

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ВІЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ ТОНКОЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ (Огляд)

А.С. Новодранов, Є.В. Шаповалов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: artur19940731@gmail.com

Зважаючи на швидкість розвитку виробництв тонколистових матеріалів застосування автоматизованих систем виявлення поверхневих дефектів у таких výroбах стає все більш актуальним. Обумовлено це тим, що завчасно виявлений дефект зменшує кількість відходів та підвищує продуктивність виробництва шляхом зменшення часу простою обладнання. Метою статті є огляд сучасних автоматизованих систем візуального контролю поверхневих дефектів на тонколистових матеріалах для оцінки їх ефективності, переваг та обмежень. У статті розглянуто та проаналізовано автоматизовані системи пошуку поверхневих дефектів на різних виробництвах – металевому, паперовому та ткацькому прокатах. Показано, що системи такого класу найчастіше виконуються у стаціонарній конфігурації безпосередньо на верстатах або прокатних машинах, але є системи, які крім стаціонарної реалізації мають портативну версію, яка монтується на діагностичному візку. Розглянуто складові частини апаратної підсистеми, а саме визначено переваги застосування інтелектуальних камер у порівнянні з камерами лінійного сканування. Визначено переваги застосування стробоскопічного освітлення у порівнянні зі звичайними LED прожекторами. Розглянуто програмну підсистему, а також визначено, що застосування методів штучного інтелекту, а саме нейронних мереж із машинним навчанням, є перспективним вектором розвитку таких систем. Бібліогр. 36, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: автоматизований візуальний контроль, дефекти тонколистових матеріалів, металеві тонколистові матеріали, автоматизовані системи контролю

Вступ. Інтенсивний розвиток виробництв тонколистових металевих і неметалевих матеріалів потребує забезпечення високої якості продукції, що випускається. Наявні системи управління формуванням тонколистового полотна достатньо складні та не завжди ефективно реагують на деякі небажані фактори, що чинять вплив на процес виробництва і призводять до виникнення обривів, нерівномірного розподілу листового матеріалу за шириною формуючої машини, утворення дефектів по краях полотна та ін. Застосування автоматизованих систем контролю дефектності тонколистових матеріалів дає змогу виявити всі вищенаведені недоліки старих систем [1, 2]. Варто зазначити, що використання автоматизованих систем моніторингу поверхневих дефектів у першу чергу доцільно на ткацьких [3, 4], металопрокатних [5], а також паперово-картонних [6, 7] виробництвах. Використання автоматизованих систем моніторингу дає можливість контролювати в режимі реального часу якість листових матеріалів, а також підвищує продуктивність і знижує вплив людського фактору на процес виробництва. Системи такого типу можна віднести до візуального методу неруйнівного контролю, який не потребує безпосереднього механічного контакту з прокатом полотна та запобігає пошкодженню або забрудненню поверхні.

Зазвичай системи візуального контролю тонколистових матеріалів складаються з апаратної

та програмної частини. Апаратна складова таких систем забезпечує захоплення потокового зображення прокату полотна та його передачу на сервер для подальшої програмної обробки [8, 9]. У свою чергу програмна частина складається із сукупності алгоритмів обробки зображень, методів машинного навчання та класифікатора дефектів, частіше на базі нейромережевої технології [10]. За результатами класифікації знайденого дефекту автоматизована система приймає рішення про подальші кроки, такі як зупинка формуючої машини або занесення даних про незначний дефект в електронний журнал із зазначенням точного часу виявлення дефекту та його збільшеним зображенням для подальшої звітності.

Складові частини автоматизованої системи моніторингу якості тонколистових матеріалів. Для досягнення високої швидкості та точності виявлення поверхневих дефектів не підходять традиційні методи ручного візуального неруйнівного контролю через низку недоліків, до яких можна віднести низьку точність і продуктивність, а також погану адаптацію до умов навколишнього середовища. Зі швидким розвитком комп'ютерного зору автоматизація моніторингу поверхневих дефектів все більше й більше застосовується у виробництві металопрокату сталі, алюмінію, міді та інших металів, а також у паперово-картонному, ткацькому та інших подібних виробництвах

Новодранов А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3380-3745>, Шаповалов Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5063-9556>

© А.С. Новодранов, Є.В. Шаповалов, 2024

[11]. У загальному випадку автоматизована система моніторингу якості тонколистових матеріалів (рис. 1) складається з апаратної та програмної підсистем.

До апаратної підсистеми можна віднести світильники (О-1–О-7), в якості яких можуть виступати LED прожектори, промислові високошвидкісні камери (К1–К2), контролери живлення, мережеве обладнання, сервери та інтерфейсні кабелі. Умови освітлення відчутно впливають на якість вихідного зображення. Застосувавши достатню кількість освітлювачів, а також розмістивши їх рівномірно вздовж контрольованої ділянки полотна, можна досягти зменшення рівнів шуму зображення, тіней та відблисків. Правильно розташоване освітлення в подальшому спрощує попередню обробку зображення. Головною частиною промислової камери є матриця, яка перетворює зображення у цифровий відеосигнал. Зображення на матриці отримується шляхом фокусування світла, відбитого від поверхні досліджуваного об'єкту за допомогою об'єктиву камери. При проектуванні оптичної системи слід визначити фокусну відстань, від якої буде залежати кут огляду та масштаб зображення. Наприклад, об'єктив із фокусною відстанню 8 мм має ширший кут огляду, ніж із 4 мм. Але об'єктив із фокусною відстанню 4 мм, маючи вузький кут огляду, забезпечує більшу деталізацію зображення. Підбір цих та інших параметрів залежить від поставленої задачі [12]. Найчастіше використовують промислові кольорові або моно-камери (рис. 2) з роздільною здатністю 2...5 мегапікселів, частотою кадрів 50...60 fps та інтерфейсом передачі даних Gigabit Ethernet. До найпоширеніших виробників промислових камер можна віднести Basler, Vision Research, IDT і Photron. Для роботи автоматизованих систем на ділянках, які виходять за межі поля зору однієї камери, застосовують декілька камер з подальшим програмним об'єднанням і перекриттям. До мере-

жевого обладнання можна віднести Gigabit комутатори для забезпечення обміну даними між камерами та сервером за протоколами TCP або UDP. Інколи умови на виробництві вимагають застосування швидкісних комутаторів з функцією PoE для живлення промислових камер або іншого обладнання постійною напругою 12/24 В.

До програмної підсистеми належить наступне програмне забезпечення:

- модуль попередньої обробки зображень;
- модуль об'єднання декількох відеопотоків в один;
- протокол синхронізації декількох камер;
- модуль машинного навчання;
- модуль розпізнавання та класифікації дефектів;
- модуль прийняття рішень;
- модуль реєстрації та архівації даних.

У типовому випадку реалізації системи камери та освітлювачі розміщені горизонтально та паралельно до поверхні досліджуваного полотна. Камери розташовані так, щоб перекривати одна одну для недопущення пропуску дефектних ділянок. Зображення, отримані за допомогою високошвидкісних камер, передаються до серверу обробки. Далі спеціалізоване програмне забезпечення виконує зведення зображень з декількох камер та їх попередню обробку. У випадку розпізнавання дефекту виконується його класифікація за допомогою залучення нейронної мережі [14]. У залежності від визначеного класу дефекту модуль прийняття рішень визначає подальші дії системи, а саме повну зупинку системи та ін. [15].

Автоматизовані системи розпізнавання дефектів на металопрокатних виробництвах. Застосування автоматизованих систем розпізнавання поверхневих дефектів насамперед актуально для виробництв із виготовлення фольги з алюмінієвих і мідних сплавів. Також доцільне застосування на більш специфічних виробництвах фольги

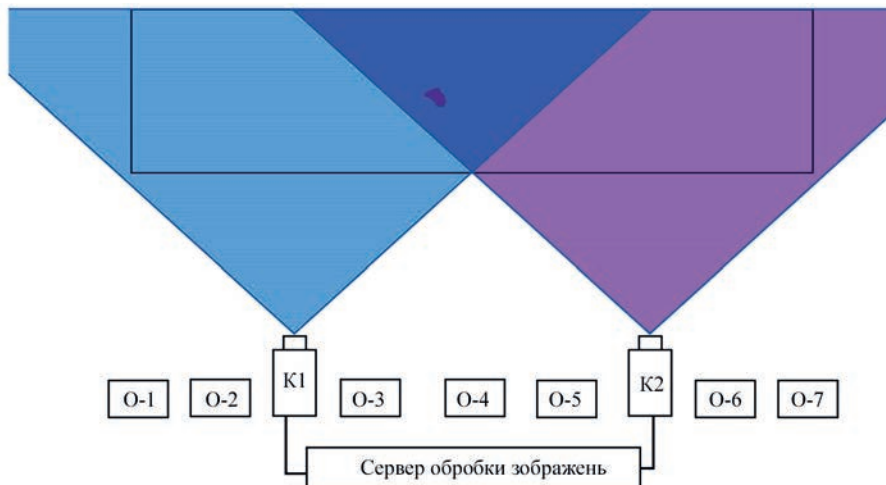


Рис. 1. Типова схема автоматизованої системи контролю дефектності тонколистових матеріалів



Рис. 2. Промислова швидкісна камера Basler Ace [13]

з кобальту або нікелю. До типових поверхневих дефектів металопрокатних виробництв належать масляні плями, подряпини та дірки, нерівності, а також плями корозії [16].

Наприклад, американська компанія Wintriss Engineering Corporation розробляє високоефективні системи Web Ranger (рис. 3) для виявлення дефектів на тонколистових металевих матеріалах. Такі системи можуть бути налаштовані на роботу з плівками, металами, тканиною та папером. Виробник заявляє про можливість розпізнавання найменших і найтонших дефектів за рахунок інтелектуальних камер OPSIS Smart Vision, а також запатентованої системи освітлення. Інтелектуальні камери лінійного сканування обробляють потокове відео в режимі реального часу. За допомогою вбудованого процесора PowerPC дана камера може працювати без сервера за рахунок вбудованих п'яти двовимірних програмних фільтрів, які паралельно обробляють зображення під час сканування поверхні, а також відеобуферу на 1 Гб. За допомогою інтерфейсу Ethernet камера може об'єднуватися з іншими камерами та головним комп'ютером. Швидкість сканування даної камери становить до 640 мегапікселів на секунду [17].

Також слід згадати німецьку компанію IMS Experts, яка розробляє системи контролю для чорної та кольорової металургії. Їх розробку для автоматизованого контролю досліджуваних поверхонь SURCON 2D наведено на рис. 4. Дана система здатна розпізнавати найменші поверхневі дефекти (0,4 мм) у найскладніших виробничих умовах, таких як обмежений простір, середовища з випаровуванням масла або кислот, а також проводити моніторинг поверхні одночасно з двох сторін. Ширина та довжина полотна не обмежена, а максимальна швидкість прокату досягає 1900 м/хв. Апаратна частина складається з Gigabit Ethernet камери лінійного сканування з роздільною здатністю до 8192 пікселів і частотою кадрів до 140 кГц. У якості освітлення використовуються потужні світлодіоди з довжиною хвилі 450...630 нм і активною потужністю понад 500 Вт/м². У якості класифікатора дефектів використовується попередньо навчена за допомогою машинного навчання нейронна мережа. Також можливою є функція паралельної класифікації з використанням декількох класифікаторів для збільшення точності розпізнавання. На додаток корпус системи оснащений повітряним охолодженням для забезпечення



Рис. 3. Автоматизована система Web Ranger для металопрокатного виробництва [18]



Рис. 4. Автоматизована система контролю поверхонь SURCON 2D [20]

роботи на тривалому відрізку часу, а також захистом системи від бризок, пилу, а також бруду [19].

Американська компанія AMETEK Surface Vision розробила модульну систему (рис. 5) для моніторингу поверхневих дефектів на сталі, алюмінії, міді та навіть папері. Дана система оснащена високошвидкісною лінійною камерою з роздільною здатністю 4K 160 МГц, апаратним забезпеченням датчиків власної розробки SmartView SPU, а також лінійними світильниками високої інтенсивності. Програмну частину реалізовано за допомогою штучного інтелекту на базі нейронної мережі, що дозволяє отримати ви-



Рис. 5. Автоматизована система моніторингу поверхні SmartView [22]

сокий рівень розпізнавання та класифікації. Конфігурація оптичного модуля камери забезпечує роздільну здатність пікселя 0,2 мм² із повітряним обдувом для виключення можливості забруднення оптики. Також слід відзначити великий обсяг пам'яті відеобуферу, який сягає 30 год потокового запису [21].

Автоматизовані системи розпізнавання дефектів на паперово-картонних виробництвах. Враховуючи швидкість розвитку паперово-картонної промисловості, головною метою таких підприємств є зменшення кількості дефектів і розривів полотна шляхом удосконалення формуючого обладнання. На цей час найкращим рішенням для зменшення кількості відмов є інтеграція автоматизованих модулів виявлення дефектів в існуючу систему. Типовими дефектами, які негативно впливають на якість матеріалів паперово-картонних виробництв, є: дірки, яскраві та чорні плями, шорсткі краї, подряпини, складки, а також розриви полотна [23].

Наприклад, австрійська компанія IBS-Paper Performance Group в об'єднанні з канадською компанією Papertech розробили автоматизовану систему виявлення дефектів паперового полотна WebInspector (рис. 6). Дана система представлена у трьох конфігураціях у залежності від особливостей виробництва:

- балкова конструкція (рис. 6, а). Даний тип має найвищий ступінь захисту від негативних факторів навколишнього середовища;
- портативна пересувна конструкція (рис. 6, б). Дана система за рахунок своєї мобільності та адаптивності дає змогу проводити моніторинг поверхонь у важкодоступних місцях;
- конструкція типу WebView (рис. 6, в). Даний тип конструкції є спрощеним і дешевшим варіантом балкової конструкції. Конфігурація камер і можливості програмної частини залишилися незмінними.

У якості апаратної частини системи можуть виступати швидкісні промислові камери GigE-стандарту моно або кольорові, з роздільною здатністю матриці понад 2 Мп і частотою 30...1000 зображень на секунду. У якості джерел світла використовуються LED, ксенонові або люмінесцентні прожектори WebLED власної розробки, які повністю синхронізуються з камерами. Програмна частина системи TotalVision працює на базі нейронної мережі. Класифікатор системи виявляє поверхневі дефекти, визначає їх клас та позначає його на карті дефектів котушки [25].

Також варто відзначити фінську компанію Valmet Oyj, яка розробила автоматизовану систему Valmet IQ Web Inspection System (рис. 7) для моніторингу поверхневих дефектів і підви-



Рис. 6. Автоматизована система WebInspector: *а* – балкова конструкція; *б* – портативна; *в* – конструкція типу WebView [24, 25]

щення якості. Апаратна частина складається зі швидкісних промислових матричних камер із роздільною здатністю 0,3...0,8 мм, які синхронізовані з потужними стробоскопічними LED світильниками, які можуть бути розміщені як над полотном, так і під ним для отримання зображень дефектів під різним кутом освітлення. Такий підхід забезпечує підвищення якості розпізнавання та класифікації. Для обміну даними між оптичною системою та серверами обробки зображень застосовуються оптоволоконні кабелі для зниження впливу електромагнітних перешкод. Дана система використовує новітню технологію машинного зору для виявлення та класифікації дефектів на основі нейронних мереж [26]. Для визначення класу небезпеки дефектів застосовується технологія MIDA [27] від німецького виробника Schenk Vision. Дана техно-

логія використовує декілька джерел світла, серед яких може застосовуватися також інфрачервоне, для отримання серії зображень одного дефекту за різного освітлення і один прохід сканування. Такий підхід оцінювання якості полотна забезпечує надійність і високий відсоток розпізнавання та класифікації поверхневих дефектів.

Фінська компанія Proscetex розробила систему виявлення дефектів паперового полотна Proscetex Paper Web Inspection System (рис. 8). Дана система може бути представлена у восьми геометричних реалізаціях під конкретну виробничу задачу, зокрема:

- огляд полотна під високим кутом (рис. 8, *а*). Дана реалізація найкраще підходить для випадків, коли необхідно виявляти лише дефекти з однієї сторони поверхні. При такому варіанті камери встановлюються під кутом 90° до поверхні полотна, а освітлювальні пристрої – під кутом 60°;

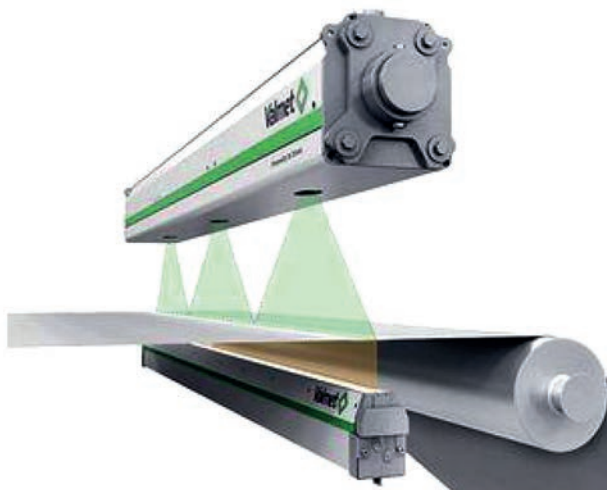


Рис. 7. Автоматизована система Valmet IQ Web Inspection System [28]

- огляд полотна під низьким кутом (рис. 8, б). Дана реалізація найкраще підходить для виявлення дуже маленьких дефектів на поверхні полотна, таких як смуги та пропуски, і не заміняє собою вище описану конструкцію. При такій реалізації кут нахилу камери та освітлювальних пристроїв відносно полотна складає $15...20^\circ$;

- огляд полотна методом пропускання світла (рис. 8, в). Дана реалізацію ґрунтується на встановленні освітлювальних пристроїв під прокатом полотна та пропусканні світла безпосередньо через матеріал виробництва. Така реалізація системи виявлення дефектів обґрунтована тоді, коли не важливо, з якого боку поверхні знаходиться дефект;

- огляд полотна під високим кутом і пропусканні світла (рис. 8, г). Дана реалізація забезпечує найвищий рівень виявлення дефектів за рахунок розширеної та надійнішої класифікації. Внаслідок двох незалежних вимірювань (відбиття та пропус-

кання) інтелектуальна камера може контролювати двокадрове пульсування світлового потоку. Сервери обробки аналізують зображення, отримані під час двох вимірювань за один прохід, тим самим підвищуючи загальний рівень розпізнавання та класифікації;

- огляд полотна з бічним освітленням (рис. 8, д). Дана реалізація системи поєднує в собі метод пропускання світла та бокового освітлення. За допомогою цих методів стає можливим виявлення дефектів, таких як зморшки та деформація поверхні полотна шляхом аналізу тіні. Для забезпечення необхідного ефекту тіні кут освітлення встановлюється дуже низьким. Таке перехресне освітлення усуває проблему підсвічування краю паперового полотна за рахунок того, що прожектори освітлюють ділянки від середини до країв полотна;

- 3D огляд виявлення дефектів (рис. 8, е). Дана система зазвичай монтується в безпосередній близькості до опорного рулону. Така конструкція дає змогу виявляти вм'ятини, а також великі дефекти з високою точністю розпізнавання та класифікації. При такій реалізації камера розташована під кутом 90° до поверхні прокату полотна, а освітлювальне обладнання – під кутом 10° .

Загалом така система може бути налаштована на виробництво газетного або журнального паперу, серветок або картону. Інтелектуальні камери Procemex Smart Camera даної системи дають змогу виявляти дефекти у моно або кольоровому режимі з роздільною здатністю 12 Мп. Також інтелектуальні камери виконують попередню обробку та класифікацію на основі інформації про колір. Система здатна працювати з найвищою швидкістю до 700 мільйонів пікселів на секунду. Застосування стробоскопів за-



Рис. 8. Автоматизована система контролю Procemex Paper Web Inspection System [29]

мість метало-галогенних освітлювачів дозволяє в 15 разів зменшити споживання електроенергії та виділення тепла, а також продовжити термін експлуатації світлодіодів. Така технологія освітлення та застосування надчутливого датчика CMOS забезпечує час експозиції 5...20 мкс, що призводить до отримання чітких і чистих зображень [30].

Автоматизовані системи розпізнавання дефектів на ткацьких виробництвах. Застосування автоматизованих систем виявлення та класифікації поверхневих дефектів на ткацьких виробництвах дозволяє зменшити кількість браку на ранніх стадіях, тим самим підвищити якість і продуктивність. Підвищення продуктивності досягається швидким реагуванням на виявлені дефекти та прийняттям рішення про подальші дії. Таким чином, інтеграція модулів виявлення дефектів у вже існуючі ткацькі системи призводить до випуску високоякісної продукції з дотриманням усіх стандартів цієї галузі. До типових дефектів ткацького виробництва можна віднести зміщені, втрачені або сторонні волокна, масляні плями, відхилення від базової структури, зморшки та ін. [31].

Нідерландська компанія COMVIS розробила автоматизовану систему перевірки дефектності тканини Profiler (рис. 9) у двох варіантах: універсальний модуль (рис. 9, а) і модуль для ткацьких верстатів (рис. 9, б). Швидкість прокату такої системи сягає 100 м/хв. Апаратна частина представлена камерами лінійного сканування Areascan, джерелами світла, що представлені модулем власної розробки Profile Backlight для про-

зорих і напівпрозорих тканин, а також передніми ліхтарями для непрозорих тканин. Програмна частина забезпечує повністю автоматичну перевірку ткацького полотна за допомогою системи невидимих чорнильних марок або аплікатора етикеток. Модуль виявлення, розпізнавання та класифікації дефектів Teexplorer CORE за допомогою сучасних алгоритмів визначає всі відхилення або дефектні області, а також краї ткацького полотна [32, 33].

Також варто відзначити англійську компанію Shelton Vision, яка розробила систему пошуку дефектів ткацького виробництва WebSPECTOR (рис. 10). Швидкість прокату для такої системи сягає понад 100 м/хв. Апаратна частина представлена декількома камерами лінійного сканування, розміщеними по ширині полотна із вбудованими датчиками контролю кольору c-text color. У якості конфігурації освітлення в залежності від задачі можуть бути застосовані дифузійне верхнє або заднє освітлення, тінь під низьким кутом або тінь збоку під низьким кутом. Програмна частина системи включає в себе алгоритми машинного навчання для виявлення та класифікації дефектів за типом, а також визначення ступеня небезпечності того чи іншого дефекту в реальному часі. Використання карти дефектів призводить до зменшення кількості відходів, а також підвищення продуктивності виробництва [34].

Зведені технічні характеристики автоматизованих систем контролю дефектів тонколистових матеріалів для порівняння наведено у таблиці.

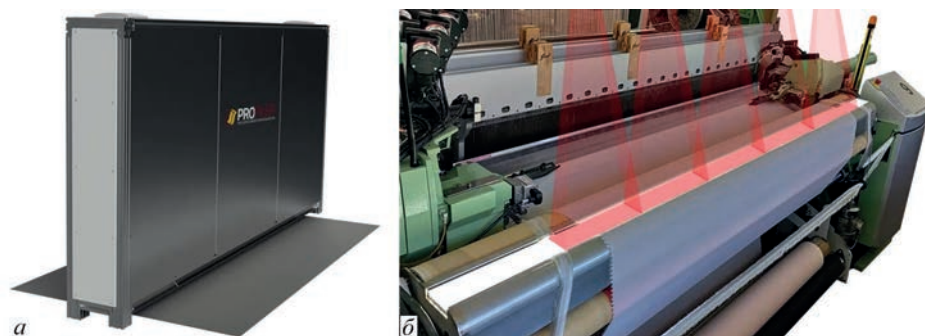


Рис. 9. Автоматизована система COMVIS Profiler [32, 33]



Рис. 10. Автоматизована система Shelton Vision WebSPECTOR [35, 36]

Зведені технічні характеристики автоматизованих систем контролю дефектів тонколистових матеріалів

Назва системи	Об’єкт контролю	Тип конструкції	Тип освітлення	Технологія програмної частини
Web Ranger	Метал, тканина, папір, плівка	Стаціонарна	LED прожектори	Нейромережева
SURCON 2D	Метал	Стаціонарна	LED прожектори	Нейромережева
SmartView	Метал, папір	Модульна	Лінійні світильники	Нейромережева
WebInspector	Метал, папір	Портативна, стаціонарна	Ксенонові або люмінесцентні прожектори	Нейромережева
Web Inspection System	Папір	Модульна	Стробоскопічні LED світильники	Нейромережева
Procemex Paper Web Inspection System	Папір	Стаціонарна, модульна	Стробоскопічні LED світильники	Нейромережева
Profiler	Метал, папір, тканина	Стаціонарна, модульна	LED прожектори	Нейромережева
Shelton Vision Web Inspector	Тканина	Стаціонарна	LED прожектори	Нейромережева

Висновки

За результатами аналізу функціональних можливостей автоматизованих систем контролю дефектів тонколистових матеріалів можна зробити висновок, що застосування таких систем призводить до підвищення продуктивності виробництва шляхом завчасного виявлення дефектів і зменшення кількості відходів. Оснащення такими системами автоматизованих ліній дозволяє зменшити вплив людського фактору на процес виробництва.

У процесі аналізу було визначено, що розглянуті системи Web Ranger і Profiler є універсальними, тобто здатні розпізнавати дефекти на поверхнях починаючи з паперу, завершуючи металевим прокатом і тканиною. Порівнюючи апаратну частину можна зробити висновок, що переважно застосовуються швидкісні промислові камери, але компанії Procemex і Wintriss Engineering Corporation оснащують свої системи інтелектуальними камерами, які можуть виконувати попередню обробку зображень і працювати як окремі модулі. У якості систем освітлення в найпростіших конфігураціях застосовується верхнє освітлення під високим кутом, а саме 90° до досліджуваної поверхні. Але системи SURCON, IQ Web Inspection System і Paper Web Inspection System мають конфігурації розміщення освітлення під високим або низьким кутом із використанням метода просвічування або поєднання декількох варіантів у залежності від матеріалу. У якості джерел освітлення зазвичай використовують LED світильники, проте в системах IQ Web Inspection System і Paper Web Inspection System застосовано стробоскопічні LED прожектори, що дозволяє зменшити енерговитрати, продовжити термін служби світлодіодів, а також підвищити якість зображення. Серед варіантів монтажу найчастіше застосовують стаціонарну конфігурацію безпосередньо на виробничій лінії. Проте система WebInspector має варіант портативної реалізації на діагностичному візку, а системи Profiler і

WebSPECTOR можуть бути використані як окремі модулі. У якості програмної частини всі розглянуті системи застосовують власне програмне забезпечення на базі нейронних мереж із використанням методів машинного навчання та схожі за функціональними можливостями. До типових функцій програмного забезпечення подібних систем можна віднести віддалене керування, карту дефектів, візуалізацію результатів, систему сповіщення та звітності та ін. Щодо цінової політики таких систем, то у відкритому доступі інформація відсутня. Для отримання інформації про вартість таких систем необхідно надіслати технічне завдання відповідальним особам для розрахунку.

Список літератури/References

- Goebbels, K., Ferrano, G. (1988) Automation of surface defect detection and evaluation. Proc. SPIE 0849, Automated Inspection and High-Speed Vision Architectures, 22 March 1988. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.942832>
- Malamas, E.N., Petrakis, E.G.M., Zervakis, M. et al. (2003) A survey on industrial vision systems, applications and tools. *Image Vis. Comput.*, 21(2), 171–188. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(02\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(02)00152-X)
- Norton-Wayne, L., Bradshaw, M., Jewell, A.J. (1992) Machine vision inspection of web textile fabric. *BMVC*, 1, 217–226. DOI: <https://doi.org/10.5244/C.6.23>
- Kumar, A. (2008) Computer-vision-based fabric defect detection: A survey. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 55(1), 348–363. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.1930.896476>
- Shao, X., Xia, X., Song, J. (2022) Design and research of metal surface defect detection based on machine vision. *11th International Conference of Information and Communication Technology*, 406–410. DOI Bookmark: <https://doi.org/10.1109/ICTech55460.2022.00087>
- Huottilainen, T., Laster, M., Riikonen, S. (2019) Real-time paper and paperboard quality analysis and classification based on paper formation or surface appearance in web inspection system. *Conference PaperCon, May2019, Indianapolis, USA*.
- Bissessur, Y., Martin, E., Morris, A. (1999) Monitoring the performance of the paper making process. *Control Eng. Pr.*, 7(11), 1357–1368. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(99\)00105-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00105-7)
- Xiaoxin Fang, Qiwu Luo, Bingxing Zhou, Congcong Li and, Lu Tian (2020) Research progress of automated visual surface defect detection for industrial metal planar materials. *Sensors*, 20(8), 5136. DOI: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(99\)00105-710.3390/s20185136](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00105-710.3390/s20185136)
- Luo, Q., He, Y. (2016) A cost-effective and automatic surface defect inspection system for hot-rolled flat steel. *Robot.*

- Comput. Integr. Manuf.*, **38**(C), 16–30. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(99\)00105-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00105-7). rcim.2015.09.008
10. Singh, Swarit & Desai, Kaushal (2022) Automated surface defect detection framework using machine vision and convolutional neural networks. *J. of Intelligent Manufacturing*, **34**(4), 1995–2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01878-w>
 11. Francisco G. Bulnes, Ruben Usamentiaga, Daniel F. Garcia, Julio Molleda (2012) Vision-based sensor for early detection of periodical defects in web materials. *Sensors*, **12**(8), 10788–10809. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(99\)00105-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00105-7)
 12. Telljohann, A. (2007) *Chapter 2. Introduction to building a machine vision inspection*. In: Handbook of Machine Vision; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 35–71.
 13. Basler, AG [Електронний ресурс]. Basler ace aca1920-48gm. <https://www.baslerweb.com/en/shop/aca1920-48gm/>
 14. Chang, C.A., Su, C.T. (1995) A comparison of statistical regression and neural network methods in modeling measurement errors for computer vision inspection systems. *Comput. Ind. Eng.*, **28**(3), 593–603. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(94\)00211-5](https://doi.org/10.1016/0360-8352(94)00211-5)
 15. Brzakovic, D., Vujovic, N. (1996) Designing a defect classification system: A case study. *Pattern Recog.*, **29**(8), 1401–1419. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(95\)00166-2](https://doi.org/10.1016/0031-3203(95)00166-2)
 16. Duan, X., Duan, F., Han, F. (2011) Study on surface defect vision detection system for steel plate based on virtual instrument technology. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Control, Automation and Systems Engineering, Singapore*. DOI: <https://doi.org/10.1109/IC-CASE.2011.5997625>
 17. (2014) Wintriss Engineering [Електронний ресурс]. *OPISIS Smart Vision*. <https://datasheet.datasheetarchive.com/originals/crawler/weco.com/682af94e91931264471d0a90eb777fbd.pdf>
 18. Wintriss Engineering [Електронний ресурс]. *Metals Solution*. <https://www.weco.com/metals>
 19. (2020) IMS Messsysteme GmbH [Електронний ресурс]. *Optical measuring systems surcon 2D surface inspection for Cold Rolling Mills & Processing Lines*. <https://www.ims-experts.com/wp-content/uploads/2020/12/TIN-2D-Surface-Inspection-Systems-for-Cold-Rolling-Mills-and-Processing-Lines.pdf>
 20. IMS Messsysteme GmbH [Електронний ресурс]. *Surcon 2D surface inspection system*. <https://www.ims-experts.com/en/measuring-system/surface-inspection-system-surcon-2d-metal-service-centres/>
 21. (2019) AMETEK Surface Vision [Електронний ресурс]. *Metals surface inspection*. https://www.ameteksurfacevision.com/-/media/ameteksurfacevisionv2/documentation/industry-brochures/metals/ametek_surface_vision_metals_brochure_rev3_en.pdf
 22. AMETEK Surface Vision [Електронний ресурс]. *Surface Vision*. https://www.ameteksurfacevision.com/-/media/AmetekSurfaceVisionV2/Documentation/CaseStudies/AMETEK_Surface_Vision_Arania_Case_Study_Rev2_KO.pdf
 23. Strokina, N., Eerola, T., Lensu, L., Kälviäinen, H. (2011) Adaptive classification of dirt particles in papermaking process. *Image Analysis – 17th Scandinavian Conference, SCIA 2011, Ystad, Sweden*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-21227-7_68
 24. IBS Austria GmbH [Електронний ресурс]. *Camera based trouble shooting*. <https://www.ibs-ppg.com/en/products/detail/camera-based-trouble-shooting>
 25. Papertech [Електронний ресурс]. *Web inspection*. <https://www.papertech.ca/web-inspection/>
 26. Valmet Corporation [Електронний ресурс]. *Valmet IQ Web inspection system*. <https://valmet.my.salesforce-sites.com/solutionfinderweb/sfc/servlet.shepherd/version/download/068580000026M9GAAU>
 27. Dr. Schenk GmbH [Електронний ресурс]. *MIDA – Superior defect detection and classification*. <https://www.drshenk.com/news/news-article/mida-superior-defect-detection-and-classification-15/>
 28. Dr. Schenk GmbH [Електронний ресурс]. *Paper inspection*. <https://www.drshenk.com/products/paper-inspection.html>
 29. Procemex [Електронний ресурс]. *Measurement geometries*. <https://www.procemex.com/web-inspection/measurement-geometries/#low-angle-web-inspection>
 30. Procemex [Електронний ресурс]. *Web inspection system*. <https://www.procemex.com/web-inspection/>
 31. Dr. Schenk GmbH [Електронний ресурс]. *Textile inspection*. <https://www.drshenk.com/products/structured-surfaces/textile-inspection.html>
 32. COMVIS – Company in vision [Електронний ресурс]. *Profiler™ for Looms*. <https://comvis.com/inspection-systems/profiler-for-looms/>
 33. COMVIS – Company in vision [Електронний ресурс]. *Profiler™ Fabric Inspection*. <https://comvis.com/inspection-systems/profiler-automatic-fabric-inspection/>
 34. Shelton Machines Ltd [Електронний ресурс]. *Machine vision solutions*. <https://www.sheltonvision.co.uk/visual-inspection-systems/machine-vision-solutions/>
 35. Indian Textile Journal [Електронний ресурс]. *Shelton vision: Beyond big data and tailored for textiles*. <https://indiantextilejournal.com/shelton-vision-beyond-big-data-and-tailored-for-textiles/>
 36. IndiaMART [Електронний ресурс]. *Fully automatic camera based inspection machine, for fabric checking*. <https://www.indiamart.com/proddetail/fully-automatic-camera-based-inspection-machine-23747914755.html>

AUTOMATED VISUAL CONTROL SYSTEMS FOR SURFACE DEFECTS IN THIN-SHEET MATERIALS (Review)

A.S. Novodranov, E.V. Shapovalov

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: artur19940731@gmail.com

Taking into account the speed of development in the production of thin-sheet materials, the use of automated systems for detecting surface defects in such products is becoming more and more relevant. This is due to the fact that an early-detected defect reduces the amount of waste and increases production efficiency by reducing equipment downtime. The purpose of the paper is to review modern automated systems for visual inspection of surface defects on thin-sheet materials, in order to evaluate their effectiveness, advantages, and limitations. The paper examines and analyzes the automated systems for searching for surface defects in various industries, including metal, paper and weaving rolled stock. It is shown that systems of this class are most often performed in a stationary configuration directly on machine tools or rolling machines, but there are systems that, in addition to their stationary implementation, have a portable version that is mounted on a diagnostic cart. The components of the hardware subsystem are considered, namely, the advantages of using intelligent cameras in comparison with linear scanning cameras are outlined. The advantages of using stroboscopic lighting in comparison with conventional LED floodlights have been determined. The software subsystem was considered, and it was also determined that the use of artificial intelligence methods, namely neural networks with machine learning, is a promising vector for development of such systems. 36 Ref., 1 Tabl., 10 Fig.

Keywords: *automated visual control, defects of thin-sheet materials, metal thin-sheet materials, automated control systems*

Надійшла до редакції 05.02.2024,
Отримано у переглянутому вигляді 13.02.2024
Прийнято 21.03.2024