

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК В УКРАЇНІ

І.В. Зяхор¹, Є.В. Антіпін¹, О.В. Дідковський¹, А.М. Левчук¹, В.В. Калюжний², В.В. Озюменко²,
О.А. Великоіваненко¹, П.М. Руденко¹, Ю.А. Шило¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: zyakhor2@ukr.net

²Філія «Центр з будівництва та ремонту колії» АТ «Укрзалізниця». 01103, м. Київ, Залізничне шосе, 5Б

З'єднання рейок у стаціонарних і польових умовах переважно виконується контактним стиковим зварюванням оплавленням (КСЗО), яке впродовж багатьох років успішно використовується на залізницях України та за кордоном. У статті проаналізовано критичні проблеми щодо забезпечення працездатності залізничної інфраструктури в умовах воєнного стану в Україні. Для вирішення цих проблем Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України спільно з Філією «Центр з будівництва та ремонту колії» АТ «Укрзалізниця» розробили комплекс заходів щодо забезпечення якісного зварювання рейок у стаціонарних і польових умовах при ремонті та спорудженні безстикових залізничних колій відповідно до вимог чинних нормативних документів. Наведено результати робіт (науково-дослідних, технологічних, науково-технічних експертиз) з реалізації цих заходів за період 2022–2025 рр. Зокрема успішно проведено аудит технічного стану рейкозварювальних машин, удосконалено технологію та відпрацьовано технологічні режими КСЗО залізничних рейок, удосконалено систему забезпечення якості з'єднань при КСЗО залізничних рейок, підготовлено нові редакції нормативних документів на КСЗО залізничних рейок, проводяться роботи з удосконалення конструкції машин для КСЗО, розвивається співробітництво з компаніями для відновлення виробництва рейкозварювального устаткування в Україні. Бібліогр. 43, табл. 4, рис. 17.

Ключові слова: залізнична рейка, зварне з'єднання, контактне стикове зварювання оплавленням, залізнична хрестовина

Вступ. Безстикова колія є найпрогресивнішою конструкцією верхньої будови колії в умовах сучасної експлуатації залізниць [1]. З'єднання рейок у стаціонарних і польових умовах переважно виконується контактним стиковим зварюванням оплавленням (КСЗО), яке впродовж багатьох років успішно використовується на залізницях України і за кордоном [2]. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (ІЕЗ) з 1950-х років є світовим лідером у галузі розробки технологій та устаткування для КСЗО залізничних рейок [3–5].

В ІЕЗ під загальним керівництвом академіка Б.Є. Патона та безпосереднім керівництвом академіків НАН України В.К. Лебедева та С.І. Кучука-Яценка вперше в світі створено високоефективне мобільне устаткування для КСЗО залізничних рейок у польових умовах. В його основу покладено оригінальну конструкцію вторинного контуру зварювальних трансформаторів зі зниженим опором короткого замикання та технологію контактного стикового зварювання безперервним оплавленням з програмною зміною основних параметрів процесу КСЗО. Створено унікальне зварювальне устаткування [3–5], яке, у порівнянні з кращими закордонними аналогами, відрізнялось

суттєво меншими габаритами, вагою, споживаною потужністю, високим коефіцієнтом корисної дії, повною автоматизацією процесу зварювання, що забезпечило можливість виконання зварювання рейок на місці укладання колії.

Перші мобільні рейкозварювальні машини були виготовлені в ІЕЗ, а з 1961 р. на Каховському заводі електрозварювального устаткування було впроваджено у серійне виробництво мобільні (К155, К255, К255Л, К355) та стаціонарні (К190, К190М, К190ПА) рейкозварювальні машини, які успішно працювали в Україні та в десятках країн на всіх континентах [4]. Устаткування й ліцензії на технологічні розробки ІЕЗ придбали ряд провідних закордонних компаній, зокрема Plasser & Theurer (Австрія), Holland і Progress Rail Services (США), Network Rail (Великобританія). Подорожуючи залізничним транспортом територіями України, США, Китаю, Європейського Союзу та багатьох країн світу, більшість пасажирів не уявляють, що зварні стики рейок виконано за допомогою технологій та устаткування, створеного в ІЕЗ. До того ж, це стосується й колій метрополітену в м. Києві, Вашингтоні, Нью-Йорку, Сінгапурі, Шанхаї, Пекіні, Бангкоці та інших містах. Рейкозварювальні підприємства АТ «Укрза-

Зяхор І.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7780-0688>, Антіпін Є.В. – <https://orcid.org/0000-0003-3297-5382>,
Дідковський О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5268-5599>, Левчук А.М. – <https://orcid.org/0000-0002-0361-7394>,
Великоіваненко О.А. – <https://orcid.org/0009-0007-3704-2000>, Руденко П.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7770-2145>,
Шило Ю.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6174-5925>,
© І.В. Зяхор, Є.В. Антіпін, О.В. Дідковський, А.М. Левчук, В.В. Калюжний, В.В. Озюменко, О.А. Великоіваненко
П.М. Руденко, Ю.А. Шило, 2025

лізниця» використовують виключно технології та устаткування для КСЗО, розроблені ІЕЗ.

У 2000-х роках на основі результатів фундаментальних досліджень в ІЕЗ розроблено та впроваджено технологію КСЗО рейок з пульсуючим режимом нагрівання (пульсуючим оплавленням), спроектовано та освоєно виробництво нового покоління мобільних (К900, К920, К921, К922, К930, К945, К950, К960, К963, К1045) і стаціонарних (К1000, К924) рейкозварювальних машин. У них уперше в світі втілено низку захищених міжнародними патентами інноваційних технічних рішень в області технології зварювання, конструкції зварювальних машин, принципів центрування рейок, систем керування процесом КСЗО і контролю якості зварних стиків [6–10].

Широкомасштабне військове вторгнення в Україну у 2022 р. призвело до виникнення ряду критичних проблем щодо забезпечення працездатності залізничної інфраструктури в умовах воєнного стану. Серед них – зупинка внаслідок окупації виробництва вітчизняних рейок комбінатом «Азовсталь», що актуалізувало проблему зварювання старопридатних [11] і нових [12–17] рейок різних марок та заводів-виробників, з різними технологіями термозміцнення, зокрема у різнорідному поєднанні; припинення Каховським заводом електрозварювального устаткування («КЗЕСО») виробництва вітчизняного рейкозварювального устаткування, що призвело до зриву постачання Дніпровському стрілочному заводу стаціонарної машини К924 для КСЗО залізничних хрестовин і АТ «Укрзалізниця» новітніх рейкозварювальних комплексів КЗМ007, обладнаних машинами К922-1, та обумовило необхідність термінового вирішення проблеми подовження експлуатаційного ресурсу наявного зварювального устаткування.

Для вирішення цих проблем ІЕЗ спільно з Філією «Центр з будівництва та ремонту колії» («ЦБРК») АТ «Укрзалізниця» розробили комплекс заходів щодо забезпечення якісного зварювання рейок у стаціонарних і польових умовах при ремонті та спорудженні безстикових залізничних колій відповідно до вимог чинних нормативних документів [11–13]. Зазначений комплекс заходів включає організаційні, науково-дослідні, конструкторські та технологічні роботи, проведення науково-технічних експертиз.

Найактуальнішими та першочерговими для вирішення визначено такі завдання:

- встановлення причин невідповідності окремих зварних стиків залізничних рейок різних марок, різних заводів-виробників вимогам нормативних документів;
- аудит технічного стану наявного в АТ «Укрзалізниця» рейкозварювального устаткування та

розробка заходів для подовження його експлуатаційного ресурсу;

- удосконалення технології та відпрацювання технологічних режимів КСЗО залізничних рейок конверторного виробництва;

- удосконалення системи забезпечення якості з'єднань при КСЗО залізничних рейок;

- підготовка рекомендацій та внесення змін до чинних нормативних документів, розробка нової редакції технічних умов на КСЗО залізничних рейок;

- удосконалення конструкції мобільних рейкозварювальних машин;

- пошук компаній, які мають виробничі потужності для відновлення виробництва устаткування для КСЗО.

Мета роботи – надати стисло інформацію щодо результатів робіт за період 2022–2025 рр. для реалізації розробленого комплексу заходів для забезпечення якісного зварювання залізничних рейок в умовах воєнного стану в Україні.

Встановлення причин невідповідності окремих зварних стиків залізничних рейок вимогам нормативних документів. За заявками ЦБРК АТ «Укрзалізниця» фахівці ІЕЗ виконували науково-технічні експертизи причин невідповідності вимогам нормативних документів зварних стиків залізничних рейок різних марок, різних заводів-виробників, зокрема при їх механічних випробуваннях згідно з вимогами чинних стандартів [11–13]. На основі результатів операційного контролю, аналізу протоколів зварювання, макроаналізу та металографічних досліджень з'єднань рейок, фрактографічних досліджень зламів зварних стиків визначали причини їх руйнування при механічних випробуваннях на статичний згин і при циклічних навантаженнях у процесі експлуатації залізничної колії. Використовували методи макроаналізу, мікроаналізу, вимірювання твердості (NOVOTEST TC-GPB) і мікротвердості (М400, Leco), оптичної мікроскопії (Neophot-32), растрової електронної мікроскопії (РЕМ), мікрорентгеноспектрального аналізу (МРСА), Оже-електронної спектроскопії (Оже-мікрозонд JAMP-9500F JEOL із встановленим EDS-спектрометром OXFORD EDS INCA Energy 350) [18].

В якості ілюстрації змісту проведеного комплексу робіт з цього напрямку нижче наведено фрагмент звіту науково-технічної експертизи причин невідповідності вимогам нормативних документів (руйнування при випробуваннях на статичний згин) зварного стика рейок типу Р65 марки Е76Ф, виконаного КСЗО безперервним оплавленням рейкозварювальною машиною К355. Предмет дослідження – виявлені на злам (рис. 1) зварного стика дефекти в підшві рейки за кодом 66.3 і дефекти в шийці за кодом 56.3 [19].

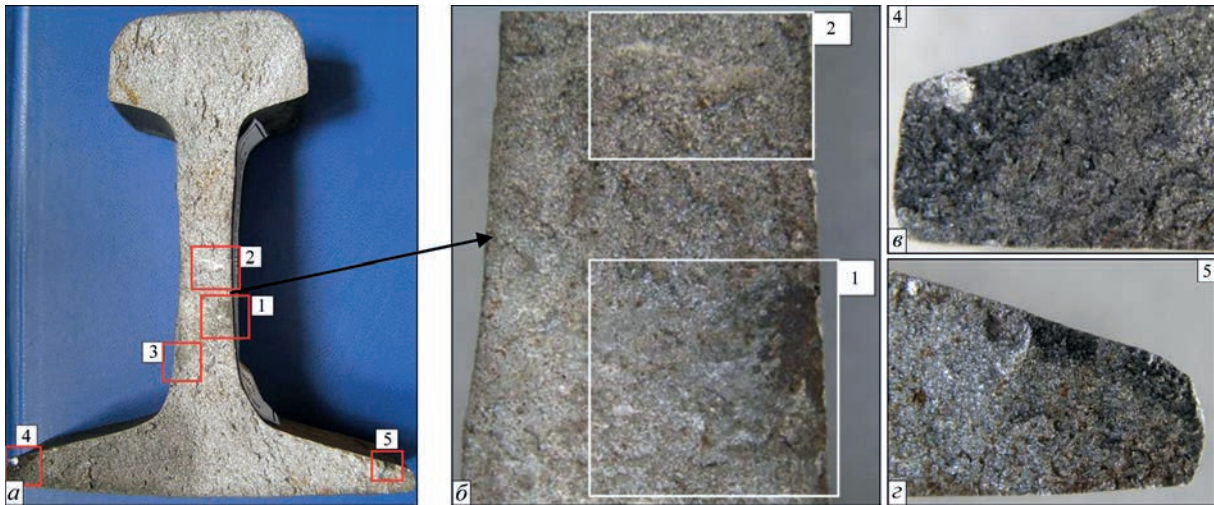


Рис. 1. Злам зварної рейки (а), дефекти в шийці (б) та підшві (в, з) рейки

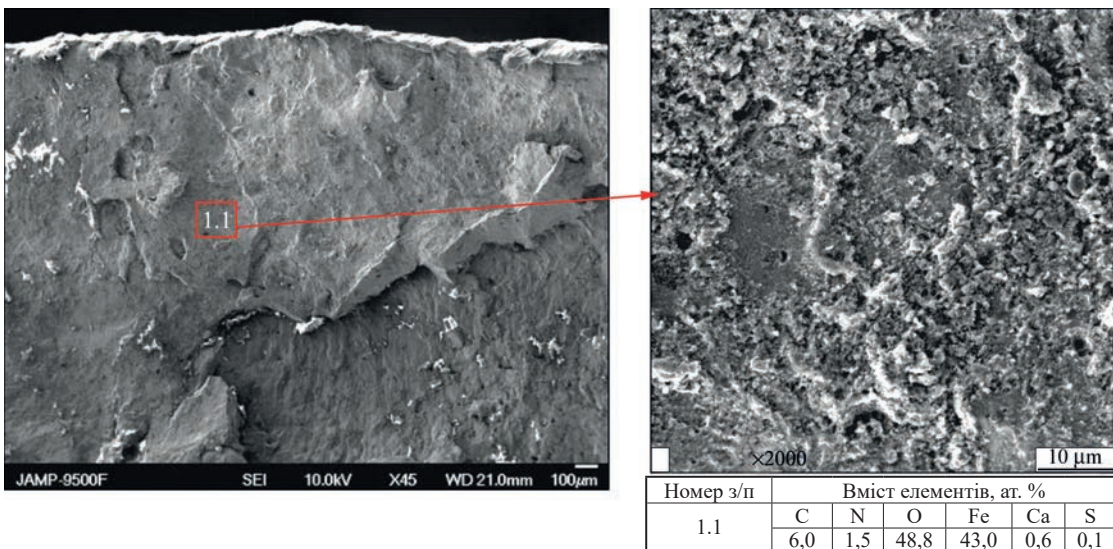


Рис. 2. РЕМ-зображення ділянок № 1 (див. рис. 1, а) зламу і №1.1 після іонного травлення іонами Ag⁺ з енергією 3 кеВ на глибину 60 нм, результати Оже-спектрометрії ділянки № 1.1

Злам зварного стику рейок за макрогеометрією поверхні руйнування є неоднорідним [20], оскільки має геометричні зони з різним макрорельєфом поверхні руйнування. За станом поверхні та мікрорельєфом руйнування злам у головці та переважній частині шийки й підшви є кристалічним, квазікристалічним, міжзерняним [21, 22].

У шийці рейки на ділянках зламу №№ 1, 3 (рис. 1, а) спостерігаються дефекти у вигляді темних плям без металевих блисків та ознак кристалічного зламу (рис. 2). Загальна площа цих дефектів складає близько 60 мм², що свідчить про невідповідність зварного стику рейок вимогам нормативної документації [11–13].

Хімічний склад темних ділянок приблизно відповідає складу оксиду заліза FeO (рис. 2, б). Згідно з [21] цей вид дефекту можна віднести до групи 4 «Незплавлення» підгрупи Р401 «Відсутність зварювання» або Р403 «Недостатнє сплавлення/злипання зварного шва». Найімовірнішою причиною утворення таких дефектів є порушення процесу

оплавлення перед осадкою на стадії форсування (інтенсивного оплавлення).

На ділянці № 2 зламу в шийці рейки виявлено дефект розмірами 0,3...2×10 мм (рис. 3, а) у вигляді світлої плями з металевим блиском без ознак кристалічного зламу. Дефект витягнутий у поперечному напрямку шийки, загальна площа – близько 18 мм², що перевищує допустиме максимальне значення згідно з [11–13]. Поверхня зламу на ділянках №№ 2 і 3 не має ознак кристалічного зламу, має вигляд локально оплавленої поверхні з незначним металевим блиском, основною складовою є залізо (близько 85 %) з незначним вмістом кисню (близько 6 %). Численні вкраплення, розташовані на поверхні дефекту, за хімічним складом відповідають залізомарганцевим силікатам, які присутні в основному металі рейкової сталі, що свідчить про їх металургійне походження [23].

При металографічних дослідженнях прилеглих до зламу зварного стику ділянок зони термічного впливу (ЗТВ) встановлено, що загальна ширина

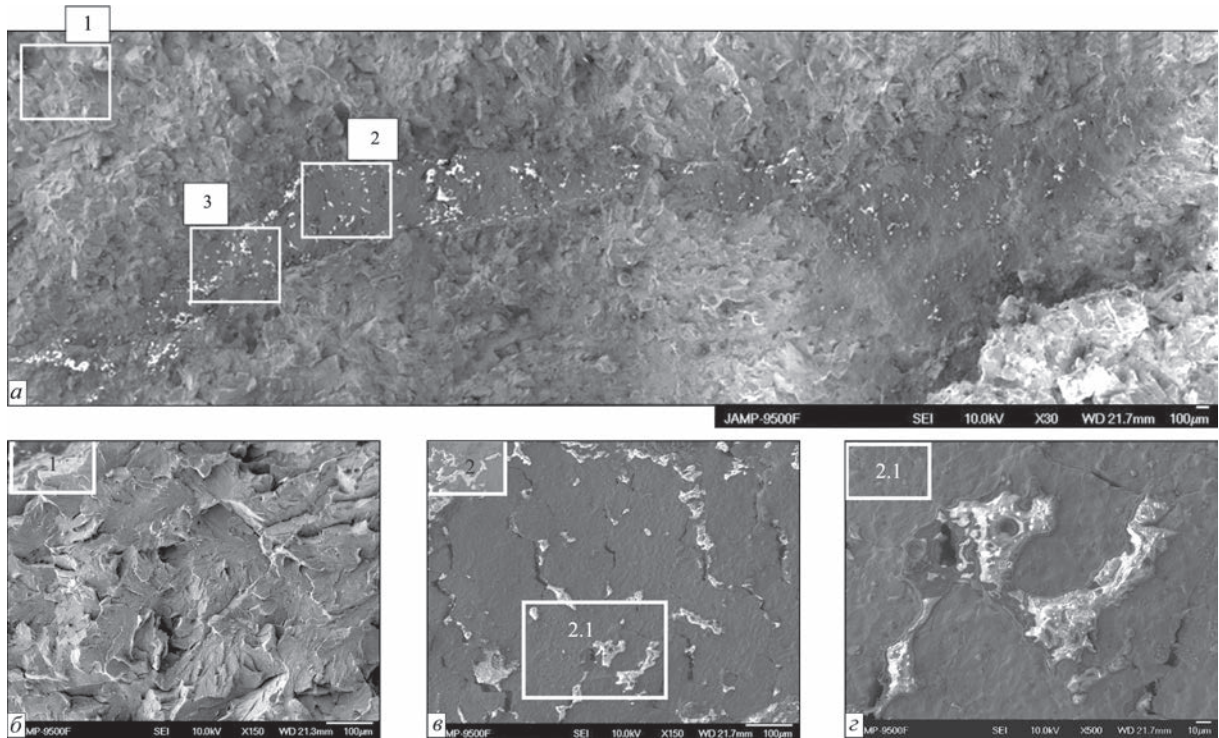


Рис. 3. РЕМ-зображення поверхні зламу на ділянці № 2 (див. рис. 1) (а) і локаціях 1, 2 і 2.1 (б, в)

ЗТВ значно перевищує вимоги [17], який регламентує допустиме значення ширини ЗТВ у межах 20...45 мм. Суттєве збільшення ширини ЗТВ у порівнянні з вимогами [17] могло бути наслідком декількох факторів, а саме: перегрівом рейок (надмірне енерговкладення у зварний стик), тривалим коротким замиканням торців рейок при оплавленні, надмірно тривалим процесом оплавлення.

На ділянках зламу в підшві рейки виявлено дефекти за кодом 66.3 [19] (див. рис. 1, в, ділянки 4, 5). За результатами фрактографічних досліджень зламів встановлено, що вони є дефектами групи 3 «Тверді включення», Р306 «Включення литого металу (залишки розплавленого металу з домішками у зварному шві)» [21].

Імовірними причинами утворення цих дефектів і невідповідності зварного стику нормативним вимогам [11–13, 17] є поєднання декількох чинників, зокрема: надмірне енерговкладення у зварний стик, локальне окислення торців рейок на стадії інтенсивного оплавлення, попадання перегрітого металу в площину з'єднання при зрізанні ґрата. Встановлено, що зоною стартового розвитку тріщини та причиною зламу зварного стику є дефекти в підшві рейки; руйнування стику обумовлено розташуванням дефектів у зоні напружень розтягу.

Дефекти у підшві рейки (групи 3, Р306) відносно складно виявити наявними ультразвуковими дефектоскопами після зварювання стику, оскільки вони мають монолітну структуру перегрітого металу, окисленого по границям зерен, без наявності порожнин. При ультразвуковому контролі наявни-

ми дефектоскопами такі дефекти можуть сприйматись як структурні шуми.

Основні результати науково-технічних експертиз причин невідповідності зварних стиків залізничних рейок вимогам нормативних документів наведено у висновках, які містять класифікацію зламу зварного стику рейок за макрогеометрією поверхні руйнування, характеристику зламу за станом поверхні та мікромеханізмом руйнування, класифікацію дефектів, висновки про відповідність зварного стику нормативним вимогам, обґрунтування ймовірних причин утворення дефектів і причин зламу зварного стику рейок, оцінку можливості виявлення наявних дефектів методами ультразвукової дефектоскопії.

За результатами науково-технічних експертиз зварних стиків залізничних рейок типу Р65 різних марок (Е76Ф, К76, К76Ф, Р350НТ) та різних заводів-виробників, виконаних мобільними рейкозварювальними машинами К355, К900, К922-1 протягом 2024–2025 рр., фахівці ІЕЗ розробили рекомендації щодо недопущення виникнення дефектів у зварних стиках рейок і надійного виявлення можливих дефектів при неруйнівному контролі стиків, а також перелік практичних заходів для їх реалізації. Основними заходами недопущення дефектних зварних стиків у залізничній колії є: вдосконалення технології та відпрацювання технологічних режимів КСЗО рейок різних марок; неухильне дотримання персоналом вимог [11–13] до виконання допоміжних і зварювальних робіт; використання зварювальних машин, обладнаних системами реєстрації основних параметрів процесу

КСЗО; вчасне проведення моніторингу технології зварювання рейок за електронними рапортами, які надходять з рейкозварювальних підприємств АТ «Укрзалізниця». Також рекомендовано використання технології фазованих антенних решіток для ультразвукового контролю зварних стиків рейок.

Аудит технічного стану рейкозварювального устаткування. Протягом звітнього періоду фахівці ІЕЗ провели на всіх рейкозварювальних підприємствах (РЗП) АТ «Укрзалізниця» аудит технічного стану зварювальних машин, зокрема стаціонарних К1000 та мобільних К355А, К900, К920, К922-1. У результаті виконаних робіт виявлено наявні проблеми, наведені в актах технічного стану устаткування; спільно з Філією «ЦБРК» АТ «Укрзалізниця» розроблено комплекс заходів для підтримки заданих технічних характеристик і продовження експлуатаційного ресурсу рейкозварювальних машин у складі комплексів КЗМ 005, КЗМ 007, КРЗМ 3, КРЗМ 4, КРЗ 1 (рис. 4), укладено нові договори на виконання аналогічних робіт. Плідна співпраця у цьому напрямку продовжується.

Удосконалення технології та відпрацювання технологічних режимів КСЗО залізничних рейок конверторного виробництва. Після зупинки у 2022 р. внаслідок окупації м. Маріуполь виробництва вітчизняних рейок комбінатом «Азовсталь» на залізницях України почали використовувати рейки Р65 (60E1) конверторного виробництва різних марок з різними технологіями термозміцнення, які закуповуються у різних заводів-виробників та отримані в якості гуманітарної допомоги. Рейкозварювальні підприємства АТ «Укрзалізниця» спільно з ІЕЗ у стислі терміни повинні були вирішити проблему вдосконалення технології та відпрацювання технологічних режимів КСЗО рейок різних марок (R350HT, R350LHT, R400HT), зокрема, у різномірному сполученні. Аналогічна проблема виникла при використанні старопридатних рейок мартенівського та конверторного виробництва марок М76, Е76, Е76Ф, К76, К76Ф, які при укладанні в залізничну колію необхідно зварювати між собою та у різномірному поєднанні.

У попередні роки технологічні режими КСЗО рейок визначались експериментально для наявного типу рейок і конкретної рейкозварювальної машини. Вимогами чинних нормативних документів [11–13] регламентуються допустимі діапазони зміни окремих параметрів КСЗО рейок, зокрема: напруги первинної обмотки зварювальних трансформаторів і величини переміщення на різних етапах процесу КСЗО; тиску осадки; швидкості переміщення при оплавленні, форсуванні та осадці; час осадки під струмом тощо. На основі аналізу результатів багаторічного практичного досвіду з

КСЗО рейок на рейкозварювальних підприємствах АТ «Укрзалізниця», механічних випробувань і металографічних досліджень зварних стиків було встановлено, що забезпечення у визначених межах технологічних параметрів КСЗО є необхідною, але недостатньою умовою одержання зварних з'єднань рейок, які задовольняють вимогам [11–13].

Більш того, гарантування відповідності зварних стиків рейок вимогам національного стандарту [17], гармонізованого з відповідним європейським нормативним документом, передбачає забезпечення певних параметрів ЗТВ, а саме: допустимого діапазону значень ширини ЗТВ (мінімальне $H_{ЗТВ\ min}$ та максимальне $H_{ЗТВ\ max}$ значення) та її нерівномірності по довжині та перерізу рейок, і додатково містить вимоги до мікроструктури металу в ЗТВ – унеможливується утворення гартівних структур.

Розробка та затвердження режиму КСЗО рейок кожної марки на конкретній рейкозварювальній машині вимагало проведення комплексу робіт, які включали: механічні випробування, металографічні та фрактографічні дослідження, неруйнівний контроль, визначення розподілу твердості тощо. Дотепер не був визначений надійний алгоритм забезпечення якості зварних з'єднань рейок при зміні зовнішніх факторів (стан зварювальної машини, параметри дизель-генератора, якість підготовки кінців рейок тощо). Розробка зазначеного алгоритму якості з'єднань рейок базувалася на ідеї академіка НАН України С.І. Кучука-Яценка про використання величини загального енерговкладення $Q_{опл}$ у процесі оплавлення рейок в якості комплексного параметра, який враховує вплив інших енергетичних параметрів процесу КСЗО на розподіл температури в ЗТВ, формування мікроструктури та механічні властивості зварних з'єднань рейок. Реалізація цієї ідеї полягала у визначенні та науковому обґрунтуванні діапазону зміни величини $Q_{опл}$ при КСЗО сучасних рейок конверторного виробництва, у якому забезпечується відповідність зварних стиків вимогам чинних стандартів. З практичної точки зору це дозволить суттєво скоротити час та об'єм досліджень і випробувань при розробці та відпрацюванні технологічних режимів КСЗО рейок різних марок незалежно від параметрів електричної мережі, стану рейкозварювальної машини тощо. Нижче наведено короткий опис проведених досліджень і отриманих результатів.

Розрахунками зміни теплового коефіцієнта корисної дії (ККД) процесів нагрівання рейок при безперервному (БО) і пульсуючому оплавленні (ПО) встановлено, що при БО рейок значення ККД зменшується з 0,7 (у початковий період) до 0,45 при $t_{опл} = 180$ с, а при ПО – ККД зменшується з 0,9 у початковий період оплавлення до 0,7 при $t_{опл} = 80$ с (рис. 5). Проведеними розрахунками об-



Рис. 4. Мобільні машини K922-1 у складі рейкозварювальних комплексів КЗМ 005 (а), КЗМ 007 (б), КРЗ 1 (в)

грунтовано використання ПО у якості базового процесу при розробленні ефективної технології КСЗО сучасних залізничних рейок конверторного виробництва.

Проводили розрахункове дослідження нагрівання рейок типу Р65 (60Е1) при ПО з програмною зміною напруги U (рис. 6) на різних стадіях процесу оплавлення.

Спільно з відділом № 34 ІЕЗ розроблено математичні моделі та відповідні засоби комп'ютерного моделювання кінетики температурних полів при КСЗО залізничних рейок. Використано чисельне розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності поряд із комплексом необхідних лабораторних вимірювань впливу технологічних параметрів КСЗО на температурні цикли в рейках, що зварюються. Це дозволило врахувати мультифізичні процеси оплавлення торців рейок, визначити характерну теплову ефективність процесу КСЗО.

За допомогою математичної моделі розраховувались термічні цикли та розподіл температур в ЗТВ при ПО рейок типу Р65 марки К76Ф. При проведенні розрахунків значення основних параметрів режимів КСЗО (табл. 1) встановлювали в межах, передбачених [13].

Для оцінки достовірності математичної моделі проводили експериментальні дослідження термічних циклів і визначали розподіл температур у зварних з'єднаннях, отриманих КСЗО згідно з табл. 1. Експерименти з дослідження термічних циклів при КСЗО виконували на стаціонарних та мобільних машинах К1000 і К922-1 (рис. 7). Використовували систему термопар, закріплених у го-

ловці рейки на різній відстані від торця рейки з кроком 5 мм. Перша термопара розміщувалась на відстані 18 мм від торця рейки, що передбачало її розташування після закінчення процесу КСЗО на відстані 5 мм від лінії з'єднання.

Порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних дослідження термічних ци-

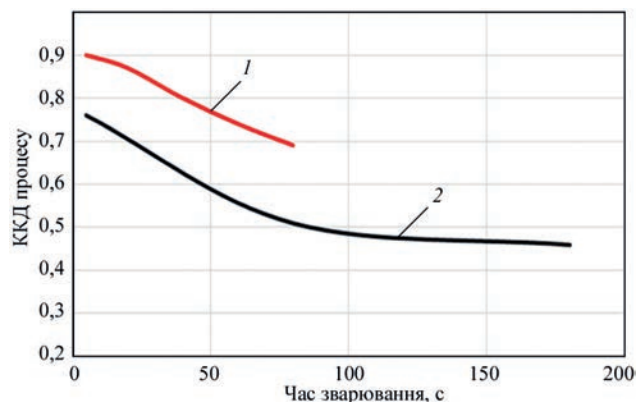


Рис. 5. Зміна ККД у часі при КСЗО: 1 – ПО; 2 – БО (розрахункові дані)

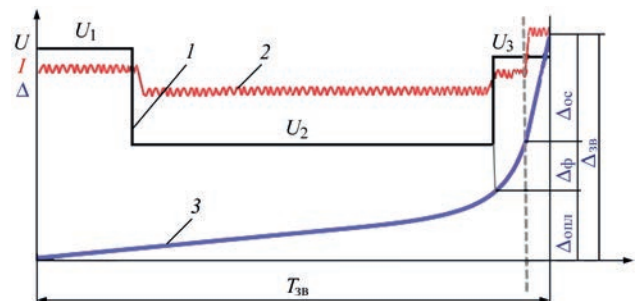


Рис. 6. Циклограма процесу КСЗО з програмною зміною первинної напруги: 1 – напруга; 2 – струм; 3 – переміщення

Таблиця 1. Режим КСЗО рейок К76Ф

Параметр	Значення
Первинна напруга на різних стадіях оплавлення U , В	$U_1 = 400, U_2 = 300, U_3 = 400$
Середнє значення первинного струму I на різних стадіях оплавлення, А	$I_1 = 420, I_2 = 380, I_3 = 420$
Тривалість оплавлення загальна $t_{опл}$ ($t_{1,2,3}$ – по стадіях), с	$t_{опл} = 80$ ($t_1 = 30, t_2 = 45, t_3 = 5$)
Час осадки під струмом, с	1
Припуск на оплавлення $\Delta_{опл}$ загальний ($\Delta_{1,2,3}$ – по стадіях), мм	14 ($\Delta_1 = 3, \Delta_2 = 7, \Delta_3 = 4$)
Величина осадки $\Delta_{ос}$, мм	12
Розрахункова величина енерговкладення $Q_{опл}$, МДж	12,8

клів при оплавленні (рис. 8) показує, що математична модель має похибку розрахунку близько 8 %, що дає можливість із задовільною точністю прогнозувати кінетику температурного поля в рейках при КСЗО. Це дозволяє використовувати математичну модель для дослідження впливу основних параметрів КСЗО на процеси нагрівання й охолодження зварних стиків рейок. Встановлено, що максимальне значення швидкості охолодження у зварному з’єднанні та ЗТВ досягається по лінії з’єднання, де температура нагрівання у процесі КСЗО була максимальною.

Із використанням розробленої математичної моделі досліджували вплив на ефективність процесу нагрівання та розподіл температури в зоні зварного з’єднання рейок типу Р65 (60Е1) параметрів процесу КСЗО, а саме: первинної напруги U джерела живлення на різних стадіях процесу оплавлення ($U_1 - U_3$), припуску $\Delta_{ф}$ стадії інтенсивного оплавлення (форсування), тривалості оплавлення $t_{опл}$, і величини енерговкладення $Q_{опл}$. Розподіл температур по осі зварного з’єднання рейок при КСЗО з різною величиною напруги U на другій стадії процесу наведено на рис. 9.

На основі отриманих результатів обґрунтовано використання процесу КСЗО з програмною зміною в часі напруги джерела живлення, уточнено циклограму процесу оплавлення, яка передбачає поетапну зміну значення U в діапазоні $U_1 = 355...440$ В на першій стадії оплавлення, у діапазоні $U_2 = 250...300$ В на другій (квазістаціо-

нарного нагрівання) і в межах $U_3 = 355...440$ В на третій (інтенсивного оплавлення – форсування).

Визначали розподіл температури по осі зварного з’єднання рейок при КСЗО з різною величиною тривалості процесу оплавлення $t_{опл}$. Результати розрахунків для значень $t_{опл} = 90$ і 120 с наведено на рис. 10. Критеріями вибору мінімально допустимого значення $t_{опл}$ було досягнення розподілу температури по осі оплавлених рейок, при якому забезпечуються умови для виконання осадки на задану величину припуску на осадку $\Delta_{ос} = 12$ мм (ширина ЗТВ з температурою нагрівання до 1000 °С повинна перевищувати $\Delta_{ос} = 12$ мм). Як видно з отриманих даних, для $t_{опл} = 90$ с і більше забезпечується виконання вищенаведеної умови.

Розрахунковим шляхом визначали залежність мінімального $H_{ЗТВ\ min}$ та максимального $H_{ЗТВ\ max}$ значень ширини ЗТВ зварного з’єднання (згідно з вимогами [17]) від тривалості процесу оплавлення $t_{опл}$ у діапазоні $50...140$ с. Встановлено, що при ПО залізничних рейок типу Р65 (60Е1) при збільшенні $t_{опл}$ у зазначеному діапазоні значення енерговкладення $Q_{опл}$ змінюється в діапазоні $Q_{опл} = 9...18$ МДж, при цьому значення $H_{ЗТВ\ min}$ зростає від 16 до 22 мм, а значення $H_{ЗТВ\ max}$ – від 36 до 54 мм.

Важливим параметром термічного циклу при КСЗО рейок є швидкість охолодження $W_{8/5}$ металу зварного з’єднання в інтервалі температур $800...500$ °С. Цей параметр визначає наявність або відсутність гартівних структур, дисперсність перліту, показники міцності та твердості в ЗТВ



Рис. 7. Рейкозварювальні машини К1000 (а), К922-1 (б)

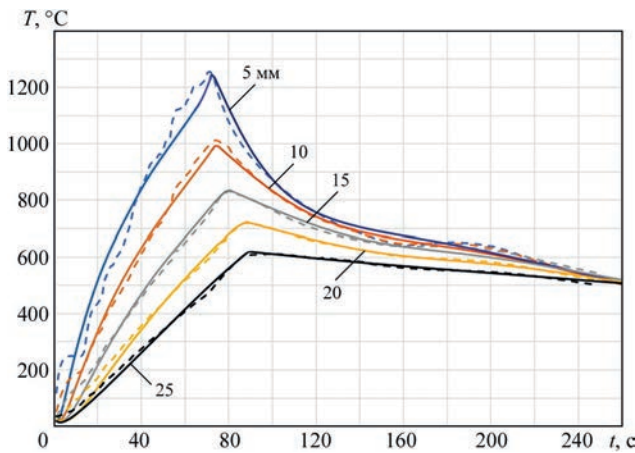


Рис. 8. Розрахункові (пунктирні лінії) та експериментальні (суцільні лінії) термічні цикли при КСЗО рейок Р65 (60E1)

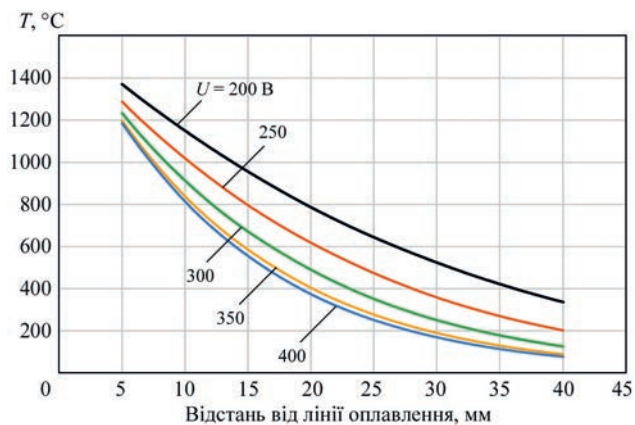


Рис. 9. Розподіл температур по осі зварного з'єднання рейок при КСЗО з різною величиною напруги U , В на другій стадії процесу оплавлення (див. рис. 6)

марки К76Ф на різній відстані від лінії з'єднання

зварного з'єднання. Розрахунковим шляхом досліджували залежність швидкості охолодження $W_{8/5}$ зварних з'єднань після КСЗО залізничних рейок типу Р65 марки К76Ф від величини $Q_{опл}$. При розрахунках швидкості охолодження $W_{8/5}$ металу в ЗТВ з'єднань значення $Q_{опл}$ змінювали у вищенаведених межах, а саме: $t_{опл} = 50...140$ с, $Q_{опл} = 9...18$ МДж.

Для оцінки структурного стану металу в ЗТВ з'єднань рейок Р65 марки К76Ф використовували діаграму трансформації при безперервному охолодженні (ССТ-діаграма) рейкової сталі К76Ф [14]. Метою досліджень було визначення діапазону зміни величини енерговкладення $Q_{опл}$, в якому в зварному з'єднанні рейок відсутні гартівні структури (мартенсит), забезпечується перлітна структура металу ЗТВ і досягаються показники твердості згідно з вимогами чинних стандартів [11–13, 17]. При розрахунках значення струму, припуску та тривалості оплавлення, припуску на осадку та енерговкладення встановлювали для трьох різних режимів КСЗО (табл. 2). Розрахунковий розподіл температури в ЗТВ з'єднань при КСЗО рейок Р65 (60E1) марки К76Ф для режимів 1–3 наведено на рис. 11.

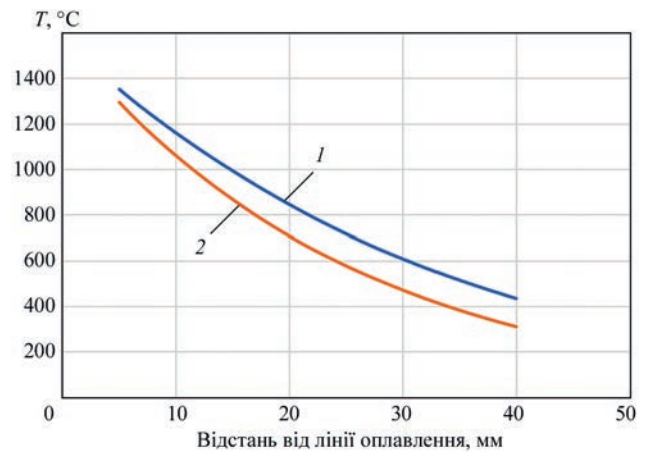


Рис. 10. Розподіл температури по осі зварного з'єднання рейок при КСЗО з різною величиною тривалості оплавлення $t_{опл}$, с: 1 – 120; 2 – 90

Для оцінки структурного стану металу в ЗТВ з'єднань рейок розрахункові криві охолодження (логарифмічна шкала часу) для різних режимів КСЗО накладали на діаграму трансформації при безперервному охолодженні рейкової сталі К76Ф. ССТ-діаграма сталі К76Ф з максимальним вмістом вуглецю в межах нормативних вимог [24] і розрахункові криві охолодження з'єднань для значення енерговкладення при КСЗО $Q_{опл} = 9,0; 9,7; 12,6; 16,2$ МДж наведено на рис. 12. Аналіз даних рис. 12 показує, що для $Q_{опл} = 9$ МДж (в межах режиму 1) максимальна швидкість охолодження по лінії з'єднання складає $W_{8/5} = 8,7$ °C/с, крива охолодження частково міститься в межах бейнітної області, значення твердості досягає 395 HV30. Наявність бейніту в структурі металу зварного стика рейок не допускається, тому режим 1 при значенні $Q_{опл} = 9$ МДж є неприйнятним за критерієм структурного стану металу в зоні з'єднання при дослідженні мікроструктури [17]. Для $Q_{опл} = 12,6$ МДж (в межах режиму 2) швидкість охолодження по лінії з'єднання складає $W_{8/5} = 3,75$ °C/с, крива охолодження міститься в межах області перлітного перетворення, значення твердості досягає 380 HV30, що відповідає вимогам чинних нормативних документів. Для $Q_{опл} = 16,2$ МДж (в межах режиму 3) швидкість охолодження по лінії з'єднання складає $W_{8/5} = 2,75$ °C/с, крива охолодження повністю лежить в межах області перлітного перетворення.

Таблиця 2. Режими КСЗО рейок Р65 марки К76Ф

Параметр	Режим КСЗО		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Тривалість оплавлення $t_{опл}$, с	50...60	70...90	110...140
Первинний струм при оплавленні I , А	370...390		
Припуск на оплавлення $\Delta_{опл}$, мм	7...8	9...12	14...15
Величина енерговкладення $Q_{опл}$, МДж	9...10,8	11,5...14,0	14,4...18

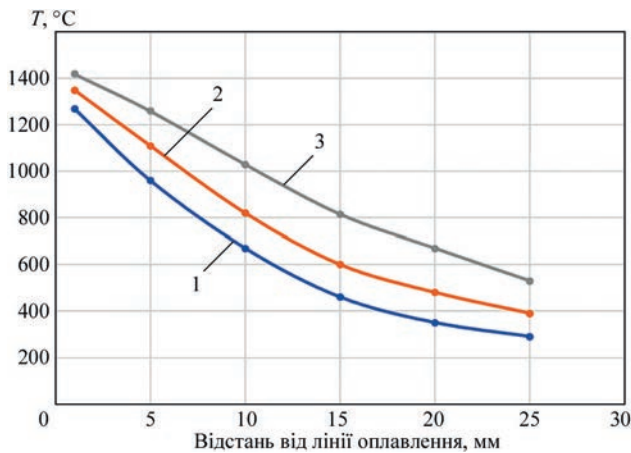


Рис. 11. Розподіл температури в ЗТВ перед осадкою при ПО рейок Р65 (60Е1) на режимах 1–3

ня, значення твердості досягає 368 *HV*₃₀. Таким чином, при КСЗО на режимах 2 і 3 зварні стики відповідають нормативним вимогам за критерієм структурного стану металу в зоні з'єднання [17].

Розрахунковим шляхом визначено мінімальні значення тривалості процесу оплавлення $t_{\text{опл min}} = 55$ с і енерговкладення $Q_{\text{опл min}} = 9,7$ МДж при КСЗО термічнозміцнених рейок К76Ф з максимальним вмістом вуглецю в межах нормативних вимог, при яких швидкість охолодження по лінії з'єднання не перевищує $W_{8/5} = 7,0$ °C/с і забезпечується відсутність у зоні з'єднання бейніту та мартенситу.

Виконувалося відпрацювання технологічних режимів КСЗО рейок типу Р65 (60Е1) марок К76Ф і R350НТ за результатами механічних випробувань і металографічних досліджень. Проводили механічні випробування на статичний поперечний згин [11–13, 17] зварних стиків рейок, виконаних

на різних режимах КСЗО (див. табл. 2). Результати випробувань наведено в табл. 3 і 4.

Очевидно, що тільки режим 2 відповідає нормативним вимогам за величинами стріли прогину та руйнівного навантаження зварних стиків рейок К76Ф і R350НТ. Після випробувань на статичний згин зварних стиків рейок К76Ф, виконаних КСЗО на режимі 1, проводили фрактографічний аналіз зламів. У зламах спостерігаються дефекти (рис. 13), які визначаються як «плоскі плями» або «матові плями» (МП) [23, 25, 26] загальною площею більше 15 мм², що не відповідає [11–13]. МП виділяються на поверхні зламу нерозвиненим рельєфом і відрізняються сірим кольором. У структурі МП присутні численні оплавленого виду вкраплення (рис. 13), їх основу складають частки комплексних оксидів розміром декілька мікрон, до складу яких входять марганець, кремній.

Збільшення енерговкладення при КСЗО (режим 3) призводить до зниження показників механічних властивостей при випробуваннях зварних стиків рейок на згин. Це обумовлено, перш за все, збільшенням розміру зерна по лінії з'єднання та в ЗТВ і розвитком процесу виділення доєвтектоїдного фериту по границях первинних аустенітних зерен [25]. Отже, режим 3 ($t_{\text{опл}} = 110...140$ с, $Q_{\text{опл}} = 14,4...18$ МДж) не відповідає вимогам [11–13], хоча є допустимим за критерієм структурного стану металу в зоні з'єднання при дослідженні мікроструктури [17]. При КСЗО на режимі 2 забезпечуються нормативні вимоги до зварних стиків рейок класу 350*HV*₃₀ (К76Ф, R350НТ) за обома критеріями – структурного стану металу та показників механічних властивостей з'єднань при випробуваннях на згин.

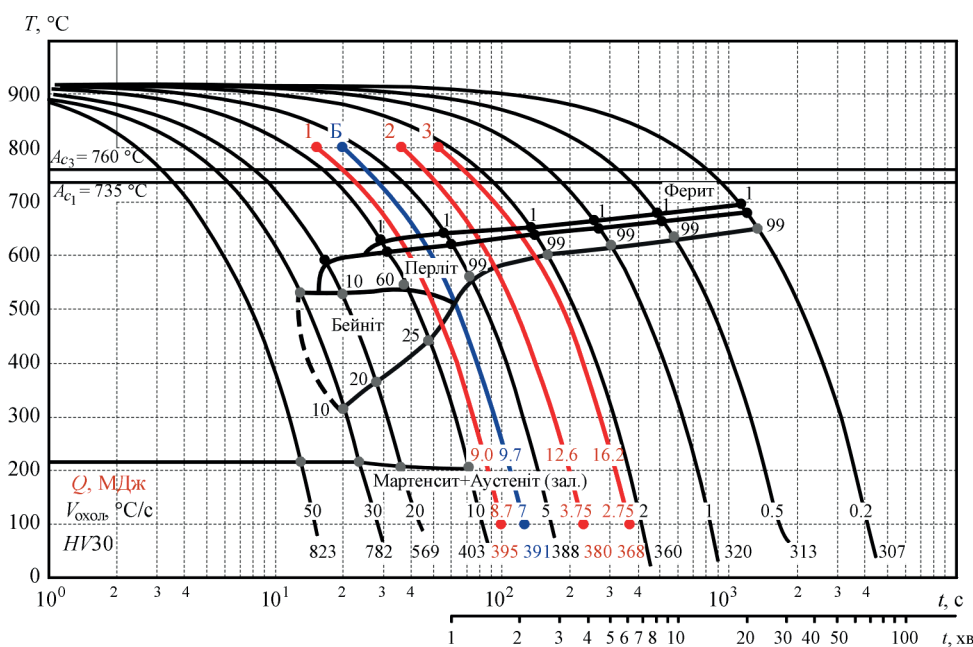


Рис. 12. CCT-діаграма сталі К76Ф [24] та розрахункові криві охолодження рейок, виконаних КСЗО з різною величиною енерговкладення $Q_{\text{опл}}$, МДж

Проводилися металографічні дослідження зварних з'єднань рейок марки К76Ф і R350НТ, отриманих при КСЗО на режимі 2. Макрошліф, мікроструктура, РЕМ-зображення металу в зоні з'єднання та розподіл твердості зварних стиків рейок марки R350НТ наведено на рис. 14. У межах ЗТВ спостерігається зниження твердості до 280 НВ30, що обумовлено процесом сфероїдизації цементиту в зоні неповної перекристалізації. Це є характерним для зварних з'єднань термічнозміцнених рейок зі сталей евтектоїдного класу [26–30]. Протяжність таких ділянок з обох боків від лінії з'єднання не перевищує 4 мм, загальна ширина ЗТВ становить 24...29 мм, що відповідає вимогам [17].

За результатами розрахунків та експериментальних досліджень термічних циклів при КСЗО, макроаналізу, металографічних досліджень, механічних випробувань зварних з'єднань рейок визначено спільний діапазон зміни $Q_{опл}$ при КСЗО термічнозміцнених рейок марок К76Ф, R350НТ, в якому забезпечуються формування якісних з'єднань, які задовольняють вимоги чинних нормативних документів для зварних стиків рейок, а саме: величина енерговкладення при оплавленні повина становити $Q_{опл} = 11,88...14,0$ МДж. Варіювання величини енерговкладення $Q_{опл}$ у визначених межах забезпечує задану швидкість охолодження зварних стиків рейок в інтервалі температур перетворення аустеніту та обумовлює утворення в зоні з'єднання високодисперсного пластинчастого перліту без структурних складових мартенситу й бейніту.

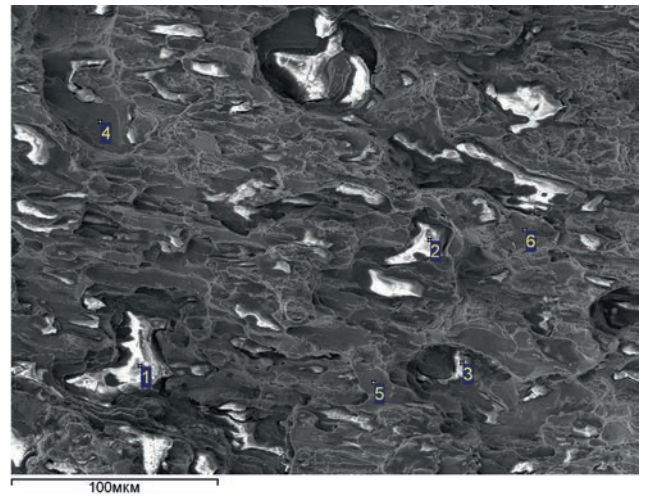
Визначений діапазон оптимальних значень $Q_{опл}$ використано при розробці та відпрацюванні технологічних режимів КСЗО рейок різних марок (R350НТ, R350ЛНТ, М76, Е76, Е76Ф, К76, К76Ф) і виробників на всіх рейкозварювальних підприємствах АТ «Укрзалізниця». На основі результа-

Таблиця 3. Результати випробувань зварних стиків рейок Р65 марки К76Ф

Номер режиму	Руйнівне навантаження, кН	Стріла прогину, мм
Вимоги [13]	≥ 1650	≥ 30
Режим 1	$\frac{1950...2250}{1950}$	$\frac{27...32}{28}$
Режим 2	$\frac{2000...2300}{2150}$	$\frac{35...45}{38}$
Режим 3	$\frac{1800...2000}{1900}$	$\frac{25...34}{29}$

Таблиця 4. Результати випробувань зварних стиків рейок 60Е1 марки R350НТ

Режим КСЗО	Руйнівне навантаження, кН	Стріла прогину, мм
Вимоги [13]	≥ 1650	≥ 30
Режим 1	$\frac{1900...2100}{1900}$	$\frac{27...31}{28}$
Режим 2	$\frac{2100...2350}{2200}$	$\frac{34...41}{37}$



Спектр	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe
1	1.51	46.66	0.00	22.15	0.00	24.77	4.90
2	20.02	43.54	0.23	15.99	0.11	17.14	2.96
3	1.50	37.53	0.06	20.94	0.08	33.93	5.73
4	1.83	0.54	0.00	0.40	0.00	0.76	96.47
5	2.12	1.49	0.08	0.46	0.06	1.65	94.13
6	0.87	0.52	0.00	0.27	0.00	0.08	98.26

Рис. 13. РЕМ-зображення та результати МРСА матової плями у зламі з'єднань рейок К76Ф при КСЗО, режим 1

тів досліджень удосконалено технологію КСЗО термічнозміцнених залізничних рейок [31], розроблено блок вимірювальних перетворювачів [32] і алгоритм керування процесом КСЗО з керованим режимом охолодження зварних стиків [33], який адаптовано до існуючих програм системи керування рейкозварювальних машин К922-1 і К1000. За рахунок дозованого енерговкладення в процесі оплавлення при КСЗО реалізовано можливість керованого охолодження зварних стиків рейок для гарантування їх відповідності вимогам чинних стандартів щодо показників твердості та структурного стану металу зони з'єднання (відсутність мартенситу й бейніту).

Описана вище методологія розрахунково-експериментальних досліджень була використана при визначенні допустимих діапазонів зміни технологічних параметрів процесу КСЗО елементів залізничних хрестовин. Заміна рейок М76 зі сталей мартенівського виробництва на термічнозміцнені рейки К76Ф і R350НТ із конверторної сталі вимагала вдосконалення технології КСЗО осердя хрестовини зі сталі 110Г13Л з рейковими закінченнями зі сталі К76Ф через перехідний елемент (ПЕ) із аустенітної хромонікелевої сталі 08Х18Н10Т. Проблеми, що є характерними для зварювання різномірних сталей, пов'язані зі структурною та хімічною неоднорідністю зони з'єднання, можливістю утворення крихкого проміжного прошарку змінного хімічного складу, зокрема ділянок з мартенситною структурою. Проблему вирішували шляхом застосування технології КСЗО пульсуючим оплавленням, яка забезпечує реалізацію зада-

них термічних циклів для запобігання утворенню крихких структурних складових у комбінованому з'єднанні сталей 110Г13Л, 08Х18Н10Т, К76Ф і для отримання регламентованої перлітної структури в ЗТВ рейкової сталі К76Ф [32].

За допомогою алгоритму чисельного вирішення тривимірного рівняння теплопровідності при початкових і граничних умовах, що відповідають реальним умовам зварювання зразків, отримано термічні цикли при КСЗО сталі К76Ф з ПЕ із аустенітної сталі 08Х18Н10Т (стик 1) та сталі 110Г13Л з ПЕ зі сталі 08Х18Н10Т (стик 2). Ви-

значено діапазони зміни основних технологічних параметрів процесу КСЗО, при яких у процесі оплавлення рейок зі сталей К76Ф, 110Г13Л та 08Х18Н10Т забезпечується їх рівномірне нагрівання по перерізу та довжині, достатнє для виконання деформації на задану величину при осадці.

За розрахунковими та експериментальними даними оцінювали вплив термічного циклу КСЗО другого стика на структурну стабільність металу в ЗТВ першого стика. Встановлено, що відсутність крихких карбідів хрому в ЗТВ обох стиків комбінованого з'єднання забезпечується за рахунок реа-

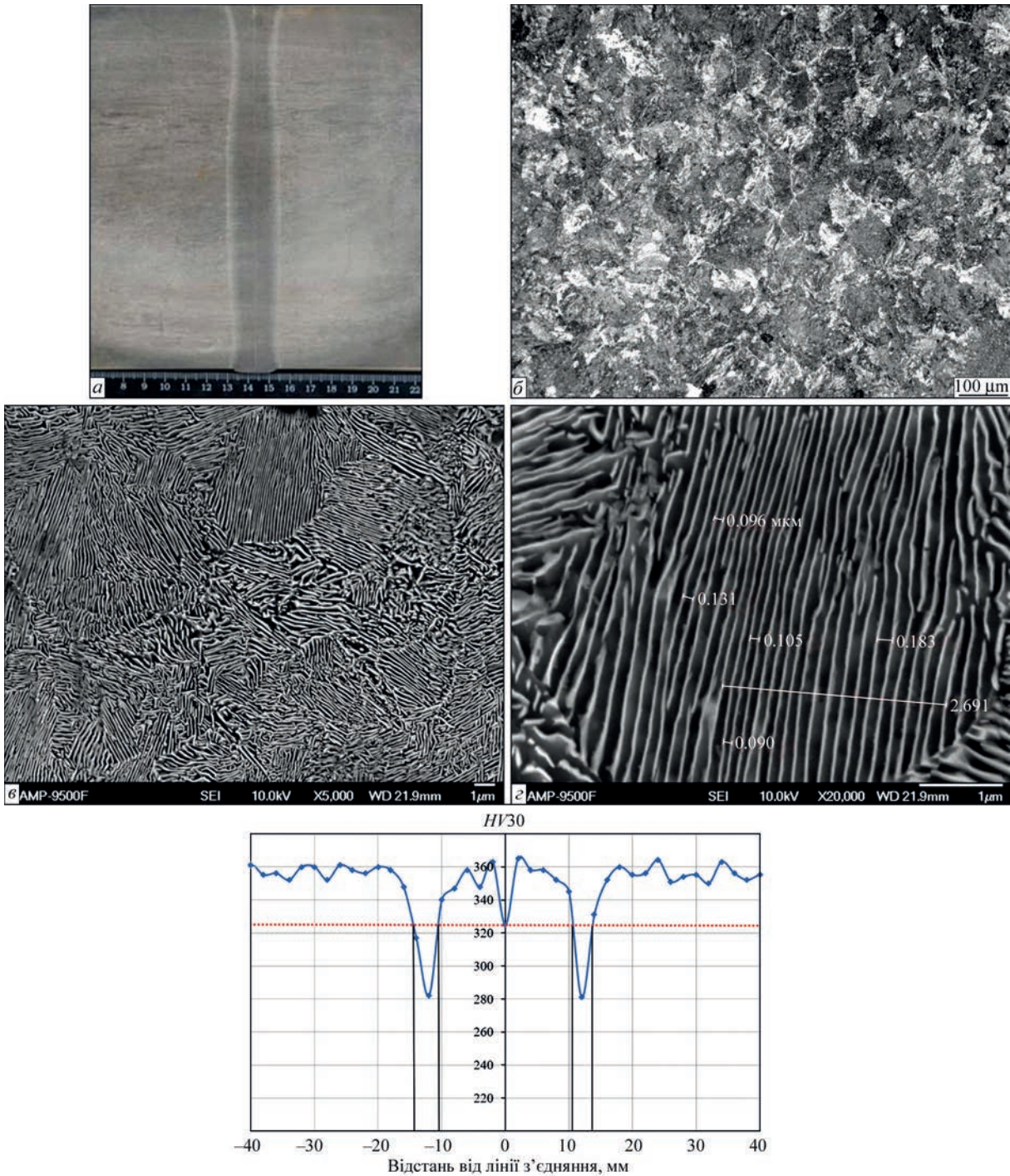


Рис. 14. Макрошліф (а), мікроструктура $\times 100$ (б), РЕМ-зображення $\times 5000$ (в) та $\times 20000$ (г) і розподіл твердості в з'єднанні рейки R350HT при КСЗО (д), режим 2

лізації заданих температурно-часових умов КСЗО пульсуючим оплавленням, при яких не відбувається суттєвої дифузії вуглецю в зоні з'єднання сталей К76Ф і 08Х18Н10Т при умові оптимізації ширини ПЕ зі сталі 08Х18Н10Т.

Оцінювали можливі структурні зміни в металі першого стику з боку сталі К76Ф при ширині ПЕ $h_{\text{ПЕ}} = 10$ мм на різній відстані L від лінії з'єднання (ЛЗ) сталей К76Ф + 08Х18Н10Т: $L = 0, 5, 10, 15$ мм [33]. Зокрема встановлено, що термічний цикл КСЗО другого стику при заданій величині енерговкладення $Q_{\text{опл}}$ може призводити до нагрівання сталі К76Ф у зоні з'єднання першого стику до температури нижче або вище ніж температури структурних перетворень $T(Ac_1) = 735$ °С, $T(Ac_2) = 760$ °С (рис. 15) у залежності від ширини ПЕ зі сталі 08Х18Н10Т.

Для заданого режиму КСЗО другого стику визначали мінімальну ширину ПЕ зі сталі 08Х18Н10Т, при якій не відбувається нагрів стику 1 до температур $T > T(Ac_1)$, і унеможлижуються негативні структурні перетворення в стику 1. Зокрема встановлено, що для режиму КСЗО другого стику з величиною енерговкладення $Q_{\text{опл}} = 14,4$ МДж при ширині ПЕ $h_{\text{ПЕ}} \geq 21$ мм відбувається нагрів першого стику до температури, нижче за $T(Ac_1) = 735$ °С, що потенційно не призводить до утворення гартівних структур у з'єднанні сталей К76Ф + 08Х18Н10Т, а режим нагріву відповідає короткочасному «відпуску» для сталі К76Ф [33].

При використанні удосконаленої технології КСЗО забезпечується отримання перлітної структури заданої дисперсності (сорбітно-трооститної) у стику 1 з боку рейкової сталі К76Ф; зварні залізничні хрестовини відповідають нормативним вимогам [34].

Удосконалення системи забезпечення якості з'єднань при КСЗО залізничних рейок. У відділі «Стикове зварювання» ІЕЗ розроблені, впроваджені у виробництво та протягом багатьох років успішно використовуються комп'ютеризовані системи контролю якості з'єднань при різних способах зварювання тиском. Для КСЗО залізничних рейок розроблена трирівнева система забезпечення якості зварних стиків, яка передбачає:

- рівень 1 – розробку ефективної технології та затвердження режимів КСЗО для конкретних типів і марок залізничних рейок відповідно до вимог чинних нормативних документів;
- рівень 2 – виконання операційного контролю основних параметрів процесу КСЗО в реальних виробничих умовах, порівняння із встановленими допустимими межами їх відхилень, видача рапорту (протоколів) про відповідність зварних стиків встановленим вимогам;

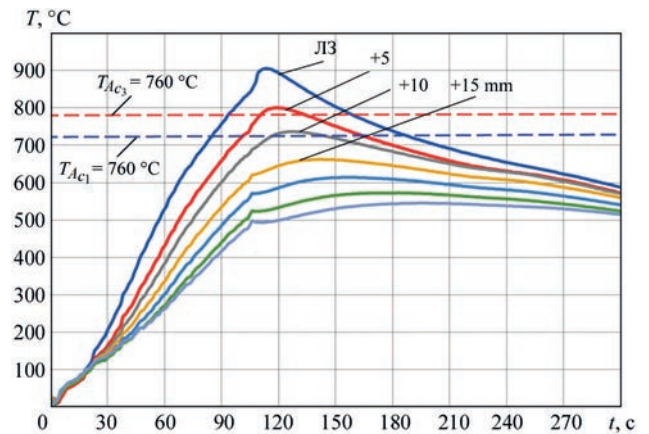


Рис. 15. Термічні цикли в першому стикі з боку сталі К76Ф при КСЗО другого стику при ширині $h_{\text{ПЕ}} = 10$ мм (експериментальні дані)

- рівень 3 – статистичний аналіз протоколів КСЗО залізничних рейок, які було виконано на всіх РЗП і переданих до діагностичного центру АТ «Укрзалізниця».

Реалізація рівня 1 системи забезпечення якості здійснюється на основі вимог до зварних з'єднань залізничних рейок, передбачених [11–13, 17]. При розробці технології та режимів КСЗО для наявних типу та марки залізничних рейок, а також конкретного рейкозварювального комплексу, фахівці відділу «Стикове зварювання» використовують результати руйнівного та неруйнівного контролю, металографічних досліджень і механічних випробувань зварних стиків, які виконуються у випробувальній лабораторії ІЕЗ, акредитованій відповідно до вимог ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019.

З метою реалізації рівня 2 забезпечення якості, тобто для стабільного відтворення процесу зварювання рейок, контролю основних його параметрів, розроблено комп'ютеризовану систему контролю та керування процесом КСЗО, яка дозволяє в реальних виробничих умовах підтримувати оптимальний режим оплавлення, значною мірою незалежно від умов експлуатації. Система складається з промислового комп'ютера, контролера та відповідних датчиків. При зварюванні кожного стику може проводитися самонастроювання технологічних параметрів, що забезпечує оптимізацію програм їхньої зміни на всіх етапах оплавлення й у цілому за період зварювання. Комп'ютеризована система контролю реєструє основні параметри процесу КСЗО, визначає їх допустимі відхилення від заданих величин і відповідно до встановлених алгоритмів видає оцінку якості з'єднань відразу після виконання зварювання [35].

Статистичний аналіз протоколів зварювання залізничних рейок (рівень 3), забезпечує своєчасне виявлення систематичних відхилень основних параметрів КСЗО, оптимізацію процесу та можливість діагностики діючого рейкозварювального

устаткування. Результати обчислень подаються у вигляді таблиць, діаграм і гістограм та наочно відтворюють перебіг зварювального процесу, а також його залежність від конкретної рейкозварювальної машини, режимів КСЗО, марки рейок. Статистичний аналіз протоколів КСЗО залізничних рейок успішно реалізовано спільно з АТ «Укрзалізниця».

У 2024–2025 рр. налагоджено проведення дистанційного моніторингу за дотриманням технології КСЗО всіх зварних стиків рейок за електронними рапортами зварювання, які надсилаються до Діагностичного центру АТ «Укрзалізниця» з кожної рейкозварювальної машини, оснащеної комп'ютеризованою системою контролю якості.

Підготовка рекомендацій та внесення змін до чинних нормативних документів, розробка нової редакції технічних умов на КСЗО залізничних рейок. У 2024 р. за результатами виконання науково-дослідних робіт і договорів фахівцями ІЕЗ розроблено рекомендації стосовно внесення змін і доповнень до чинних технічних умов зі зварювання залізничних рейок [11–13], які повністю враховані у новій редакції нормативних документів [36, 37]. Оцінку результатів спільних робіт викладено в листі директора Філії ЦБРК АТ «Укрзалізниця», де зазначено, що: «за результатами виконання договорів суттєво покращено технічний стан рейкозварювальних машин для забезпечення безпеки руху поїздів та сталої роботи залізничної інфраструктури в умовах воєнного стану».

Удосконалення конструкції машин для КСЗО, відновлення виробництва рейкозварювальних комплексів. Надзвичайно актуальною для задоволення потреб АТ «Укрзалізниця» та інших партнерів є проблема відновлення виробництва рейкозварювальних машин, розроблених в ІЕЗ. Успішне вирішення цієї проблеми нерозривно пов'язане з удосконаленням конструкції мобільних і стаціонарних машин для КСЗО рейок під технічні вимоги кінцевого замовника та виробничі можливості компаній-виробників устаткування.

У 2023 р. чеська компанія SaZ s.r.o. у тісній співпраці з ІЕЗ налагодила серійне виготовлення дводорожніх рейкозварювальних комплексів WELDERLINER (рис. 16), оснащених мобільними машинами K922-1, які реалізують технологію КСЗО пульсуючим оплавленням. Цій події передувало суттєве доопрацювання конструкторської документації машини K922-1 під технічні вимоги виробника, конструкторський і технологічний супровід виробництва рейкозварювальних машин, який виконували фахівці ІЕЗ.

Комплекси WELDERLINER успішно пройшли всебічні випробування, передбачені європейським стандартом EN 14587-2:2009 на КСЗО рейок. Мобільна машина K922-1, яка є оригінальною роз-

робкою ІЕЗ, оснащується сучасною комп'ютеризованою системою багатофакторного контролю параметрів зварювання, швидкодіючими гідроприводами, а також пристроєм для видалення ґрату в гарячому стані без розтискання звареної ділянки рейок для охолодження зварного стика до заданої температури.

У 2024 р. ІЕЗ розробив конструкторську документацією для компанії RW Equipment & Consulting LLC (США) на мобільну рейкозварювальну машину RW1060, яка є удосконаленим варіантом машини K1045 для КСЗО залізничних рейок у важкодоступних локаціях. Партію машин типу K1045 ДП «Інженерний центр зварювання тиском» (ІЦЗТ) НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона» раніше виготовляв на замовлення компанії Progress Rail Services (США). У машині RW1060 удосконалено конструкцію струмоміпідвідного контуру, що забезпечує суттєві переваги при експлуатації устаткування в тунелях метро, при зварюванні залізничних хрестовин з рейками в залізничній колії. При виготовленні зварювальної головки RW1060 (рис. 17) в ІЦЗТ фахівці відділу «Стикове зварювання» ІЕЗ здійснювали конструкторський супровід виробництва, при цьому оперативно вносились удосконалення, спрямовані на підвищення технологічності виготовлення вузлів і механізмів машини. Конструктивні рішення, реалізовані у машинах для КСЗО залізничних рейок у важкодоступних локаціях, запатентовані [38–41].

У 2024 р. започатковано співробітництво ІЕЗ з французькою компанією Yardway Railquip France SAS з метою надання послуг з підтримки технології і мобільного устаткування для КСЗО рейок. Планується, що успішний розвиток співпраці відкриє додаткові можливості для розширення використання розробок ІЕЗ за кордоном.

З метою відновлення виробництва стаціонарних рейкозварювальних машин K1000 для задоволення потреб АТ «Укрзалізниця» між ІЕЗ і вітчизняною компанією «Рейл Системс» укладено ліцензійний договір щодо надання права на використання конструкції, технології виготовлення та експлуатації машин для КСЗО у стаціонарних умовах. У 2024 р. вже є наявний успішний досвід з капітального ремонту машин K1000 на замовлення рейкозварювальних підприємств АТ «Укрзалізниця».

Продовжується багаторічна співпраця з Дніпровським стрілочним заводом щодо підтримки технологічного процесу виготовлення залізничних хрестовин, зокрема технології КСЗО осердя хрестовин із високосносостійкої сталі 110Г13Л з рейками зі сталей евтектоїдного класу через ПЕ із хромонікелевої сталі аустенітного класу. У 2023–2025 рр. ІЕЗ успішно виконує роботи з консультаційної підтримки технології КСЗО залізничних хрестовин, аудиту технічного стану машини



Рис. 16. Мобільна машина K922-1 (а), рейкозварювальний комплекс WELDERLINER (б, в) на комбінованому автомобільно-залізничному ходу



Рис. 17. Зварювальна головка машини RW1060 для КСЗО залізничних рейок у важкодоступних локаціях

K924M, виготовлення елементів зварювального контуру, розробки комплексу заходів з метою забезпечення заданих технічних характеристик машини K924M і продовження її експлуатаційного ресурсу.

Завдяки спільним зусиллям структурних підрозділів АТ «Укрзалізниця», ІЕЗ, вітчизняних і закордонних компаній-партнерів успішно долаються критичні виклики щодо забезпечення працездатності залізничної інфраструктури в умовах воєнного стану в Україні та розширення використання вітчизняних розробок за кордоном.

Висновки

1. Проаналізовано критичні виклики щодо забезпечення працездатності залізничної інфраструктури в умовах воєнного стану в Україні. Зупинка внаслідок окупації виробництва вітчизняних рейок комбінатом «Азовсталь» актуалізувала проблему зварювання старопридатних і нових рейок різних марок та заводів-виробників, з різними технологіями термозміцнення, зокрема у різноманітному поєднанні. Актуальним є вирішення проблеми подовження експлуатаційного ресурсу зварювального устаткування.

2. Для вирішення наявних проблем розроблено комплекс заходів щодо забезпечення якісного зва-

рювання рейок у стаціонарних і польових умовах при ремонті та спорудженні безстикових залізничних колій в Україні відповідно до вимог нормативних документів.

3. Реалізація у 2022–2025 рр. розробленого комплексу заходів дозволила вирішити низку проблем, пов'язаних із контактним стиковим зварюванням оплавленням (КСЗО) залізничних рейок:

- встановлено причини невідповідності зварних стиків рейок різних марок вимогам нормативних документів, розроблено рекомендації щодо недопущення виникнення дефектів і надійного виявлення можливих дефектів при неруйнівному контролю зварних стиків рейок;

- проведено аудит технічного стану наявного в АТ «Укрзалізниця» рейкозварювального устаткування та розроблено заходи для продовження його експлуатаційного ресурсу;

- удосконалено технологію та відпрацьовано технологічні режими КСЗО термічнозміцнених залізничних рейок конверторного виробництва;

- удосконалено системи забезпечення якості з'єднань при КСЗО залізничних рейок;

- удосконалено конструкції мобільних рейкозварювальних машин, відновлено виробництво устаткування для КСЗО рейок.

4. Завдяки спільним зусиллям ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, структурних підрозділів АТ «Укрзалізниця», вітчизняних і закордонних компаній-партнерів успішно долаються критичні виклики щодо забезпечення працездатності залізничної інфраструктури в умовах воєнного стану в Україні та розширення використання вітчизняних розробок за кордоном.

Список літератури

1. Патон Б.Е., Костюк М.Д., Кучук-Яценко С.И. и др. (2010) Инновационный кластер «Бархатный путь» и научно-технический прорыв Украины на мировой рынок строительства скоростных железных дорог. *Наука та інновації*, 6(2), 69–86. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin6.02.069>
2. Solano-Alvarez, W., Bhadeshia, H.K.D.H. (2024) *Steels for rails Progress in Materials Science*, 146(12). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101313>
3. Ziakhor, I.V., Antipin, E.V., Didkovsky, O.V. et al. (2023) Modern technologies of welding railway rails (Review). *The Paton Welding J.*, 8, 4–16. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.08.01>
4. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2018) Technologies and equipment for flash-butt welding of rails: 60 years of continuous innovations. *The Paton Welding J.*, 11–12, 25–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.03>
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2019) 60 Years of the first in the world mobile machine for flash-butt welding of rails in the field conditions. *The Paton Welding J.*, 3, 2–5. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.03>
6. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, A.V., Shvets, V.I. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails of nowadays production. *The Paton Welding J.*, 5–6, 4–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.01>
7. Rudenko, P.M., Gavrish, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I. et al. (2017) Influence of flash butt welding process parameters on

strength characteristics of railway rail butts. *The Paton Welding J.*, 5–6, 75–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.14>

8. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2018) Mathematical modeling of metal heating process in continuous flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, 10, 2–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.10.01>
9. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. (2016) Statistical control of process of flash-butt welding of rails. Two-level control system. *The Paton Welding J.*, 5–6, 13–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.02>
10. Кучук-Яценко С.И., Руденко П.М., Гавриш В.С. та ін. (2019) Система керування процесом контактного зварювання оплавленням рейок у стаціонарних і польових умовах для підвищення ресурсу та надійності залізничних колій. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 41–50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2019.02.07>
11. ТУ УЗ 24.1-40075815-085:2019. *Рейки звичайні старопритатні. Ремонт і зварювання. Технічні умови.*
12. ТУ УЗ 24.1-40075815-109:2020. *Рейки залізничні. Зварювання стиків рейок контактним способом на підприємствах та в колії. Технічні умови.*
13. ТУ УЗ 24.1-40075815-002:2021. *Рейки нові зварені для залізниць. Технічні умови.*
14. ДСТУ 4344:2004. *Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні вимоги.* Український науково-дослідний інститут металів «УкрНДІМет», Київ, Держспоживстандарт України.
15. ДСТУ EN 13674-1:2018 (EN 13674-1:2011:2005, IDT). *Залізничний транспорт – Колія – Рейки. Частина 1. Залізничні рейки Вігноле 46 кг/м та вище.* ДП «УкрНДНЦ», Київ, Держспоживстандарт України.
16. BS EN 13674-1:2011+A1:2017. *Railway applications – Track – Rail. Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above.* European Committee for Standardization.
17. ДСТУ EN 14587-2:2015 (EN 14587-2:2009, IDT). *Залізничний транспорт. Колія. Стикове зварювання рейок. Частина 2. Нові класи рейок R220, R260, R260Mn та R350HT із рухомих зварювальних механізмом порівняно зі стаціонарним механізмом.* ДП «УкрНДНЦ».
18. Задорожнюк О.М., Капитанчук Л.М., Смиян О.Д., Буткова Е.И. (2013) Новые возможности для проведения металлургических исследований основного металла и сварных соединений. *Современная электрометаллургия*, 2, 36–40. <https://patonpublishinghouse.com/sem/pdf/2013/pdfarticles/02/9.pdf>
19. Рибкін В.В. та ін. (2013) *Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень рейок на залізницях України.* ЦП-0285. Київ, Видавництво ТОВ «Інпрес».
20. ДСТУ 3715-1998. *Метали. Види поверхонь руйнування (зломів).* Інститут проблем лиття НАН України, Київ, Держстандарт України.
21. ДСТУ EN ISO 6520:2015. (EN ISO 6520-1:2007, IDT; ISO 6520-1:2007, IDT) *Зварювання та споріднені процеси. Класифікація геометричних дефектів у металевих матеріалах. Частина 2. Зварювання тиском.*
22. ДСТУ 7175:2010. *Метали та сплави. Методи металографічного контролювання Терміни та визначення понять.* Київ, Держспоживстандарт України.
23. Shvets, V.I., Ziakhor, I.V., Kapitanchuk, L.M. (2023) Features of formation and transformation of oxides in flash-butt welding of K76F rails. *The Paton Welding J.*, 7, 16–24 DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.07.02>
24. Бабаченко О., Кононенко Г., Хулін А. (2018) Дослідження кінетики розпаду аустеніту при безперервному охолодженні сталі К76Ф для рейок звичайних для залізниць широкої колії. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. Сборник научных трудов ИЧМ*, 32, 317–327.
25. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Shvets, V.I., Didkovsky, A.V. et al. (2013) Defects of joints of high-strength rails produced using flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, 9, 2–8.
26. Mousavizade, M., Farhangi, H. (2010) Characterization of surface defects associated with flash butt-welded pearlitic rails and their contribution to overload and fatigue failures. *Advanced Materials Research*, 83–86, 1262–1269. DOI: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.1262>
27. Porcaro, R.R., Faria, G.L., Godefroid, L.B. et al. (2019) Microstructure and mechanical properties of a flash butt welded pearlitic rail. *J. Mater. Process. Tech.*, 270, 20–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.013>

28. Micenko, P., Muruganant, M., Li Huijun, Xu Xiaofeng (2013) *Double dip hardness profiles in rail weld heat-affected zone – literature and research review report*. CRC Project Report, R3.121, Brisbane, Australia.
29. Weingrill, L., Krutzler, J., Enzinger, N. (2016) Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails. *Materials Science Forum*, **879**, 2088–2093. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088>
30. Micheletto, A., Cookson, J., Pang, Y. et al. (2020) The structural integrity of flash-butt welded premium rail steel – Evaluation of strength, microstructure and defects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: J. of Rail and Rapid Transit*, **235(8)**, 1006–1012. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409720973138>
31. Антипін С., Зяxor I., Дідковський О. та ін. (2023) Технологія контактного стикового зварювання оплавленням термічнозміцнених рейок. *Збірка тез доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» 25–26 травня 2023 р., Чернігів, Україна. Том 2*, сс. 91–92. <http://ir.stu.cn.ua/123456789/28253>
32. Kavunichenko, O.V., Ziakhor, I.V., Shylo, Yu.A. et al. (2024) Thermal cycles and microstructure of the flash butt welded joints of 110G13L and K76F steel rails through 08Xh18N10T steel insert. *The Paton Welding J.*, **3**, 9–14. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.03.02>
33. Шило Ю.А., Зяxor I.B., Кавуніченко О.В. та ін. (2025) Термічні цикли при контактному стиковому зварюванні оплавленням залізничних хрестовин. *Збірка тез XV міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» 22–23 травня 2025 р., Чернігів, Україна, Том 2*, с. 89. https://drive.google.com/file/d/1LZk8Ezf_00sYSOPtmLeR8y3PuVnIJeys/view
34. EN14587-3:2012. *Railway applications – Track – Rail. Part 3: Welding in association with crossing construction*. European Committee for Standardization
35. Kuchuk-Yatsenko, S., Rudenko, P., Gavrish, V. et al. (2020) Operational control as a means of the evaluation of quality of welded connections for flash-butt welding of modern high-strength steels. *Science and Innovation*, **16**, 72–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/scin16.02.072>
36. ТУ УЗ 24.1-40075815-002:2024. *Рейки нові зварені для залізниць. Технічні умови*. Філія «НДКП залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», дата набуття чинності 10.05.2025.
37. ТУ УЗ 24.1-40075815-139:2025. *Рейки старопридатні. Ремонт та зварювання стиків в колії та поза межами колії. Технічні умови*. Філія «НДКП залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», дата набуття чинності 10.05.2025.
38. Зяxor I.B., Коваль М.І., Дідковський О.В. та ін. (2022) *Машина для контактного стикового зварювання рейок*. Патент України на корисну модель №151797, опубл. 14.09.2022, бюл. № 37. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1705612/>
39. Зяxor I.B., Коваль М.І., Дідковський О.В. та ін. (2024) *Машина для контактного стикового зварювання рейок*. Патент України на винахід №128177, опубл. 24.04.2024, бюл. № 17. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1796632/>
40. Зяxor I.B., Коваль М.І., Дідковський О.В. та ін. (2024) *Машина для контактного стикового зварювання рейок*. Патент України на корисну модель №156326, опубл. 05.06.2024, бюл. № 23. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1803859/>
41. Зяxor I.B., Коваль М.І., Дідковський О.В. та ін. (2024) *Машина для контактного стикового зварювання рейок*. Патент на корисну модель № 157480, опубл. 23.10.2024, бюл. №43. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1824287>
- Paton Welding J.*, **8**, 4–16. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.08.01>
4. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2018) Technologies and equipment for flash-butt welding of rails: 60 years of continuous innovations. *The Paton Welding J.*, **11–12**, 25–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.03>
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2019) 60 years of the first in the world mobile machine for flash-butt welding of rails in the field conditions. *The Paton Welding J.*, **3**, 2–5. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.03>
6. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, A.V., Shvets, V.I. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails of nowadays production. *The Paton Welding J.*, **5–6**, 4–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.01>
7. Rudenko, P.M., Gavrish, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I. et al. (2017) Influence of flash-butt welding process parameters on strength characteristics of railway rail butts. *The Paton Welding J.*, **5–6**, 75–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.14>
8. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2018) Mathematical modeling of metal heating process in continuous flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, **10**, 2–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.10.01>
9. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. (2016) Statistical control of process of flash-butt welding of rails. Two-level control system. *The Paton Welding J.*, **5–6**, 13–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.02>
10. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. et al. (2019) System of controlling the process of flash-butt welding of rails under stationary and field conditions to extend the service life and reliability of railway tracks. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 41–50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2019.02.07>
11. TU UZ 24.1-40075815-085:2019: *Ordinary used rails. Repair and welding. Specifications* [in Ukrainian].
12. TU UZ 24.1-40075815-109:2020: *Railway rails. Welding of rail butt joints by contact method at enterprises and on the track. Specifications* [in Ukrainian].
13. TU UZ 24.1-40075815-002:2021: *New welded rails for railways. Specifications* [in Ukrainian].
14. DSTU 4344:2004: *Ordinary rails for broad gauge railways. General technical requirements*. Ukrainian Research Institute of Metals UkrNDIMet. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
15. DSTU EN 13674-1:2018 (EN 13674-1:2011:2005, IDT): *Railway transport – Track – Rails. Pt 1: Railway rails Vignole 46 kg/m and above*. Kyiv, SE UkrNDNTs.
16. BS EN 13674-1:2011+A1:2017: *Railway applications – Track – Rail. Pt 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above*. European Committee for Standardization.
17. DSTU EN 14587-2:2015 (EN 14587-2:2009, IDT): *Railway transport. Track. Butt welding of rails. Pt 2. New rail classes R220, R260, R260Mn and R350HT with a mobile welding mechanism compared to a stationary mechanism*. Kyiv, SE UkrNDNTs [in Ukrainian].
18. Zadorozhnyuk, O.M., Kapitanchuk, L.M., Smiyan, O.D., Butkova, E.I. (2013) New possibilities to carry out metals science investigations of base metal and welded joints. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 36–40 [in Russian]. DOI: <https://patonpublishinghouse.com/rus/journals/sem/2013/02/08>
19. Rybkin, V.V. et al. (2013) *Classification and catalog of defects and damage of rails in railways of Ukraine*. TsP-0285. Kyiv, Inpres [in Ukrainian].
20. DSTU 3715–1998: *Metals. Types of fracture surfaces (ruptures)*. Institute of Casting Problems of the NASU. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
21. DSTU EN ISO 6520:2015 (EN ISO 6520-1:2007, IDT; ISO 6520-1:2007, IDT) *Welding and allied processes. Classification of geometric imperfections in metallic materials. Pt 2. Pressure welding* [in Ukrainian].
22. DSTU 7175:2010: *Metals and alloys. Methods of metallographic testing. Terms and definitions of concepts*. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
23. Shvets, V.I., Ziakhor, I.V., Kapitanchuk, L.M. (2023) Features of formation and transformation of oxides in flash-

- butt welding of K76F rails. *The Paton Welding J.*, **7**, 16–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.07>
24. Babachenko, O., Kononenko, G., Khulin, A. (2018) Investigation of austenite decomposition kinetics in continuous cooling of K76F steel for ordinary rails of broad gauge railways. Fundamental and Applied Problem of Ferrous Metallurgy. *Sbornik IChM*, **32**, 317–327 [in Ukrainian].
 25. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Shvets, V.I., Didkovsky, A.V. et al. (2013) Defects of joints of high-strength rails produced using flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 2–8.
 26. Mousavizade, M., Farhangi, H. (2010) Characterization of surface defects associated with flash-butt welded pearlitic rails and their contribution to overload and fatigue failures. *Adv. Materials Research*, **83–86**, 1262–1269. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.1262>
 27. Porcaro, R.R., Faria, G.L., Godefroid, L.B. et al. (2019) Microstructure and mechanical properties of a flash butt welded pearlitic rail. *J. Mater. Process. Tech.*, **270**, 20–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.013>
 28. Micenko, P., Muruganant, M., Huijun, Li, Xu Xiaofeng (2013) *Double dip hardness profiles in rail weld heat-affected zone — Literature and research review report*. CRC Project Report, R3.121, Brisbane, Australia.
 29. Weingrill, L., Krutzler, J., Enzinger, N. (2016) Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails. *Mater. Sci. Forum*, **879**, 2088–2093. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088>
 30. Micheletto, A., Cookson, J., Pang, Y. et al. (2020) The structural integrity of flash-butt welded premium rail steel — Evaluation of strength, microstructure and defects. Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Pt F. *J. of Rail and Rapid Transit*, **235(8)**, 1006–1012. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409720973138>
 31. Antipin, Ie., Ziakhor, I., Didkovsky, O. et al. (2023) Technology of flash butt welding of heat-strengthened rails. In: *Abstr. of Papers of 13th Inter. Sci.-Pract. Conf. on Complex Assurance of Quality of Technological Processes and Systems. 25–26 May 2023, Chernihiv, Ukraine*, Vol. 2, 91–92 [in Ukrainian]. <http://ir.stu.cn.ua/123456789/28253>
 32. Kavunichenko, O.V., Ziakhor, I.V., Shylo, Yu.A. et al. (2024) Thermal cycles and microstructure of the flash butt welded joints of 110G13L and K76F steel rails through 08Xh18N10T steel insert. *The Paton Welding J.*, **3**, 9–14. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.03.02>
 33. Shylo, Yu.A., Ziakhor, I.V., Kavunichenko, O.V. et al. (2025) Thermal cycles in contact flash butt welding of railway frogs. In: *Abstr. of Papers of 13th Inter. Sci.-Pract. Conf. on Complex Assurance of Quality of Technological Process and Systems. 22–23 May 2025, Chernihiv, Ukraine*, Vol. 2, 89 [in Ukrainian]. https://drive.google.com/file/d/1LZk8Ezf_0OsYSOPtmLeR8y3PuVnIJeys/view
 34. EN 14587-3:2012: *Railway applications – Track – Rail*. Pt 3: Welding in association with crossing construction. European Committee for Standardization.
 35. Kuchuk-Yatsenko, S., Rudenko, P., Gavrish, V. et al. (2020) Operational control as a means of the evaluation of quality of welded connections for flash-butt welding of modern high-strength steels, *Nauka ta Innovatsii*, **16**, 72–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/scin16.02.072>
 36. TU UZ 24.1-40075815-002:2024: *New welded rails for railways. Technical conditions*. Branch of NDKTI of Railway Transport, JSC Ukrzaliznytsia. Effective date 10.05.2025 [in Ukrainian].
 37. TU UZ 24.1-40075815-139:2025: *Old rails. Repair and welding of butt joints in the track and outside the track. Technical conditions*. Branch of NDKTI of Railway Transport, JSC Ukrzaliznytsia. Effective date 10.05.2025 [in Ukrainian].
 38. Ziakhor, I.V., Koval, M.Y., Didkovsky, O.V. et al. (2022) *Machine for resistance butt welding of rails*. Pat. of Ukraine on utility model, 151797, Publ. 14.09.2022 [in Ukrainian]. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1705612/>
 39. Ziakhor, I.V., Koval, M.Y., Didkovsky, O.V. et al. (2022) *Machine for resistance butt welding of rails*. Pat. of Ukraine on invention, 128177, Publ. 24.04.2024 [in Ukrainian]. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1796632/>
 40. Ziakhor, I.V., Koval, M.Y., Didkovsky, O.V. et al. (2024) *Machine for resistance butt welding of rails*. Pat. of Ukraine on utility model, 156326, Publ. 05.06.2024 [in Ukrainian]. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1803859/>
 41. Ziakhor, I.V., Koval, M.Y., Didkovsky, O.V. et al. (2024) *Machine for resistance butt welding of rails*. Pat. of Ukraine on utility model, 157480, Publ. 23.10.2024 [in Ukrainian]. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1824287/>

URGENT PROBLEMS OF WELDING RAILWAY RAILS UNDER MARTIAL LAW IN UKRAINE

I.V. Ziakhor¹, Ye.V. Antipin¹, O.V. Didkovskiy¹, A.M. Levchuk¹, V.V. Kalyuzhnyy², V.V. Ozyumenko², O.A. Velykoivanenko¹, P.M. Rudenko¹, Yu.A. Shylo¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: zyakhor2@ukr.net

²Branch «Center for Track Construction and Repair» of the JSC «Ukrainian Railways». 5B Zaliznychne Shosse, 01103, Kyiv, Ukraine

Rail joining in stationary and field conditions is mainly performed by flash butt welding (FBW), which has been successfully used for many years on the railways of Ukraine and abroad. The article analyzes the critical challenges for ensuring the operability of the railway infrastructure under martial law in Ukraine. To solve urgent problems, the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine (PWI) together with the Branch «Center for Track Construction and Repair» of the JSC «Ukrainian Railways» have developed a set of measures to ensure high-quality welding of rails in stationary and field conditions during the repair and construction of continuous welded rails in accordance with the requirements of acting regulatory documents. The results of works (research, technological, scientific and technical expertises) on the implementation of these measures for the period of 2022–2025 are presented. In particular, the technical condition of rail welding machines was successfully audited, the technology was improved and technological modes of FBW of railway rails were practiced, the system of quality assurance of joints during FBW of railway rails was improved, new revisions of regulatory documents for FBW of railway rails were prepared, the works are being conducted to update the design of FBW machines, cooperation with companies is developed to renew the production of rail welding equipment in Ukraine. 41 Ref., 4 Tabl., 17 Fig.

Keywords: railway rails, welded joint, flash butt welding, railroad frog

Отримано 20.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 28.07.2025

Прийнято 23.09.2025