

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХНЬОЇ НАДІЙНОСТІ

А.С. Новодранов, В.О. Коляда

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

Перехід від ливарного виробництва несучих частин візків вантажних вагонів до альтернативних технологій, зокрема електродугового зварювання, є перспективним напрямком розвитку. У цьому дослідженні розглядається бокова рама візка вантажного вагона. З'єднання за допомогою електродугового зварювання елементів рами із якісного листового прокату забезпечує дотримання базових розмірів у межах ± 1 мм. Крім того, це дозволяє зменшити зношення колісних пар та вагу непередсорених мас. Однак ефективність застосування ручного зварювання значною мірою залежить від кваліфікації зварника. Внаслідок порушення технології зварювання можуть утворюватися дефекти. Такі обмеження створюють передумови для використання засобів автоматизованого зварювання на основі робототехнічних комплексів. Роботизація зварювального виробництва забезпечує високу продуктивність, а також дотримання всіх технологічних вимог. Проте використання одних лише зварювальних роботів не може забезпечити бездефектне виробництво, що спонукає до інтеграції автоматизованих систем неруйнівного контролю (НК). Враховуючи той факт, що бокова рама належить до класу конструкцій відповідального призначення та підлягає багатоступінчастому НК, доцільно застосовувати технологію машинного зору як систему візуально-оптичного НК. Алгоритми нейронних мереж, які є основою програмних компонентів системи візуально-оптичного НК, дозволяють автоматизувати процес розпізнавання поверхневих дефектів. Такий підхід сприяє своєчасному виявленню і усуненню дефектів, що призводить до підвищення довговічності конструкції. *Бібліогр.* 10, табл. 3, рис. 9.

Ключові слова: конструкції відповідального призначення, роботизоване зварювання, візуально-оптичний неруйнівний контроль, пошук дефектів, нейронна мережа, робототехнічна система, машинний зір

Вступ. У наш час виготовлення зварних конструкцій відповідального призначення потребує залучення сучасних підходів до зварювання та контролю якості. Як найбільш навантажений елемент несучої частини візка вантажного вагона в даному дослідженні розглядається конструкція бокової рами. Від її експлуатаційної надійності та працездатності залежить безпека рухомого складу залізничного транспорту.

Як правило, причинами втомного руйнування є недосконалість конструкції виробу та її невідповідність умовам навантаження. Сучасне вітчизняне виробництво таких елементів візка залізничного вагона, як бокова рама, передбачає застосування ливарних технологій. Ливарне виробництво має ряд недоліків, таких як: утворення тріщин у литих конструкціях, усадкові раковини та газові пори, включення у метали частинок формовочних матеріалів, порушення геометрії та розмірів литих деталей. Крім цього, литво є термічним процесом із великою теплоємністю металу, що супроводжується уповільненням його кристалізації. Ливарна форма також вносить свій негативний вплив у про-

цес кристалізації металу через низьку теплопровідність матеріалу, з якого вона виготовляється. При цьому необхідно врахувати значну масу бокової рами, її складну геометрію та необхідність підживлення рідким металом у процесі кристалізації та усадки. Тобто кристалізація рідкого металу буде досить тривалим процесом, що призведе до зростання розмірів кристалітів і можливої ліквідації домішок. Такі особливості ливарного виробництва габаритних і масивних виробів, як правило, супроводжуються зниженням пластичності та в'язкості металу, що негативно позначається на експлуата-



Рис. 1. Зруйнована бокова рама візка вантажного вагона, що виготовлена за ливарною технологією [1]

© А.С. Новодранов, В.О. Коляда
 © Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026
 Це стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ційній надійності та циклічній довговічності виробів (рис. 1) [1, 2]. Виправлення дефектів, які утворюються у виробках, виготовлених із застосуванням литва – трудомісткий, довгий і коштовний процес.

Крім цього, в останні десятиліття в світі спостерігаються тенденції до обмеження та зниження негативного впливу виробничих процесів на екологію навколишнього середовища. Металургійні ж процеси, до яких відноситься й литво, вирізняються негативними екологічними показниками. Такі виробництва вимагають оснащення їх коштовними та складними системами очистки виробничих викидів. Усі перераховані фактори не сприяють здешевленню виробництва бокових рам, а, навпаки, підвищують собівартість їхнього виготовлення. Тому всі промислово й технічно розвинуті країни працюють над альтернативними технологіями виготовлення литих масивних елементів візків вагонів. Одною з таких альтернативних технологій є виготовлення вказаних елементів із металевого прокату із застосуванням зварювання, яке має значно вищі екологічні показники ніж литво.

Стан проблеми. Бокові рами, виготовлені із використанням ливарних технологій, мають суцільну литу структуру. Вище було зазначено, що через їхню масивність і велику теплоємність рідкого металу кристалізація уповільнюється, а в металі, що кристалізується, формується крупнокристалічна структура з порівняно низькими показниками в'язкості та пластичності. Циклічна ж довговічність металевих виробів залежить від цих показників – чим вони вищі, тим вищою буде стійкість до втомного руйнування. Виправити недоліки литої крупнокристалічної структури можна або за рахунок механічної обробки конструкції – прокатування чи проковування, або термічної обробки з перекристалізацією металу. У першому випадку відбувається механічне подрібнювання кристалітів (зерен) металу. Другий випадок передбачає нагрів виробу до температур аустенітного перетворення із зародженням нових зерен і обмеженням процесу їхнього росту. Обидва методи достатньо ефективні, проте підвищують трудо- та енергоємність виробничого процесу, а відповідно – й вартість литих виробів.

При виготовленні бокових рам із листового прокату із застосуванням зварювання використовується метал, що пройшов механічну обробку – прокатування, який має дрібнокристалічну структуру з високими показниками пластичності та в'язкості. Єдиними ділянками металу, що має литу структуру, є зварні шви. Однак їхня маса та площа

порівняно з відповідними показниками усєї конструкції є надзвичайно малими. Крім цього, зварювання за рахунок обмеження тепловкладення сприяє формуванню в зварних швах дрібнокристалічної структури. Якщо ж шви виконуються за кілька проходів, це додатково подрібнює зерна металу за рахунок циклічних нагрівів і охолоджень металу уже виконаних проходів. Обмеження тепловкладення в зварне з'єднання при його виконанні сприяє прискоренню кристалізації металу шва та попередженню ліквідації домішок.

Таким чином, порівняння наведених вище факторів свідчить, що застосування зварювання при виготовленні масивних і габаритних елементів візків залізничних вагонів є доцільнішим та перспективнішим за ливарні технології. Однак зварювання має багато способів реалізації. Аналіз і порівняння їхніх технологічних можливостей, проплавної здатності та продуктивності, особливостей захисту зони зварювання від впливу навколишнього середовища, вимог до облаштування виробничих приміщень, вимог до підготовки виробів під зварювання, складності та вартості обладнання для реалізації показали, що найоптимальнішим способом для зварювання елементів візків залізничних вагонів є дугове зварювання плавким електродом у захисних газах. Враховуючи те, що елементи візка залізничного вагона, зокрема бокова рама, відносяться до категорії особливо відповідальних конструкцій, при їхньому виробництві повинна застосовуватись багаторівнева система контролю якості, починаючи зі зварних з'єднань.

Практичний досвід показує, що на якість зварних з'єднань інтенсивний вплив чинить людський фактор, який необхідно обмежувати, а враховуючи категорію відповідальності зварної конструкції, його вплив необхідно звести до мінімуму – практично виключити зовсім. Забезпечити це здатна тільки роботизація зварювального процесу.

Мета роботи полягає у дослідженні впливу якості зварних з'єднань на циклічну довговічність бокової рами та ефективності застосування автоматизованої системи візуально-оптичного контролю на основі штучних нейронних мережі для підвищення достовірності розпізнавання поверхневих дефектів під час зварювання конструкцій відповідального призначення.

Результати досліджень впливу якості зварних з'єднань на циклічну довговічність бокової рами. Одним із основних факторів, що визначають властивості металу зварних з'єднань, їхню працездатність і експлуатаційну надійність, є структура металу з'єднання. В якості основного

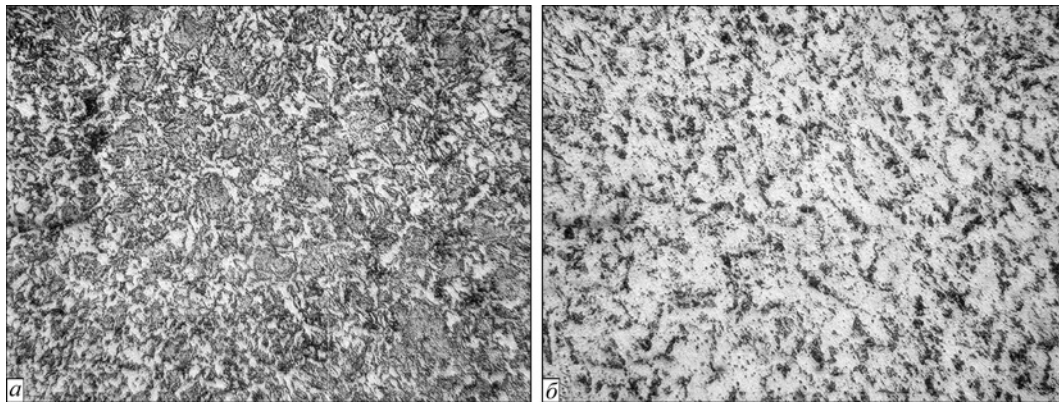


Рис. 2. Ферито-перлітна мікроструктура металу зварного з'єднання бокової рами ($\times 500$): метал ЗТВ – ферит 89,5 % + перліт 10,5 % (а); метал зварного шва – ферит 90,4 % + перліт 9,6 % (б)

металу при виготовленні бокової рами використовується сталь 09Г2С, її аналоги та замітники. Дана група сталей відноситься до низьковуглецевих. Для їх зварювання застосовується дріт типу Св08Г2С. Як правило, у зварних з'єднаннях вказаних сталей формуються змішані ферито-перлітні структури з різним процентним співвідношенням складових – фериту та перліту. Це підтверджується й результатами металографічних досліджень зварних з'єднань, у яких формуються ферито-перлітна структура (рис. 2). Процентне співвідношення фериту та перліту в металі зони термічного впливу (ЗТВ) складає 89,5 і 10,5 % відповідно, а в металі шва – 90,4 і 9,6 % відповідно. Розміри зерна в металі ЗТВ відповідає 6-му балу за ДСТУ, а в металі шва – 9-му балу.

Ці дані показують, що в металі шва та ЗТВ формуються дрібнозернисті ферито-перлітні структури, дуже близькі за процентним співвідношенням фаз. Як правило, такі структури мають високі показники в'язкості та пластичності, що обумовлює їхню високу тріщиностійкість. У табл. 1 наведено результати механічних випробувань металу зварного з'єднання. Вони показують, що метал шва та ЗТВ мають близькі й високі показники пластичності – відносне подовження (δ) і відносне звуження (ψ), а також близькі й високі показники ударної в'язкості при випробуваннях із круглим надрізом (KCU) і гострим надрізом (KCV) при достатньо високих показниках міцності.

Мікроструктура металу зварного з'єднання та його механічні властивості в сукупності свідчать, що зварна конструкція (бокова рама) повинна мати високу стійкість до втомного руйнування. Однак випробування на втомну міцність (рис. 3) показали, що це не відповідає дійсності. Причиною ви-

явилися дефекти зварних з'єднань, допущені при їхньому виконанні механізованим (напівавтоматичним) зварюванням. Зародження тріщини спричинило неякісне завершення зварювального шва в місці з'єднання нижнього похилого поясу та буксової опори (рис. 3, б, з). Закінчення даного шва супроводжується значним підрізом (рис. 3, д), що стало значним концентратором напружень при циклічних навантаженнях. Також зламана частина бокової рами містить непровари в корені шва (рис. 3, е) у повздовжніх зварних з'єднаннях нижнього поясу з боковими стінками. Це доводить доцільність роботизації процесу зварювання бокової рами візка вантажного вагона.

Таким чином, ані сприятлива структура металу зварних з'єднань, ані високі показники його пластичності та в'язкості не здатні забезпечити необхідний рівень спротиву втомному руйнуванню при наявності дефектів у металі зварних з'єднань. А це обґрунтовує необхідність безперервного контролю за умовами та якістю формування зварних з'єднань у процесі їхнього виконання. Враховуючи те, що конструкція бокової рами підлягає багатоступінчастому НК, зокрема й візуальному контролю, доречним виглядає варіант оснащення зварювального робота системою машинного зору. У такому випадку дана система буде спроможна виявляти, класифікувати, визначати ступінь небезпечності та необхідність усунення того чи іншого поверхневого дефекту, тим самим підвищуючи надійність зварної конструкції.

Методологія. Більшість швів у конструкції бокової рами є багатопрхідними та формуються з 2-х, 3-х шарів залежно від типу зварного з'єднання й товщини деталей. Контроль зварних з'єднань здійснюється після закінчення зварювання відпо-

Таблиця 1. Результати випробувань металу зварного з'єднання на ударну в'язкість (+20 °С)

Ділянка зварного з'єднання	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²	KCV , Дж/см ²
Шов	468,6	361,2	39,9	74,8	348,8	254,0
ЗТВ	489,9	389,8	41,0	77,9	349,4	265,1

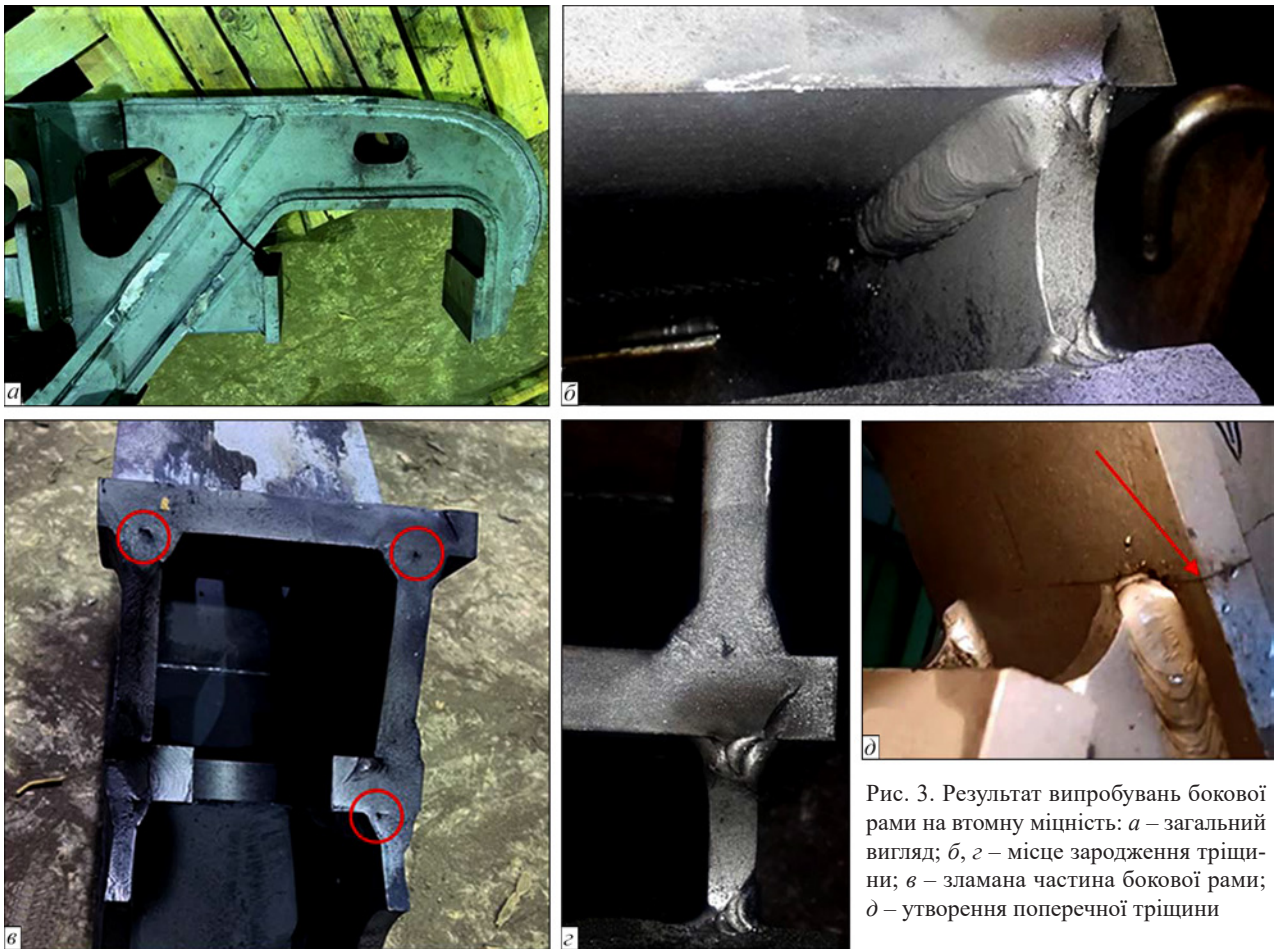


Рис. 3. Результат випробувань бокової рами на втомну міцність: а – загальний вигляд; б, с – місце зародження тріщини; в – зламана частина бокової рами; д – утворення поперечної тріщини

відного проходу. Методика виявлення поверхневих дефектів полягає в аналізі цифрового зображення зварного шва шляхом визначення інформативних ознак. Виявлення та класифікація дефектів відбувається на основі аналізу інформативних ознак. Шляхом застосування зворотного перспективного перетворення визначаються геометричні розміри дефектів. Система машинного зору складається з промислової високошвидкісної камери та контро-

лера обробки зображень, що інтегровані в робототехнічний комплекс (РТК). Макет РТК (рис. 4) для електродугового зварювання конструкції бокової рами складається з наступних компонентів: зварювального робота Fanuc серії ARC Mate (1); позиціонера з однією обертальною ланкою (2); контролера керування роботом R-30iB Plus (3); зварювального джерела живлення (4); станції автоматичного очищення пальника (5); контроле-

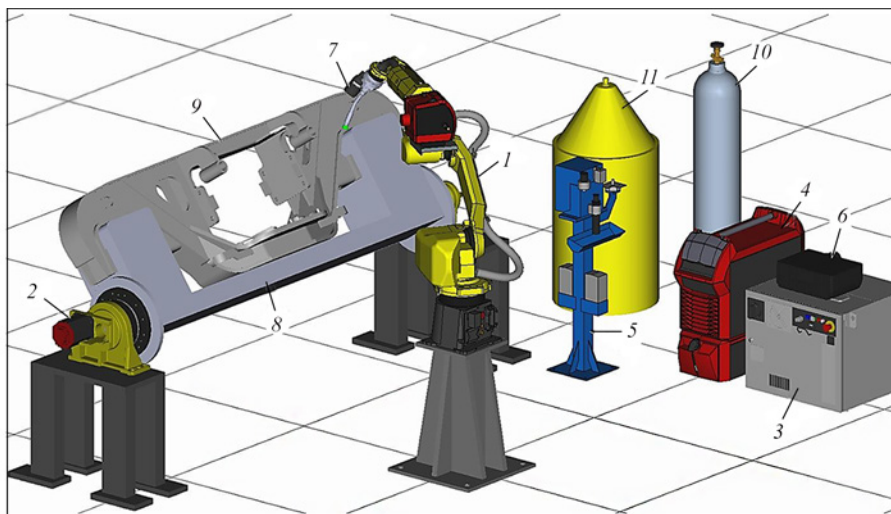


Рис. 4. Макет робототехнічної системи для автоматизованого зварювання бокової рами візка вантажного вагона, створений у пакеті моделювання Fanuc Roboguide

ра системи розпізнавання поверхневих дефектів (6); промислової камери для системи розпізнавання поверхневих дефектів (закріплена на пальнику робота) (7); спрощеної моделі оснащення для складання та зварювання (8); зібраної конструкції бокової рами (9); ємності із захисною газовою сумішшю $Ar\ 82\% + CO_2\ 18\%$ (10); контейнера зі зварювальним дротом (250 кг) (11).

Використання зварювального робота забезпечує чітке дотримання запрограмованих траєкторій руху пальника з можливим адаптивним корегуванням параметрів зварювання (струм, напруга на дузі, амплітуда й частота коливань тощо) для компенсації похибок підготовки деталей або будь-яких інших чинників. Адаптивне корегування забезпечується вбудованими програмно-апаратними засобами зварювального робота. Наприклад, для зварювальних роботів FANUC це наступні модулі: FANUC Through Arc Seam Tracking, FANUC Touch Sensing, FANUC Automatic Voltage Control тощо [3]. Таким чином, досягається повна автоматизація процесу зварювання, що повністю виключає вплив людського фактора на процес виробництва. Однак без встановлення належного зворотного зв'язку між роботом і відповідною системою НК забезпечити бездефектне зварювальне виробництво неможливо. У процесі роботи системи створюється карта дефектів, що містить наступну інформацію: клас, розмір і рівень небезпечності кожного дефекту. На основі карти дефектів система може автоматично приймати рішення щодо придатності зварного з'єднання або необхідності усунення виявленого дефекту.

Обробка зображень. Попередня обробка реалізується на підготовчому етапі для нормалізації цифрових зображень, отриманих від камери, закріпленої на пальнику зварювального робота. Для зменшення впливу шумів та інших відхилень, що можуть виникати під час зйомки, застосовується фільтрація. Найчастіше використовується алгоритм медіанної фільтрації для зниження імпульсного шуму, що накладається на зображення під час проходження через електричне середовище внаслідок дії електромагнітних перешкод [4]. Наявність шумів на зображеннях поверхні зварних з'єднань призводить до зниження якості розпізнавання та класифікації дефектів. Використання методів підвищення контрастності необхідне для ефективного розрізнення дефектів малого розміру на зображенні з нерівномірним освітленням. Найчастіше в якості методу підвищення контрастності використовується підхід вирівнювання гистограми зображення (Histogram equalization). Особливість глобальних методів підвищення контрастності полягає у застосуванні функції перетворення до всіх пікселів зображення в цілому. У свою чергу, суть локальних методів полягає в ітераційній обробці пікселів зображення шляхом застосування вікна ковзання розміром $M \times N$. Використання граничної сегментації призводить до виділення характерних ознак дефектів на бінаризованих зображеннях. Процес бінаризації полягає у призначенні певному пікселю зображення значення 0 або 1 у залежності від встановленого граничного значення. Найбільша ефективність граничної сегментації досягається під час обробки зображень із рівномірним освітленням і

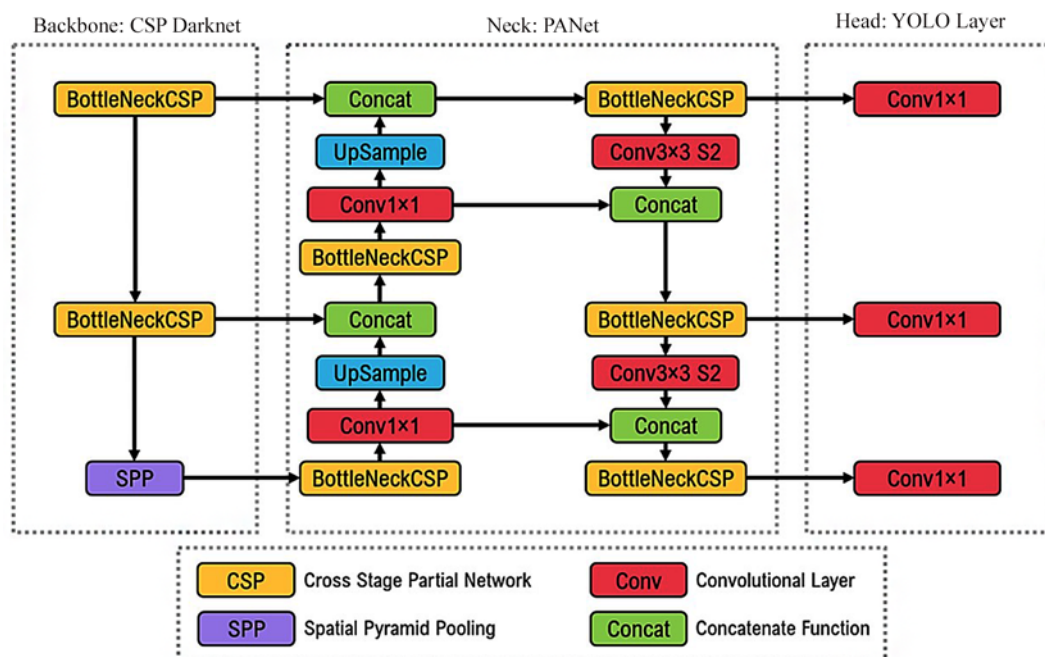


Рис. 5. Архітектура нейронної мережі YOLOv5 [6]

чіткою границею між фоном і зварним швом. Таким чином, підвищення ефективності розпізнавання поверхневих дефектів методами на основі нейронних мереж досягається шляхом застосування методів нормалізації зображень [4].

Програмна частина системи автоматизованого візуально-оптичного НК. Програмна частина сучасних систем машинного зору найчастіше розробляється з використанням алгоритмів нейронних мереж. Ці алгоритми автоматично формують багаторівневий простір інформативних ознак на противагу класичним підходам виявлення поверхневих дефектів. У роботі розглянуто можливість одностадійного детектора YOLOv5, архітектура якого зображена на рис. 5. Вибір обумовлений технічними можливостями, що необхідні для систем реального часу, а саме: відмінний рівень швидкодії та висока точність класифікації. Архітектура моделі (рис. 5) складається з трьох базових модулів: Backbone, Neck і Head. За вилучення інформативних ознак дефектів відповідає головний блок Backbone. Об'єднання згорткових блоків, що використовують механізм часткового поєднання інформативних ознак, реалізовано за допомогою технології CSPDarknet. Головною задачею блоку Neck є аналіз та обробка інформативних ознак різних рівнів, що надходять із блоку Backbone. Виявлення об'єктів, прогнозування обмежувальних рамок, а також формування ймовірностей належить до функціональних можливостей блоку Head. Застосування методу PANet необхідне для підвищення ефективності аналізу елементів, що є варіативними за формою та геометричними параметрами [5, 6].

Зважаючи на універсальність і широкий спектр галузей використання моделі YOLOv5, доцільно адаптувати нейронну мережу під особливості задач візуально-оптичного НК. Наявність дефектів невеликих розмірів, низький контраст, нерівномірне освітлення, а також подібність між класами – все це формує завдання для автоматизації візуально-оптичного НК. Тому в базову модель внесено декілька вдосконалень. Зокрема для підвищення точності локалізації дефектів малого розміру (поверхневі пори) та загальної чутливості моделі модифіковано функцію втрат. У базовій моделі функція втрат [7] визначається наступним чином:

$$L_{IoU} = 1 - IoU + \frac{p^2(b, b^{st})}{c^2} + \alpha \cdot v, \quad (1)$$

де IoU – площа перерізу обмежувальних рамок; $p^2(b, b^{st})$ – евклідова відстань між центрами прогнозованої (b) та еталонної (b^{st}) рамок; c – діагональ уздовж обох рамок; α – коефіцієнт ваги;

v – значення різниці співвідношення сторін. Для адаптивної зміни ваги корегувальної компоненти у залежності від геометричних параметрів дефекту введено коефіцієнт β , що визначається наступним чином:

$$\beta = 1 + \log(1 + w \cdot h), \quad (2)$$

де w та h – відповідно ширина та висота обмежувальної рамки. Таким чином, модифікована функція втрат визначається як:

$$L_{mod} = (1 - IoU) + \beta \cdot \left(\frac{p^2(b, b^{st})}{c^2} + \alpha \cdot v \right), \quad (3)$$

Запропонована модифікація функції втрат призводить до підсилення впливу просторових характеристик елементів, що, в свою чергу, підвищує точність локалізації дефектів занадто видовженої форми, зокрема тріщин і подрізів. Адаптивне підсилення істинно позитивних передбачень R_{enh} призводить до підвищення точності локалізації низькоконтрастних дефектів і може бути визначено наступним чином:

$$R_{enh} = R_{base} \cdot (1 + \gamma \cdot (1 - R_{base})), \quad (4)$$

де R_{base} – базовий показник чутливості моделі; γ – коефіцієнт підсилення, емпірично визначений як $\gamma = 1,2$. Наведені вдосконалення сприяють кращій стійкості навчання та зменшенню кількості хибно-позитивних передбачень без істотного зниження точності.

Перевірка адекватності моделі YOLOv5 із запропонованими удосконаленнями проводилась на загальноприйнятому наборі зображень NEU-DET [8, 9]. Цей набір містить зображення поверхневих дефектів гарячекатаних сталевих смуг, що розподілені на шість класів, серед яких: тріщини, включення, ямкова поверхня, прокатна окалина, подряпини та плями. Загальна кількість даних набору NEU-DET складає 1800 зображень у градаціях сірого розміром 200×200 пікселів.

Кількісна оцінка точності виявлення та класифікації дефектів визначається шляхом розрахунку таких метрик: Precision, Recall та F1-міра (F1) [10]. Точність (Precision) відображає частку істинно позитивних передбачень серед усіх об'єктів, що модель визначила як такі, що належать до певного класу, і може бути представлена наступним чином:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{FP + TP}, \quad (5)$$

де TP (True Positive) – істинно позитивне передбачення; FP (False Positive) – хибно позитивне передбачення. При цьому повнота (Recall) визначає здатність моделі виявляти всі наявні об'єкти відповідного класу та може бути представлена наступним чином:

Таблиця 2. Результати навчання базової та вдосконаленої моделі YOLOv5 на NEU-DET наборі даних

Метрика	Базова модель YOLOv5	Удосконалена модель YOLOv5
Precision	0,752	0,801
Recall	0,741	0,898
F1-міра	0,746	0,847
mAP@0.5	0,779	0,895
mAP@0.5:0.95	0,418	0,556

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TN} + \text{TP}}, \quad (6)$$

де TN (True Negative) – істинно негативне передбачення. У свою чергу, F1-міра відображає гармонійне середнє між точністю та повнотою, що допомагає визначити баланс між цими метриками та може бути представлена таким чином:

$$\text{F1} = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}. \quad (7)$$

Результати навчання на NEU-DET наборі зображень наведено в табл. 2. Загальне підвищення ефективності вдосконаленої моделі складає не менш ніж 10 %.

Наступний крок передбачає перевірку ефективності на зварювальному наборі даних. Для цього сформовано набір даних, що містить зображен-

Таблиця 3. Результати навчання базової та вдосконаленої моделі YOLOv5 на зварювальному наборі даних

Метрика	Базова модель YOLOv5	Удосконалена модель YOLOv5
Precision	0,848	0,931
Recall	0,798	0,924
F1-міра	0,822	0,927
mAP@0.5	0,838	0,974
mAP@0.5:0.95	0,563	0,721

ня поверхневих дефектів зварних з'єднань, які розподілені на чотири класи, серед яких: тріщини, пропали, підрізи та поверхневі пори. Загальна кількість даних зварювального набору складає 998 кольорових зображень розміром 640×640 пікселів. Результати навчання на зварювальному наборі зображень наведено в табл. 3.

На рис. 6 відображено порівняння результатів навчання базової (1 – yolov5_orig) та вдосконаленої (2 – yolov5_custom) моделі YOLOv5 на зварювальному наборі даних. Удосконалена модель показала ефективність не менш ніж на 10 % вищу в порівнянні з базовою.

Результати виявлення та класифікації поверхневих дефектів для базової моделі відображено на рис. 7. Водночас на рис. 8 представлено результати для вдосконаленої моделі. Удосконалена мо-

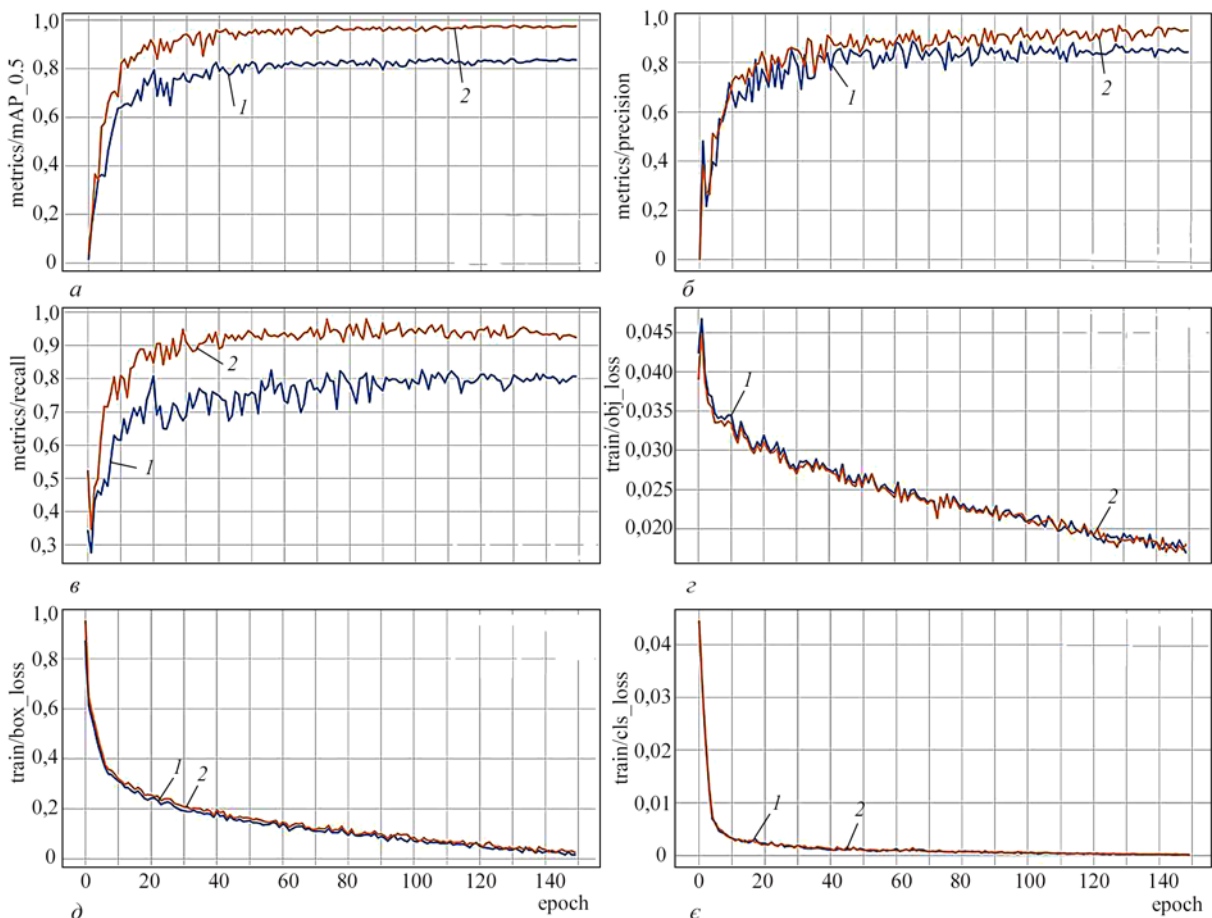


Рис. 6. Результат навчання моделей YOLOv5 на зварювальному наборі даних: 1 – базової, 2 – удосконаленої



Рис. 7. Результат розпізнавання поверхневих дефектів базовою моделлю YOLOv5, що навчена на зварювальному наборі даних: *a* – поверхневі пори; *б* – пропал; *в* – підріз; *г* – поперечна тріщина

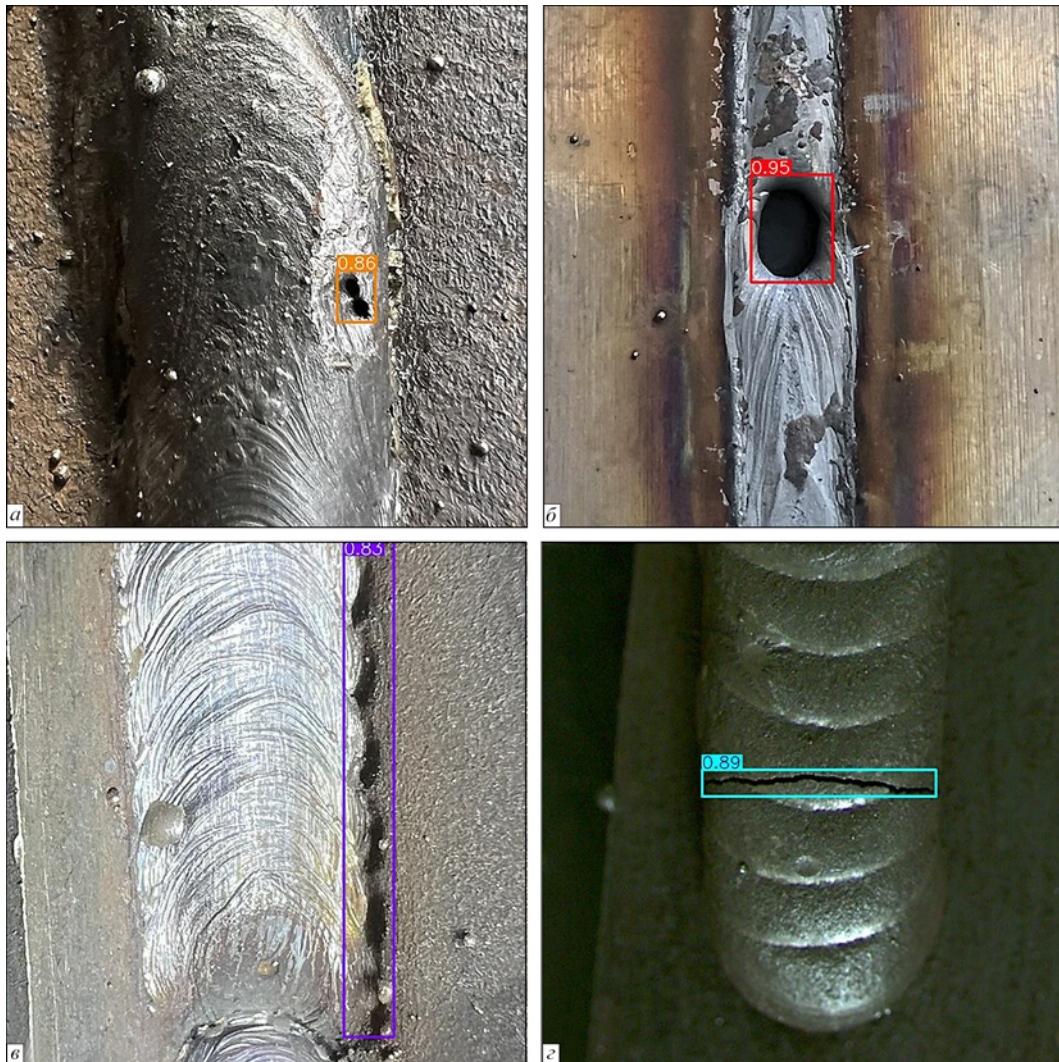


Рис. 8. Результат розпізнавання поверхневих дефектів удосконаленою моделлю YOLOv5, що навчена на зварювальному наборі даних: *a* – поверхневі пори; *б* – пропал; *в* – підріз; *г* – поперечна тріщина

дель YOLOv5 забезпечує кращі показники впевненості (confidence) класифікації для поверхневих пор, тріщин і підрізів. У випадку пропалу результати класифікації однакові як для базової (рис. 7, б), так і вдосконаленої (рис. 8, б) моделей внаслідок простішої ідентифікації на фоні зварного шва. Також варто вказати на більш коректне виявлення підрізу вдосконаленою моделлю (рис. 8, в) у порівнянні з базовою (рис. 7, в). На рис. 8, г показано більшу ефективність удосконаленої моделі

при розпізнаванні тріщин унаслідок застосування адаптивного підсилення істинно позитивних передбачень (R_{enh}).

Додатково варто вказати на відмінності при класифікації поверхневих пор на прикладі одного тестового зображення (рис. 9). Унаслідок недостатньої чутливості класифікатора до текстурних ознак базова модель визначила поверхневий дефект як пропал і пору одночасно (рис. 9, а). Така поведінка притаманна моделям детекторів загаль-

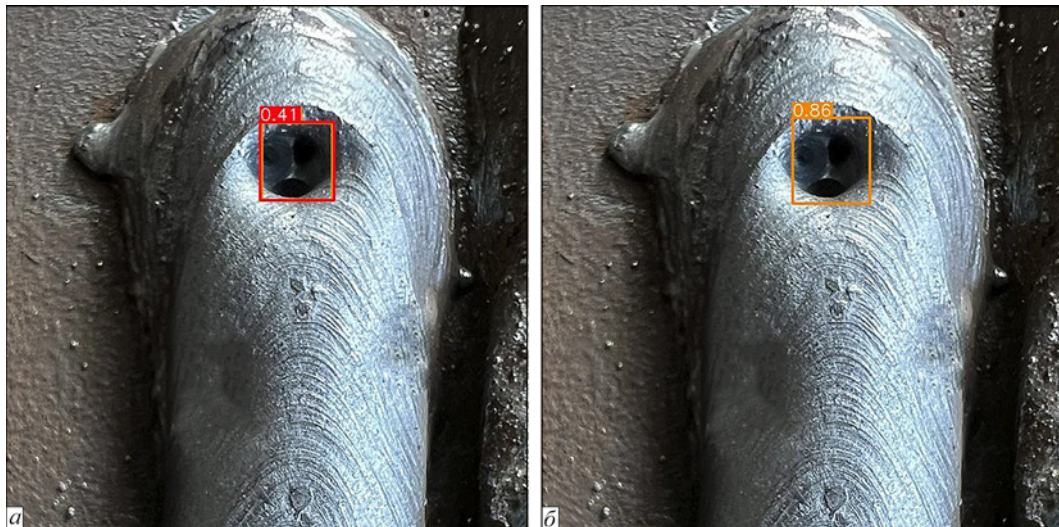


Рис. 9. Відмінності розпізнавання поверхневих пор: а – базова модель; б – удосконалена модель YOLOv5

ного призначення. У таких детекторів видача істинно позитивних передбачень не адаптується до складності й частоти зразків. Водночас удосконалена модель (рис. 9, б) визначила дефект коректно, що підтверджує доцільність запропонованих удосконалень базової моделі нейронної мережі YOLOv5.

Таким чином, ефективність роботи моделі нейронної мережі насамперед визначається точністю виявлення та класифікації дефектів і коректністю локалізації їхніх просторових меж. Оцінка точності виявлення та класифікації кількісно визначається за допомогою метрик Precision, Recall і F1. Зазначені метрики дозволяють проаналізувати стабільність роботи моделі для окремих класів, що дає змогу оцінити чутливість до виявлення складних дефектів. Додатковим критерієм оцінки ефективності роботи нейронної мережі можна вважати раціональне використання обчислювальних ресурсів системи, що особливо важливо для систем, які працюють у режимі реального часу.

Висновки

1. Результати досліджень показали, що при дуговому зварюванні плавким електродом у суміші захисних газів (85% Ar + 15% CO₂) елементів бокової рами візка зі сталі 09Г2С у металі шва та ЗТВ формуються дрібнозернисті ферито-перлітні структури з високими показниками пластичності та в'язкості, але вони не можуть забезпечити необхідний рівень циклічної стійкості конструкції при наявності дефектів у металі зварних з'єднань.

2. Для забезпечення необхідного рівня якості зварних з'єднань потрібен безперервний контроль за умовами та якістю формування зварних з'єднань. Це можливо зробити шляхом роботизації

зварювального процесу та автоматизованого візуально-оптичного НК.

3. У роботі визначено перспективи переходу від литої до суцільнозварної конструкції бокової рами візка вантажного вагона.

4. Для підвищення ефективності виявлення та класифікації поверхневих дефектів зварних з'єднань обґрунтовано доцільність використання методів попередньої обробки зображень.

5. Досліджено ефективність застосування штучних нейронних мереж і алгоритмів машинного зору в автоматизованій системі візуально-оптичного НК, що інтегровані у зварювальний робототехнічний комплекс.

6. Удосконалено базову модель нейронної мережі YOLOv5 для підвищення достовірності розпізнавання дефектів.

7. Підтверджено доцільність запропонованих змін базової моделі YOLOv5. Ефективність класифікації удосконаленої моделі не менш ніж на 10 % більша за базову.

Список літератури/References

1. Лобанов Л.М., Махненко О.В., Павловський В.І., Саприкіна Г.Ю., Пустовой А.Д. (2022) Переваги суцільнозварної конструкції бокової рами візка вантажного вагона. *Наука та прогрес транспорту*, 3-4, 55–69. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/276541>
2. Лобанов Л.М., Махненко О.В., Кныш В.В., Соловей С.А., Павловський В.І. (2020) Розробка зварної конструкції бічної рами візка вантажного вагону підвищеної надійності. *Автоматичне зварювання*, 3, 22–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.03.02>
- Lobanov, L.M., Makhnenko, O.V., Pavlovsky, V.I., Saprykina, G.Y., Pustovoy, A.D. (2022) Advantages of an all-welded freight car bogie side frame. *Nauka ta progress transportu*, 3-4, 55–69. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/276541>
- Lobanov, L.M., Makhnenko, O.V., Knysh, V.V., Solovey, S.A., Pavlovskyi, V.I. (2020) Development of welded structure of side frame of freight car truck of increased reliability. *The Paton Welding J.*, 3, 13–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.03.02>

- FANUC Robotics America Corporation. (2013) *FANUC Robotics SYSTEM R-30iB Arc Tool Setup and Operations Manual*, Document ID: MAROBAR8203131E, REV A, Version 8.20 series.
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E. (2018) *Digital Image Processing. 4th Edition*, Pearson Education, New York.
- Terven, J., Córdova-Esparza, D.-M., Romero-González, J.-A. (2023) A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 5(4), 1680–1716. DOI: <https://doi.org/10.3390/make5040083>
- Katsamenis, I., Karolou, E., Davradou, A. et al. (2022) TraCon: A novel dataset for real-time traffic cones detection using deep learning. *Novel & Intelligent Digital Systems: Proceedings of the 2nd International Conference (NiDS 2022)*, 382–391. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17601-2_37
- Koay, H.V., Chuah, J.H., Chow, C.-O., Chang, Y.-L., Yong, K.K. (2021) YOLO-RTUAV: Towards real-time vehicle detection through aerial images with low-cost edge devices. *Remote Sensing*, 13(21), 4196. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13214196>
- Guan, S., Lei, M., Lu, H. (2020) A steel surface defect recognition algorithm based on improved deep learning network model using feature visualization and quality evaluation. *IEEE Access*, 8, 49885–49895. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979755>
- Qike Wu (2024) *NEU-DET*. *IEEE Dataport*. DOI: <https://doi.org/10.21227/j84r-f770>
- Hossin, M., Sulaiman, M.N. (2015) A review on evaluation metrics for data classification evaluations. *International J. of Data Mining & Knowledge Management Process*, 5, 1–11. DOI: <http://dx.doi.org/10.5121/ijdkp.2015.5201>

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF NEURAL NETWORKS IN WELDING OF CRITICAL STRUCTURES FOR RELIABILITY ENHANCEMENT

A.S. Novodranov, V.O. Koliada

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

The transition from foundry production of load-bearing parts of freight car bogies to alternative technologies, in particular electric arc welding, is a promising direction of development. This study considers the side frame of a freight car bogie. The connection of frame elements made of high-quality sheet metal by electric arc welding ensures compliance with the basic dimensions within ± 1 mm. In addition, it allows reducing wear on wheelsets, as well as reducing the weight of unsprung masses. However, the effectiveness of manual welding depends largely on the qualifications of the welder. Defects may form as a result of welding technology violations. Such limitations create the prerequisites for the use of automated welding equipment based on robotic complexes. Robotisation of welding production ensures high productivity, as well as compliance with all technological requirements. However, the use of welding robots alone cannot ensure defect-free production, which prompts the integration of automated non-destructive testing (NDT) systems. Considering the fact that the side frame belongs to the class of structures of responsible purpose and is subject to multi-stage NDT, it is advisable to use machine vision technology as a visual-optical NDT system. Neural network algorithms form the basis of the software components of the visual-optical NDT system and automate the process of recognising surface defects. This approach contributes to the timely detection and elimination of defects, which leads to increased durability of the structure. 10 Ref., 3 Tabl., 9 Fig.

Keywords: critical structures, robotic welding, visual-optical non-destructive testing, defect detection, neural network, robotic system, machine vision

ORCID

Новодранов А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3380-3745>, Коляда В.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7539-6626>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

А.С. Новодранов

ІЕЗ ім. С.О. Пагона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: artur19940731@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

А.С. Новодранов, В.О. Коляда (2026) Дослідження ефективності застосування нейронних мереж під час зварювання відповідальних конструкцій для підвищення їхньої надійності. *Автоматичне зварювання*, 02, 47–56.

DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.02.06>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

Отримано 05.12.2025

Отримано у переглянутому вигляді 25.03.2026

Підписано до друку 10.04.2026

Оприлюднено 11.04.2026

З АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ

ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН»

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

тел./факс: (38044) 205-23-90, E-mail: journal@paton.kiev.ua

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

ПІДПИШІТЬСЯ СЬОГОДНІ

Передплата доступна
у друкованому
та цифровому форматах!

