

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК (Огляд)

І.В. Зяхор¹, Є.В. Антіпін¹, О.В. Дідковський¹, О.В. Кавуніченко¹, А.М. Левчук¹, Ю.А. Шило¹,
Yan Truska²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: zyakhor@paton.kiev.ua

²SaZ s.r.o. Company. Koupelní 3908/6, 69501 Hodonín, Czech Republic

Проаналізовано відомі способи зварювання залізничних рейок з точки зору їх ефективності, продуктивності й можливості забезпечення показників якості зварних рейок відповідно до вимог діючих стандартів. При оцінці ефективності різних способів зварювання брались до уваги технологічні особливості формування зварних стиків, показники механічних властивостей, макро- та мікроструктура з'єднань, імовірність утворення дефектів, продуктивність та можливість автоматизації процесу зварювання. Показано, що практичне застосування отримали способи зварювання – термітне, автоматичне електродугове, газопресове, електроконтактне. Різновидами останнього є контактне стикове зварювання (КСЗ) безперервним оплавленням, КСЗ з попереднім підігрівом опором і КСЗ пульсуючим оплавленням. Технологія КСЗ пульсуючим оплавленням дозволяє забезпечити оптимальні термічні цикли при зварюванні сталей з різним хімічним складом і властивостями та забезпечує регламентовану діючими стандартами якість з'єднань. Наукові, технологічні та конструкторські розробки Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ) реалізовано в серії стаціонарних і мобільних рейкозварювальних машин, якими комплектуються пересувні рейкозварювальні комплекси, успішно впроваджені у багатьох країнах світу. Бібліогр. 53, табл. 3, рис. 14.

Ключові слова: термітне, електродугове, газопресове, контактне стикове зварювання оплавленням рейок

Сучасний стан і умови експлуатації залізниць України, необхідність їхньої інтеграції в міжнародну систему транспортних коридорів, необхідність підвищення швидкостей руху, забезпечення міжнародних нормативів по плавності й безпеці руху – все це вимагає постійного розвитку та удосконалення всього залізничного комплексу. Першою чергою це стосується шляхового господарства, що є одним з найважливіших елементів залізниць. Від стану верхньої будови колії залежить швидкість і безпека руху поїздів, припустимі навантаження на осі вагонів і локомотивів [1]. Аналіз продуктивності вантажних і пасажирських перевезень на європейських залізницях показує, що підвищення їх ефективності досягається, головним чином, за рахунок технічного прогресу [2, 3].

Однією з науково-технічних проблем, яка вимагає постійного вирішення, є удосконалення технологій і устаткування для зварювання суцільнозварної безстикової колії [4] з рейкових сталей сучасного виробництва [5–7]. Безстикова колія є найбільш прогресивною конструкцією верхньої будови колії в умовах сучасної експлуатації залізниць. Основна її перевага – майже повна ліквідація стиків з механічним кріпленням, які є причиною додаткових ударних динамічних впливів коліс на рейки.

З'єднання рейок при виготовленні довгомірних рейкових плітей (200...800 м) у стаціонарних

умовах, а також у польових умовах при їхньому укладанні в колію виконується зварюванням [3, 4]. Експлуатаційні показники залізничних рейок та їх зварних стиків є важливою складовою довговічності залізниць і регламентуються чинними вітчизняними і міжнародними стандартами [8–11]. Провідні світові виробники залізничних рейок постійно удосконалюють рейкові сталі з метою збільшення показників твердості, опору крихкому руйнуванню, зносостійкості, зокрема у головці рейки [12–17].

Для зварювання рейок при будівництві та ремонті залізничних колій застосовуються способи зварювання плавленням [18–26] і тиском [3, 4, 27–35]. Способи зварювання плавленням почали використовувати з 1920-х років, зокрема при ремонті, а згодом і спорудженні залізничних колій. Практичне застосування отримали способи – термітне [18–20], електродугове (ручне штучними електродами, напівавтоматичне у середовищі захисних газів і порошковим дротом [21, 22], автоматичне електродугове ванним способом з використанням плавкого мундштука [23–26]). Серед способів зварювання тиском ефективними є газопресове [27–28], індукційне [29, 30], лінійним тертям [31–34], електроконтактне [3, 4, 35–39], різновидами останнього є контактне стикове зварювання (КСЗ) безперервним оплавленням, КСЗ з попереднім підігрівом опором і КСЗ пульсуючим оплавленням.

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>, Кавуніченко О.В. <https://orcid.org/0000-0002-5164-9796>, Левчук А.М. – <https://orcid.org/0000-0002-0361-7394>, Шило Ю.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6174-5925>

© І.В. Зяхор, Є.В. Антіпін, О.В. Дідковський, О.В. Кавуніченко, А.М. Левчук, Ю.А. Шило, Yan Truska, 2023

Проводились роботи по розробці та дослідженню технології електрошлакового зварювання рейок [40, 41], але інформації про широке практичне застосування цього способу в наявних публікаціях знайти не вдалось.

Мета огляду – проаналізувати відомі способи зварювання залізничних рейок з точки зору їх ефективності, продуктивності та можливості забезпечення показників якості зварних рейок відповідно до вимог діючих стандартів.

При оцінці ефективності різних способів зварювання залізничних рейок брали до уваги технологічні особливості формування зварних стиків, показники механічних властивостей, макро- та мікроструктуру з'єднань, імовірність утворення дефектів, придатність до контролю (прогнозування) якості стиків, продуктивність та можливість автоматизації процесу зварювання.

Оскільки практичного застосування при будівництві та ремонті залізничних колій набули термітне, електродугове, газопресове і електроконтактне зварювання, то огляд присвячено аналізу саме цих способів.

Термітне (алюмінотермітне) зварювання. Термітне зварювання (ТЗ) – спосіб, у процесі якого нагрівання та плавлення торців рейок здійснюють теплом хімічної реакції порошкоподібної термітної суміші, яка складається з окисленого заліза, металевого алюмінію як реагуючих складових, та легуючих складових. Склад термітної суміші задається таким, щоб склад металу шва наближався до складу рейкової сталі.

З метою уникнення можливих дефектів зварного шва, забезпечується надійна фіксація рейок [18]. Термітну суміш виливають в тигель, встановлений над формою, і реакція запускається піротехнічним реагентом. Реакція триває 15...30 с, в процесі ТЗ температура досягає 2000 °С або вище, утворюють-

ся розплавлена сталь та глиноземний шлак, які залишаються в розплавленому стані і розділяються в тиглі за рахунок різниці в питомій вазі. Отримана таким чином розплавлена сталь заливається між торцями рейок. Процес від випуску до затвердіння займає близько 4 хв. Загальний час виконання одного з'єднання рейок становить близько 30 хв. Устаткування для ТЗ включає пальник для попереднього підігріву, тигель, комплект прес-форми та гратознімач з гідравлічним приводом.

Як видно з фотографії макроструктури шва, звареного ТЗ (рис. 1), ширина литої зони становить до 75 мм, а ширина ЗТВ – приблизно 20 мм по обидва боки шва [19]. Значення твердості металу шва та ЗТВ при ТЗ термічнозміцнених рейок суттєво менші у порівнянні з показниками основного металу. Для зменшення градієнта твердості (рис. 2) при ТЗ високоміцних рейок іноді застосовують термічну обробку – повторний нагрів зварного шва до аустенітної області та прискорене охолодження стисненим повітрям.

Структура металу шва характеризується величиною зерна № 1, властивого перегрітій сталі. Формування дефектних структур з великою величиною зерна сприяє втраті пластичності сталі [20]. Присутність у шві неметалічних включень типу сульфідів марганцю може суттєво впливати на формування дефектів, які значно знижують показники пластичності та міцності зварних стиків при циклічних навантаженнях.

При ТЗ довжина рейки під час зварювання не змінюється, тому цей метод успішно використовується у польових умовах для завершального етапу встановлення рейок. Якість зварювання залежить, головним чином, від дотримання умов підготовчих робіт та якості термітної суміші, що обумовлює низьку придатність ТЗ до автоматизованого контролю та прогнозування якості звар-

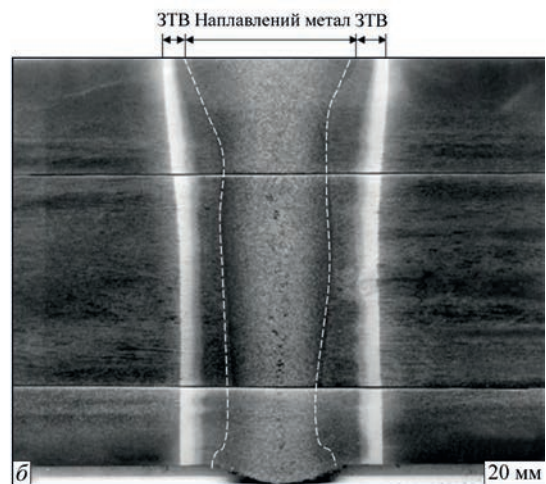


Рис. 1. Послідовність технологічних операцій при ТЗ (а) [19], макроструктура шва (б) [23]

них швів. Необхідний рівень твердості металу з'єднання залежить від марки рейки і може контролюватися кількістю легуючих елементів [20]. Незважаючи на порівняно низьку продуктивність, неможливість автоматизації процесу, технологія ТЗ завдяки високій мобільності та універсальності понад сто років застосовується для з'єднання рейок різного призначення (на трамвайних і залізничних коліях), а також для приварки хрестовин стрілочних переводів [18, 19, 23, 37].

Електродугове зварювання (ЕДЗ). Найбільш простий різновид – ручне ванне ЕДЗ покритими електродами застосовується в основному для з'єднання трамвайних і кранових рейок [21]. Однак цей спосіб не забезпечує задовільної якості з'єднань залізничних рейок, залежить від кваліфікації зварювальника і значно поступається за продуктивністю іншим способам зварювання. Більш високу продуктивність має напівавтоматичне ванне ЕДЗ, яке, зокрема, використовували при ремонті залізничних колій метрополітену [21]. Для запобігання утворенню тріщин у зоні зварного з'єднання проводили попередній підігрів до температури 300...350 °С. У роботі [22] описується досвід використання ЕДЗ закритою дугою з використанням високовуглецевих електродів для з'єднання рейок із високоміцних сталей, при цьому технологічний цикл зварювання передбачав попередній підігрів і післязварювальну термічну обробку. Більш висока

продуктивність досягалась при автоматичному зварюванні плавленням з використанням комбінації технологій ЕДЗ плавким електродом у захисному газі (для підосви рейок) та електрошлакового зварювання у вузький зазор [22].

Є досвід успішного застосування ЕДЗ при будівництві швидкісної залізничної лінії в Японії, де завдяки удосконаленню технології та зварювальних матеріалів, а також застосування спеціальної термічної обробки вдалося значно поліпшити якість зварних з'єднань [23]. Процес ЕДЗ рейок включає накладання кореневого валика з наскрізним проплавленням, багатопрохідне зварювання підосви, безперервне зварювання від шийки до головки та багатопрохідне зварювання головки рейок. Зварювальний дріт класу 800...1100 МПа використовуються для стандартних рейок із вуглецевої сталі. Оскільки вміст вуглецю у дроті низький, метал зварного шва має бейнітну структуру. Щоб покращити зносостійкість та стійкість до стирання металу шва високоміцних рейок, використовували високовуглецевий зварювальний дріт для отримання перлітної структури металу шва [23]. Продуктивність зварювання (один стик за 60...75 хв) навіть за умови використання сучасного обладнання знаходиться на низькому рівні.

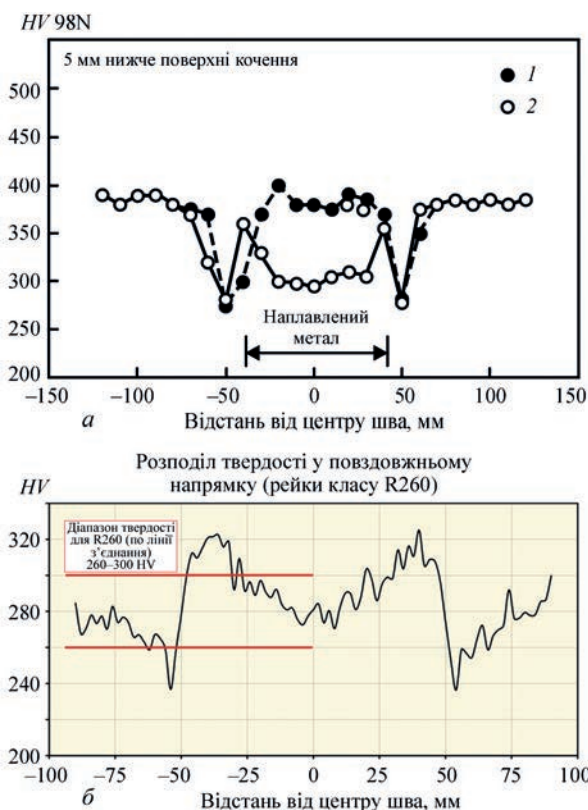


Рис. 2. Розподіл твердості в з'єднанні рейок класу міцності R350HT (а) [23] і R260 (б) [37]: 1 – після повторного нагріву і прискореного охолодження; 2 – після зварювання

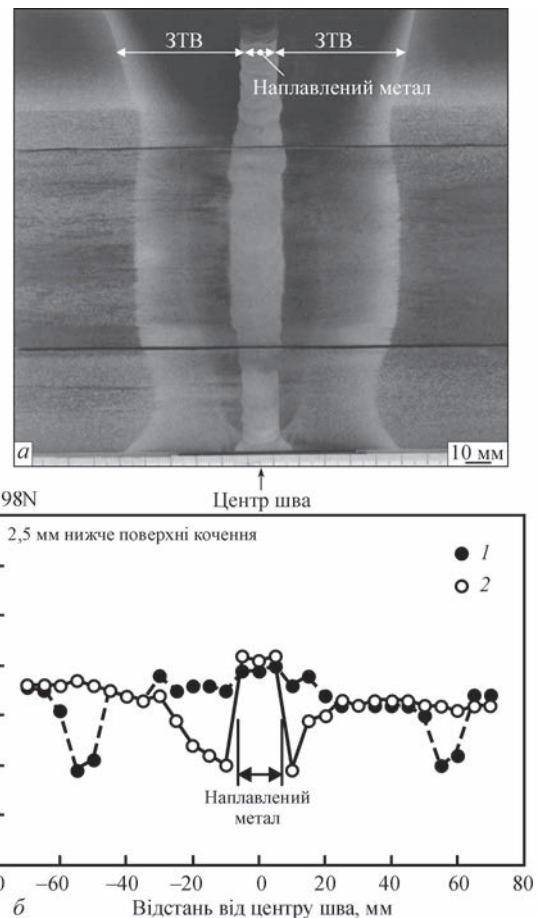


Рис. 3. Макроструктура шва (а), розподіл твердості в ЗТВ (б) з'єднання термічнозміцнених рейок [23]: 1 – після повторного нагріву і прискореного охолодження; 2 – після зварювання

На рис. 3 наведено макроструктуру шва та розподіл твердості в зоні з'єднання термічнозмцнених рейок. Ширина шва становить приблизно 20 мм, а загальна ширина ЗТВ – приблизно 100 мм. Твердість металу шва близька до твердості основного матеріалу *HV390*, але наявні зони пониженої твердості з обох боків шва. При повторному нагріванні та прискореному охолодженні зварного стику, яке проводять для зменшення градієнта твердості, розташування зон пониженої твердості зміщується на відстань до 60 мм від центру шва [23]. В роботі [24] показано, що при ЕДЗ рейок найбільш небезпечною ділянкою з'єднань з точки зору зародження холодних тріщин, є метал ЗТВ. Без застосування попереднього підігріву до температури щонайменше 250 °С виключити утворення холодних тріщин у з'єднаннях проблематично. Збільшення погонної енергії зварювання сприяє тільки уповільненню процесів розвитку холодних тріщин у зварних з'єднаннях, але не запобігає їх зародженню.

Відомі різновиди ЕДЗ мають невисокі показники ефективності з точки зору гарантування бездефектності швів, придатності до автоматизованого контролю (прогнозування) якості зварювання, продуктивності процесу.

В ІЕЗ розроблено технологію автоматичного ЕДЗ ванним способом з використанням плавкого мундштука [25, 26]. Її відмінною особливістю (рис. 4, *а, б*) є використання самозахисного порошкового дроту, що подається через поздовжній канал в плоскому мундштуку, який плавиться, що дозволяє виконувати зварювання при зазорі 12...16 мм, а в окремих випадках 8...22 мм [25]. Розроблена технологія ЕДЗ завдяки механізації процесу зварювання дозволяє у 2...3 рази збільшити продуктивність робіт і значно покращити якісні показники зварних з'єднань, зберігаючи високу мобільність та універсальність обладнання (рис. 4, *в*). Спеціальні зварювальні матеріали та технологія автоматичного ЕДЗ забезпечують задовільні показники механічних властивостей з'єднань [25, 26]. Так, твердість металу шва зварного з'єднання рейок Р65 становить *HV 2600...3200* МПа, межа міцності – 800...900 МПа [25], руйнівне навантаження при випробуванні на статичний згин – 1500...1650 кН при стрілі прогину 16...22 мм. Дана технологія придатна для зварювання рейкових колій промислових підприємств, трамвайних та підкранових шляхів, а також у перспективі – для виконання оперативних ремонтних робіт на залізницях.

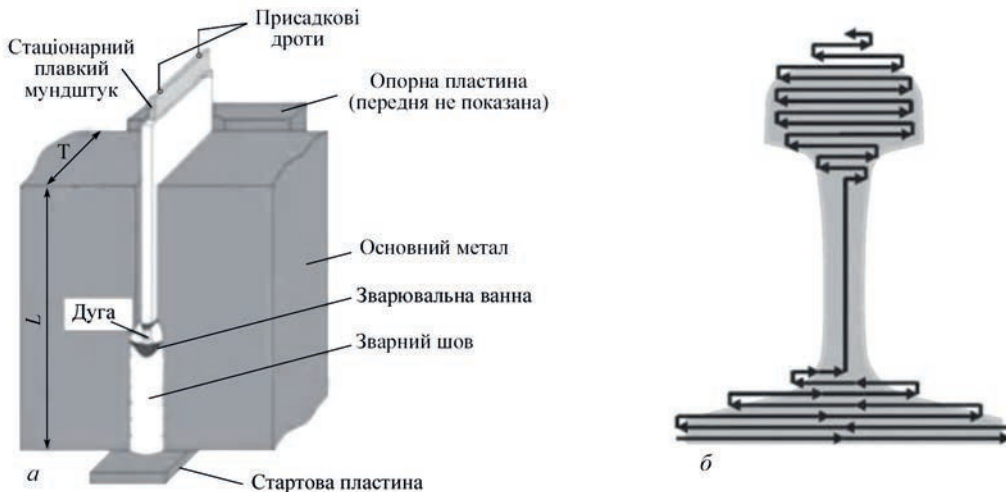


Рис. 4. Схема процесу (*а*), напрям переміщення мундштука (*б*) [25, 26], мобільне устаткування для ЕДЗ-ПІМ (*в*)

Газопресове зварювання (ГПЗ). ГПЗ – метод зварювання тиском, при якому торцеві поверхні рейок стикаються, а для нагрівання використовується газове полум'я [23, 27, 28]. Процес ГПЗ (рис. 5) складається зі стадій нагрівання, осадки, проковки і зрізання грату. Процес нагрівання виконується вручну оператором-зварювальником з використанням киснево-ацетиленової суміші, тому ступінь автоматизації процесу зварювання низький. Оскільки щільність контакту торців, що зварюються, значно впливає на якість з'єднання, торцеві поверхні обробляють спеціальними шліфувальними пристроями, що обумовлює відповідні вимоги до кваліфікації персоналу та організації підготовчих робіт.

У процесі нагрівання торцеві поверхні і прилеглі ділянки шва нагріваються до температури 1200...1300 °С. Тиск на торцях зазвичай залишається постійним $P = 20...30$ МПа протягом усього процесу нагрівання. У процесі ГПЗ кінці рейок пластично деформуються, величина укорочення рейок становить 20...40 мм. Випуклість, що утворилася в процесі проковки, в гарячому стані видаляється гратознімачем з гідравлічним приводом. При ГПЗ досягається відносно висока продуктив-

ність – час зварювання одного стику залежно від профілю рейки становить 6...7 хв. Устаткування для ГПЗ складається з газонагрівального пристрою, системи стискання рейок та гідравлічного гратознімача.

Ширина ЗТВ з'єднань рейок, становить близько 100 мм (рис. 6), значення твердості знижується приблизно до $HV270...290$, тому при ГПЗ термічнозміцнених рейок використовується післязварювальна термічна обробка, що суттєво знижує продуктивність робіт. Характерним видом дефектів, які утворюються у з'єднаннях при ГПЗ, є плівки оксидів. З метою зменшення утворення оксидів у роботі [27] досліджували процес ГПЗ з використанням водню у якості газу для нагрівання.

Незважаючи на те, що якість зварних стиків при ГПЗ залежна від рівня підготовки оператора, якості газу для нагрівання та підготовки торцевих поверхонь рейок, придатність до контролю (прогнозування) якості зварних з'єднань є вищою у порівнянні з ТЗ та ЕДЗ. За умови наявності кваліфікованого персоналу, правильній організації допоміжних і зварювальних робіт, ГПЗ при відносно незначному вкладенні коштів забезпечує надійне зварювання



Рис. 5. Послідовність технологічних операцій при ГПЗ [19]: 1 – зачистка кінців рейок; 2 – налаштування апарату для ГПЗ; 3 – у процесі ГПЗ (процес нагрівання); 4 – закінчення процесу ГПЗ (осадка); 5 – зрізання грату; 6 – зварна деталь відразу після ГПЗ

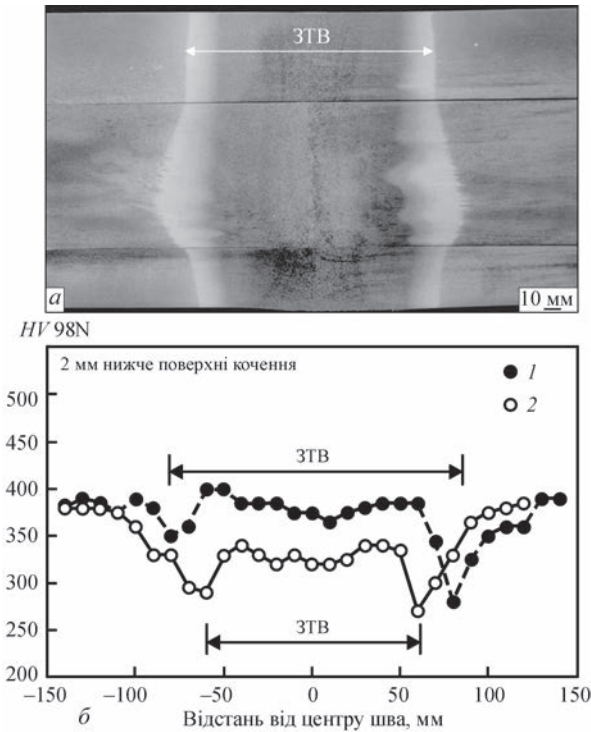


Рис. 6. Макроструктура (а), розподіл твердості в ЗТВ (б) з'єднання при ГПЗ термічнозміцнених рейок [23]: 1 – після повторного нагріву і прискореного охолодження; 2 – після зварювання

рейок, про що свідчить успішний досвід використання цієї технології в Японії [23]. В країнах ЄС, США цей метод не набув широкого застосування.

Контактне стикове зварювання (КСЗ) оплавленням. КСЗ може здійснюватися безперервним або пульсуючим оплавленням [36–39], а також оплавленням з попереднім підігрівом опором [35, 43–47]. При КСЗ безперервним оплавленням (рис. 7, а) рейки поступово зближують при включеному джерелі струму, що призводить до утворення і оплавлення контактів-перемичок. У результаті цього безперервного процесу забезпечується нагрівання рейок на задану глибину, на торцях утворюється шар рідкого металу, після чого швидкість зближення короткочасно підвищується (стадія інтенсивного оплавлення) (рис. 8, а) і виконується осадка. При цьому рідкий метал з оксидними плівками видавлюється зі стику назовні та при затвердінні утворює ґрат, який зазвичай видаляють в гарячому стані.

Процес КСЗ оплавленням з попереднім підігрівом включає стадії попереднього підігріву опором (основний розігрів рейок), інтенсивного оплавлення, осадки і зрізки ґрата. При підігріві опором (рис. 7, б) кінці рейок періодично стискають невеликим осьовим зусиллям і вмикають струм, розмикають і розводять, внаслідок чого досягається вирівнювання температурних полів по поперечному перерізу рейок. При попередньому підігріві опором джерело виділення енергії і зона розігріву майже повністю охоплює метал, що знаходиться між застискними губками зварювальної машини. Після

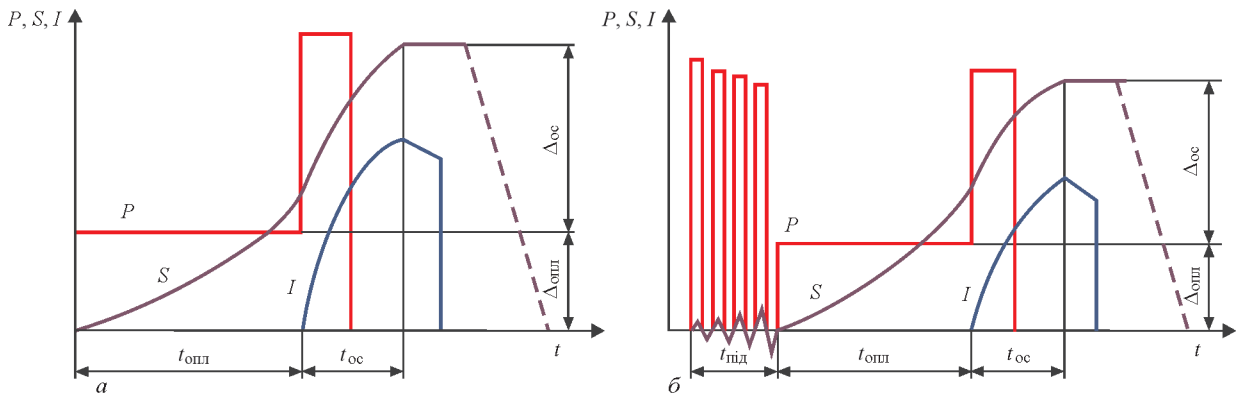


Рис. 7. Типові циклограми процесу КСЗ безперервним оплавленням (а) і КСЗ з попереднім підігрівом опором (б): $t_{опл}$, $t_{ос}$, $t_{від}$ – тривалість етапів оплавлення, осадки, підігріву; $\Delta_{опл}$ і $\Delta_{ос}$ – припуск на оплавлення і осадку; P – тиск, S – переміщення, I – струм

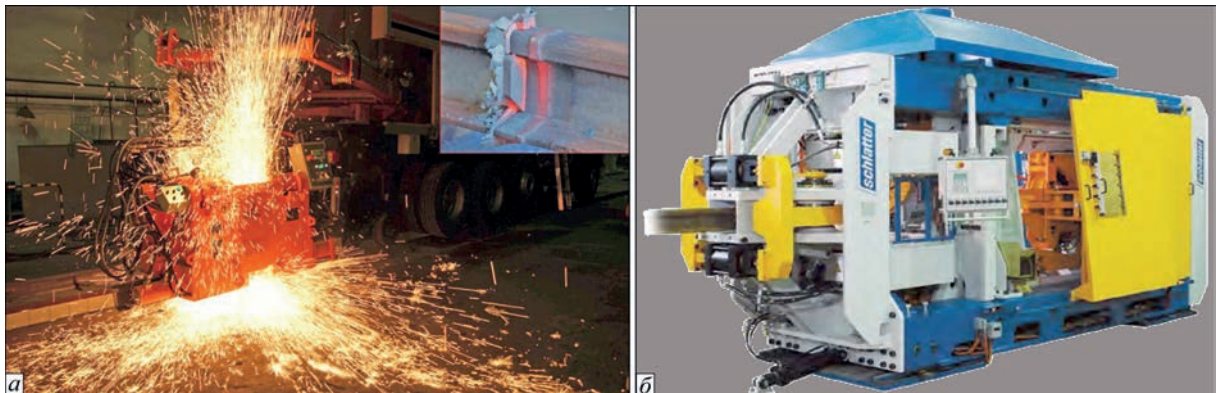


Рис. 8. Мобільна рейкозварювальна машина K922-1 у процесі КСЗ оплавленням (а), стаціонарна рейкозварювальна установка Schlatter GAAS 80 (б) [35]

підігрівання стиків рейок до потрібної температури виконується оплавлення і осадка. До середини 1960-х років ХХ сторіччя з'єднання рейок виконували методом КСЗ оплавленням з попереднім підігрівом в стаціонарних умовах на громіздкому устаткуванні вагою 20...30 т при наявності потужних (600...700 кВА) джерел енергопостачання.

Відомим сучасним розробником технології та устаткування для КСЗ оплавленням з попереднім підігрівом є компанія Schlatter (Швейцарія) [35], яка виготовляє рейкозварювальні комплекси, зокрема стаціонарні машини (рис. 8, б) для роботи в заводських умовах. Суттєвими обмеженнями застосування даної технології є необхідність використання джерела живлення значної потужності, відносна складність, великі габарити та висока вартість устаткування, зокрема і мобільних рейкозварювальних комплексів.

В ІЕЗ у 1960-х роках вперше у світі розроблено технологічні основи та створено високоефективне мобільне устаткування для зварювання залізничних рейок у польових умовах. В їх основу покладено технологію КСЗ безперервним оплавленням з програмною зміною основних параметрів процесу зварювання. Програмована зміна параметрів здійснюється спільно з використанням зворотних зв'язків, які автоматично корегують задані значення параметрів при зміні умов зварювання. Успішна реалізація даної технології обумовлена створенням оригі-

нальної конструкції зварювальних трансформаторів зі знизеним опором короткого замикання, зокрема була реалізована ідея використання елементів силового гідравлічного приводу у якості струмопровідних елементів вторинного контуру трансформаторів.

Недолік технології КСЗ безперервним оплавленням рейок – відносно великі значення припуску на оплавлення (близько 40 мм) і загального часу зварювання (180...240 с). Револьюційним удосконаленням технології КСЗ рейок стала технологія КСЗ пульсуючим оплавленням, розроблена в ІЕЗ [3, 4, 36, 38]. За рахунок багатфакторного регулювання процесу оплавлення забезпечується інтенсифікація контактного нагрівання, скорочуються втрати металу, підвищується термічний коефіцієнт корисної дії (ККД) процесу. Завдяки висококонцентрованому нагріванню, загальне енерговкладення, тривалість процесу і припуск на зварювання скорочується у 1,5...2,0 рази.

Для оцінки ефективності різних технологій КСЗ оплавленням необхідно розглянути вимоги чинних стандартів України та ЄС до зварних стиків залізничних рейок. Порівняння вимог чинних стандартів до показників якості зварних стиків рейок при КСЗ наведено в табл. 1.

Відповідно до нормативних документів – вітчизняних [8, 9] і європейських [10, 11] стандартів вимоги до зварних з'єднань залізничних рейок можна умовно розділити на групи:

Таблиця 1. Основні вимоги до показників якості зварних стиків рейок при КСЗ

Параметр, що контролюється	EN 14587-1:2018	EN 14587-2:2009	ТУ У 24.1-40075815-002:2016
Механічні властивості при випробуванні на статичний згин			
Мінімальне руйнівне навантаження при його прикладанні на головку рейки, кН	1600		1650
Стріла прогину, мм, не менше	20		30
Наявність дефектів при магнітопорошковому контролі			
Тріщини	недопустимо		недопустимо
Наявність дефектів у зламі з'єднання після примусового руйнування стиків			
Непровар	недопустимо		недопустимо
Матова пляма (не лінза)	припустимо $L < 10$ мм, $\delta < 0,7$ мм		не більше 3-х площею до 15 мм ²
Матова пляма (лінза)	припустимо $L < 4$ мм, $\delta < 0,7$ мм		
Дефекти та параметри ЗТВ при аналізі макроструктури			
Наявність непроварів, включень, тріщин, усадки	Не допускається		
Мінімальна ширина ЗТВ $H_{ЗТВ\min}$, мм	25	20	Не контролюється
Максимальна ширина ЗТВ $H_{ЗТВ\max}$, мм	45	45	Не контролюється
Допустима різниця ширини ЗТВ $H_{ЗТВ\max} - H_{ЗТВ\min}$, мм	10	20	Не контролюється
Мікроструктура			
Наявність мартенситу та бейніту при $\times 100$	Не допускається	Не допускається	Не контролюється
Розподіл твердості			
Нетермозміцнені рейки (R260, R220, R260Mn, M76), HV30	Min: $P - 30HV_{30}$ Max: $P + 60HV_{30}$	Min: $P - 30HV_{30}$ Max: $P + 60HV_{30}$	Min $P - 10\% HV_{30}$
Термозміцнені рейки (R350HT, K76Ф), HV30	Min: $P = 325HV_{30}$ Max: $P = 410HV_{30}$	Min: $P = 325HV_{30}$ Max: $P = 410HV_{30}$	Min $P - 15\% HV_{30}$
Втомні випробування			
Кількість циклів, млн	5	5	Не контролюється
Навантаження, кН	190	190	Не контролюється

- показники механічних властивостей – стріла прогину і навантаження до руйнування при випробуваннях стиків на статичний поперечний згин;
- наявність дефектів – види недопустимих і максимальні розміри та кількість допустимих дефектів;
- параметри зони термічного впливу (ЗТВ) – її ширина та нерівномірність по довжині та перерізу рейок при аналізі макроструктури зварних стиків;
- розподіл твердості у ЗТВ (мінімальне і максимальне значення);
- мікроструктура металу в зоні з’єднання і ЗТВ – допустима перлітна структура різної дисперсності (перліт, сорбіт, троостит), виключається наявність ділянок з мартенситною та бейнітною структурою;
- показники при випробуваннях стиків на циклічну міцність.

Аналіз даних табл. 1 показує, що існують суттєві відмінності у вимогах вітчизняних і європейських стандартів, перш за все, в необхідності визначення показників міцності при циклічних навантаженнях зварних стиків, і по-друге, кількісної оцінки параметрів ЗТВ з’єднань. Як свідчить інформація в наявних закордонних публікаціях [43–47], параметри ЗТВ (ширина, рівномірність по перерізу рейок) і показники втомної міцності є надзвичайно важливими в прогнозуванні зносостійкості зварних стиків і довговічності експлуатації залізничної колії (що є одним із визначальних критеріїв оцінки ефективності способу зварювання).

Тому, обґрунтованим і своєчасним є затвердження Міністерством інфраструктури України Переліку національних стандартів, відповідність яким надає презумпцію відповідності вимогам Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту (Наказ від 20.11.2019 р. № 815). До вказаного переліку включено національний стандарт ДСТУ EN 14587-2:2015 (EN 14587-2:2009, IDT), гармонізований з відповідним європейським нормативним документом [11]. Це означає, що при будівництві та ремонті вітчизняних залізничних колій з використан-

ням рейок закордонного виробництва показники якості стиків повинні оцінюватись на основі вимог європейського стандарту.

У зв’язку з цим, параметри ЗТВ, розподіл твердості в зоні з’єднань, мікроструктура (відсутність гартівних структур) є важливими критеріями оцінки ефективності технології КСЗ. Наявні публікації та багаторічний практичний досвід свідчать, що як і для будь-яких способів зварювання для КСЗ залізничних рейок проблемою є утворення в зоні термічного впливу градієнта твердості (рис. 9): для термічнозмцнених рейок – зон пониженої твердості з обох боків від лінії з’єднання («Double Dip Hardness») [43–47], а для нетермічнозмцнених рейок – суттєве підвищення твердості в зоні перегріву [4].

Головна проблема методу КСЗ з попереднім підгрівом це стабілізація теплового поля, що виникає під час зварювання. Зі збільшенням площі поперечного перерізу рейок енергетичний ККД процесу значно падає, також знижується коефіцієнт потужності. Практичний досвід свідчить, що за рахунок відповідного відпрацювання технології КСЗ з підгрівом вдається забезпечити вимоги до показників якості зварних стиків рейок (табл. 1). Однак, реалізація даної технології зварювання ускладнена в польових умовах за рахунок значних габаритних розмірів мобільних рейкозварювальних машин.

Технологія КСЗ пульсуючим оплавленням дозволяє у широких межах регулювати термічні цикли при зварюванні сталей з різним хімічним складом і властивостями та за умови оптимізації технологічних режимів забезпечує регламентовану чинними стандартами [10, 11] якість стиків рейок, виконаних як стаціонарними, так і мобільними рейкозварювальними машинами [4, 39].

Порівняння різних способів зварювання рейок. У табл. 2 наведено оціночне порівняння розглянутих способів зварювання рейок за декількома показниками із літературного джерела [23], а у табл. 3 – оцінку за іншими розглянутими критеріями.

Таблиця 2. Порівняння способів зварювання залізничних рейок [23]

Способи зварювання	Час зварювання, хв	Обладнання		Навички оператора	Якість зварювання
		Початкові інвестиції	Мобільність		
КСЗ	2...4	Значні	Низька	Не потребує	Висока
ГПЗ	5...7	Значні	Середня	Потребує	Висока
ЕДЗ	60	Незначні	Висока	Потребує	Задовільна
ТЗ	30	Незначні	Висока	Не потребує	Задовільна

Таблиця 3. Оціночне порівняння способів зварювання залізничних рейок

Характеристика (показник)	КСЗ	ГПЗ	ЕДЗ	ТЗ
Металургія процесу	Ковка	Ковка	Плавлення	Плавлення
Автоматизація процесу	Висока	Середня	Середня	Низька
Ширина ЗТВ, мм	20...45	120...150	80...100	115...140
Придатність до контролю (прогнозування) якості з’єднань	Висока	Середня	Низька	Низька

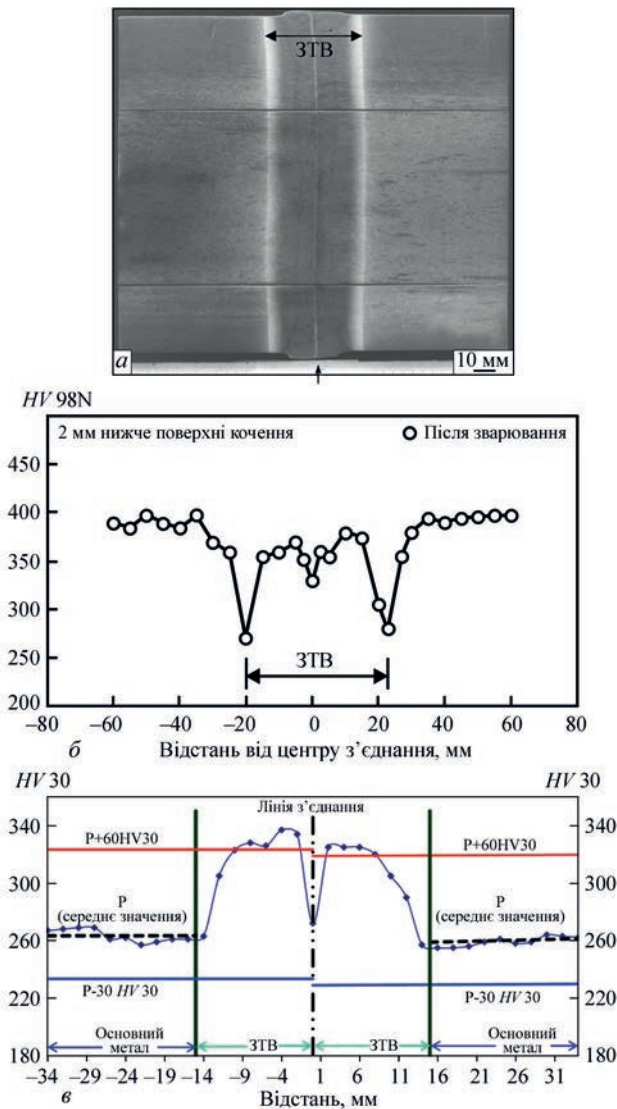


Рис. 9. Макроструктура зварного з'єднання рейок при КСЗ оплавленням (а); розподіл твердості у з'єднанні рейок класу R350НТ (б) [23] та R260 (в)

Практичний досвід свідчить, що незважаючи на порівняно низьку продуктивність, складність автоматизації процесу, способи зварювання плавленням (ТЗ і ЕДЗ) завдяки невисокій вартості по-

чаткових інвестицій, високій мобільності та універсальності понад сто років застосовується для з'єднання рейок різного призначення на трамвайних і залізничних коліях, підкранових шляхів промислових підприємств, а ТЗ успішно використовується для приварки хрестовин стрілочних переводів на залізничних коліях.

Незважаючи на невисокий ступінь автоматизації процесів підготовки кінців рейок, нагрівання, контролю якості з'єднань, газопресове зварювання за умови наявності кваліфікованого персоналу, правильній організації допоміжних і зварювальних робіт забезпечує надійне зварювання рейок, про що свідчить успішний досвід використання цієї технології в Японії.

Практичний досвід використання КСЗ оплавленням з попереднім підгрівом опором, зокрема компанії Schlatter, свідчить про відповідність показників якості зварних стиків рейок вимогам чинних стандартів. Основним обмеженням застосування даної технології є відносна складність, великі габарити та висока вартість рейкозварювального устаткування.

Починаючи з 1960-х до 2010-х рр. технологія КСЗ безперервним оплавленням успішно застосовувалась при з'єднанні рейок у стаціонарних і польових умовах, зокрема всіх типів рейок мартенівського виробництва. Недоліками технології КСЗ безперервним оплавленням рейок є відносно великі значення припуску на оплавлення, загального часу зварювання і складність забезпечення заданих нормативними документами термічних циклів, що необхідно для якісного з'єднання сучасних зносостійких рейок конверторного виробництва.

Технологія КСЗ пульсуючим оплавленням дозволяє у широких межах регулювати термічні цикли при з'єднанні залізничних рейок різних категорій, класу міцності зі сталей з різним хімічним складом та забезпечує регламентовану чинними стандартами якість з'єднань. У 2000-х рр. освоєно

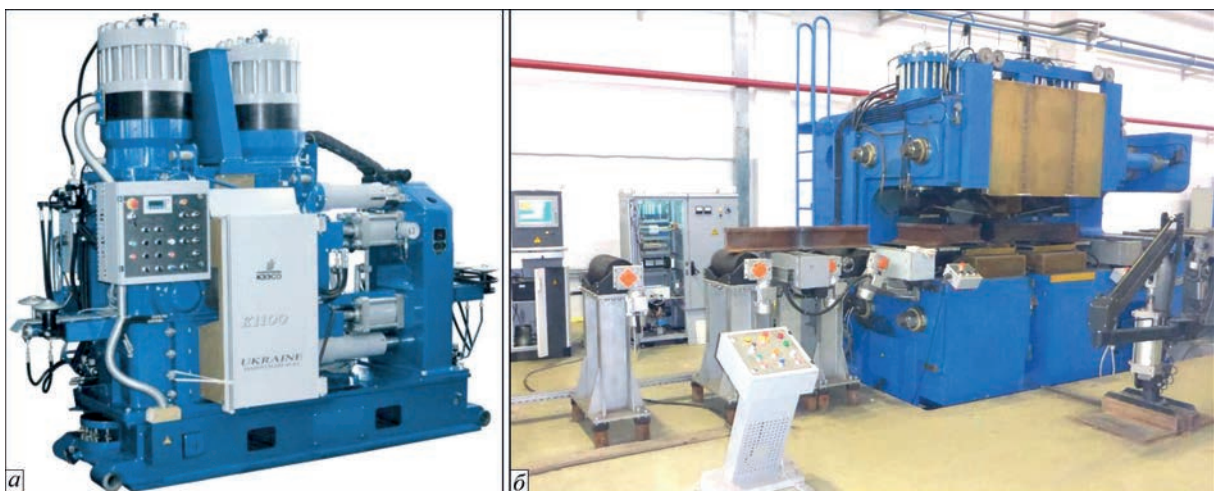


Рис. 10. Стаціонарні рейкозварювальні установки К1100 (а), К924 (б), розроблені ІЕЗ

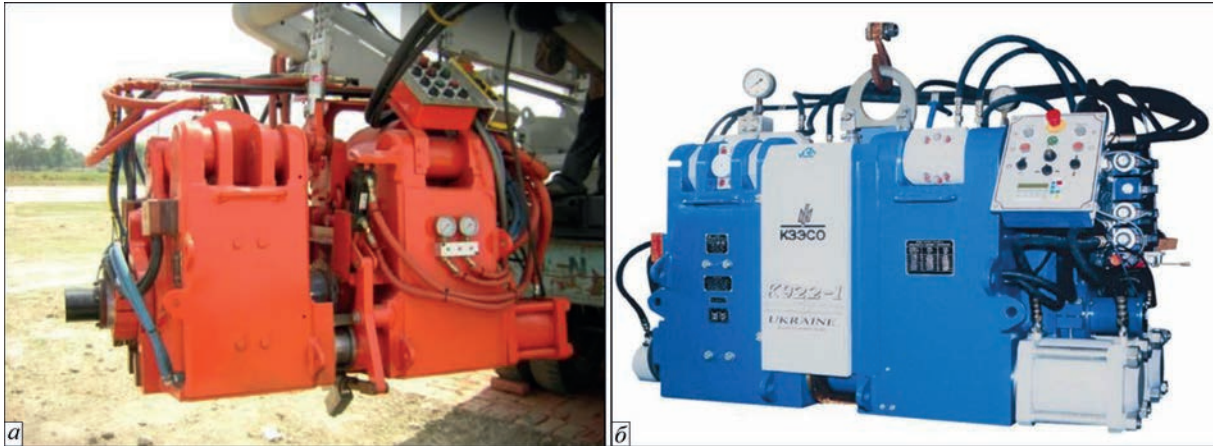


Рис. 11. Мобільні рейкозварювальні машини K920 (а), K922-1 (б)

виробництво мобільних і стаціонарних рейкозварювальних машин, оснащених комп'ютеризованими системами керування процесом і контролю основних параметрів зварювання. В основу систем покладені принципи керування процесом пульсуючого оплавлення [48–50]. Система автоматичного керування базується на використанні швидкого гідроприводу, промислового комп'ютера

з монітором для візуалізації даних, контролера, датчиків переміщення, напруги й тиску. При зварюванні кожного стику відбувається самонастроювання параметрів, що забезпечує оптимізацію програм їхньої зміни на всіх етапах оплавлення й у цілому за період зварювання. Комп'ютеризована система контролю реєструє всі параметри зварювання, визначає їх допустимі відхилення від зада-



Рис. 12. Мобільні машини K960 (а), K945 (б), рейкозварювальний комплекс з машиною K945 (в) для КСЗ рейок з «натягом»

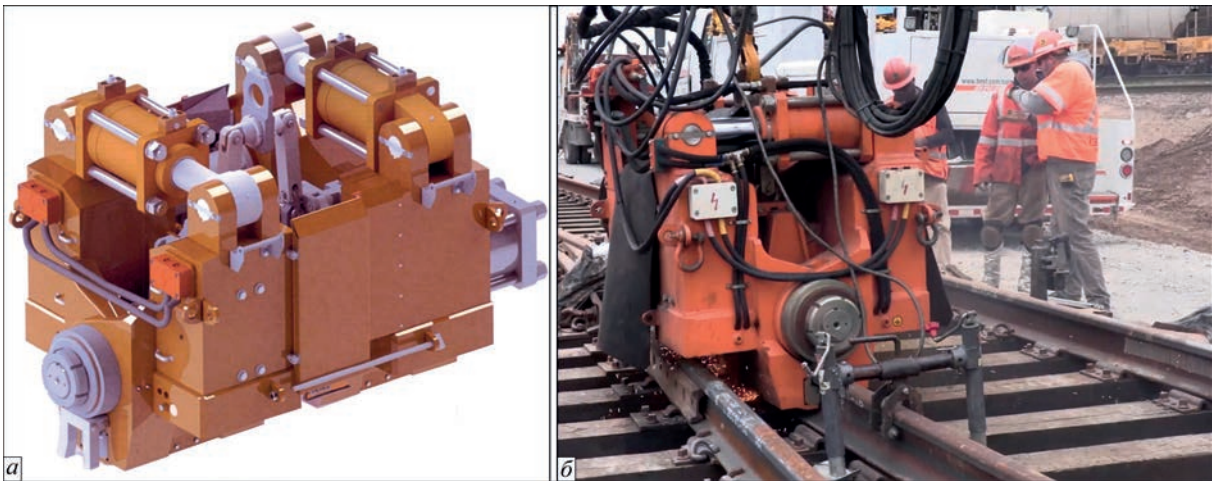


Рис. 13. Модель машини K1045 (а) та зварювальний комплекс з машиною K1045 для КСЗ рейок у важкодоступних локаціях (б)



Рис. 14. Рейкозварювальний комплекс KCM 005 на комбінованому шасі, оснащений машиною K920 (а), K922-1 (б)

них величин і відповідно до встановлених алгоритмів видає оцінку якості з'єднань відразу після виконання зварювання [49, 51].

Наукові, технологічні та конструкторські розробки ІЕЗ реалізовано в серії стаціонарних (K1000, K1100, K924) і мобільних машин (K900, K920, K921, K922-1, K930, K945, K950, K1045), якими комплектуються пересувні рейкозварювальні комплекси (рис. 10–14). Відмінними характеристиками цих машин є кінематична схема, особливості конструкції механізмів затискання та осьового переміщення, зусилля осадки (650...2000 кН) та інше. Перевагою більшості моделей машин є наявність вбудованого гратознімача з індивідуальним приводом для зрізання ґрату в гарячому стані без розтискання рейок, що зварюються.

В цих машинах втілено низку захищених міжнародними патентами інноваційних технічних рішень в області зварювання, систем керування, конструювання вузлів зварювальних машин, швидкодійних гідроприводів і принципів центрування рейок. За останні роки виготовлено й поставлено в різні країни (США, Канада, Австрія, Великобританія, Китай, Сінгапур, Таїланд, Малайзія, Тайвань, Казахстан, Словаччина та ін.) кілька сотень стаціонарних і мобільних рейкозварювальних машин.

Сучасні наукові, технологічні та конструкторські розробки ІЕЗ спрямовані на максималь-

ну адаптацію до вимог замовників з точки зору ефективності зварювання рейок різних категорій, класів міцності та хімічного складу (зокрема, заєвтектоїдного класу та легованих Cr, Mn, Ti, V) [52, 53], конструктивного вирішення та технічних характеристик машин, підвищення технологічності виготовлення окремих вузлів та механізмів і втілюються у конструкції нових мобільних рейкозварювальних машин.

Висновки

1. Для нероз'ємного з'єднання залізничних рейок використовуються способи зварювання плавленням (термітне, електродугове, електрошлакове) і тиском (газопресове, електроконтактне, індукційне, лінійним тертям).

2. Практичне застосування при будівництві та ремонті залізничних колій отримали способи зварювання – термітне, електродугове, газопресове й електроконтактне, різновидами якого є КСЗ безперервним оплавленням, КСЗ з попереднім підігрівом опором і КСЗ пульсуючим оплавленням.

3. Незважаючи на порівняно низьку продуктивність, неможливість автоматизації процесу, термітне зварювання завдяки високій мобільності та універсальності понад сто років застосовується для з'єднання рейок різного призначення

(на трамвайних і залізничних коліях), а також для приварки хрестовин стрілочних переводів.

4. Розроблена в ІЕЗ технологія автоматичного електродугового зварювання ванним способом з використанням плавкого мундштука придатна для зварювання рейкових колій промислових підприємств, трамвайних та підкранових шляхів, а також у перспективі – для виконання оперативних ремонтних робіт на залізницях.

5. Незважаючи на порівняно низький ступінь автоматизації процесу, газопресове зварювання за умови наявності кваліфікованого персоналу, при правильній організації допоміжних і зварювальних робіт забезпечує надійне зварювання рейок, про що свідчить успішний досвід використання цієї технології в Японії.

6. Практичний досвід використання КСЗ з попереднім підгрівом опором, зокрема компанії Schlatter, свідчить про відповідність показників якості зварних стиків рейок вимогам діючих стандартів. Основним обмеженням застосування даної технології є відносна складність, великі габарити та висока вартість рейкозварювального устаткування.

7. Технологія КСЗ пульсуючим оплавленням дозволяє забезпечити оптимальні термічні цикли при зварюванні сталей з різним хімічним складом і властивостями та забезпечує регламентовану чинними стандартами якість з'єднань. Наукові, технологічні та конструкторські розробки ІЕЗ реалізовано в серії стаціонарних і мобільних рейкозварювальних машин, якими комплектуються пересувні рейкозварювальні комплекси, успішно впроваджені у багатьох країнах світу.

8. Розвиток технологій і устаткування для КСЗ оплавленням обумовлюється необхідністю їх максимальної адаптації до сучасних вимог ефективного зварювання рейок різних категорій, класів міцності та хімічного складу, конструктивного вирішення та технічних характеристик рейкозварювальних машин, підвищення технологічності виготовлення окремих вузлів та механізмів.

Список літератури/References

1. Патон Б., Костюк М., Кучук-Яценко С. (2010) Инновационный кластер «Бархатный путь» и научно-технический прорыв Украины на мировой рынок строительства скоростных железных дорог. *Наука та інновації*, 6(2), 69–86. Paton, B., Kostyuk, M., Kuchuk-Yatsenko, S. (2010) Innovative cluster «Velvet road» and scientific-technical breakthrough of Ukraine into world market of construction of high-speed railways. *Nauka ta Innovatsii*, 6(2), 69–86 [in Ukrainian].
2. Cantos, P., Pastor, J., Serrano, L. (1999) Productivity, efficiency and technical change in the European railways: A non-parametric approach. *Transportation*, (26), 337–357. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1005127513206>
3. Кучук-Яценко С., Яковлев В., Дідковський О. та ін. (2016) Розвиток технологій та устаткування для зварювання рейок – ключ до розширення мережі суцільнозварних безстикових колій в Україні. *Українська залізниця*, 1, 56–59. Kuchuk-Yatsenko, S., Yakovlev, V., Didkovskiy, O. et al. (2016) Development of technologies and equipment of rail
- welding is the key for widening of all-welded seamless tracks in Ukraine. *Ukrainska Zaliznytsya*, 1, 56–59 [in Ukrainian].
4. Kuchuk-Yatsenko, S. (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. Український науково-дослідний інститут металів «УкрНДІМет» (2004) *Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні вимоги* ДСТУ 4344:2004. Київ, Держспоживстандарт України. DSTU 4344:2004 *Rails common to broad gauge railways. General specifications*. UkrNDIMet, Kyiv, Derzhspozhyvstandart [in Ukrainian].
6. *Railway applications – Track – Rail. Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above*. EN 13674-1:2011+A1:2017. European Committee for Standardization.
7. ДП «УкрНДНЦ» (2018) *Залізничний транспорт – Колія – Рейки – Частина 1: Залізничні рейки Вігноле 46 кг/м та вище* ДСТУ EN 13674-1:2018 (EN 13674-1:2011+A1:2017, IDT). DSTU EN 13674-1:2018 (EN 13674-1:2011+A1:2017, IDT) (2018) *Railway transport. Track. Rails. Pt. 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above*. DP UkrNDNTs [in Ukrainian].
8. ТУУ 24.1-40075815-002:2016. *Рейки нові зварені для залізниць. Технічні умови*. ТУУ 24.1-40075815-002:2016. *New welded rails for railways. Specifications* [in Ukrainian].
9. *Технічні вказівки за технологією контактного зварювання рейок з натягом*, (2012). ВНД УЗ 32.7.02.012-2012 ЦП. ЦП-0280. Київ: НВП Поліграфсервіс. (2012) *Technical recommendations on technology of tension welding of rails*. VND UZ 32.7.02.012-2012 TsP-0280. Kyiv, Poligraphservis [in Ukrainian].
10. EN 14587-1:2018 (E). *Railway applications - Infrastructure - Flash butt welding of new rails - Part 1: R220, R260, R260Mn, R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT and R400HT grade rails in a fixed plant*.
11. EN 14587-2:2009 (E). *Railway applications – Track – Flash butt welding of rails – Part 2: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails by mobile welding machines at sites other than a fixed plant*.
12. Tachikawa, H., Uneta, T., Nishimoto, H. (2000) Steel welding technologies for civil construction applications. *Nippon Steel Techn. Rept.* 82(7), 35–41.
13. Xiao-Fei, L.L., Langenberg, P., Münstermann, S. et al. (2005) *Recent Developments of Modern Rail Steels*. HSLA Steels. 2.
14. Tatsumi, K., Mineyasu, T., Minoru, H. (2011) *Development of SP3 rail with high wear resistance and rolling contact fatigue resistance for heavy haul railways*. JFE Technical Report, (16).
15. Pointner, P. (2008) High strength rail steels – The importance of material properties in contact mechanics problems. *Wear.*, 265(9–10), 1373–1379.
16. Kuziak, R., Zygmunt, T. (2013) A new method of rail head hardening of standard-gauge rails for improved wear and damage resistance. *Steel Res. Int.*, 84(1), 13–19. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201200140>
17. Morant, S. (2015) Next-generation super-premium rail steels hit the tracks. *International Railway Journal*. <http://www.railjournal.com/index.php/track/next-generation-super-premium-rail-steels-hit-the-tracks.html?channel=531>
18. Lonsdale, C. (1999) *Thermite rail welding: History, process developments, current practices and outlook for the 21st century*. *Altoona, PA 16601: Conrail Technical Services Laboratory Altoona*.
19. Micenko, P., Muruganant, M., Huijun, L. et al. *Double Dip Hardness Profiles in Rail Weld Heat-affected Zone Literature and Research Review Report*, CRC Project Report, R3.121. Brisbane, Australia.
20. Wang, Y., Zhou, H., Shil, Y.-j. et al. (2012) Mechanical properties and fracture toughness of rail steels and thermit welds at low temperature. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 19(5), 409. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-012-0572-8>.
21. Dahl, B. (1995) Repair of rails on-site by welding. *Svetsaren*, 50, 2, 10–14.
22. Okumura, M. et al. (1995) Development of field fusion welding technology for rail-roadrails. *Nippon Steel Techn. Rept.*, 65, 4, 41–49.

23. Saita, K., Karimine, K., Ueda, M. (2013) Trends in Rail Welding Technologies and Our Future Approach. *Nippon steel and Sumitomo metal technical report.*, 105, 84–92.
24. Poznyakov, V., Kiriakov, V., Gajvoronsky, A. et al. (2010) Properties of welded joints of rail steel in electric arc welding. *The Paton Welding J.*, (8), 16–20.
25. Kuzmenko, G., Kuzmenko, V., Galinich, V. et al. (2012) New technology of electric arc bath welding of rails on tram and crane tracks. *The Paton Welding J.*, (5), 33–36.
26. Bajic, D., Kuzmenko, G., Samardzic, I. (2013) Welding of rails with new technology of arc welding. *Metalurgija*, 3, 399–402.
27. Yamamoto, R. (2007) Advances in Gas Pressure Welding Technology for Rails. *Railway. Technology Avalanche*, 17, 99–105.
28. Yamamoto, R., Komizu, Y., Fukada, Y. (2014) Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding. *Welding International*, 7, 510–520. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.753237>.
29. *Induction rail welding plant.* www.mirageservices.co.uk.
30. *Railway rail induction-welding device:* patent US2019330805: E01B29/46, B23K13/01, B23K37/04, E01B29/04, E01B29/44. Published on 06.12.2022.
31. Maalekian, M (2007) *Friction Welding of Rails.* PhD Th., Graz University of Technology.
32. Gould, J., Johnson, W. *Translational friction weld rail repair – Phase I final report*, EWJ Project No. 52765GTH, FRA Contract No. DTFR53-11-C-00004.
33. Shira, S. *The use of translational friction welding for constructing and repairing rail for high speed and intercity passenger rail*–Phase II design report EWJ Project 54368GTH Task 1 – 3, FRA Contract No. DTFR53-13-C-00041.
34. Zhang, H., Li, C., Zhu, Z. (2022) Influence of CDFW Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of U75V Rail Steel Welded Joint. *Metals*. 12(5), 711. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12050711>.
35. *Schlatter Group. Rail welding systems* (2016) www.schlatter.ch.: www.schlatter.ch/en/welding-machines.
36. Kuchuk-Yatsenko, S., Krivenko, V., Didkovsky, A. (2012) Technology and new generation of equipment for flash butt welding of advanced high-strength rails for construction and reconstruction of high-speed railway lines. *The Paton Welding J.*, (6), 22–26.
37. *INNOTRACK – Innovative Track Systems.* Concluding Technical Report. <http://www.innotrack.eu>
38. Kuchuk-Yatsenko, S., Didkovsky, A., Shvets, V. (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>
39. Kuchuk-Yatsenko, S., Didkovsky, A., Shvets, V. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails. *Mining, Informatics, Automation and Electrical Engineering*, (528), 4.
40. Turpin, B., Danks, D. (2003) *Electroslag field welding of railroad rail–Final report for high-speed rail IDEA Project* http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/studies/idea/finalreports/highspeedrail/hsr-37final_report.pdf
41. Danks, D., Turpin, B. (2005) Recent advances in field electroslag rail welding. *Proceedings of the AREMA 2005 Annual Conferences.* www.arena.org/files/library/2005_Conference_Proceedings/00049.pdf
42. Grigorenko, G., Kostin, V., Zhukov, V. et al (2016) Peculiarities of structural transformations in HAZ metal of rail steel M76 joint produced by flash-butt welding. *Journal of Physical Science and Application*, 6(5), 54–652. DOI: <https://doi.org/10.17265/2159-5348/2016.05.0>
43. 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>
44. 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. *Journal of Rail and Rapid Transit* (IF 1.87). DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409720973138>
45. Mousavizade, M., Farhangi, H. (2009) 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.
46. 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.
47. D4.6.1. *The influence of the working procedures on the formation and shape of the HAZ of flash butt and aluminothermic welds in rails* (2008) INNOTRACK Project TIP5-CT-2006-031415. <http://www.innotrack.eu>
48. Rudenko, P., Gavrish, V., Kuchuk-Yatsenko, S. (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>
49. Kuchuk-Yatsenko, S., Didkovsky, A., Antipin, E. (2017) Real-time operational control information management system for flash-butt welding of rails. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*, (529), 4. DOI: <http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.35>.
50. Kuchuk-Yatsenko, S., Milenin, A., Velikoivanenko, E. (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>.
51. Kuchuk-Yatsenko, S. I., Rudenko, P. M., Gavrish, V. S. et al (2016) Statistical control of process of flash-butt welding of rails. Two-level control system. *The Paton Welding J.*, (6), 13–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.02>.
52. Shvets, V.I., Didkovsky, O.V., Antipin, Y.V. et al. (2022) Features of microstructure of butt joints of hypereutectoid ARE-AL-136HE-X rail steel in flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, (3), 33–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.03.04>
53. Shvets, V.I., Didkovsky, O.V., Zyakhor, I.V. et al (2023) Study of the structure of joints of rails of R260MN grade in flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, (1), 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.01.01>

MODERN TECHNOLOGIES OF WELDING RAILWAY RAILS (Review)

I.V. Ziakhor¹, E.V. Antipin¹, O.V. Didkovsky¹, O.V. Kavunichenko¹, A.M. Levchuk¹, Yu.A. Shilo¹, Yan Truska²

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

E-mail: zyakhor@paton.kiev.ua

²SaZ s.r.o. Company. Koupeľni 3908/6, 69501 Hodonin, Czech Republic

The known methods of welding railway rails in terms of their efficiency, productivity and ability to provide the quality of welded rails in accordance with the requirements of acting standards were analyzed. When evaluating the efficiency of different methods of welding, the technological features of the formation of welded joints, indicators of mechanical properties, macro- and microstructure of joints, the probability of defects formation, efficiency and possibility of automation of the welding process were taken into account. It is shown that such welding methods received practical application as termitic, automatic electric arc, gas-pressure and electric resistance. The varieties of the latter are flash-butt welding (FBW) using continuous flashing, FBW with resistance preheating and FBW with pulsating flashing. FBW technology with pulsating flashing allows providing optimal thermal cycles when welding steels with different chemical composition and properties and provides the quality of joints regulated by acting standards. Scientific, technological and design developments of PWI were implemented in a series of stationary and mobile rail welding machines, which are completed with mobile rail welding complexes, successfully implemented in many countries of the world. 53 Ref., 3 Tabl., 14 Fig.

Keywords: *termitic, electric arc, gas-pressure, flash-butt welding of rails*

Надійшла до редакції 10.04.2023