

# ЗАСТОСУВАННЯ ВІЗУАЛЬНО-ОПТИЧНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

О.С. Костеневич, А.С. Новодранов

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

Контроль якості зварних з'єднань є одним із основних чинників забезпечення надійності та довговічності зварних конструкцій. Наявність навіть незначних дефектів у зварному шві може спричинити втрату несучої здатності конструкції. Враховуючи залежність якості ручного зварювання від кваліфікації зварника, доцільним виглядає перехід до роботизованого зварювального виробництва. Проте такий підхід вимагає автоматизації відповідних систем неруйнівного контролю. При проведенні автоматизованого візуально-оптичного контролю якості зварних з'єднань ступінь небезпечності виявленого дефекту визначається відповідно до діючих стандартів. Також допустимі розміри поверхневих дефектів у зварних з'єднаннях певної конструкції можуть визначатись розрахунковими методами з урахуванням відповідних умов експлуатаційного навантаження. У роботі проведено співставлення цих двох підходів, а також сформовані вимоги до візуально-оптичного методу НК зварної бокової рами візка залізничного вантажного вагону на основі розрахункового визначення допустимих розмірів дефектів. Візуально-оптичний метод контролю зварних з'єднань спроможний виявляти лише поверхневі дефекти, які можна консервативно розглянути як поверхневі еліптичні тріщини та оцінити їхню допустимість методами механіки руйнування. За результатами дослідження доведено, що візуально-оптичний метод НК є ефективним інструментом для первинної діагностики зварних конструкцій відповідального призначення. Бібліогр. 17, табл. 5, рис. 10.

*Ключові слова:* зварні з'єднання, зварні конструкції, візок вантажного вагону, бокова рама, напружено-деформований стан, спектр навантажень, математичне моделювання, опір втомі, допустимі розміри дефектів, візуально-оптичний контроль

**Вступ.** У наш час у багатьох галузях промисловості виготовлення елементів конструкцій виконується з використанням технології зварювання. Одним із головних чинників забезпечення надійності та довговічності зварних конструкцій виступає контроль якості зварних з'єднань [1–3, 14]. Наявність навіть незначних дефектів у зварному шві може призвести до утворення концентрації напружень і розвитку руйнування, що, відповідно, може спричинити втрату несучої здатності конструкції [2, 3]. Зважаючи на це, гостро стає питання контролю якості зварних з'єднань, оцінки напружено-деформованого стану (НДС) конструкції, а також визначення допустимих розмірів дефектів [2, 4]. Особливої уваги вимагають конструкції відповідального призначення, що перебувають під значними динамічними та циклічними навантаженнями. До такого класу конструкцій належить бокова рама візка вантажного залізничного вагону, що виступає однією з основних несучих частин двовісного триелементного візка [5]. Бокова рама забезпечує передачу навантажень між колісною парою і кузовом вагону, що супроводжується дією значних динамічних і циклічних навантажень.

Напруження, що виникають у вузлах конструкції рами під час експлуатації, напряму впливають на рівень експлуатаційної надійності. Тому під час проектування конструкції бокової рами важливу роль відіграють: розрахунок НДС та опору втомі, а також дослідження найбільш небезпечних зон, що можуть бути осередками утворення критичних дефектів. Додатково варто зазначити важливість визначення допустимих розмірів дефектів, що забезпечують збереження несучої здатності конструкції при регламентованих амплітудах експлуатаційного та випробувального навантажень [3, 5, 6].

**Проблематика.** Враховуючи те, що під час руху вагону бокова рама піддається широкому спектру вертикальних, повздовжніх і бокових динамічних навантажень [6], якість зварних з'єднань відіграє головну роль у забезпеченні відмовостійкості (надійності) конструкції. На якість зварних з'єднань, передусім, впливають такі фактори – порушення технології зварювання та недостатня кваліфікація персоналу. Усі ці фактори можуть призводити до утворення дефектів під час зварювання, серед яких: пори, непровари, тріщини, пропали, подрізи тощо. Під час експлуатації наявні дефекти зварювання можуть призводити до прискореного втомного руйнування конструкції, особливо в зонах концентрації напружень [2, 3, 5]. Унаслідок наявності в конструкції елементів різ-

ного перерізу, а також складної просторової конфігурації, що призводять до нерівномірного тепловкладення, утворюються залишкові напруження та деформації. Особливо варто виділити залежність якості ручного зварювання від кваліфікації зварника. Забезпечити повторюваність результату від виробу до виробу складно навіть при розроблених технологічних картах та інструкціях. Отже, доцільним виглядає застосування робототехнічних комплексів (РТК) для зварювання відповідальних конструкцій, що частково вирішує проблему повторюваності результату, проте вони вимагають відповідних автоматизованих систем неруйнівного контролю (НК). Зазвичай РТК складаються з таких компонентів: антропоморфний робот, зварювальне джерело живлення, механізм подавання дроту, контролер керування роботом і станція автоматичного очищення пальника. Враховуючи той факт, що конструкції відповідального призначення підпадають під багатоступеневий НК, доцільно застосовувати автоматизований візуально-оптичний контроль як первинний. Подібні системи повинні забезпечувати розпізнавання поверхневих дефектів у режимі реального часу після завершення зварювання відповідного шва.

Огляд публікацій [7–11] з автоматизації візуального контролю на виробництвах формує підґрунтя для досліджень у цьому напрямку. Детальний аналіз публікацій показав, що типова система автоматизованого візуального контролю складається з таких компонентів: апаратна складова для захоплення цифрових зображень (камери, об'єктиви, сенсори), засоби локального освітлення досліджуваної області та програмна частина (алгоритми попередньої обробки зображень, виявлення та класифікації і сегментації). Висока точність виявлення дефектів напряму залежить від якості вхідних зображень. В останні роки спостерігається перехід від застосування класичних методів виявлення та класифікації дефектів (порогова сегментація, алгоритми виділення країв, метод опорних векторів тощо) до нейронних мереж, що показують вищу точність і стабільність [7].

Серед розглянутих публікацій щодо автоматизованого контролю зварних швів прослідковується успішна інтеграція методів машинного зору для виявлення та класифікації дефектів на цифрових зображеннях. Зокрема в [8] розглядається система для контролю кутових швів. Зазначено про підвищену ймовірність утворення підрізів і несплавлень у корені шва саме при кутових з'єднаннях, що значною мірою впливає на утворення локальних напружень. Програмна частина базується на під-

ходах глибокого навчання та використовує згорткову нейронну мережу для забезпечення стійкості класифікації. У роботі детально описано процеси попередньої обробки зображень та обґрунтування вибору архітектури нейронної мережі. Детально розглянуто питання формування навчального набору зображень, що містив типові дефекти кутових з'єднань. За результатами дослідження показано більшу ефективність класифікації у порівнянні з класичними методами на базі машинного зору. Автори довели можливість застосування автоматизованого візуального контролю без використання складних оптичних систем. У свою чергу, науковці [9] у своїй публікації розглянули автоматизацію візуального контролю для забезпечення якості зварних з'єднань шляхом аналізу дефектів, що спричинені порушенням технології зварювання: нерівномірне тепловкладення, неоднорідність основного металу та нестабільність руху пальника. Показано, що зазначені дефекти безпосередньо впливають на механічні характеристики зварних з'єднань. Обґрунтовують доцільність застосування згорткових нейронних мереж як основу програмної частини системи для розширення можливостей традиційного візуального контролю зварних з'єднань. Автори застосовували глибокі нейронні мережі типу ResNet-18 і ResNet-50 для класифікації поверхневих зварювальних дефектів, а саме: газових пор, тріщин і несплавлень. Для підвищення точності класифікації застосовано методи зменшення шумів і вирівнювання контрасту. За результатами дослідження архітектура ResNet-50 показала більшу точність класифікації у порівнянні з ResNet-18, що сягнула 95 %. Загалом публікація показала перспективність інтеграції автоматизованих систем візуального контролю на базі нейронних мереж для НК зварних з'єднань. Науковці [10] у своїй роботі розглянули автоматизацію візуального контролю у спорідненій галузі для виявлення поверхневих дефектів листових прокатних матеріалів. Авторами вказано на важливість виявлення дефектів на етапі виробництва матеріалів, з яких у подальшому будуть виготовлені елементи конструкцій. Дефекти, утворенні на етапі прокатного виробництва, можуть призводити до прискореного втомного руйнування конструкції у процесі експлуатації. Автори дослідили модифіковану архітектуру YOLO і ConSinGAN-підходи для їхньої інтеграції у промислові системи автоматизації виробничих процесів SCADA. Результати дослідження демонструють ефективність запропонованих підходів для автоматизації контролю дефектності металевих листів. Отже, автоматизо-

ваний візуальний контроль дефектності листових і прокатних матеріалів сприяє підвищенню довговічності металевих конструкцій. Науковці [11] у своїй роботі розглянули підхід до контролю дефектності поверхні листових матеріалів. Вказали, що поверхневі дефекти можуть виступати потенційними концентраторами напружень, а їхнє своєчасне виявлення призводить до підвищення якості металевих виробів. Окремо розкрили проблему складності збору репрезентативних навчальних зображень для рідкісних класів дефектів. Запропонували спільне використання глибокої згорткової нейронної мережі (DCNN) та умовного варіаційного автокодувальника (CVAE) для виявлення та класифікації дефектів. Дослідили можливість аналізу інформативних ознак дефектів. Застосування CVAE необхідне для створення зразків зображень рідкісних класів дефектів на основі опрацьованих даних. Однак вказано, що технологія CVAE не здатна повною мірою відобразити природу деяких складних дефектів. Загалом автори показали придатність запропонованої системи для застосування на металургійних підприємствах, що повинно спричинити підвищення якості металевих виробів.

У результаті можна зробити висновок, що автоматизація є основним напрямом розвитку візуально-оптичного методу НК. Проведений аналіз сучасного стану галузі створює основу для подальшого вивчення взаємозв'язку параметрів дефектив зварювання, НДС і довговічності конструкцій.

**Мета** роботи полягає у дослідженні впливу поверхневих дефектів зварних з'єднань на міцність і довговічність конструкцій відповідального призначення на прикладі бокової рами візка вантажного вагона, а також у формуванні вимог до візуально-оптичного методу НК на основі визначених допустимих розмірів дефектів з урахуванням реальних умов експлуатаційного навантаження.

**Негативний вплив дефектів зварювання на міцність і довговічність конструкції бокової рами при довгостроковій експлуатації.** Під час виготовлення зварної конструкції бокової рами можуть утворюватися дефекти зварювання, які будуть мати негативний вплив на міцність цього несучого елемента візка під час тривалої експлуатації. Ефективне виявлення та класифікація поверхневих дефектів, визначення їхньої припустимості до експлуатаційного навантаження або прийняття рішення про необхідність виправлення виявлених дефектів є важливою задачею організації зварювального виробництва з точки зору забезпечення якості продукції і зниження виробничих витрат.

**Навантаженість конструкції бокової рами при регламентованих експлуатаційному та випробувальному навантаженнях (результати розрахунку НДС).** Для розробленої суцільнозварної конструкції бокової рами проведено відповідно до Норм [6] оцінку на міцність за напруженнями, що допускаються при різних розрахункових режимах [5]. Результати розрахунків НДС у конструкції бокової рами показали, що максимальні еквівалентні напруження (до 286 МПа), викликані відповідними сполученнями навантажень, не перевищують величин допустимих напружень, а в зоні зварних з'єднань напруження для всіх регламентованих режимів навантаження не перевищують 200 МПа.

Проведений розрахунок опору втомі конструкції суцільнозварної бокової рами [5] візка відповідно до Норм [6] за коефіцієнтами опору втомі для різних оціночних зон (основного металу та зварних швів) з урахуванням розподілу коефіцієнта вертикальної динаміки за діапазонами швидкостей експлуатації (спектр навантаження), а також з урахуванням додаткового спектру навантаження від поздовжніх стискаючих сил через автозчеплення показав, що суцільнозварна конструкція бокової рами є працездатною при змінних навантаженнях і задовольняє вимогам Норм [6] з коефіцієнтом опору втомі  $[n] = 2$  як за умовою неперевіщення розрахунковими напруженнями величин амплітуд напружень, що допускаються (табл. 1), так і за умовою накопичення пошкоджуваності. На рис. 1, а наведено модель конструкції зварної бокової рами під дією квазістатичного навантаження для розрахунку міцності при циклічних навантаженнях. Згідно з вимогами Норм [6] вертикальне навантаження  $F_z = 210,6$  кН (А) рівномірно розподілене по площі спирання пружин на опорній поверхні центрального ресорного підвішування, і сили розпору клинів  $F_{3x} = 30,1$  кН (В, С), які прикладені до вертикальної стійки центрального ресорного отвору. Результати розрахунку (рис. 1, б, табл. 1) показали, що максимальні головні напруження в конструкції бокової рами в зоні зварних з'єднань не перевищують 70 МПа.

**Визначення допустимих розмірів поверхневих дефектів у зварних з'єднаннях бокової рами.** На практиці при проведенні візуального контролю якості зварних з'єднань ступінь небезпечності виявленого дефекту визначається відповідно до діючих стандартів, наприклад, вимог, наведених у ДСТУ EN ISO 5817:2022 [14]. Так, тріщини взагалі не допускаються, інші дефекти, наприклад, поверхневі пори, кратерна раковина,

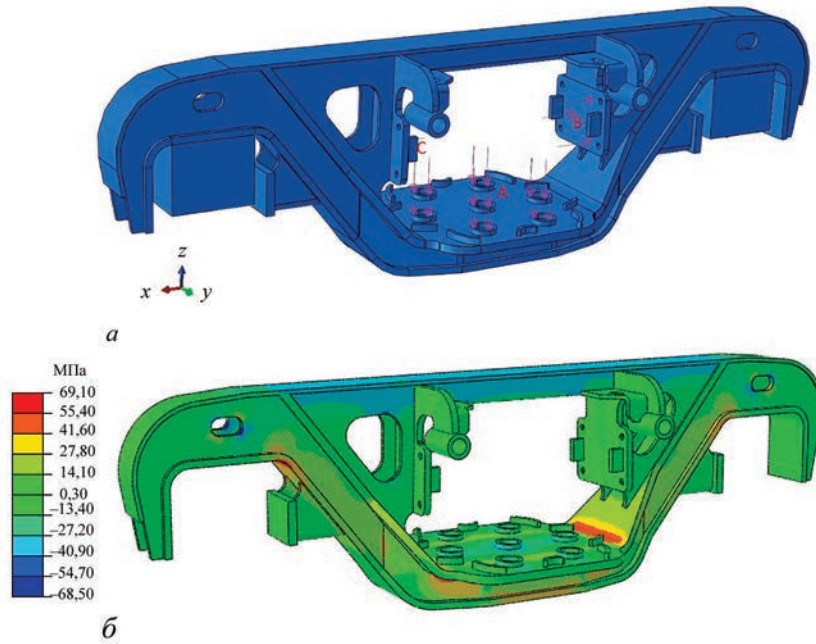


Рис. 1. Модель конструкції зварної бокової рами під дією квазістатичного навантаження при розрахунку опору втомі: *a* – граничні умови розрахункової моделі; *б* – розрахункові результати розподілу головних напружень

неспалення, підріз, незаповнена обробка крайок можуть допускатися при досить обмежених розмірах самих дефектів, наприклад, для товстостінних виробів як бокова рама (товщина елементів 16...20 мм) – не більше 0,5...3 мм. Також допустимі розміри поверхневих дефектів у зварних з'єднаннях певної конструкції можуть визначатись розрахунковими методами механіки руйнування з урахуванням відповідних умов експлуатаційного навантаження.

При розрахунковому обґрунтуванні допустимості більшість дефектів зварних з'єднань можна описати трьома видами тріщин: підповерхневі, поверхневі та наскрізні дефекти. При застосуванні візуально-оптичного методу контролю зварних з'єднань виявляються поверхневі дефекти, які можна консервативно розглядати як поверхневі

еліптичні тріщини. Існують досить узгоджені підходи до визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень для поверхневих тріщин у відповідних конструктивних елементах при певному розподілі напружень у межах тріщини.

Інтерес представляє визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень для поздовжніх і поперечних (щодо зварного шва) тріщин, розташованих у зоні переходу від зварного шва до основного металу, тобто в зоні концентрації напружень, обумовленої формою зварного шва. Це питання викладається у межах роботи [15] та рекомендацій МІС [3]. На рис. 2, *a* наведено схему зварного стикового з'єднання з повним проплавленням і тріщиною вздовж зварного шва глибиною *a* в зоні переходу від шва до основного металу. Таку саму

Таблиця 1. Порівняння амплітуд напружень, що допускаються, та розрахункових статичних напружень у різних зонах конструкції бокової рами

Зона конструкції РБ	Коефіцієнт зниження границі витривалості $K_{\sigma}$	Максимальна амплітуда напружень, що допускаються, $\max(\sigma_a)$ , МПа		Максимальне значення головних максимальних напружень $\sigma_a$ , МПа
		$m = \frac{16}{K_{\sigma}}$	$m = 4$	
Основний матеріал в зоні R55 буксового отвору	1,5	150	158	69
Поздовжнє кутове зварне з'єднання у зоні опорної поверхні пружин	3,0	78	79	51
Поперечне зварне з'єднання бокової стінки	3,0	78	79	35
Поздовжнє кутове з'єднання в зоні R55 буксового отвору	3,0	78	79	48
Поперечне стикове зварне з'єднання нижньої полиці	4,7	51	50	23

Примітка. *m* – показник ступеня кривої втомі.

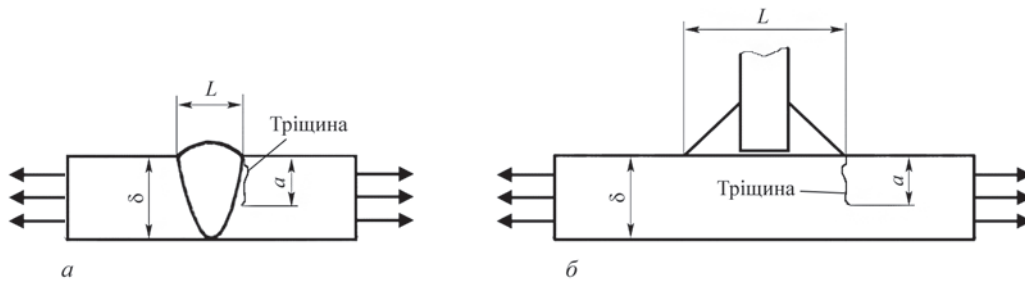


Рис. 2. Стикове з'єднання з повним проплавленням (а) та слабо навантажене таврове з'єднання (б) з тріщиною в зоні переходу до основного металу

схему для слабо навантаженого таврового з'єднання наведено на рис. 2, б.

На рис. 3 наведено хрестоподібне з'єднання з тріщиною вздовж зварного шва в зоні переходу. Глибина тріщини  $a$ . Навантажений горизонтальний елемент товщиною  $\delta$  мембранними напруженнями  $\sigma_m = Q/\delta$ .

Виявлені при проведенні візуального контролю поверхневі тріщини відповідають досить характерним дефектам, що мають, природно, кінцеві розміри, які можна приймати за довжину тріщини  $2c$ . Вимірювання глибини тріщини при візуальному контролі не проводиться. Але ступінь консервативності можна оцінити для різних співвідношень  $a/c$  довжини та глибини тріщини, використовуючи відповідні рішення для необмеженої пластини товщиною  $\delta$  з поверхневою напівеліптичною тріщиною  $2c \times a$ , завантаженою мембранними напруженнями  $\sigma_{zz}^\infty$  [2, 16, 17]. Величина коефіцієнта інтенсивності  $K_I$  представляється у вигляді добутку величини  $K_{I\theta}$  у відповідній пластині при аналогічному навантаженні й з такою ж тріщиною на множник  $M_K$ , що враховує відмінність форми поперечного перерізу зварного з'єднання порівняно з пластиною.

Критеріями визначення допустимості тріщини при подальшій експлуатації може бути або критерій крихкого руйнування (спонтанного розвитку тріщини) при статичному навантаженні, або критерій відсутності росту тріщини при циклічному

навантаженні. Для матеріалу бокової рами низьколегованої сталі підвищеної міцності типу 09Г2С (аналог S355) можна прийняти наступні критичні значення КІН крихкого руйнування [2]: при статичному навантаженні ( $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) для основного матеріалу  $K_{Ic} = 56 \dots 60 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ , для ЗТВ  $K_{Ic} \approx 42 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ , при циклічному навантаженні  $K_{Ith} \approx 3,8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

Розрахунок для поверхневих тріщин обмеженої довжини [16]:

$$K_{0j} = \frac{\sigma_\infty \sqrt{\pi a}}{\Phi\left(\frac{a}{c}\right)} \text{ при } j = \sigma \quad (1)$$

де  $\Phi\left(\frac{a}{c}\right)$  – повний еліптичний інтеграл другого роду, який апроксимується залежністю:

$$\Phi\left(\frac{a}{c}\right) = \sqrt{1 + 1,464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1,65}} \quad (2)$$

Згідно з [17] аналітична залежність для точок контуру напівеліптичної тріщини при  $\theta = 0$  (точка на поверхні) та  $\theta = \pi/2$  (найглибша точка тріщини) при  $0 < \frac{a}{c} < 1, \frac{a}{\delta} < 0,7$ :

$$\frac{K_{I\sigma}}{K_{0\sigma}} = \gamma_\theta \left[ 1 - \left( 0,89 - 0,57 \sqrt{\frac{a}{c}} \right)^3 \left( \frac{a}{\delta} \right)^{1,5} \right]^{-3,25} \quad (3)$$

$$\gamma_{\theta=0} = \left[ 1 + 0,32 \left( \frac{a}{\delta} \right)^2 \right] \left( 1,23 - 0,09 \frac{a}{c} \right) \sqrt{\frac{a}{c}} \quad (4)$$

$$\gamma_{\theta=\frac{\pi}{2}} = 1,12 - 0,08 \frac{a}{c}$$

Враховуючи, що критичні значення в'язкості руйнування при циклічному навантаженні значно нижчі (більш ніж в 10 разів) у порівнянні зі статичним навантаженням, у першу чергу треба визначити допустимі розміри поверхневих дефектів при регламентованому квазістатичному навантаженні конструкції зварної бокової рами при розрахунку опору втомі (рис. 1, табл. 1). Розглянемо постульовані тріщини в таврових з'єднаннях бокової стінки з нижнім поясом та поясом спірання прую

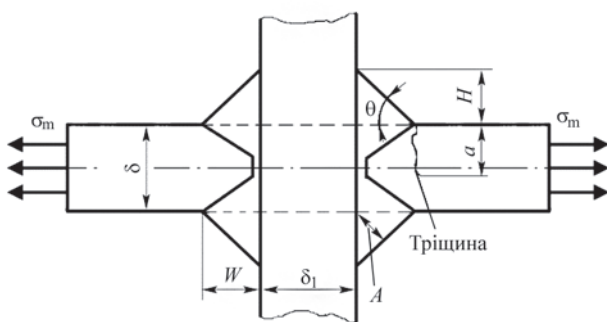


Рис. 3. Хрестове з'єднання з нарізаним розрізним елементом, привареним з повним проплавленням при K-подібній обробці кромок

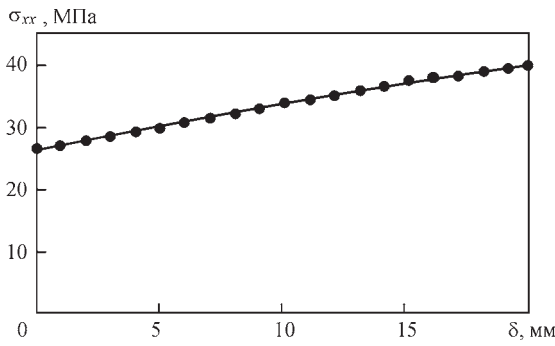


Рис. 4. Розподіл напружень у нижньому поясі таврового з'єднання з боковою стінкою по центру бокової рами

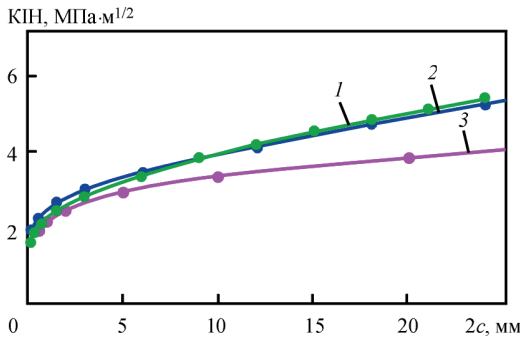


Рис. 5. Результати розрахунку КІН у тавровому з'єднанні бокової стінки з нижнім поясом при розташуванні тріщини в нижньому поясі по центру бокової рами під дією поздовжніх напружень  $\sigma_{xx} = 39,8$  МПа зі співвідношення  $a/c$ : 1 – 0,7; 2 – 0,3; 3 – 0,1

жин, які є одними з найнебезпечніших ділянок при розрахунку опору втомі. Консервативно при розрахунку поверхневих тріщин у поясах приймався рівномірний розподіл напружень з максимальним значенням напружень розтягу, які діють в перерізі по нормалі до тріщини по центру бокової рами (рис. 4). Для розрахунку тріщин в боковій стінці розглядалася найнебезпечніша ділянка таврового з'єднання з поясом спірання пружин у зоні переходу з горизонтальної ділянки до похилої (рис. 1). Результати розрахункової оцінки циклічної міцності для поверхневих тріщин, які розташовані в нижньому поясі, наведено на рис. 5 і в табл. 2–4. Для тріщин, що розташовані в боковій стінці, отримали близькі результати.

З урахуванням наведених у таблицях значень КІН для поверхневих тріщин обмежених розмірів із різним співвідношенням  $a/c = 0,1 \dots 0,67$  можна зробити висновки, що з точки зору статичного навантаження ( $n = 2, K_{1c}/2 \approx 21$  МПа·м<sup>1/2</sup>) розглянуті поверхневі тріщини з розмірами (завдовжки  $2c$ ) до 15 мм і більше є безпечними. Але при циклічному навантаженні поперечні та поздовжні поверхневі тріщини в нижньому поясі та боковій стінці можуть бути небезпечними при значно менших розмірах. При врахуванні коефіцієнта запасу  $n = 2$

Таблиця 2. Результати перевірки циклічної міцності для тріщин обмеженої довжини ( $a/c = 0,33$ ) у нижньому поясі під дією поздовжніх напружень  $\sigma_{xx} = 39,8$  МПа

Глибина тріщини $a$ , мм	Довжина тріщини $2c$ , мм	Співвідношення $a/c$	Товщина $\delta$ , мм	$K_{10=0}$ , МПа $\sqrt{м}$	$K_{10=p/2}$ , МПа $\sqrt{м}$	$K_{10} < K_{1th} = 3,8$ , МПа $\sqrt{м}$	$K_{10} < 0,5K_{1th} = 1,9$ , МПа $\sqrt{м}$
0,045	0,27	0,33	20	1,20	1,89	+	+
0,1	0,6			1,40	2,20	+	–
0,25	1,5			1,66	2,62	+	–
0,5	3			1,90	3,00	+	–
1	6			2,18	3,43	+	–
2	12			2,64	4,15	–	–
3	18			3,04	4,76	–	–
4	24			3,39	5,28	–	–
5	30			3,73	5,77	–	–

Примітка. + допустимий дефект.

Таблиця 3. Результати перевірки циклічної міцності для тріщин обмеженої довжини ( $a/c = 0,67$ ) у нижньому поясі під дією поздовжніх напружень  $\sigma_{xx} = 39,8$  МПа

Глибина тріщини $a$ , мм	Довжина тріщини $2c$ , мм	Співвідношення $a/c$	Товщина $\delta$ , мм	$K_{10=0}$ , МПа $\sqrt{м}$	$K_{10=p/2}$ , МПа $\sqrt{м}$	$K_{10} < K_{1th} = 3,8$ , МПа $\sqrt{м}$	$K_{10} < 0,5K_{1th} = 1,9$ , МПа $\sqrt{м}$
0,05	0,15	0,67	20	1,42	1,58	+	+
0,1	0,3			1,62	1,81	+	+
0,25	0,75			1,93	2,15	+	–
0,5	1,5			2,20	2,46	+	–
1	3,0			2,52	2,81	+	–
2	6,0			3,03	3,37	+	–
3	9,0			3,46	3,83	–	–
4	12			3,82	4,21	–	–
5	15			4,15	4,54	–	–

Примітка. + допустимий дефект.

Таблиця 4. Результати перевірки циклічної міцності для тріщин обмеженої довжини ( $a/c = 0,1$ ) у нижньому поясі під дією поздовжніх напружень  $\sigma_{xx} = 39,8$  МПа

Глибина тріщини $a$ , мм	Довжина тріщини $2c$ , мм	Співвідношення $a/c$	Товщина $\delta$ , мм	$K_{10=0}$ , МПа $\sqrt{м}$	$K_{10=p/2}$ , МПа $\sqrt{м}$	$K_{10} < K_{1th} = 3,8$ , МПа $\sqrt{м}$	$K_{10} < 0,5K_{1th} = 1,9$ , МПа $\sqrt{м}$
0,025	0,5	0,1	20	0,65	1,88	+	+
0,1	2			0,85	2,45	+	-
0,25	5			1,01	2,92	+	-
0,5	10			1,16	3,34	+	-
1	20			1,34	3,85	+	-
2	40			1,64	4,71	+	-
3	60			1,92	5,49	-	-
4	80			2,18	6,21	-	-
5	100			2,45	6,93	-	-

Примітка. + допустимий дефект.

Таблиця 5. Визначені максимально допустимі розміри поверхневих дефектів зварних з'єднань бокової рами в залежності від розташування

№	Зварне з'єднання	Ділянка зварного з'єднання	Максимально допустимий розмір поверхні дефекту, мм
1	Таврове з'єднання бокової стінки і нижнього поясу	По центру рами	0,3
		У буксовому отворі	0,6
		На інших ділянках	8,5
2	Таврове з'єднання бокової стінки і поясу спирання пружин	По центру рами	0,6
		На інших ділянках	6,5
3	Стикове з'єднання бокової стінки	Усе з'єднання	9,0

( $K_{1th}/2 \approx 1,9$  МПа $\cdot м^{1/2}$ ) допустимий розмір поверхневих дефектів (тріщин) у небезпечних зонах таврових з'єднань бокової стінки з нижнім поясом та поясом спирання пружин складає приблизно 0,3 мм, що корелює з допустимими розмірами поверхневих дефектів згідно з ДСТУ EN ISO 5817:2022 [14].

Але це – досить консервативний підхід. На інших ділянках зварних з'єднань, які менш навантажені при експлуатації, вимоги до допустимих розмірів поверхневих дефектів можуть бути знижені. На основі проведених розрахунків сформовано вимоги до візуально-оптичного НК, а саме, визначено максимально допустимі розміри поверхневих дефектів зварювання бокової рами візка вантажного вагону в небезпечних зонах і на інших ділянках зварних з'єднань (табл. 5).

**Реалізація візуально-оптичного НК.** За результатами розрахунку навантаженості конструкції бокової рами при регламентованих експлуатаційному та випробувальному навантаженнях визначено найбільш напружені зони: основний матеріал і поздовжнє кутове з'єднання в зоні радіусного переходу R55 буксового отвору; поздовжнє кутове зварне з'єднання в зоні опорної поверхні пружин; поперечні зварні з'єднання бокової стінки та нижньої полиці. Такі зони визначені як найбільш небезпечні з точки зору утворення тріщин втоми та руйнування, тому потребують підвищеної достовірності розпізнавання поверхневих дефектів.

**Технологічна послідовність зварювання.** Під час виготовлення бокової рами необхідно чітко дотримуватися технології зварювання, враховуючи необхідність зменшення залишкових напружень і деформацій. Спочатку зварюється балка замкнутого перерізу, яка містить нижній, верхній пояси та бокові стінки (рис. 6, а). Більшість швів є багатопрохідними стиковими й тавровими, що формуються в 2–3 проходи залежно від товщини деталей і типу зварного з'єднання. Наступним кроком відбувається приварювання елементів, які формують проріз надресорної балки (рис. 6, б). На останньому етапі приварюються додаткові елементи конструкції бокової рами (рис. 6, в).

**Принцип дії автоматизованого візуально-оптичного контролю.** У порівнянні з традиційним візуальним контролем автоматизований метод має низку переваг, серед яких: мінімізація людського чинника, висока точність, своєчасне виявлення дефектів, а також можливість автоматизації. Зважаючи

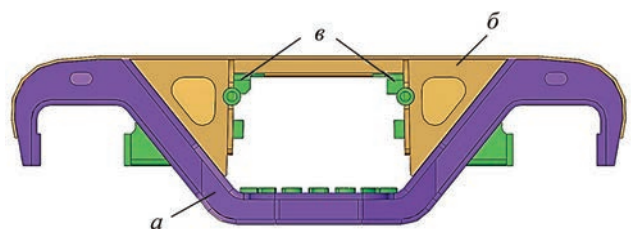


Рис. 6. Загальна послідовність складання та зварювання елементів конструкції бокової рами: а – балка замкнутого перерізу; б – елементи, що формують проріз надресорної балки; в – додаткові елементи

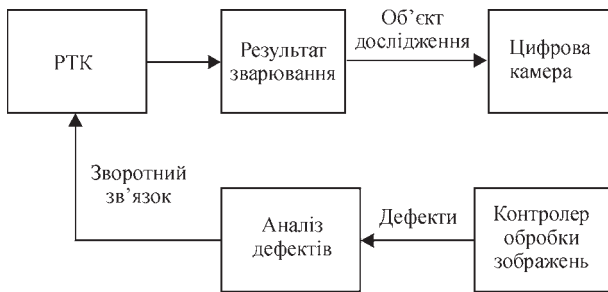


Рис. 7. Принцип дії автоматизованого візуально-оптичного НК на те, що бокова рама підлягає багатоступеневому НК, у даному дослідженні основна увага приділяється візуально-оптичному НК як первинному. Подібні системи (рис. 7) складаються з комбінованого лазерного сенсора і контролера обробки зображень, що інтегровані у робототехнічний комплекс.

Комбінований лазерний сенсор встановлюється безпосередньо на пальнику (рис. 8) зварювального робота у статичному положенні перпендикулярно до досліджуваної поверхні та може працювати у двох режимах в рамках одного оптичного модуля. Для кожного з режимів відбувається переналаштування конфігурації оптичної системи (експозиція, рівень підсилення, параметри освітлення тощо). При цьому роздільна здатність під час визначення геометричних параметрів дефектів складає 0,1 мм. Перший режим забезпечує слідкування за розділкою безпосередньо під час зварювання. При такому режимі сенсор працює на основі методу лазерної триангуляції. У разі відхилення зварювального дроту від центру розділки сенсор фіксує величину зміщення й автоматично передає корекцію траєкторії до РТК. Подібні зміщення найчас-

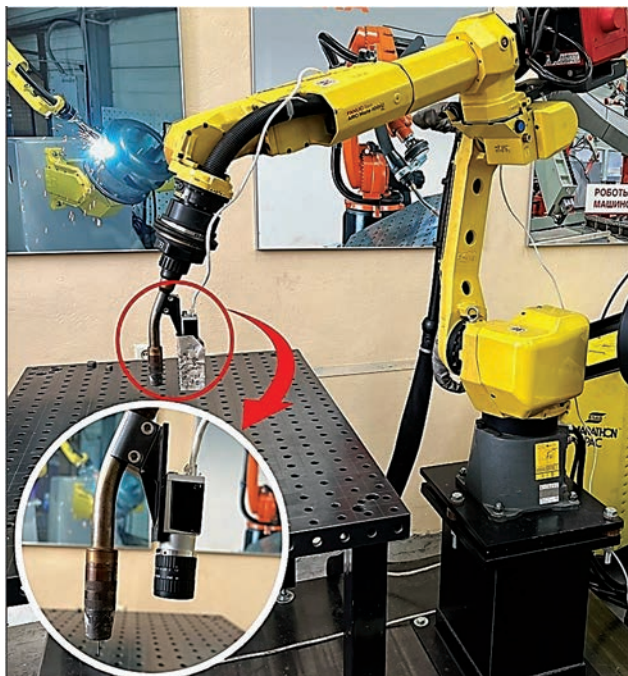


Рис. 8. Інтегрована в робототехнічний комплекс система візуально-оптичного НК

тіше виникають у результаті неналежної підготовки деталей до зварювання. Другий режим роботи передбачає сканування поверхні зварного шва для виявлення дефектів, а також визначення їхніх геометричних параметрів. Визначення геометричних параметрів при такому режимі роботи реалізовано на основі методу фотограмметрії. Контроль зварних швів відбувається після завершення процесу зварювання окремого з'єднання, включно з останнім проходом при багатоходовому зварюванні. Завершивши зварювання чергового шва, робот автоматично переходить у режим сканування вздовж зони зварювання. Виявлення поверхневих дефектів безпосередньо під час зварювання досить складно реалізувати внаслідок інтенсивного випромінювання електричної дуги.

Зображення, отримані від комбінованого сенсора, передаються до контролера, що виконує обробку зображень і подальше виявлення та класифікацію дефектів. Серед основних етапів попередньої обробки зображень варто виділити нормалізацію яскравості, фільтрацію цифрових шумів, а також граничну сегментацію локальних неоднорідностей. Застосування алгоритмів попередньої обробки зображень відіграє важливу роль у реальних виробничих умовах, коли неможливо забезпечити достатнє та рівномірне освітлення зони контролю. Програмна частина використовує алгоритм штучної нейронної мережі (YOLOv5), що попередньо навчена на зображеннях, які містили поверхневі дефекти зварних з'єднань, серед яких: тріщини, газові пори, пропали та подрізи.

Шляхом застосування алгоритму зворотного перспективного перетворення [12, 13] для кожного виявленого дефекту визначаються геометричні розміри. Застосування даного алгоритму мінімізує вплив спотворень, що викликані незначною зміною кута нахилу сенсора відносно поверхні зварного шва. Дотримання однакової відстані між лазерним сенсором та поверхнею зварного з'єднання забезпечується шляхом застосування вбудованого у пальник робота датчика дотику.

Основна перевага застосування комбінованого сенсора у порівнянні зі звичайною цифровою камерою проявляється під час визначення геометричних параметрів подрізів. Відповідно до ДСТУ EN ISO 5817:2022 [14] визначення недопустимості дефекту типу подріз передбачає вимірювання його глибини, що неможливо здійснити за допомогою однієї камери. Проведене сканування кутового з'єднання елементів бокової рами візка вантажного вагона (рис. 9) дозволило виявити односторонній подріз завглибшки 0,2 мм, що доводить доцільність застосування комбінованого лазерного сенсора.

На рис. 10 наведено результати застосування візуально-оптичного НК на тестових зразках, а саме,

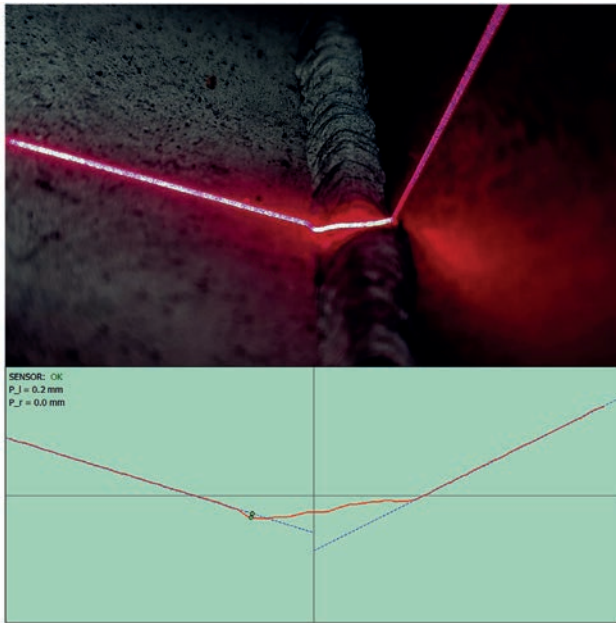


Рис. 9. Приклад визначення одностороннього підрізу кутового з'єднання елементів бокової рами

можливості виявлення, класифікації та визначення геометричних параметрів зварювальних дефектів. Зокрема результати роботи алгоритму визначення геометричних параметрів дефектів містять: пропал (рис. 10, а), поперечна тріщина (рис. 10, б), групові та поодинокі газові пори (рис. 10, в), а також підріз (рис. 10, г).

У разі виявлення характерних особливостей підрізу під час сканування поверхні шва за другим режимом роботи сенсора в РТК надходить сигнал і координати про необхідність дослідження відповідного відрізка сенсором із застосуванням триангуляційного методу. Ступінь небезпечності дефекту визначається відповідно до вимог, наведених у ДСТУ EN ISO 5817:2022 [14], а також з урахуванням результатів розрахункового визначення допустимих розмірів поверхневих дефектів у зварних з'єднаннях бокової рами. Дефект вважається допустимим, коли його геометричні параметри не перевищують встановлених граничних значень. У протилежному випадку автоматизована система класифікує його як недопустимий та сповістить

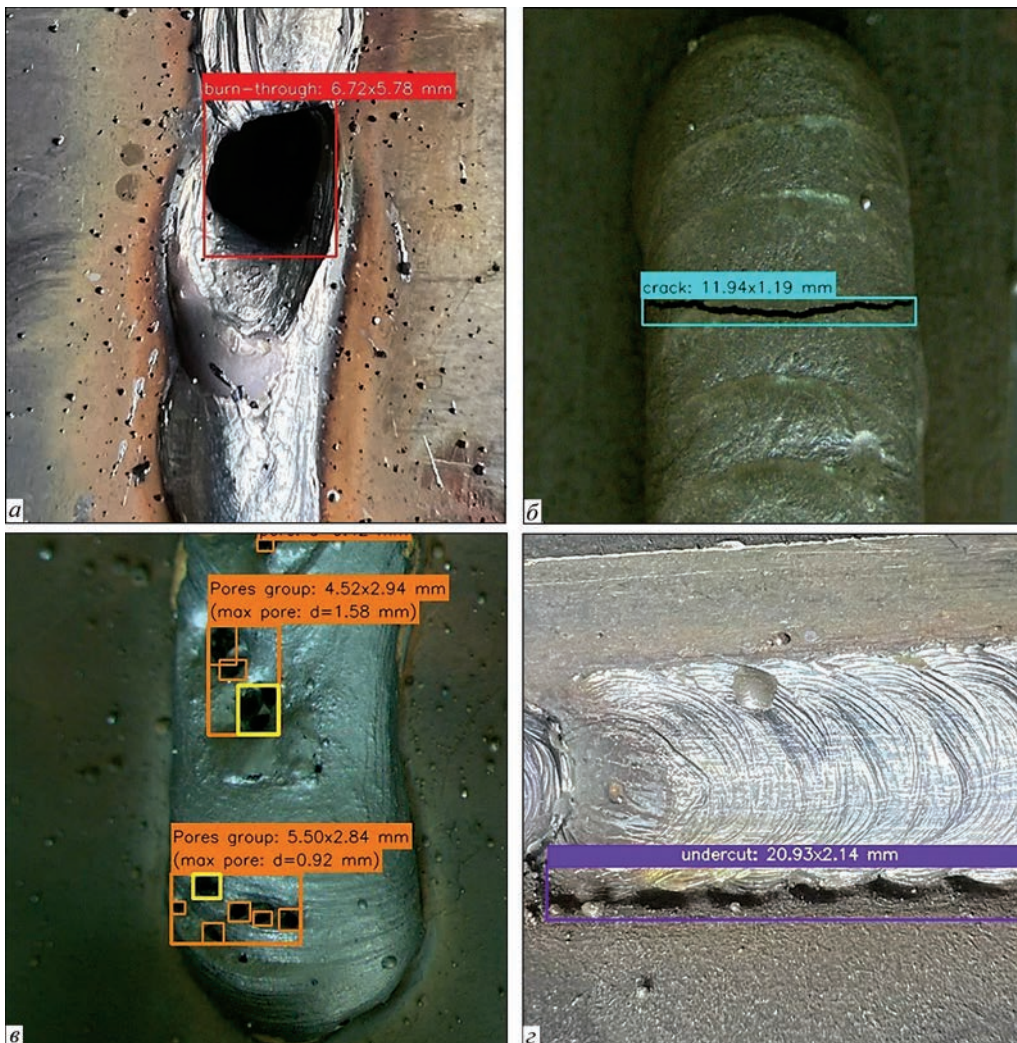


Рис. 10. Демонстрація можливостей роботи системи візуально-оптичного НК: а – пропал; б – поперечна тріщина; в – газові пори; г – підріз

оператора РТК. Повідомлення відображається на дисплеї пульта керування із вказанням його типу, геометричних розмірів і ступеня небезпечності. Такий підхід призводить до своєчасного прийняття рішень щодо подальших дій у роботі системи.

Окремо варто зазначити, що ефективність автоматизованого візуально-оптичного контролю визначається точністю виявлення та класифікації поверхневих дефектів. Визначено на основі розрахунків НДС небезпечні зони, що підлягають більш детальному контролю. Для таких зон система налаштовується на підвищену чутливість, що призводить до покращення достовірності розпізнавання дефектів, але потребує дещо більшого часу на сканування області дослідження.

## Висновки

1. Візуально-оптичний метод НК є ефективним інструментом для первинної діагностики зварних конструкцій відповідального призначення. Автоматизований метод візуального контролю має низку переваг, серед яких: мінімізація людського чинника, висока точність, своєчасне виявлення дефектів, а також можливість автоматизації.

2. Ступінь небезпечності виявлених дефектів визначається відповідно до діючих стандартів або з урахуванням результатів розрахункової оцінки методами механіки руйнування допустимих розмірів поверхневих дефектів у зварних з'єднаннях певних конструкцій при експлуатаційних навантаженнях.

3. На прикладі розрахункового дослідження впливу поверхневих дефектів зварних з'єднань на міцність і довговічність конструкції бокової рами візка вантажного вагона показано, як можуть бути сформувані вимоги до візуально-оптичного методу НК на основі визначених допустимих розмірів дефектів на різних ділянках зварних з'єднань із урахуванням регламентованих умов експлуатаційного навантаження.

4. Автоматизована система візуально-оптичного контролю зварних з'єднань передбачає інтеграцію в РТК оптико-електронного модуля на основі алгоритмів штучних нейронних мереж для аналізу зображень поверхні шва в режимі реального часу. Алгоритм визначення ступеня небезпечності дефекту враховує напружено-деформований стан досліджуваної ділянки конструкції, що забезпечує диференційовану оцінку допустимості поверхневих дефектів.

## Список літератури/References

1. Martyniuk, R.T. (2025) Main defects of welded joints. *Oil and Gas Power Engineering*, 1(43), 109–116. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2025-1\(43\)-109-116](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2025-1(43)-109-116)
2. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.

- Makhnenko, V.I. (2006) *Resource for safe operation of welded joints and units of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
3. ИВ XIII–1539–96/XV–845–96. *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*.
4. Makhnenko, V.I., Pochinok, V.E. (2006) *Strength calculation of welded joints with crack-like imperfections*. PWI.
5. Лобанов Л.М., Махненко О.В., Книш 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., Knysh, V.V., Solovej, S.A., Pavlovskiy, V.I. (2020) Development of welded structure of side frame of freight car bogie of increased reliability. *The Paton Welding J.*, 3, 13-18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.03.02>
6. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). DSTU 7598:2014: Freight wagons. General requirements for calculations and design of new and modernized 1520 mm gauge (non-self-propelled) wagons [in Ukrainian].
7. Ren, Z., Fang, F., Yan, N. et al. (2022) State of the art in defect detection based on machine vision. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech*, 9, 661–691. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00343-6>
8. Diaz-Cano I, Morgado-Estevéz A, Rodríguez Corral JM et al. (2025) Automated fillet weld inspection based on deep learning from 2D images. *Applied Sciences*, 15(2), 889. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020899>
9. Elhendawy, G.A., El-Taybany, Y. (2025) Machine vision-assisted welding defect detection system with convolutional neural networks. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 26, 3185–3194. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-025-01281-y>
10. Chou, P.-H., Wang, C.-C., Mao, W.-L. (2024) YOLO-based defect detection for metal sheets. *2024 IEEE Int. Conf. on Imaging Systems and Techniques (IST)*, 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/IST63414.2024.10759237>
11. Yun J., Shin W., Koo G., Kim M., Lee C., Lee S. (2020) Automated defect inspection system for metal surfaces based on deep learning and data augmentation. *J. of Manufacturing Systems*, 55, 317–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.03.009>
12. Hou, C., Kang, Y., Qiao, T. (2025) Multi-camera hierarchical calibration and three-dimensional reconstruction method for bulk material transportation system. *Sensors*, 25(7), 2111. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25072111>
13. Carnegie Mellon University. *Camera Matrix and Projection, Course Notes 2017*. [https://www.cs.cmu.edu/~16385/s17/Slides/11.1\\_Camera\\_matrix.pdf](https://www.cs.cmu.edu/~16385/s17/Slides/11.1_Camera_matrix.pdf)
14. ДСТУ EN ISO 5817:2022. *Зварювання. Зварні шви під час зварювання плавленням сталі, нікелю, титану та інших сплавів (крім променевого зварювання). Рівні якості залежно від дефектів* (EN ISO 5817:2014, IDT; ISO 5817:2014, IDT).
- DSTU EN ISO 5817:2022: *Welding. Welds during fusion welding of steel, nickel, titanium and other alloys (except beam welding). Quality levels depending on defects* (EN ISO 5817:2014, IDT; ISO 5817:2014, IDT) [in Ukrainian].
15. Hobbacher, A. (1994) Stress intensity factors of welded joints. *Eng. Fracture Mech.*, 46(2), 173–182.
16. Саврух М.П. (1988) *Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие. Т.2. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами*. Под общ. ред. В.В. Панасюка. Киев, Наукова думка.
- Savruk, M.P. (1988) *Fracture mechanics and strength of materials: A reference manual. Pt 2. Stress intensity factors in bodies with cracks*. Ed. by V.V. Panasyuk. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
17. МР-125-01-90. *Расчет коэффициентов интенсивности напряжений и коэффициентов ослаблений сечений для дефектов в сварных соединениях*. Киев.
- MP-125-01-90. *Calculation of stress intensity factors and cross-sectional weakening factors for defects in welded joints*. Kyiv [in Russian].

# APPLICATION OF VISUAL INSPECTION METHOD FOR WELD QUALITY METAL ASSESSMENT

O.S. Kostenevych, A.S. Novodranov

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

Quality testing of welded joints is one of the main factors in ensuring the reliability and durability of welded structures. Even minor defects in the weld can cause a loss of the bearing capacity of the structure. Considering the dependence of manual welding quality on the welder’s skill, transitioning to robotic welding production is advisable. However, this approach requires automation of the relevant non-destructive testing systems. When conducting automated visual-optical quality testing of welded joints, the degree of danger of the detected defect is assessed according to applicable standards. In addition, permissible sizes of surface defects can be determined using fracture mechanics-based calculations, taking into account operating load conditions. The paper compares these two approaches and also formulates requirements for the visual-optical NDT method for welded side frame of a railway freight car bogie based on calculated allowable defect sizes. The visual-optical method of testing welded joints is capable of detecting only surface defects, which can be conservatively considered as surface elliptical cracks and evaluated using fracture mechanics methods. The results of the study prove that the visual-optical NDT method is an effective tool for the primary diagnosis of critical welded structures. 17 Ref., 5 Tabl., 10 Fig.

*Keywords: welded joints, welded structures, freight car bogie, side frame, stress-strain state, load spectrum, mathematical modelling, fatigue resistance, permissible defect sizes, visual-optical testing*

### ORCID

Костеневич О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-7427-2805>, Новодранов А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3380-3745>

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

### АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

А.С. Новодранов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: artur19940731@gmail.com

### РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

О.С. Костеневич, А.С. Новодранов (2026) Застосування візуально-оптичного методу контролю якості зварних з’єднань металевих конструкцій. *Автоматичне зварювання*, **03**, 23–33. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.03.04>

### ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 22.02.2026

Отримано у переглянутому вигляді 10.04.2026

Підписано до друку 14.05.2026

Оприлюднено 20.05.2026

Розроблено в ІЕЗ

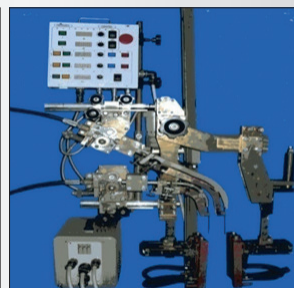
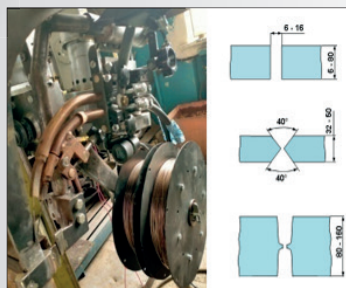
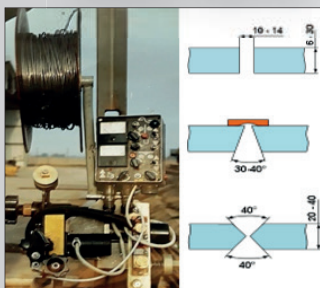
## Зварювання металоконструкцій зі сталі товщиною 6...200 мм за один прохід

### Апарат АД1381

### Апарат АД348

### Апарат АШ115М2

### Апарат АД381Ш



Дугове зварювання з примусовим формуванням вертикальних та нахилених стиків товщиною 6...160 мм за один або два проходи

Електрошлакове зварювання вертикальних, нахилених та криволінійних стиків металу товщиною 30...200 мм за один прохід