних структур та оптимізації їх багатошарової будови. У медичному текстилі перспективним є поєднання цифрового проєктування з сенсорними системами, функціональними покриттями та моделюванням взаємодії матеріалу з умовами експлуатації. Для функціональних smart-текстильних систем цифрові технології забезпечують можливість оптимізації електропровідності, тепло- і масообміну, сенсорної чутливості та інших заданих характеристик. Поєднання CAD/CAE-проєктування, методів машинного навчання та цифрових двійників створює передумови для переходу від емпіричного підбору структури матеріалу до цілеспрямованого прогнозування його властивостей ще на етапі розроблення. Таким чином, результати дослідження підтверджують системний характер цифрової трансформації хімічної та текстильної промисловості, яка характеризується переходом до прогнозної, модельно-орієнтованої та інтелектуалізованої парадигми створення функціональних текстильних матеріалів.

Висновки.

1. За результатами аналізу сучасних напрямів цифровізації текстильної та хімічної промисловості встановлено, що найбільшу частку в сумарній кількості результатів за досліджуваними тематичними запитамі становлять «advanced textile materials» – 44,9% та «digital transformation of manufacturing» – 21,0%. Водночас аналіз часової динаміки показав, що найбільш виражене зростання після 2020 року характерне для напряму цифрової трансформації виробництва, що відображає посилення ролі

цифрових і data-driven підходів у сучасному матеріалознавстві.

2. За результатами контент-аналізу літературних джерел встановлено, що методи машинного навчання, зокрема регресійні алгоритми, нейронні мережі та ансамблеві моделі, є перспективними інструментами прогнозування фізико-хімічних і функціональних властивостей матеріалів. Їх застосування дає змогу встановлювати взаємозв'язки між складом, структурою, технологічними параметрами та прогнозованими характеристиками матеріалів і може сприяти скороченню обсягу емпіричних досліджень.

3. Аналіз літературних даних показав, що цифрові двійники є перспективним інструментом інтегрованого моделювання матеріалів і технологічних процесів. Їх використання забезпечує можливість поєднання даних про структуру матеріалу, параметри виробництва та прогнозовані експлуатаційні характеристики в єдиному цифровому середовищі, що створює передумови для оптимізації проєктування текстильних систем.

4. Контент-аналіз досліджень із нанofункціоналізації текстильних матеріалів підтвердив широке застосування TiO_2 , ZnO , Ag та вуглецевих наноструктур для формування антимікробних, фотокаталітичних, гідрофобних та інших спеціальних властивостей. Ефективність наномодифікації визначається природою модифікатора, способом його нанесення, структурою текстильної основи та умовами експлуатації матеріалу.

5. Щодо перспектив розвитку smart-textiles у контексті Industry 4.0 встановлено, що ці матеріали формуються як багатокомпонентні системи, які поєднують текстильну основу, функціональні добавки та електронні компоненти. Найбільш перспективними сферами застосування є медицина, військова галузь, спорт та промисловий моніторинг.

Література

1. Sajovic I., Kert M., Boh Podgornik B. Smart Textiles: A Review and Bibliometric Mapping. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, Issue 18. Art. 10489. DOI: <https://doi.org/10.3390/app131810489>.
2. Wang Z., Jiang Q., Chen C., Tian M. The intellectual base, knowledge evolution, and frontiers of

References

1. Sajovic, I., Kert, M., & Boh Podgornik, B. (2023). Smart Textiles: A Review and Bibliometric Mapping. *Applied Sciences*, 13(18), 10489. <https://doi.org/10.3390/app131810489>.
2. Wang, Z., Jiang, Q., Chen, C., & Tian, M. (2025). The intellectual base, knowledge evolution,

research on smart clothing: A visual analysis of research trajectory. *Textile Research Journal*. 2025. OnlineFirst. DOI:

<https://doi.org/10.1177/00405175251379803>.

3. Kaur S., Singh P., Cheema N. K., Ray N. C., Singh S. AI-Driven Digital Twins and Data-Driven Smart Manufacturing in the Textile Industry: Integrating Domain Expertise with Intelligent Systems. *Proceedings of the 1st IEEE Uttar Pradesh Section Women in Engineering International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPWIECON)*. 2025. P. 71–78. DOI: <https://doi.org/10.1109/UPWIECON67212.2025.11390143>.

4. Bongomin O., Mwape M. C., Mpofo N. S., Bahunde B. K., Kidega R., Mpungu I. L., Tumusiime G., Owino C. A., Goussongtogue Y. M., Yemane A., Kyokunzire P., Malanda C., Komakech J., Tigalana D., Gumisiriza O., Ngulube G. Digital twin technology advancing Industry 4.0 and Industry 5.0 across sectors. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. Art. 105583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105583>.

5. Glogar M., Petrak S., Mahnić Naglić M. Digital Technologies in the Sustainable Design and Development of Textiles and Clothing-A Literature Review. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, Issue 4. Art. 1371. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17041371>.

6. Deepthi B., Bansal V. Industry 4.0 in Textile and Apparel Industry: A Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis of Global Research Trends. *Vision*. 2024. Vol. 28, Issue 2. P. 157–170. DOI: <https://doi.org/10.1177/09722629221130233>.

7. Krifa M., Prichard C. Nanotechnology in textile and apparel research – an overview of technologies and processes. *The Journal of The Textile Institute*. 2020. Vol. 111, Issue 12. P. 1778–1793. DOI: <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1721696>.

8. Jadoun S., Verma A., Arif R. Modification of Textiles via Nanomaterials and Their Applications. In: *Frontiers of Textile Materials: Polymers, Nanomaterials, Enzymes, and Advanced Modification Techniques*. 2020. P. 135–152. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119620396.ch6>.

9. Singh S., Kamble Z., Neje G. Types of Nanomaterials Used in Textile Finishing. In: Bairagi S., Ahmed S., Ali S. W. (eds.). *Nanotechnology in Textile Finishing: Advancements and Applications*. Springer, Singapore, 2024. P. 23–48. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-2696-7_2.

10. Islam M. T., Asaduzzaman S. Environmentally-Friendly Textile Finishing. In: Shabbir M. (Ed.). *Textiles and Clothing*. 2019. P. 101–129. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119526599.ch6>.

11. Nam S., Chavez S. E., Hillyer M. B., Condon B. D., Shen H., Sun L. Interior vs. exterior incorporation of silver nanoparticles in cotton fiber and washing durability. *AATCC Journal of Research*. 2021. Vol. 8, Issue 6. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.14504/ajr.8.6.1>.

12. Huang G., Guo Y., Chen Y., Nie Z. Application of Machine Learning in Material Synthesis and Property Prediction. *Materials*. 2023. Vol. 16, Issue 17. Art. 5977. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16175977>.

and frontiers of research on smart clothing: A visual analysis of research trajectory. *Textile Research Journal*. OnlineFirst. DOI:

<https://doi.org/10.1177/00405175251379803>.

3. Kaur, S., Singh, P., Cheema, N. K., Ray, N. C., & Singh, S. (2025). AI-Driven Digital Twins and Data-Driven Smart Manufacturing in the Textile Industry: Integrating Domain Expertise with Intelligent Systems. *Proceedings of the 1st IEEE Uttar Pradesh Section Women in Engineering International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPWIECON)* (pp. 71–78). <https://doi.org/10.1109/UPWIECON67212.2025.11390143>.

4. Bongomin, O., Mwape, M. C., Mpofo, N. S., Bahunde, B. K., Kidega, R., Mpungu, I. L., Tumusiime, G., Owino, C. A., Goussongtogue, Y. M., Yemane, A., Kyokunzire, P., Malanda, C., Komakech, J., Tigalana, D., Gumisiriza, O., & Ngulube, G. (2025). Digital twin technology advancing Industry 4.0 and Industry 5.0 across sectors. *Results in Engineering*, (26), 105583. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105583>.

5. Glogar, M., Petrak, S., & Mahnić Naglić, M. (2025). Digital Technologies in the Sustainable Design and Development of Textiles and Clothing-A Literature Review. *Sustainability*, 17(4), 1371. <https://doi.org/10.3390/su17041371>.

6. Deepthi, B., & Bansal, V. (2024). Industry 4.0 in Textile and Apparel Industry: A Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis of Global Research Trends. *Vision*, 28(2), 157–170. <https://doi.org/10.1177/09722629221130233>.

7. Krifa, M., & Prichard, C. (2020). Nanotechnology in textile and apparel research – an overview of technologies and processes. *The Journal of The Textile Institute*, 111(12), 1778–1793. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1721696>.

8. Jadoun, S., Verma, A., & Arif, R. (2020). Modification of Textiles via Nanomaterials and Their Applications. In: *Frontiers of Textile Materials: Polymers, Nanomaterials, Enzymes, and Advanced Modification Techniques* (pp. 135–152). <https://doi.org/10.1002/9781119620396.ch6>.

9. Singh, S., Kamble, Z., & Neje, G. (2024). Types of Nanomaterials Used in Textile Finishing. In: Bairagi S., Ahmed S., Ali S. W. (eds.). *Nanotechnology in Textile Finishing: Advancements and Applications* (pp. 23–48.). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-2696-7_2.

10. Islam, M. T., & Asaduzzaman, S. (2019). Environmentally-Friendly Textile Finishing. In: Shabbir, M. (Ed.), *Textiles and Clothing* (pp. 101–129). <https://doi.org/10.1002/9781119526599.ch6>

11. Nam, S., Chavez, S. E., Hillyer, M. B., Condon, B. D., Shen, H., & Sun, L. (2021). Interior vs. exterior incorporation of silver nanoparticles in cotton fiber and washing durability. *AATCC Journal of Research*, 8(6), 1–12. <https://doi.org/10.14504/ajr.8.6.1>.

12. Huang, G., Guo, Y., Chen, Y., & Nie, Z. (2023). Application of Machine Learning in Material Synthesis and Property Prediction. *Materials*, 16(17), 5977. <https://doi.org/10.3390/ma16175977>.

13. Yao Y., Hu J., Liu F. Intelligent manufacturing defect detection based on deep learning framework. In: *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Networks, Multimedia and Information Technology (NMITCON)*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1109/NMITCON65824.2025.11187858>.

14. Bi Y., Pan L., Cao L. Research status and development trends of digital twin technology in apparel production: a review. *The Journal of The Textile Institute*. 2025. Vol. 116, Issue 12. P. 3318–3341. DOI: <https://doi.org/10.1080/00405000.2025.2496840>.

15. Li Q., Gao Y. Application of finite element method in textile process: a review. *The Journal of The Textile Institute*. 2024. Vol. 115, Issue 12. P. 2444–2455. <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2293321>.

16. Butturi M. A., Neri A., Mercalli F., Gamberini R. Sustainability-Oriented Innovation in the Textile Manufacturing Industry: Pre-Consumer Waste Recovery and Circular Patterns. *Environments*. 2025. Vol. 12, Issue 3. Art. 82. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments12030082>.

13. Yao, Y., Hu, J., & Liu, F. (2025). Intelligent manufacturing defect detection based on deep learning framework. In: *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Networks, Multimedia and Information Technology (NMITCON)*. <https://doi.org/10.1109/NMITCON65824.2025.11187858>.

14. Bi, Y., Pan, L., & Cao, L. (2025). Research status and development trends of digital twin technology in apparel production: a review. *The Journal of The Textile Institute*, 116(12), 3318–3341. <https://doi.org/10.1080/00405000.2025.2496840>.

15. Li, Q., & Gao, Y. (2024). Application of finite element method in textile process: a review. *The Journal of The Textile Institute*, 115(12), 2444–2455. <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2293321>.

16. Butturi, M. A., Neri, A., Mercalli, F., & Gamberini, R. (2025). Sustainability-Oriented Innovation in the Textile Manufacturing Industry: Pre-Consumer Waste Recovery and Circular Patterns. *Environments*, 12(3), 82. <https://doi.org/10.3390/environments12030082>.