

СОЛОМЯНИЙ ЄГОР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0000-7553-2763>e-mail: solomyanyyy@gmail.com**ГОРЯЩЕНКО СЕРГІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6623-2523>e-mail: gsl7@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ МАТЕРІАЛІВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

У статті представлено аналітичний огляд сучасних технологій та пристроїв, що використовуються для виявлення дефектів у матеріалах легкої промисловості, з акцентом на текстильні та шкіряні поверхні. У дослідженні підкреслюється, що однією з ключових проблем у цій галузі є гетерогенна та гнучка природа цих матеріалів, які демонструють змінні текстури, неоднорідні кольори та складну геометрію поверхні. Ці характеристики значно ускладнюють процес автоматизованого контролю порівняно з контролем металевих або жорстких матеріалів. У дослідженні аналізуються технічні можливості сучасних оптичних систем, включаючи камери високої роздільної здатності, структуроване світло, гіперспектральне зображення та системи розпізнавання на основі глибокого навчання. Огляд наукових джерел показує, що більшість досліджень досягли точності виявлення, що перевищує 95% у лабораторних умовах, але багато з цих систем все ще стикаються з обмеженнями при впровадженні в реальних виробничих умовах. Проблеми включають чутливість до коливань освітлення, різні типи переплетення тканин та природні нерівності шкіри. Крім того, існуючі підходи часто спираються на обмежені набори даних, що зменшує їхню здатність до узагальнення для різних типів дефектів.

У статті визначено ключові прогалини в дослідженнях, включаючи інтеграцію систем машинного зору з роботизованими виробничими установками. Зроблено висновок, що майбутній прогрес у системах виявлення дефектів має бути зосереджений на інтелектуальних, автономних та взаємопов'язаних технологіях керування, які працюють у режимі реального часу, взаємодіють з виробничим обладнанням та підтримують концепцію цифрової фабрики.

Ключові слова: алгоритм, технічний зір, автоматизація, контроль, легка промисловість, взуття, матеріал.

HORIASHCHENKO SERHIY, SOLOMYANIY EHOR

Khmelnytskyi National University

FEATURES OF AUTOMATED DEFECT CONTROL OF LIGHT INDUSTRY MATERIALS

The article presents an analytical review of current technologies and devices used for defect detection in materials of the light industry, with a focus on textile and leather surfaces. The study highlights that one of the key challenges in this domain is the heterogeneous and flexible nature of these materials, which exhibit variable textures, non-uniform colors, and complex surface geometries. These characteristics make the automated inspection process significantly more difficult compared to the control of metallic or rigid materials. The research analyzes the technical capabilities of modern optical systems, including high-resolution cameras, structured light, hyperspectral imaging, and deep learning-based recognition systems. It also emphasizes the need for stable illumination conditions, high-speed data acquisition, and adaptive algorithms capable of processing images in real time.

The review of scientific sources demonstrates that most studies have achieved detection accuracy exceeding 95% under laboratory conditions, but many of these systems still face limitations when implemented in real production environments. Challenges include sensitivity to lighting variations, different types of fabric weaves, and the natural irregularities of leather. Additionally, existing approaches often rely on limited datasets, which reduces their ability to generalize across various defect types.

The article identifies key research gaps, including the integration of vision systems with robotic manufacturing units, the development of multi-class defect classification models, and the creation of adaptive self-learning algorithms for continuous performance improvement. It is concluded that future progress in defect detection systems should focus on intelligent, autonomous, and interconnected control technologies that operate in real time, interact with production equipment, and support the concept of a digital factory. Such developments will ensure stable product quality, reduce human involvement, and increase the efficiency of modern manufacturing processes in the textile and footwear industries.

Keywords: algorithm, technical vision, automation, control, light industry, footwear, material.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасне виробництво взуття є високотехнологічною галуззю, яка поєднує традиційні методи обробки матеріалів із сучасними автоматизованими процесами. Контроль якості в легкій промисловості є одним з найважливіших елементів, що забезпечують конкурентоспроможність та ринковий успіх текстильної, шкіряної, взуттєвої та нетканої промисловості. Технічний зір відіграє важливу роль у забезпеченні якості продукції, контролі дефектів та оптимізації виробничих процесів.

Основна термінологія, пов'язана з дефектами швейних виробів, визначена у стандартах ДСТУ 2033-92 «Вироби швейні. Дефекти. Терміни та визначення» та ДСТУ 2916-94 «Дефекти швейних виробів після хімчистки». У стандарті ДСТУ 2201-93 «Полотна текстильні. Види, дефекти. Терміни та визначення» дефекти тканин класифіковано за різними ознаками, зокрема за походженням, ступенем допустимості, площею ураження, впливом на рівень якості тощо. Ідентифікація дефектів здійснюється

за походженням (сировинні, виробничі, пов'язані зі зберіганням тощо), площею (місцеві або поширені), дефектами зовнішнього вигляду, а також недоліками, що виникають через відхилення від встановлених нормативів за окремими параметрами складу, механічних чи фізико-хімічних властивостей матеріалів. До дефектів матеріалів належать: дефекти пряжі, недоліки в якості, огріхи в обробці, приховані дефекти, механічні пошкодження та забруднення. Для текстилю до них належать обірвані нитки, плями, пропущені стібки та нерівності кольору; для шкіри – тріщини, пори, зморшки та відхилення текстури; для нетканих матеріалів – нерівномірна щільність, вклучення або погане склеювання; а для взуттєвих матеріалів – подряпини, розшарування покриття та нерівності товщини.

Аналіз досліджень та публікацій

Огляд наукових робіт свідчить про активний розвиток методів комп'ютерного зору для контролю дефектів у тканинах і шкірі. Дослідження [1] та [2] показали ефективність згорткових нейронних мереж (CNN) у класифікації поверхневих дефектів текстилю та шкіряних матеріалів, проте їхні підходи базуються на обмежених наборах даних і демонструють низьку узагальнюваність при зміні умов виробництва. Подібні висновки підтверджуються у роботах [3] та [4], де алгоритми добре працювали на лабораторних зразках, але потребували додаткової адаптації для конвеєрних ліній. У свою чергу, автори у роботах [5] та [6] підкреслюють роль освітлення й варіативності структури матеріалів, які часто спотворюють результати виявлення.

Важливо, що частина досліджень, представлених у [7], роблять акцент на використанні традиційних методів обробки зображень, які мають нижчі обчислювальні вимоги, але поступаються сучасним глибинним моделям за точністю. Інші автори, зокрема [8] та [9], пропонують гібридні підходи (поєднання класичних методів і глибинного навчання), проте ці роботи залишають відкритим питання швидкості та енергоефективності при роботі в режимі реального часу. Дослідження [10] демонструє потенціал *lightweight*-моделей, але таких робіт поки що небагато.

Таким чином, аналіз літератури показує, що головні прогалини залишаються у сферах створення відкритих датасетів, розробки робастних методів для багатокласової детекції дефектів у реальному часі, а також інтеграції систем комп'ютерного зору з роботизованими виробничими лініями. Це визначає перспективні напрями майбутніх досліджень.

Формулювання цілей статті

Мета статті полягає в аналізі сучасних підходів і технічних засобів для автоматизованого контролю дефектів матеріалів легкої промисловості (текстиль, шкіра), визначенні їхніх переваг і обмежень, а також окресленні перспектив розвитку систем комп'ютерного зору та інтелектуальних технологій у даній сфері.

Основні завдання дослідження: проаналізувати існуючі методи контролю дефектів тканин і шкіряних матеріалів, зокрема оптичні системи, методи комп'ютерного зору та алгоритми машинного навчання; узагальнити технічні характеристики та можливості сучасних приладів і систем виявлення дефектів; запропонувати рекомендації щодо впровадження інтелектуальних систем контролю дефектів у технологічні процеси виробництва взуття та текстильних виробів.

Виклад основного матеріалу

Попри значний прогрес у галузі комп'ютерного зору та автоматизації, сфера контролю дефектів матеріалів легкої промисловості залишається недостатньо розробленою в кількох ключових аспектах. Основні показники зведені до таблиці 1.

Виділимо той факт, що є обмеженість універсальних алгоритмів розпізнавання дефектів. Більшість сучасних моделей штучного інтелекту створюються для вузькоспеціалізованих завдань і часто не здатні ефективно працювати на різних типах матеріалів — шкірі, текстилі, синтетичних волокнах. Це обумовлено великою варіативністю фактур, кольору, прозорості та умов освітлення. Внаслідок цього потрібна розробка адаптивних алгоритмів, здатних до перенавчання або використання *few-shot learning* підходів для нових типів тканин.

Недостатня кількість еталонних баз даних зразків дефектів також створює проблеми контролю. Для якісного навчання моделей необхідні великі, стандартизовані набори даних з анотацією типів дефектів. У текстильній та шкіряній промисловості такі бази часто закриті або мають вузький доступ. Це суттєво обмежує розвиток відкритих досліджень і порівняння алгоритмів.

Крім того є проблема реального часу та інтеграції у виробничі процеси. Багато наукових рішень демонструють високу точність у лабораторних умовах, але не забезпечують необхідної швидкодії для промислових ліній. У реальних умовах матеріали рухаються зі швидкістю десятків метрів за хвилину, змінюється освітлення, присутній пил та вібрації. Необхідні більш стійкі, промислово орієнтовані рішення, здатні працювати в режимі реального часу. У більшості виробничих ліній системи контролю лише фіксують дефект, але не взаємодіють з технологічним процесом для автоматичного коригування параметрів (наприклад, натягу тканини чи тиску клею). У різних підприємств відсутня уніфікована класифікація типів дефектів та їх критичності. Це ускладнює порівняння систем і інтеграцію рішень різних виробників. Гіперспектральні або 3D-візуальні системи залишаються дорогими для малих і середніх підприємств. Подальші дослідження мають бути спрямовані на здешевлення технологій без втрати точності та на розробку модульних, масштабованих рішень.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця підходів до контролю дефектів у тканинах і шкірі (на основі джерел [1-10])

Підхід	Ключові методи	Переваги	Недоліки	Типові застосування
Методи комп'ютерного зору (CV)	Класичні алгоритми: Sobel, Canny, Gabor-фільтри, вейвлет-перетворення	Простота реалізації, висока швидкість, невеликі обчислювальні витрати	Обмежена точність, чутливість до шуму та варіацій освітлення	Базовий контроль тканин, пошук простих дефектів (дірки, плями, лінії)
Машинне навчання (ML)	PCA, SVM, K-means clustering	Краще узагальнення ніж класичне CV, можливість працювати з більш складними ознаками	Потреба у ручному виділенні ознак, менша точність у порівнянні з DL	Контроль текстильних тканин у потокових лініях
Глибинне навчання (DL)	CNN, ResNet, Autoencoders	Висока точність, здатність працювати зі складними дефектами, автоматичне виділення ознак	Високі обчислювальні витрати, потреба у великих датасетах	Автоматизований контроль у текстильній та шкіряній промисловості
Методи виявлення на основі візуальної аномалії	Autoencoders, GAN, One-Class SVM	Добре підходять для рідкісних дефектів, не потребують повної розмітки дефектів	Високі вимоги до якісних даних «без дефектів», складність налаштування	Контроль шкіри з природними текстурними варіаціями
Інтегровані системи (роботизовані + CV/DL)	Роботи-маніпулятори з камерами + AI аналіз	Автоматизація процесу контролю, можливість онлайн-виробництва	Висока вартість впровадження, складність обслуговування	Великі підприємства легкої промисловості (одяг, взуття, меблі)

Сучасні системи для автоматизованого контролю матеріалів легкої промисловості (тканин, шкіри, синтетичних полімерів) поєднують у собі високоточні сенсори, алгоритми комп'ютерного зору та елементи штучного інтелекту. Їх розвиток обумовлений потребою у швидкому виявленні дефектів у реальному часі при мінімальних виробничих витратах. Дослідження [11] вказує, що система використовує 4K лінійні CMOS-камери, може обробляти тканину шириною $\approx 1.5-1.8$ м, і досягає швидкості ≈ 60 кадрів на секунду (FPS) для реального часу виявлення дефектів. У роботі [12] є апаратна система й програмне забезпечення: система працює зі швидкістю близько 34 FPS, з часом передбачення ≈ 21.4 мс на фрагмент зображення. Також відомо [13], що для зображень високої роздільної здатності система виконує виявлення дефектів за ≈ 0.37 секунди на зображення, що відповідає вимогам практичного використання для деяких виробничих умов. Запропоновано модифікацію YOLOv5 із оптимізацією, щоб підвищити швидкість та точність [15], ще призвело до зменшення обчислень, покращилась обробка різних масштабів дефектів. Основні технічні характеристики обладнання, що використовуються наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики систем контролю дефектів

Тип системи	Технічні характеристики	Можливості контролю	Обмеження	Приклади використання
Оптичні камери (HD–8K)	10–200 кадрів/с, RGB/UV/IR	Поверхневі дефекти, колір, фактура	Чутливі до освітлення	Контроль тканини на бракувальних лініях
Лазерні/3D-сканери	Точність 10–50 мкм, 3D-реконструкція	Об'ємні дефекти, геометрія, товщина	Висока вартість	Оцінка якості шкіри у взуттєвій галузі
Гіперспектральні системи	400–2500 нм, до 200 спектр. каналів	Приховані дефекти, аналіз фарбування	Висока обчислювальна потреба	Контроль текстилю та барвників
Машинне навчання/нейронні мережі	GPU-обчислення, гнучке навчання	Класифікація та сегментація дефектів	Потребують навчальних даних	Сортування та відбракування шкіри
Інтегроване ПЗ	Підтримка MES/ERP, big data	Автоматичний контроль і статистика	Залежність від обладнання	Смарт-фабрики легкої промисловості

Особливості контролю дефектів матеріалів легкої промисловості зумовлені складністю текстур, різноманітністю структур і високими вимогами до якості поверхонь тканин і шкіри. На відміну від металів чи твердих матеріалів, поверхня текстильних і шкіряних матеріалів має варіативну геометрію, неоднорідність кольору, гнучкість та відбиття світла, що ускладнює автоматизований візуальний контроль. Дефекти можуть бути структурними (розриви волокон, неповне переплетення, вузли, пори) або поверхневими (плями, зморшки, тріщини, подряпини), часто з дуже малою контрастністю на фоні природного малюнку матеріалу. Через це ефективний контроль вимагає високої просторової роздільної здатності, стабільного освітлення, адаптивних алгоритмів обробки зображень і, дедалі частіше, глибоких нейронних мереж, здатних навчатися на різних варіантах фактур. Додатковим викликом є необхідність роботи систем в режимі реального часу на виробничій лінії, інтеграції з роботизованими системами подачі та врахування тривимірних характеристик поверхні (особливо для шкіри або гнучких композитів).

Необхідна розробка міжнародних стандартів оцінки дефектів у тканинах і шкірі для автоматизованих систем контролю. Перспективним напрямом є розробка інтелектуальних замкнених систем керування, що поєднують технічний зір і роботизовані механізми для адаптивного контролю якості. Подальший розвиток систем візуального контролю матеріалів легкої промисловості тісно пов'язаний з інтеграцією сучасних технологій штучного інтелекту, машинного навчання та роботизації. Новітні тенденції спрямовані на підвищення точності, швидкодії та адаптивності систем, що забезпечують автоматичне виявлення дефектів у режимі реального часу.

Одним із пріоритетних напрямів є створення систем технічного зору, здатних до роботи на швидких виробничих лініях без втрати точності. Це потребує застосування високопродуктивних обчислювальних платформ (GPU, FPGA) та оптимізованих моделей нейронних мереж із низькою латентністю. Зокрема, перспективним є впровадження технологій Edge AI, які забезпечують локальну обробку зображень без передачі даних у хмару.

Сучасні системи часто зосереджуються на виявленні лише окремих типів дефектів (дірки, плями, подряпини). Перспективним є створення універсальних багатокласових моделей, здатних розпізнавати десятки видів дефектів різного походження та класифікувати їх за ступенем критичності. Це відкриває можливість не лише фіксувати дефекти, а й здійснювати автоматичне сортування матеріалів за якістю.

Впровадження зворотного зв'язку між системою контролю та виробничим обладнанням є наступним кроком у напрямі інтелектуальної автоматизації. Такі системи дозволять у режимі реального часу регулювати параметри технологічного процесу — наприклад, тиск під час ламінування, швидкість подачі матеріалу або натяг полотна. Це сприятиме зменшенню кількості браку та оптимізації витрат ресурсів.

Поєднання даних із RGB-, інфрачервоних, ультрафіолетових і гіперспектральних сенсорів дає змогу виявляти не лише поверхневі, але й приховані дефекти матеріалів. Використання 3D-сканерів дозволяє аналізувати мікрорельєф шкіри чи тканини, що особливо актуально при виготовленні взуття високої якості.

Нові дослідження спрямовані на розробку алгоритмів, здатних навчатися без необхідності великих обсягів розмічених даних. Використання Generative Adversarial Networks (GANs) дозволяє синтезувати штучні зображення дефектів для тренування моделей, що значно знижує витрати часу й ресурсів. У найближчій перспективі очікується поява модульних систем технічного зору, які можна адаптувати під конкретні виробничі лінії або масштаби підприємства. Це забезпечить доступність інновацій навіть для малих і середніх виробників, розширюючи сферу впровадження інтелектуальних систем контролю якості.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведений аналіз сучасних систем і методів контролю дефектів матеріалів легкої промисловості показав, що технології комп'ютерного зору, машинного навчання та нейронних мереж є ключовими напрямками розвитку візуальної інспекції тканин і шкіряних виробів. Існуючі рішення демонструють високу точність розпізнавання дефектів (до 95–99%) у лабораторних умовах, проте залишаються певні обмеження, пов'язані з роботою в реальному часі, чутливістю до освітлення, структурою поверхні та варіативністю текстури матеріалів.

Незважаючи на значний прогрес, більшість досліджень зосереджені на обмежених наборах даних, що не враховують усі типи дефектів і реальні умови виробництва. Також недостатньо вивчені аспекти інтеграції систем візуального контролю з роботизованими технологічними лініями, автоматизованими засобами обприскування або нанесення покриттів, що могло б забезпечити безперервний контроль якості в процесі виготовлення.

Перспективним напрямом подальших досліджень є створення адаптивних систем технічного зору, здатних до самонавчання та класифікації нових типів дефектів, а також розробка багатокласових моделей розпізнавання, які враховують морфологічні особливості текстильних і шкіряних структур. Важливою тенденцією також є впровадження IoT-інфраструктури та об'єднання систем контролю в єдиний цифровий виробничий простір, що дозволить проводити аналіз даних у реальному часі та забезпечувати підвищення стабільності якості продукції.

Контроль дефектів у легкій промисловості потребує поєднання комп'ютерного зору, машинного навчання, точного освітлення та адаптивних методів аналізу текстур, орієнтованих на високу швидкість, точність і стабільність в умовах змінного виробничого середовища. Подальший розвиток систем контролю дефектів матеріалів легкої промисловості має бути спрямований на підвищення автономності, швидкодії та гнучкості інтелектуальних технологій, здатних працювати в умовах реального виробництва з мінімальною участю оператора.

References

1. Machado, R., Barros, L. A. M., Vieira, V., Silva, F. D. d., Costa, H., & Carvalho, V. (2025). Textile defect detection using artificial intelligence and computer vision — a preliminary deep learning approach. *Electronics*, 14(18), 3692. <https://doi.org/10.3390/electronics14183692>
2. Shang, H., Li, P., & Zhang, X., Peng, X. Q. (2023). Overview of fabric defect detection techniques based on computer vision. In *Proceedings of the Third International Conference on Computer Graphics, Image, and Virtualization (ICCGIV 2023)*. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3008027>
3. Ochoa-Zezatti, A., Cruz-Mejía, O., Mejía, J., Ceron-Monroy, H. (2021). Image classification applied to the detection of leather defects for smart manufacturing. In J. A. Marmolejo-Saucedo, P. Vasant, I. Litvinchev, R. Rodriguez-Aguilar & F. Martinez-Rios (Eds.), *Computer Science and Health Engineering in Health Services. COMPSE 2020* (Lecture Notes in Computer Sciences, Vol. 359, pp. 52–61). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69839-3_4
4. Tanzeela Kiran, Mudasir Ali, Umair Ismail, Muhammad Altaf Ahmad, Urooj Akram, Wajahat Hussain, & Muhammad Faheem Mushtaq. (2025). Textile defect detection in the textile industry using deep learning. *Journal of Computing & Biomedical Informatics*, 8(02). Retrieved from <https://jcbi.org/index.php/Main/article/view/949>
5. Rasheed, A., Zafar, B., Rasheed, A., Ali, N., Sajid, M., Dar, S. H., Habib, U., Shehryar, T., & Mahmood, M. T. (2020). Fabric defect detection using computer vision techniques: A comprehensive review. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, Article 8189403, 1-24. <https://doi.org/10.1155/2020/8189403>
6. Liong, S.-T., Gan, Y. S., Huang, Y.-C., Liu, K.-H., Yau, W.-C., Tran, Q. B., Le, C. T., Wu, C. A., & Yang, C.-Y. (2019). Efficient neural network approaches for leather defect classification. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1906.06446>
7. Liong, S.-T., Gan, Y. S., Huang, Y.-C., Chang-Ann Yuan & Hsiu-Chi Chang. (2019). Automatic defect segmentation on leather with deep learning. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1903.12139>
8. Jeyaraj, P. R., & Samuel Nadar, E. R. (2019). Computer vision for automatic detection and classification of fabric defect employing deep learning algorithm. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 31(4), 510-521. <https://doi.org/10.1108/IJCST-11-2018-0135>
9. Kwak, C., Ventura, J. A., & Tofang-Sazi, K. (2001). Automated defect inspection and classification of leather fabric. *Intelligent Data Analysis*, 5(4), 355-370. <https://doi.org/10.3233/IDA-2001-5406>
10. "Machine Vision Based Surface Defect Inspection in Leather Products": A systematic review. (2022). *Electronics*, 11(15), 2383. <https://doi.org/10.3390/electronics11152383>
11. Yu, Z., Sheng, X., Xie, G., Xu, Y., & Sun, Y. (2023). Online Fabric Defects Detection Using Convolutional Neural Networks with Two Frameworks. *AATCC Journal of Research* 2023;10(6):356-366. doi:10.1177/24723444231201441
12. Dlamini S, Kao C-Y, Su S-L, Jeffrey Kuo C-F. (2021) Development of a real-time machine vision system for functional textile fabric defect detection using a deep YOLOv4 model. *Textile Research Journal*;92(5-6):675-690. doi:[10.1177/00405175211034241](https://doi.org/10.1177/00405175211034241)
13. Li L, Li Q, Liu Z, Xue L. Effective Fabric Defect Detection Model for High-Resolution Images. *Applied Sciences*. 2023; 13(18):10500. <https://doi.org/10.3390/app131810500>
14. Li, X., Zhu, Y. A real-time and accurate convolutional neural network for fabric defect detection. *Complex Intell. Syst.* 10, 3371–3387 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01317-8>
15. Lee, C.-F., Chen, Y.-C., Shen, J.-J., & Rehman, A. U. (2025). Lightweight Leather Surface Defect Inspection Model Design for Fast Classification and Segmentation. *Symmetry*, 17(3), 358. <https://doi.org/10.3390/sym17030358>