

ОЦІНКА ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА З УРАХУВАННЯМ ВИМОГ УКРАЇНСЬКОГО ТА ЄВРОПЕЙСЬКОГО СТАНДАРТІВ

С.І. Кучук-Яценко, Є.В. Антіпін, О.В. Дідковський, В.І. Швець, О.В. Кавуніченко

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

На більшості вантажонапружених залізничних магістралях України контактне стикове зварювання є домінуючим процесом з'єднання рейок. Зварювання виконується в спеціальних цехах і польових умовах при спорудженні нових магістралей і ремонті діючих залізничних колій. Технології та обладнання безперервно удосконалюються в зв'язку з застосуванням на залізницях України та інших країн світу нових поколінь високоміцних рейок з підвищеною зносостійкістю, відповідно до вимог до високошвидкісних магістралей. В останнє десятиріччя в розвинених країнах світу переглядають основні стандарти, що регламентують якість рейкових сталей і вимоги до механічних властивостей зварних з'єднань рейок з урахуванням їх використання на вантажонапружених і швидкісних магістралях. Однією з поставлених завдань є адаптація українського стандарту ТУ У 24.1-40075815-002: 2016 (для стаціонарних і мобільних зварювальних машин), що визначає вимоги до якості зварних з'єднань високоміцних рейок, до діючого європейського стандарту EN 14587-1 2007 (для стаціонарних зварювальних машин) та EN 14587-2 2009 (для мобільних зварювальних машин). Бібліогр. 9, табл. 4, рис. 12.

Ключові слова: контактне зварювання, залізничні рейки, високоміцні рейкові сталі, пульсуюче оплавлення, зона термічного впливу, температурні поля, дефекти в рейках, контроль якості, безстикова колія, дефекти в рейках

На більшості вантажонапружених залізничних магістралях України контактне стикове зварювання є домінуючим процесом з'єднання рейок. Зварювання виконується в спеціальних цехах і польових умовах при спорудженні нових магістралей і ремонті діючих залізничних колій. Для цього застосовують стаціонарні машини типу K1000 і мобільні типу K922-1, розроблені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона і виготовлені в ПрАТ «КЗЕСО». Перераховані машини також використовуються в багатьох країнах світу (РФ, КНР, США, Польщі, Малайзії, країнах Балтії і т. д.), поставлених за ліцензійними угодами з ІЕЗ ім. Є.О. Патона. В основу конструкції основних вузлів цих машин і систем управління покладено використання технології контактного зварювання безперервним (БО) і пульсуючим (ПО) оплавленням [1, 2].

Технології та обладнання безперервно удосконалюються в зв'язку з застосуванням на залізницях України та інших країн світу нових поколінь високоміцних рейок з підвищеною зносостійкістю, відповідно до вимог до високошвидкісних магістралей. В останнє десятиріччя в розвинених країнах світу переглядають основні стандарти, що регламентують якість рейкових сталей і вимоги до механічних властивостей зварних з'єднань рейок з урахуванням їх використання на вантажонапружених і швидкісних магістралях. ІЕЗ ім. Є.О. Патона

С.І. Кучук-Яценко – <https://orcid.org/0000-0002-1166-0253>, Є.В. Антіпін – <https://orcid.org/0000-0003-3297-5382>, О.В. Дідковський – <https://orcid.org/0000-0001-5268-5599>, В.І. Швець – <https://orcid.org/0000-0003-4653-7453>, О.В. Кавуніченко – <https://orcid.org/0000-0002-5164-9796>

© С.І. Кучук-Яценко, Є.В. Антіпін, О.В. Дідковський, В.І. Швець, О.В. Кавуніченко, 2020

спільно з підприємствами АТ «Укрзалізниця» бере участь у цій роботі. Однією з поставлених завдань є адаптація українського стандарту ТУ У 24.1-40075815-002:2016 (для стаціонарних і мобільних зварювальних машин), що визначає вимоги до якості зварних з'єднань високоміцних рейок, до діючого європейського стандарту EN 14587-1 2007 (для стаціонарних зварювальних машин) та EN 14587-2 2009 (для мобільних зварювальних машин) [3].

В даний час на залізницях України використовують високоміцні рейки як вітчизняного, так і закордонного виробництва. До рейок ставляться підвищені вимоги до зносостійкості, механічних властивостей та структури зварних з'єднань. Ці вимоги знайшли відображення в стандартах різних країн.

У табл. 1 наведено основні вимоги, яких необхідно дотримуватися при оцінці якості зварних з'єднань, виконаних контактним стиковим зварюванням, відповідно українського (ТУ У 24.1-40075815-002:2016) [4] та європейського стандартів (EN 14587-1 2007 та EN 14587-2:2009).

У повному обсязі всі перераховані в стандарті дослідження проводяться при сертифікації технології зварювання, зварювального обладнання, а також при навчанні операторів зварювальних машин.

Порівняння стандартів показує, що вони відрізняються не тільки показниками, що відносяться

Таблиця 1. Порівняння українського та європейського стандартів для зварювання залізничних рейок

| Параметр, що контролюється | EN 14587-1:2007 | EN 14587-2:2009 | ТУ У 24.1-40075815-002:2016 |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Механічні випробування | | | |
| Руйнівне навантаження на головку, кН | 1600 | 1600 | 1650 |
| Руйнівне навантаження на підшву, кН | Не випробовуються | Не випробовуються | 1400 |
| Стріла прогину, мм | 20 | 20 | 30 |
| Макроструктура | | | |
| Мінімальна ширина ЗТВ, мм | 25 | 20 | Не контролюється |
| Максимальна ширина ЗТВ, мм | 45 | 45 | "_" |
| Допустима різниця між ЗТВ max та ЗТВ min, мм | 10 | 20 | "_" |
| Мікроструктура | | | |
| Наявність мартенситної та бейнітної структури | Не допускається | Не допускається | Не контролюється |
| Розподіл твердості | | | |
| Нетермозміцнені рейки (R260, R220, R260Mn, M76), HV30 | Min P = HV30–30 Max P = HV30–60 | Min P = HV30–30 Max P = HV30–60 | Min P = 10 % HV30 |
| Термозміцнені рейки (R350HT, K76Ф, Э76Ф, K76Т), HV30 | Min P = HV30–325 Max P = HV30–410 | Min P = HV30–325 Max P = HV30–410 | Min P = 15 % HV30 |
| Втомні випробування | | | |
| Кількість циклів, млн | 5 | 5 | Не контролюється |
| Навантаження, кН | 190 | 190 | Не контролюється |
| *Дані приведені для рейок типу Р65 та 60E1 (UIC60) марок сталей R260, R220, R260Mn, M76, R350HT, K76Ф, Э76Ф, K76Т. | | | |

до механічних випробувань зварних з'єднань, але і аналізом особливостей мікроструктури і розмірів зони термічного впливу (ЗТВ).

Для всебічної оцінки якості зварних з'єднань високоміцних рейок, а також рейок, що використовуються на дорогах України, типу М76, К76Ф виробництва ПАТ МК «Азовсталь» (м. Маріуполь, Україна) та рейок, отриманих по імпорту марок сталей R260 та R350HT (British Standard French rail), співробітниками ІЕЗ ім. Є.О. Патона спільно з фахівцями АТ «Укрзалізниця» і ПрАТ «КЗЕСО» були зварені контрольні партії рейок різних марок сталей (в кількості 10 стиків) на мобільній машині типу К922-1 з подальшими їх дослідженнями відповідно наведених стандартів (див. табл. 1).

Хімічний склад і механічні властивості контрольних партій рейок, які були використані для дослідження, представлені в табл. 2.

Практично всі рейки на залізницях України зварюються з використанням технології контак-

тного стикового зварювання пульсуючим опаленням (ПО) [5], яка розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Тому, для зварювання контрольних партій рейок використовувалася саме ця технологія.

Типова програма зміни параметрів при зварюванні ПО наведена на рис. 1.

Режими зварювання різних партій рейок відрізняються. Слід зазначити, що при зварюванні високоміцних рейок марок сталей К76Ф та R350HT, для отримання необхідних механічних властивостей використовувалися режими з обмеженим тепловкладенням. При зварюванні рейок М76 та R260, які мають більш низьку твердість, можуть застосовуватися режими з більшим діапазоном тепловкладення при зварюванні, зі збереженням стабільних результатів згідно ТУ У 24.1-40075815-002:2016.

Основні параметри, що визначають режими зварювання ПО, наведені в табл. 3.

Механічні випробування. Механічні випробування зварних з'єднань контрольних партій рейок

Таблиця 2. Хімічний склад та механічні властивості контрольних партій рейок

| Марка сталі | Хімічний склад, % | | | | Твердість HV | Межа міцності σ_b , МПа | Межа плинності σ_p , МПа | Ресурс роботи, млрд. т бруто | Завод виробник |
|-------------|-------------------|-------------|-------------|------|--------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|--|
| | C | Mn | Si | V | | | | | |
| M76 | 0,71...0,82 | 0,80...1,30 | 0,25...0,45 | - | 260...280 | 800...1100 | 500...700 | 0,45 | ПАО МК «Азовсталь» (Україна) |
| K76Ф | 0,71...0,82 | 0,80...1,30 | 0,25...0,45 | 0,05 | 341...388 | 1300...1380 | 950...1050 | 0,5 | |
| R260 | 0,62...0,82 | 0,70...1,20 | 0,15...0,58 | 0,03 | 250...270 | 942...980 | 498...540 | 0,9 | Huta Katowice (Польща) |
| R350HT | 0,72...0,82 | 0,15...0,60 | 0,65...0,75 | 0,03 | 350...370 | 1240...1300 | 840 | 0,9 | British Standard French Rail (Франція) |

проводилися на пресі ТРМ з межею вимірювань 500 тс, випробування проводилися з розтягуванням головки і підшви відповідно. Методика випробувань однакова для вищенаведених стандартів. Відмінність європейського стандарту лише в тому, що випробування проводяться лише з розтягнення підшви. Схема випробувань наведена на рис. 2.

Основні показники якості зварювання, регламентовані обома стандартами (див. табл. 1), які були отримані під час зварювання контрольних партій рейок на оптимальних режимах зварювання, наведено в табл. 4.

Результати механічних випробувань (див. табл. 4) показали, що для отримання необхідних показників механічних властивостей зварних з'єднань високоміцних рейок необхідно обмежувати і контролювати тепловкладення при зварюванні і забезпечити нагрів з більш високим градієнтом температурного поля.

Показники при випробуваннях на згин в українському стандарті ТУ У 24.1-40075815-002:2016 вище вимог європейського стандарту EN 14587-2:2009 як по стрілі прогину, так і по руйнівному навантаженню. Механічні показники при

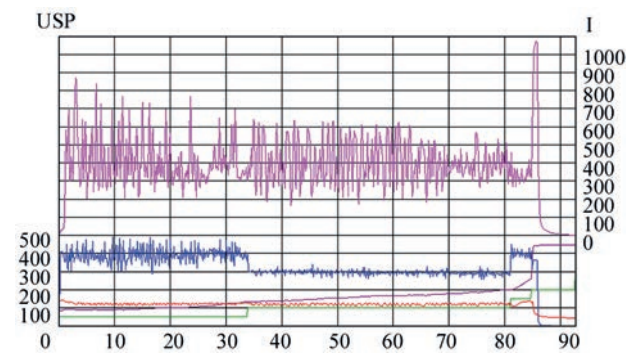


Рис. 1. Програма зміни основних параметрів зварювання пульсуючим оплавленням (ПО)

випробуванні контрольних партій в 1,5...2,0 рази перевищують нормативні значення європейського стандарту і задовольняють вимоги стандарту України. Слід зазначити, що в зламах зразків деяких досліджуваних рейок були виявлені дрібні сульфідні включення, що не перевищують вимоги, допустимі в українському та європейському стандартах.

З порівняння контрольованих показників (див. табл. 1) видно, що поряд з контролем механічних показників на статичний механічний згин зварних з'єднань рейок є ряд відмінностей, передбачених європейським стандартом, що стосуються методики дослідження якості, зокрема, металографічні, вимірювання твердості, а також втомні випробування, які не передбачені стандартом України. Тому були проведені комплексні дослідження контрольних партій з урахуванням вимог двох зазначених стандартів.

При зварюванні контрольних партій ПО на оптимальних режимах були досліджені температурні поля, при яких отримані якісні з'єднання. Дослідження проводилися за допомогою математичного моделювання процесу нагрівання залізничних рейок методом контактної стикової зварювання оплавленням [6, 7], результати моделювання наведено на рис. 3.

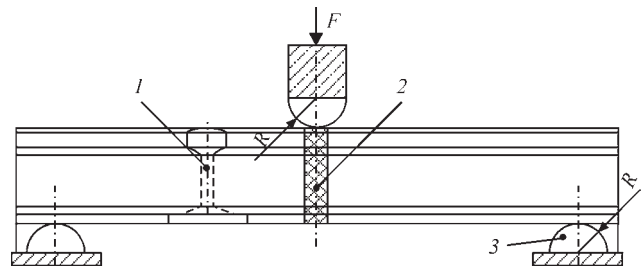


Рис. 2. Схема випробування зварного стику на статичний механічний вигин (F – зусилля; 1 – вид збоку; 2 – зварний шов; 3 – опора)

Таблиця 3. Основні параметри зварювання досліджуваних партій рейок

| Параметр | Тип рейок | | | |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | K76Ф | R260 | R350HT | M76 |
| Марка сталі | K76Ф | R260 | R350HT | M76 |
| Час зварювання, с | 70...90 | 70...100 | 7...095 | 80...110 |
| Зварювальний струм | 370...390 | 350...370 | 360...390 | 340...370 |
| Припуск на оплавлення, мм | 9...13 | 12...17 | 10...14 | 13...19 |
| Величина осадки | 11...14 | 11...14 | 11...14 | 11...14 |

Таблиця 4. Результати досліджень якості зварних з'єднань контрольних партій рейок

| Марка сталі | Випробування на згин | | Величина ЗТВ, мм | Розподіл твердості в ЗТВ, HV | |
|-------------|---------------------------|--------------------|------------------|------------------------------|-----|
| | Руйнівне навантаження, кН | Стріла прогину, мм | | min | max |
| K76Ф | 2100...2400 2250 | 32...50 36 | 24...29 | 305 | 385 |
| R350HT | 2150...2400 2200 | 34...55 40 | 24...32 | 320 | 380 |
| R260 | 2000...2350 2100 | 32...55 40 | 25...35 | 245 | 320 |
| M76 | 1900...2350 2200 | 32...57 40 | 25...38 | 245 | 308 |

На рис. 3 наведено температурні поля при зварюванні контрольних партій рейок на оптимальних режимах, також штрихпунктирними лініями показані температурні поля, відповідні граничним значенням ширини ЗТВ, допустимих європейським стандартом EN 14587-2: 2009.

Всі контрольні партії високоміцних рейок марки сталі R350HT, K76Ф (див. рис. 3.) відрізняються більш вузькою ЗТВ і знаходяться в рамках допустимих за європейським стандартом. Щоб отримати оптимальну структуру металу в ЗТВ необхідно істотно обмежувати енерговкладення. Температурне поле при зварюванні високоміцних рейок відрізняється більш високим градієнтом і меншою ЗТВ. Отримання стабільних показників при випробуванні на згин можливо при строгому контролі енерговкладення.

При зварюванні на оптимальних режимах перерахованих партій рейок були отримані високі показники механічних властивостей, це обумовлено формуванням в металі ЗТВ більш дрібнозернистої структури перліту з виділенням фериту по межах зерен, ніж при зварюванні з більшим енерговкладенням. Проведеними дослідженнями встановлено, що зниження енерговкладення при зварюванні за рахунок зменшення тривалості процесу оплавлення і підвищення зварювального струму дозволяє поліпшити структуру металу в ЗТВ, при цьому істотно зменшити її ширину.

Дослідження ширини зони термічного впливу (ЗТВ). У стандарті України ТУ У 24.1-40075815-002: 2016 відсутні вимоги до ширини ЗТВ. Ширина ЗТВ згідно європейського стандарту визначається візуально по макрошліфах, а також по лініях розподілу твердості, в цих місцях температура досягає температури високого відпуску, при цьому макроструктура зварного з'єднання повинна відповідати наступним вимогам EN 14587-2:2009:

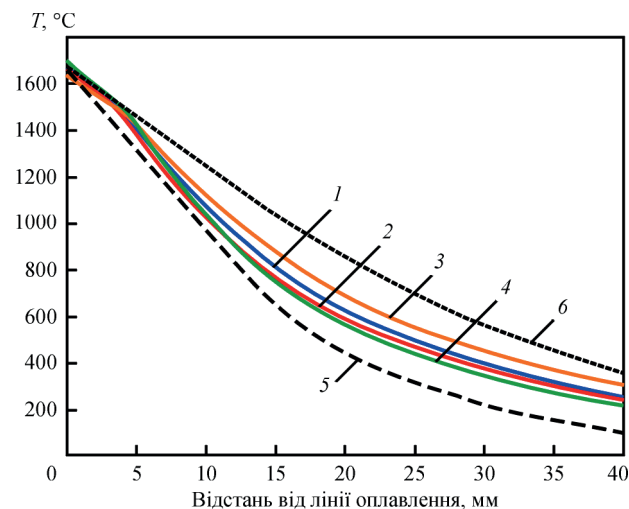


Рис. 3. Температурні поля при зварюванні дослідної партії рейок на оптимальних режимах: 1 – R260; 2 – R350HT; 3 – M76; 4 – K76Ф; 5 – min; 6 – max

1. Видима зона термічного впливу (ЗТВ) зварного макрошліфа повинна мати симетричну в межах допуску форму навколо лінії оплавлення і бути в межах 20...45 мм для мобільних машин. Допустиме відхилення між мінімальною і максимальною розмірами ЗТВ не повинно перевищувати 20 мм. Ця вимога має застосовуватися однаково до вертикальних осьових розрізах по всій глибині рейки і до країв підшови рейки.

2. Не повинно бути ознак відсутності з'єднання, включень, тріщин або усадочною деформації.

3. На лінії оплавлення допускаються дві плоскі плями за умови, що відповідають наступним вимогам:

– максимальний вертикальний розмір 10 мм і максимальна товщина 0,7 мм в разі, якщо плоскі плями здаються ущільненням лінії оплавлення, а не мають лінзоподібний вид;

– максимальний вертикальний розмір 4 мм і максимальна товщина 0,7 мм в разі, якщо плоска пляма має лінзоподібний вид;

– не повинно бути окрихчення внаслідок зварювання, охолодження або чистової обробки.

Макрошліфи зварних з'єднань контрольних партій наведено на рис. 4.

Ширина ЗТВ (рис 3, 4) при зварюванні високоміцних і високолегованих рейок змінюється в межах 26...32 мм, що на 4...6 мм менше ніж при зварюванні рейок типу M76 з меншою міцністю і меншим вмістом легуючих елементів, таких як С, Mn.

Слід зазначити, що зварювання всіх контрольних партій рейок виконувалося без наступної термообробки, яка використовується при контактному зварюванні рейок в закордонній практиці для поліпшення показників механічних властивостей зварних з'єднань.

Як видно з результатів, для отримання високих механічних властивостей необхідно зменшувати ширину зони нагріву більшою мірою для високоміцних рейок, ніж для рейок з меншою твердістю. Необхідну ЗТВ можна визначити по температурному полю, отриманого після зварювання на оптимальному режимі. Також можна визначити максимально допустимі відхилення ЗТВ від оптимальної, оскільки, згідно європейського стандарту, поле відхилення досить широке.

З макрошліфів видно, що ширина ЗТВ досліджених партій рейок відповідає температурним полям, отриманим при моделюванні процесу контактної зварювання оплавленням на оптимальних режимах. Також слід зазначити, що у всіх партіях рейок відхилення ширини ЗТВ по всьому перетину незначне та не перевищує 10 мм, що задовольняє вимогам європейського стандарту, (максимально допустиме відхилення ширини ЗТВ по перетину рейки для мобільних машин становить 20 мм).

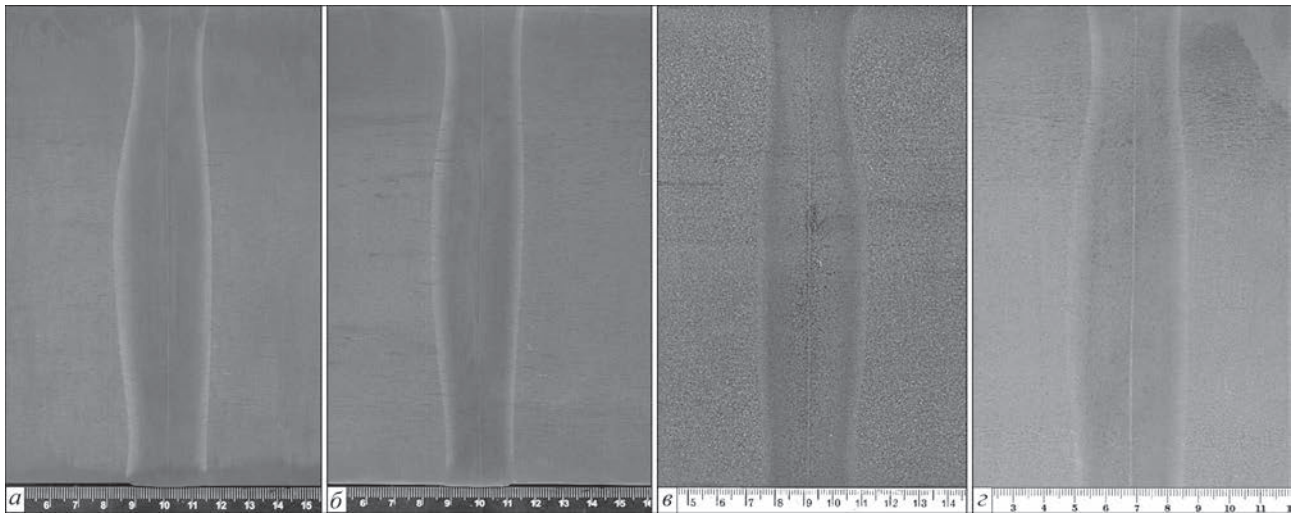


Рис. 4. Макрошліфи рейок різних марок сталей при зварюванні пульсуючим оплавленням на оптимальних режимах: а – R350HT (ЗТВ – 28 мм); б – K76Ф (ЗТВ – 27 мм); в – R260 (ЗТВ – 31 мм); з – M76 (ЗТВ – 37 мм)

Дослідження твердості. Були проведені дослідження розподілу твердості в зварних партіях рейок, які наведені на рис. 5. Дослідження проводилося за методикою, яка регламентується європейським стандартом.

Вимірювання твердості проводили по всій біляшовній зоні кожного з двох зварних зразків, безпосередньо від лінії з'єднання, за допомогою методу випробування на твердість по Вікерсу відповідно до EN ISO 6507-1 і з наступними параметрами:

- HV 30;
- вимірювання повинні проводитися нижче робочої поверхні катання рейки на 3...5 мм. Відстань між вимірами має бути 2 мм;
- ширина вимірювання проводиться на відстань від зварного шва, через ЗТВ і не менше 20 мм в основний метал зварних рейок.

При цьому, відповідно європейського стандарту, для різних марок сталей дозволяються різні відхилення розподілу твердості.

Рейки марки сталі R220, R260 та R260Mn. Для рейок R220, R260 і R260Mn отримані значення мінімальної та максимальної міцності повинні відповідати наступним вимогам:

- а) мінімальна міцність P не повинна бути менше, ніж HV30 – 30
- б) максимальна міцність P не повинна перевищувати HV30 – 60, де, P – середня міцність вихідної рейки, виміряної в загартованій траверсі.

Окрема величина твердості, що виходить за межі зазначених вище мінімальних і максимальних значень, повинна бути дозволена, якщо така величина твердості знаходиться в межах двох сусідніх значень, що відповідають вимогам.

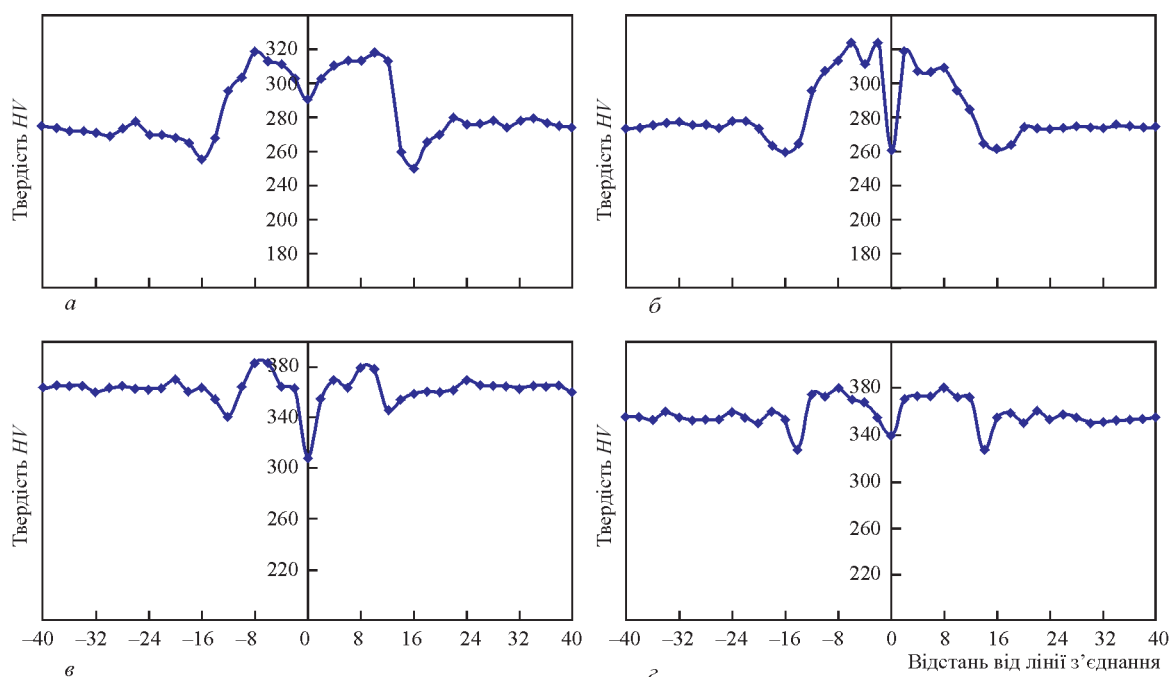


Рис. 5. Розподіл твердості в зварних партіях рейок: R260 (а); M76 (б); K76Ф (в); R350HT (z)

Рейки марки сталі R350HT. Для рейок R350HT значення мінімальної та максимальної міцності, отримані в межах 10 мм з кожного боку від лінії оплавлення, повинні відповідати наступним вимогам:

- мінімальна твердість не повинна бути менше, ніж HV30 – 325;
- максимальна твердість не повинна перевищувати HV30 – 410.

Окрема величина твердості, що виходить за межі зазначених вище мінімальних і максимальних значень, повинна бути дозволена тільки в разі, якщо вона потрапляє в лінію зварного шва.

Твердість знижується в центрі зварного шва, де формується сорбітно-перлітна структура і ділянки феритної фази. У центральній частині зварного шва, де переважає структура сорбіту, твердість має максимальне значення. Зниження твердості спостерігається і по границям ЗТВ, там спостерігається наявність структури високого відпуску, яка формується при температурах 580...620 °С. Підвищення температури на ділянках, що примикають до центру шва, залежить від градієнта температурного поля і температури ділянки ЗТВ.

Тепловкладення визначає швидкість охолодження стику – чим менше тепловкладення, тим вище швидкість охолодження. У свою чергу швидкість охолодження визначає температуру, при якій йде розпад аустеніту. Зниження температури розпаду є причиною зменшення міжпластинчастої відстані в сорбіті і, як наслідок, збільшення твердості.

Термозміцненні рейки марок сталей K76Ф і R350HT відрізняються високою твердістю, на відміну від рейок M76 і R260, тому дані рейки вимагають різного енерговкладення при зварюванні. При зварюванні високоміцних рейок необхідно уникнути великих провалів твердості в ЗТВ, а при зварюванні рейок з низькою твердістю потрібно уникати великого підвищення твердості в околшовній зоні. Максимальні відхилення твердості в металі ЗТВ регламентуються європейським стандартом.

Як видно (рис. 5), результати досліджень відповідають вимогам європейського стандарту.

Металографічні дослідження. В українському стандарті металографічний контроль зварних

з'єднань не передбачений. Відповідно європейському стандарту були проведені дослідження мікроструктури рейкової сталі R260 і R350HT, а також мікроструктура зварних з'єднань контрольних партій рейок (рис. 6). У зварних з'єднаннях не повинно бути ознак мартенситу або бейніту при 100-кратному збільшенні видимої від дії нагріву зони. Мікродослідження проводять на зразках висотою 15 мм і шириною 25 мм. При цьому зразок повинен бути вирізаний з головки рейки нижче на 3 мм від поверхні катання. Зразок повинен включати 2 мм одного боку зварного шва, лінію з'єднання та 23 мм іншого боку шва.

Основний метал рейок R260 та R350HT має сорбітно-перлітну структуру. Мікроструктура рейок марки R350HT в порівнянні з мікроструктурою рейок марки R260 характеризується меншим розміром колоній сорбіту, незначною кількістю перлітних колоній. Розмір зерен металу рейок марки R260 відповідає 2-3 балам, а рейок марки R350HT – 4-5 балам за шкалою ASTM. Перераховані вище структурні чинники визначають властивості міцності термозміцнених рейок.

У зварних з'єднаннях рейок R260 (рис. 7) та R350HT (рис. 8) на ділянках по лінії з'єднання і великого зерна мікроструктура сорбітно-перлітна. По лінії з'єднання, по межах первинних аустенітних зерен спостерігається виділення доєвтиктоїдного фериту.

Виділення фериту в значно меншій кількості спостерігається на ділянках крупного зерна, прилеглим до лінії з'єднання. Характерно, що в рейках марки R260 частка фериту як по лінії з'єднання, так на ділянках великого зерна більше.

Основний метал рейок марок сталей K76Ф та M76 має сорбітно-перлітну структуру. Також була досліджена мікроструктура лінії з'єднання рейок марки сталі M76 та K76Ф при зварюванні пульсуючим оплавленням (рис.9). У зварних з'єднаннях рейок K76Ф видимого фериту більше, ніж в зварних з'єднаннях рейок R350HT та R260.

В результаті порівняння можна відзначити, що в зварних з'єднаннях досліджуваних партій рейок, зварених на оптимальних режимах, не було виявлено слідів бейнітних та мартенситних структур.

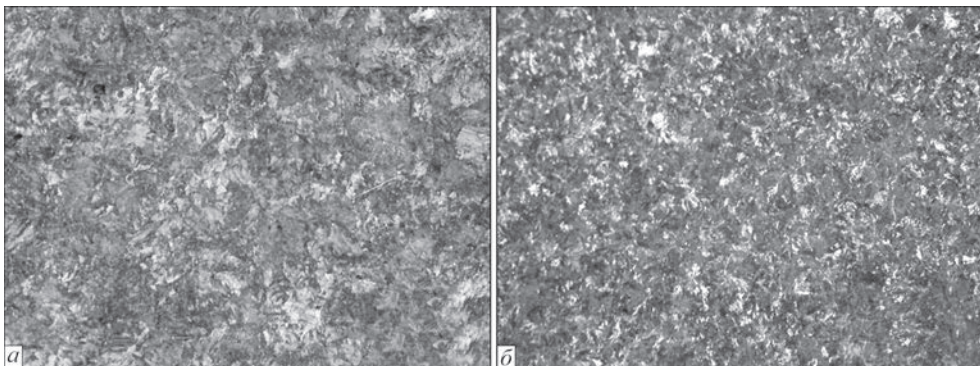


Рис. 6. Мікроструктура (×100) рейкової сталі марки: а – R260; б – R350HT

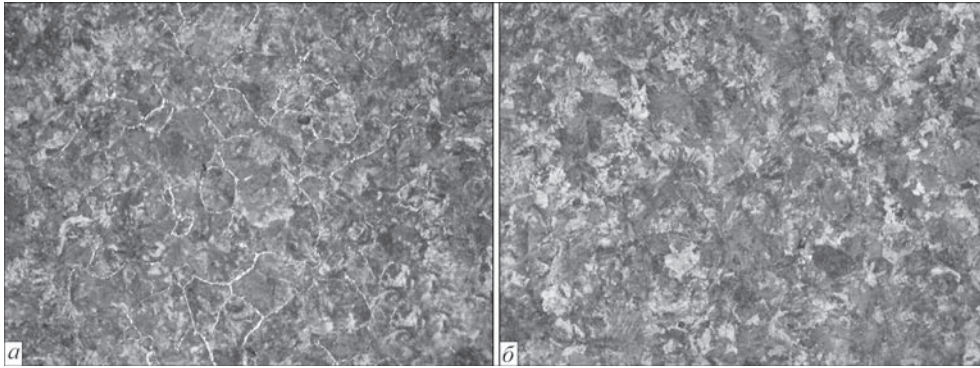


Рис. 7. Мікроструктура ($\times 100$) зварного з'єднання рейок R260 в зоні головки: *a* – лінія з'єднання; *б* – ділянка великого зерна

Крім того, зварні зразки рейок контрольних партій були перевірені засобами УЗК і методом проникаючого контролю відповідно за методиками європейського стандарту. Дефектів в зварних з'єднаннях не виявлено.

Випробування на міцність від втоми. Також відповідно до вимог європейського стандарту всі стики були випробувані на міцність від втоми (рис. 10). Випробування на втому зразків рейок марки сталі R260 та R350HT проведені відповідно до нормативного документа EN 14587-2:2009Е на випробувальній машині ZDM-200Pu, атестованої відповідними державними службами. Тестові зварні стики рейок контрольних партій довжиною 1,2 м випробувано при чистому вигині циклічним навантаженням з максимальними напруженнями циклу 190 МПа та асиметрією циклу навантаження 0,1. База випробувань становила 5,0 млн циклів, а частота навантаження – 5 Гц. Зразки витримали 5 млн циклів без руйнувань.

Досліджено, що в разі використання технології ПО забезпечуються необхідні, згідно європейського та українського стандарту, механічні, властивості міцності і необхідна структура з'єднань.

Аналіз результатів досліджень механічних властивостей і структури зварних з'єднань показує високу стабільність показників при механічних випробуваннях та оцінці структурних змін в зварних з'єднаннях. Ширина ЗТВ знаходиться в області більш низьких значень. Це обумовлено тим, що за стандартом України стріла прогину повинна бути не менше 30 мм в порівнянні зі стрілою прогину 20 мм, передбаченого європейським стандартом. Для отримання більш високих пластичних властивостей за стандартом України розроблено режими зварювання з контрольованим енерговкладенням. Це дозволяє отримати більш дрібнозернисту структуру в центральній частині зварного шва при допустимому відхиленні твердості. Тому ширина ЗТВ контрольних партій зварних

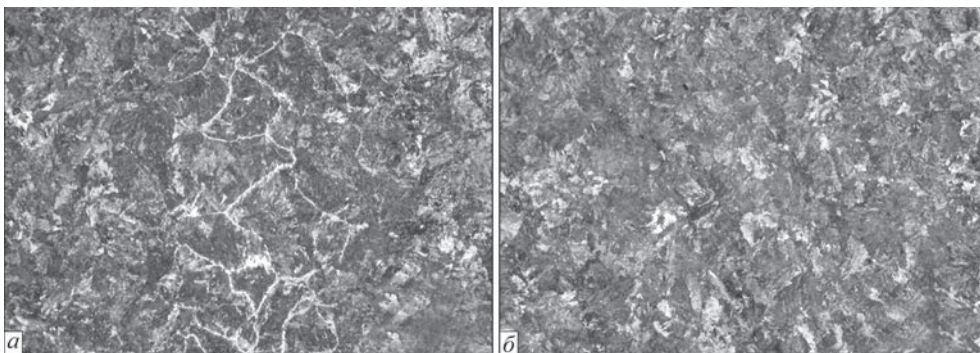


Рис. 8. Мікроструктура ($\times 100$) зварного з'єднання рейок R350HT в зоні головки: *a* – лінія з'єднання; *б* – ділянка крупного зерна

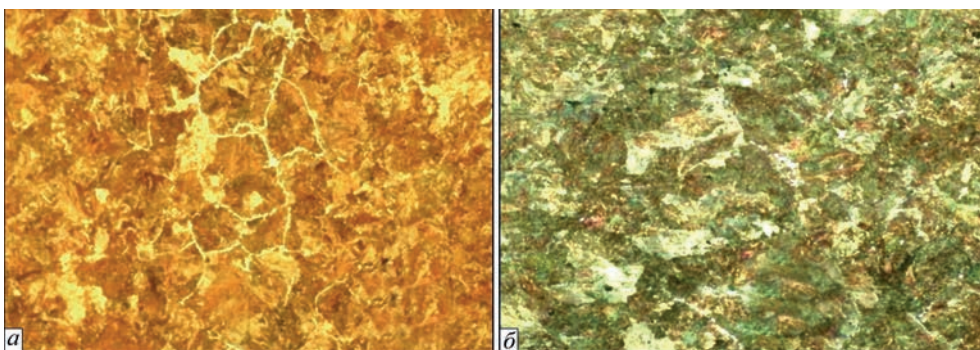


Рис. 9. Мікроструктура ($\times 100$) зварного шва рейки марки: *a* – M76 та *б* – K76Ф по лінії з'єднання

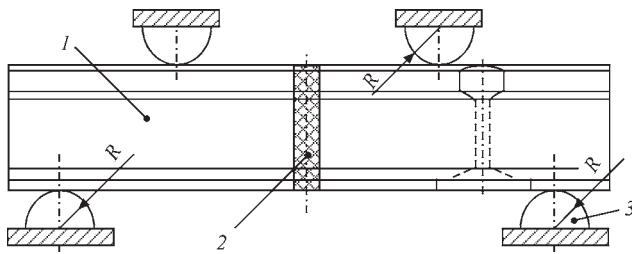


Рис. 10. Випробування зварного з'єднання на міцність від утоми: 1 – вид збоку; 2 – зварний шов; 3 – опора

зразків рейок становить 27...31 мм, що знаходиться в полі допуску цього параметра, але в області, близькою до мінімально допустимої (20 мм), при цьому твердість залишається в допустимих європейським стандартом межах.

На підставі проведених експериментальних досліджень механічних властивостей і структури металу контрольних партій рейок були визначені оптимальні значення показників, які задовольняють вимогам розглянутих стандартів.

У структурі металу ЗТВ всіх партій рейок не були помічені включення мартенситного і бейнітного типу. Для прогнозування ймовірної появи таких структур при можливих встановлених режимах зварювання була використана математична модель розрахунку температурного поля при контактному зварюванні оплавленням залізничних рейок [6, 7].

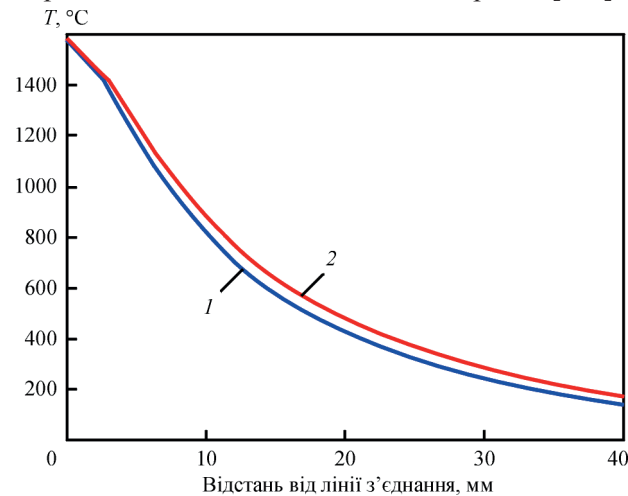


Рис. 11. Зварювання рейок марки сталі R350HT (1) та R260 (2) зі зниженим енерговкладенням

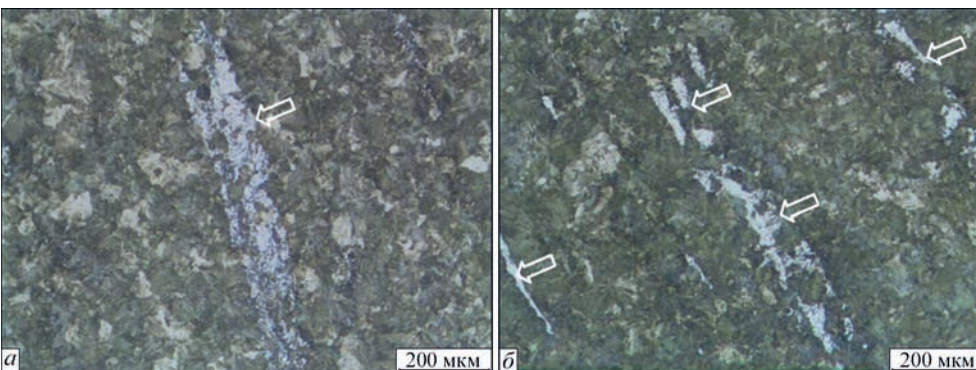


Рис. 12. Мартенситні структури в околшовній зоні зварних з'єднань рейок R350HT (а) та R260 (б) при зварюванні зі зниженим енерговкладенням

Як відомо, ширина ЗТВ і її допустиме відхилення згідно європейського стандарту вказані в табл. 1. З урахуванням виконаних розрахунків за допомогою математичного моделювання слід визначити мінімально допустиму ширину ЗТВ для досліджених рейкових сталей. Також було встановлено, що зменшувати нагрів і загальне тепловкладення потрібно в розумних межах, оскільки це супроводжується збільшенням швидкості охолодження, подрібненням зерна металу в ЗТВ, при цьому підвищується ймовірність формування дефектів типу оксидних плям в площині з'єднання [8]. Крім того, виникає небезпека появи гартівних структур, таких як мартенсит та бейніт в металі ЗТВ.

З використанням розробленої математичної моделі, а також за допомогою проведених експериментів встановлено, що появи в металі ЗТВ бейнітних та мартенситних структур при зварюванні високолегованих і високоміцних рейок типу R260 і R350HT можна очікувати при формуванні температурних полів з шириною ЗТВ близько 17...20 мм, наведених на рис. 11. Зниження нагріву і зменшення величини ЗТВ в більшій мірі позначається на структурі рейок типу R260, схильність даної сталі до появи гартівних структур, таких як мартенсит і бейніт, велика за рахунок їх високого легування Mn.

Ширина ЗТВ в цьому випадку становить 17...20 мм. Експериментально підтверджено, що при такому нагріванні, зі зменшенням ширини ЗТВ менше 20 мм в зварному з'єднанні рейок R260 присутні мартенситні структури, що показано на рис. 12. Мартенситно-аустенітні структури розташовувалися як уздовж лінії прокату, так і в довільному об'ємі металу [9]. При зварюванні рейок марки R350HT та K76Ф поява мартенситних структур спостерігалась при зниженні нагріву і отримання ЗТВ нижче 18 мм, що нижче допустимого європейським стандартом.

Найбільш високі показники механічних і властивостей міцності, а також відсутність гартівних структур були отримані при зварюванні високоміцних рейок з отриманням наступної області температурних полів, які представлені на рис. 3.

При визначенні режимів зварювання високоміцних і високолегованих рейкових сталей перерахованих типів слід уникати формування температурних полів (рис. 11), відповідних мінімально допустимій ширині ЗТВ, регламентованої в європейському стандарті. Для цього необхідні

системи управління, які дозволяють контролювати енерговкладення при зварюванні.

Висновки

Контрольні партії рейок українського виробництва марки М76 та К76Ф, а також рейок європейського виробництва марки R260 та R350НТ, зварених на оптимальних режимах відповідно до стандарту України ТУ У 27.1-40081293-002:2016 повністю задовольняють вимогам європейського стандарту EN 14587-2 2009.

Було встановлено, що при розробці технології зварювання високоміцних рейок необхідно враховувати ширину ЗТВ як контрольований параметр, що істотно впливає на якість зварного з'єднання.

Експериментальним шляхом, а також за допомогою розробленої методики математичного моделювання процесу нагріву металу при контактному зварюванні оплавленням визначений вплив можливих відхилень основних параметрів зварювання, які регламентуються чинним українським стандартом, на формування температурних полів і якість з'єднань на різних режимах зварювання пульсуючим оплавленням.

Було встановлено, що для отримання високих механічних показників при зварюванні високоміцних рейок марок сталей К76Ф, R260 та R350НТ необхідно використовувати технології, які забезпечують висококонцентрований нагрів з обмеженим енерговкладенням. Такий нагрів забезпечує технологія пульсуючого оплавлення. При цьому слід уникати формування ЗТВ шириною менше 20 мм, яка регламентується європейським стандартом як мінімально допустима.

В рамках розглянутих стандартів були визначені оптимальні програми управління основними параметрами зварювання, що забезпечують необхідні показники міцності і структури високолегко-

ваних і високоміцних рейок досліджуваних партій. Всі перераховані партії рейок були зварені з використанням основних параметрів зварювання, що відповідають стандарту України, з урахуванням їх коригування в допустимих межах.

Рекомендується внести в стандарт України визначення і контроль ширини ЗТВ після зварювання з урахуванням властивостей рейкової сталі, яка використовується в Україні.

Список літератури/References

1. Кучук-Яценко С.И. (1992) *Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением*. Киев, Наукова думка. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (1992) *Continuous flash-butt welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, A.V., Shvets, V.I. (2008) Technology and equipment for flash-butt welding of high-strength rails. *The Paton Welding J.*, **11**, 111-120.
3. ТУ У 27.1-40081293-002:2016.-ТУ У 27.1-40081293-002:2016. *Рейки нові зварені для залізниць*. Дніпропетровське НКТБ КГ філії НДКТИ АТ «Укрзалізниця». TU U 27.1-40081293-002:2016: *New welded rails for railways: Dnipropetrovske NKTB, NDKTI PJSC Ukrzaliznytsya* [in Ukrainian].
4. (2009) *Eurostandard EN_14587-1, -2*.
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, O.V., Bogorsky, M.V. et al. (2002) *Flash-butt welding method*. Pat. 46820, Ukraine, Int. Cl. 6B23K11/04, C2, Pat. 2222415, RF (2003); Pat. 6.294.752, USA (20.06.01); Pat. ZL001016772/5 (2004), PRC.
6. Weingrill, L., Enzinger, N. (2017) Temperature Fields evolution during flash-butt welding of railway rails. *Materials Science Forum*, **879**, 2088–2093.
7. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2018) Mathematical modeling in continuous flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, **10**, 2-8.
8. 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. *Ibid.*, **9**, 2-8.
9. Забильский В.В., Никонова Р.М. (2005) Вязко-хрупкий переход в сталях при околосolidusных температурах. Механизм охрупчивания границ зерен. *Физика металлов и металловедение*, **99**, **3**, 19. Zabitsky, V.V., Nikonova, R.M. (2005) Ductile-brittle transition in steels at near-solidus temperatures. Mechanism of embrittlement of grain boundaries. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **99**(3), 19 [in Russian].

EVALUATION OF QUALITY OF WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH RAILWAY RAILS OF MODERN PRODUCTION TAKING INTO ACCOUNT THE REQUIREMENTS OF UKRAINIAN AND EUROPEAN STANDARDS

S.I. Kuchuk-Yatsenko, E.V. Antipin, O.V. Didkovsky, V.I. Shvets, O.V. Kavunichenko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

On most heavy-duty railways of Ukraine, resistance butt welding is the dominant process for joining rails. Welding is performed in special shops and field conditions during the construction of new main lines and repair of existing railways. On the railways of Ukraine and other countries of the world, technologies and equipment are constantly being improved in connection with the use of new generations of high-strength rails with an increased wear resistance in accordance with the requirements to high-speed main lines. In the last decade, the developed countries of the world are revising the basic standards governing the quality of rail steels and requirements to mechanical properties of welded rail joints, taking into account their use on heavy-duty and high-speed main lines. One of the specified tasks is the adaptation of the Ukrainian standard TU U 24.1-40075815-002: 2016 (for stationary and mobile welding machines), which determines the requirements to the quality of welded joints of high-strength rails, to the acting European standard EN 14587-1 2007 (for stationary welding machines) and EN 14587-2 2009 (for mobile welding machines). 9 Ref., 4 Tabl., 12 Fig.

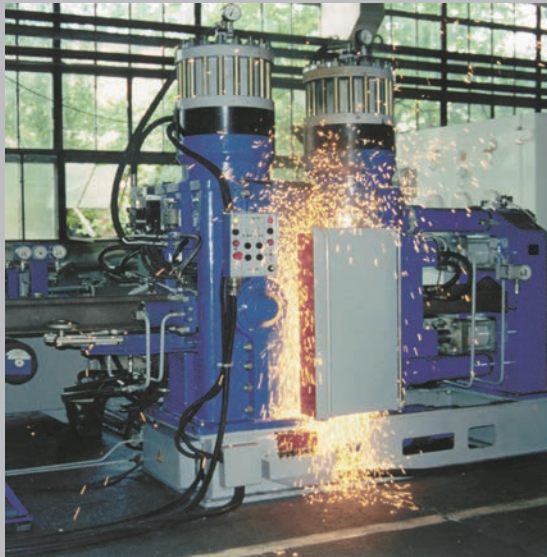
Keywords: resistance butt welding, railway rails, high-strength rail steels, pulsating flashing, heat-affected-zone, temperature fields, defects in rails, quality control, seamless track, defects in rails

Надійшла до редакції 24.06.2020

FLASH-BUTT WELDING

USING PULSED FLASHING OF HIGH-STRENGTH RAILS

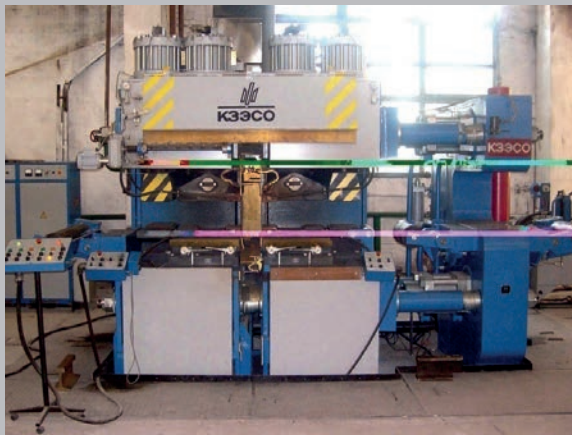
- > for essential expansion of continuous rail network («velvet way») the novel technological solutions on welding of high-strength rails with tension, realized employing stationary or mobile machines of new generation, are developed and successfully fulfilled.



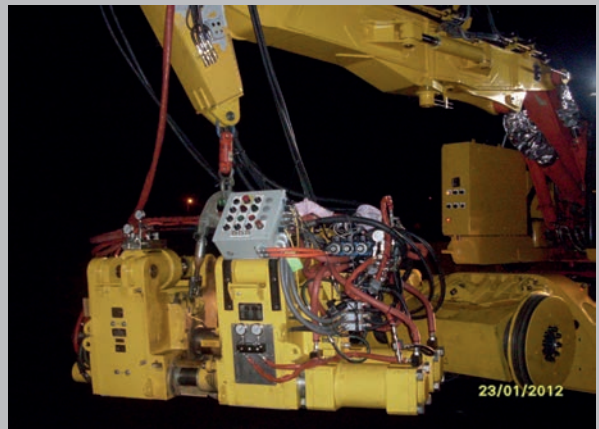
Stationary machine K1000



Mobile machine K922-1



K924 machine for rail switch welding



K390 machine for welding of rails with infinite length tension

| Characteristics | Machine model | | | | | | |
|----------------------|---------------|------|------|------|------|-------|-------|
| | K355 | K900 | K920 | K922 | K924 | K1003 | K1100 |
| Productivity, weld/h | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 20 |
| Upset force | 45 | 45 | 100 | 120 | 150 | 100 | 90 |
| Power, kW | 150 | 150 | 210 | 210 | 300 | 450 | 300 |



The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine