

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

## Пояснювальна записка

до дипломної роботи

*магістра*

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Галузь знань **13 Механічна інженерія**

Шифр і назва галузі знань

Напрямок підготовки (спеціальність): **132 «Матеріалознавство.  
Відновлення та технічний сервіс автомобілів»**

Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: **«Дослідження технології стикового зварювання залізничних  
рейок»**

Шифр **МРТАМ 2116116.000 ПЗ**

Виконав: студент 2-го курсу,  
група МТВАм-20-1

  
Підпис

В. С. Паска  
Ініціали, прізвище

Керівник *к.т.н., доц. каф ТАМ.*

  
Підпис

С. Ф. Посонський  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри ТАМ *д.т.н., проф.*

  
Підпис

О. В. Диха  
Ініціали, прізвище

6 12 \_\_\_\_\_ 2021 р.

Хмельницький, 2021

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства  
Освітній рівень магістр

Спеціальність 132 «Матеріалознавство»

Спеціалізація «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ТАМ

  
Диха О.В.  
19 жовтня 2021 року

## З А В Д А Н Н Я НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Пасці Віталію Сергійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Дослідження технології стикового зварювання залізничних рейок*

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 25.08.2021 р. № 118 (Д 25)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 7.12.2021 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали переддипломної практики; зразки зварних з'єднань залізничних рейок.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

- 1) Аналітичний огляд методів формування безстикового залізничного шляху
- 2) Обладнання та методика проведення дослідження
- 3) Результати досліджень
- 4) Висновки, рекомендації

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

*Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.*

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 19 жовтня 2021 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналітичний огляд методів формування безстиккового залізничного шляху	30.10.21	вик
2	Обладнання та методика проведення дослідження	15.11.21	вик
3	Результати досліджень	23.11.21	вик
4	Висновки, рекомендації	4.12.21	вик
5	Оформлення пояснювальної записки	6.12.21	вик
6	Дітиця до захисту	7.12.21	вик
7	Запис магістерської роботи	11.12.21	

  
Підпис

Паска В.С.  
Ініціали, прізвище

  
Підпис

Посонський С.Ф.  
Ініціали, прізвище

## РЕФЕРАТ

*Структура та обсяг пояснювальної записки.* Дипломна робота на тему «**Дослідження технології стикового зварювання залізничних рейок**» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 31 найменування, розміщених на 4 сторінках, та 2 додатків розміщених на 27 сторінках. Роботу викладено на 89 сторінках, з них 81 сторінок основного тексту, на яких розміщено 36 рисунків і 19 таблиць.

Загальний термін служби безстикової колії безпосередньо залежить від довговічності елементів його конструкції, з яких одними з найбільш відповідальних є зварні стики рейок.

Кількість гостродефектних зварних стиків рейок, які виявляються в експлуатації засобами дефектоскопії, з кожним роком збільшується. Так само щорічно збільшується кількість зламів рейок в області зварних стиків за дефектами зварювання.

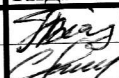
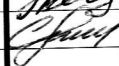


У зв'язку з цим важливим є дослідження технології зварювання залізничних рейок і вивчення впливу режимів зварювання на структуру металу і якість зварного стику, що і є метою роботи.

При стиковому зварюванні можуть виникати труднощі отримання якісних зварних з'єднань обумовленні швидким нагріванням зварного стику, що забезпечується методом пульсуючого оплавлення, та інтенсивним охолодженням зони термічного впливу з формуванням високоміцного шару зі структурою мартенситу на місці мікрооб'ємів з підвищеним вмістом хрому, нікелю та вуглецю.

*Ключові слова:* РЕЛЬСОВА СТАЛЬ, РЕЙКА, СТИКОВЕ З'ЄДНАННЯ, ЗВАРНИЙ ШОВ, ЗОНА ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ, МІКРОСТРУКТУРА, МІКРОТВЕРДІСТЬ.

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ БЕЗСТИКОВОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ШЛЯХУ	10
1.1 Класифікація залізничних рейок	10
1.2 Хімічний склад і механічні властивості рейкової сталі	12
1.3 Способи зварювання рейок	17
1.3.1 Ручне дугове зварювання рейок	17
1.3.2 Термітне зварювання рейок	22
1.3.3 Електродугове зварювання плавким мундштуком	28
1.3.4 Газопресове зварювання рейок	31
1.3.5 Контактно-стикове зварювання	33
1.4 Дефекти, що утворюються при стиковому зварюванні	40
Висновки по першому розділу	43
РОЗДІЛ 2. ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	44
2.1 Загальна методологія експериментальної оцінки властивостей зварного шва	44
2.2 Визначення хімічного складу сталі рейок	44
2.3 Обладнання для вирізки зразків	45
2.4 Зварювання зразків	47
2.5 Полірування зразків	54
2.6 Вивчення неметалевих включень наплавлених зразків	56
2.7 Вимірювання твердості	57
Висновки по другому розділу	60

МРТАМ 2116116.000 ПЗ								
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	Дослідження технології стикового зварювання залізничних рейок	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Паска		7.12.21				
Перевір.		Посонський		7.12.21			4	89
Н.контр.		Бабак				ХНУ МТВАм-20-1		
Затвер.		Диха						

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	61
3.1 Хімічний склад зразків з рельсової сталі	61
3.2 Вивчення мікроструктури та неметалевих включень зварних зразків	62
3.3 Дослідження мікротвердості	77
Висновки по третьому розділу	82
ВИСНОВКИ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	85
ДОДАТКИ	89

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

## ВСТУП

Актуальність теми. Безстиківий або «оксамитовий» шлях на сьогодні вважається найбільш прогресивною конструкцією на залізничному транспорті в усьому світі. Його головна перевага – зниження зносу коліс і верхньої будови колії, яке відбувається через стики між рейками в традиційних системах.

Крім відсутності стуку коліс, він також дозволяє підвищити швидкість руху і комфорт для пасажирів. Україна – одна з передових країн із впровадження даної технології [1].

Основна перевага «оксамитового» шляху – повна (або майже повна) ліквідація стиків, які є причиною додаткових ударних динамічних впливів коліс на рейки. Стики призводять до швидкого накопичення дефектів у рейках і колесах, і в кінцевому результаті – до передчасного зносу коліс рухомого складу і розладу колії.

Як зазначається в журналі «Наука та інновації», ліквідація стиків «веде до значного зниження динамічних сил взаємодії, зниження опору руху поїздів (в середньому на 10%), підвищення термінів служби елементів верхньої будови колії (від 10 до 25 %), скорочення витрат на ремонт колії та рухомого складу (до 35 %), економії металу на стикові з'єднання (5–7 т на 1 км)» [2].

Вважається, що перша зварна колія була використана в Німеччині у 1924 році. Одними з передових також були залізниці США та СРСР. Звичайним явищем на магістральних лініях «оксамитова» колія стала в 1950 – 1960-х роках. До 1990-го її протяжність в масштабах пострадянських держав становила 29 % мережі (55,5 тис. км) [1].

Зараз частка зросла і процес переведення колій зі звичайних на «оксамитові» активно триває. Україна завжди була однією з передових щодо

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

впровадження цієї прогресивної технології. У 1995 році таких колій в нашій країні було 14,5 тис. км, або 46,7 %. До 2010-го протяжність зросла до 20 тис. км, і їхня частка становила 67 %.

Дана конструкція, зокрема, дозволила запустити рух прискорених пасажирських поїздів до Євро-2012. Їхня швидкість на деяких ділянках склала 160 км/год.

У 2000-х роках українські наука, промисловість і залізниця зробили великий стрибок в плані розвитку технології безстикової колії. Варто зазначити, що одне з українських підприємств – Каховський завод електрозварювального устаткування «КЗЕСО» – вийшов на позиції світового лідера у виробництві машин для облаштування «оксамитової» колії.

Вироблене в Україні обладнання знайшло застосування в 78 країнах, в тому числі, таких залізничних державах, як США, Китай, Індія, Австралія, а також в країнах Європейського Союзу та СНД. На експорт було поставлено понад 2 тис. машин. Українські виробники займали 60% всього світового парку стаціонарних і 95% пересувних рейкозварювальних машин. Активну участь в розробках брав Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України.

Робота триває і сьогодні. До 2020 року зварні рейки вже встановлено на 78,1% головних колій, тобто на 20 тис. 856 км. У 2021-му планується замінити ще майже 350 км ланкових колій на безстикові [1, 3].

Торік «КЗЕСО» поставило Укрзалізниці чотири нових рейкозварювальних комплекси КСМ007. Вони побудовані на базі вантажних автомобілів Volvo, здатних також пересуватися по рейках.

У США технологія безперервних зварних рейок отримала назву CWR (Continuous Welded Rail). Іноді такі рейки ще називають «стрічковими».

Полягає технологія в тому, що рейки стандартної довжини зварюють до стану безперервної конструкції, довжина якої може сягати декількох кілометрів.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Не дивлячись на те, що безстикові колії характеризуються меншими витратами на обслуговування, головна проблема їхньої експлуатації пов'язана з температурними розширеннями. Це загрожує викидами колії. Питання вирішується шляхом застосування вставок або зрівняльних прольотів зі звичайних рейок, а також пильним моніторингом стану колії в найбільш спекотні літні дні.

У Німеччині також є досвід фарбування рейок в білий колір для меншого їх нагрівання.

Обмежувати застосування суцільнозварних рейок можуть і криві малого радіуса.

Підвищити швидкість на безстикових магістралях дозволяють вдосконалені стрілочні переводи, які забезпечують швидкість руху до 160–200 км/год замість 120 км/год. Подібні комплекти випускаються на АТ «Дніпропетровський стрілочний завод». Станом на початок 2021 року було виготовлено і встановлено в діючу колію понад 800 комплектів таких стрілочних переводів.

У технічному комплексі шляхового господарства безстиковий залізничний шлях представляє собою складно напружену дорого вартісну конструкцію, на утримання та експлуатацію якої витрачаються великі економічні, технічні та людські ресурси. Яскравим прикладом

Для нормального функціонування мережі залізниць одним із важливих чинників є підвищення ефективності експлуатації безстикової колії.

Невід'ємною складовою безстикової колії є рейки і їхні зварні стики. До якості рейкової сталі висуваються високі вимоги, особливо в сучасних умовах неухильного зростання вантажонавантаженості залізниць, швидкості руху і навантажень на вісь. До зварних стиків рейок висуваються не менш жорсткі вимоги. Вихід з ладу зварного стику рейок призводить до великих економічних витрат.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальний термін служби безстикової колії безпосередньо залежить від довговічності елементів його конструкції, з яких одними з найбільш відповідальних є зварні стики рейок.

Кількість гостродефектних зварних стиків рейок, які виявляються в експлуатації засобами дефектоскопії, з кожним роком збільшується. Так само щорічно збільшується кількість зламів рейок в області зварних стиків за дефектами зварювання.

У зв'язку з цим важливим є дослідження технології зварювання залізничних рейок і вивчення впливу режимів зварювання на структуру металу і якість зварного стику, що і є метою роботи.

Згідно мети роботи планується вирішити наступні завдання.

1. Виконати аналіз технологій зварювання залізничних рейок з визначенням переваг та недоліків.
2. За обраною технологією виконати зварювання зразків з рейкової сталі за різними режимами.
3. Визначити фізико-механічні властивості отриманих зразків з виявленням найкращих показників.
4. Отримати оптимальні параметри технології стикового зварювання залізничних рейок.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ БЕЗСТИКОВОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ШЛЯХУ

## 1.1 Класифікація залізничних рейок

Рейки – це високотехнологічний продукт, виконаний із вуглецевої сталі методом гарячого прокату, загартований та легований відповідними добавками. Середня довговічність рейки – як мінімум 25-30 років, відповідно вимоги до цієї продукції дуже суворі.

Сортамент рейок має багато різновидів, що класифікуються за застосуванням і формою профілю:

- Рейки залізничні широкої колії:
  - Р75, Р65, Р50 за стандартами України і СНД ДСТУ 4344, ГОСТ Р 51685, ГОСТ 34222;
  - 46 E1, 46E2, 46E3, 46E4, 49E1, 49E2, 49E3, 49E4, 50E1, 50E2, 50E3, 50E4, 50E5, 50E6, 52E1, 54E1, 54E2, 54E3, 55E1, 56E1, 60E1, 60E2 за європейським стандартом EN 13674-1;
  - UIC 60, UIC 54, UIC 50 згідно з американським стандартом UIC 860;
  - 115RE, 136RE за американським стандартом AREMA;
- Рейки гострякові для стрілочних переводів (наприклад, ОР50, ОР65 по ДСТУ 4814 і їх аналоги);
- Залізничні рейки вузької колії Р18, Р24, Р33, Р34 та інші профілі;
- Рейки трамвайні жолобчасті Т62;
- Кранові рейки КР70, КР80, КР100, КР120, КР140 по ДСТУ 2484/ ГОСТ 4121 і аналогічна продукція за альтернативними стандартами;

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виробництво залізничних рейок, призначених для ланкових і безстикових колій залізничних доріг і виробництво стрілочних переводів, регламентується за стандартами України і СНД ДСТУ 4344, ГОСТ Р 51685, ГОСТ 34222.

- Р50; Р65; Р65К (для зовнішніх ниток кривих ділянок колії); Р75;
- В - рейки термозміцнені вищої якості; Т1, Т2 - рейки термозміцнені; Н - рейки нетермозміцнені;
  - з отворами на обох кінцях; без отворів;
  - М - з мартенівської сталі; К - з конвертерної сталі; Е - з електросталі;
  - із злитків; з безперервно-литих заготовок (НЛЗ);
  - з вакуумованої сталі; ті, що пройшли контрольоване охолодження; ті, що пройшли ізотермічну витримку.
- за призначенням: рейки низькотемпературної надійності (НН); рейки підвищеної зносостійкості і контактної витривалості (ЗК); рейки для швидкісного суміщеного руху (СС); рейки для високошвидкісного руху (ВС);
  - за термічним зміцненням: термозміцнені, ті, що піддавались диференційованому зміцненню по перетину рейки (ДТ); термозміцнені, ті, що піддавались об'ємному загартуванню та відпуску (ОТ); не термозміцнені (НТ) [4].
  - за класом міцності (мінімальної твердості): 370 (термозміцнені); 350 (термозміцнені); 320 (нетермозміцнені); 300 (нетермозміцнені); 260 (нетермозміцнені);
  - за класом точності виготовлення профілю (класу профілю): Х; У;
  - за класом прямолінійності: А; В; С;
  - за класом якості поверхні: Е, Р [4].

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.2 Хімічний склад і механічні властивості рейкової сталі

Склад основних марок, що використовуються для виробництва рейок, контролюється ДСТУ 4344:2004. Головний складовий елемент всіх застосованих сплавів — залізо, крім нього до складу включають ряд компонентів:

- Для поліпшення ударної в'язкості використовують марганець в кількості від 0,26 до 1%. Використання марганцю обумовлене збереженням пластичності сплавів при підвищенні твердості, іржостійкості.
- Для підвищення механічних характеристик на 45-50% додається вуглець. Базова частка в сплавах для рейкових сталей від 0,7 до 0,83%.
- Видаляти кисневі домішки допомагає кремній, в співвідношенні від 0,17 до 0,4%. Він же покращує внутрішню кристалічну структуру матеріалу. За офіційними даними, кремній в складі рейкових сталей підвищує довговічність конструкції в півтора рази і знижує ризик появи ліквіційних плям.
- Для надання необхідної контактної міцності в деяких сплавах долучають ванадій, в процентному співвідношенні від 0,01 до 0,08%. З'єднуючись з вуглецем, ванадій збільшує межу витривалості.

Часом як додатковий домішок використовується алюміній і титан, проте це — виняткові випадки. Титан призначений для підвищення міцності сталевого сплаву, алюміній допомагає знизити вагу рейкового профілю без втрати якісних характеристик.

Хімічний склад найбільш вживаних рельсових сталей наведено в таблиці 1.1.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1. – Хімічний склад рельсових сталей

Марка сталі	Вагова частка елементів, %								
	C	Mn	Si	V	N	Cr	P	S	AL
	не більше								
90ХАФ	0,83-0,95	0,75-1,25	0,25-0,60	0,08-0,15	0,01-0,02	0,2-0,6	0,0	0,02	0,004
76ХАФ	0,71-0,82	0,75-1,25	0,25-0,45	0,05-0,15	0,01-0,02	0,2-0,8	0,02	0,02	0,004
76ХФ	0,71-0,82	0,75-1,25	0,25-0,60	0,03-0,15	-		0,02	0,02	0,004
76ХСФ	0,71-0,82	0,75-1,25	0,30-1,10	0,05-0,15	-	0,5-1,25	0,02	0,02	0,004
90АФ	0,83-0,95	0,75-1,25	0,25-0,60	0,08-0,15	0,01-0,02	-	0,02	0,02	0,004
76АФ	0,71-0,82	0,75-1,25	0,25-0,60	0,05-0,15	0,01-0,02	-	0,02	0,02	0,004
76Ф	0,71-0,82	0,75-1,25	0,25-0,60	0,03-0,15	-	-	0,02	0,02	0,004

Примітка – До позначення марки сталі попереду додають літеру «К» (конверторна) або «Е» з електропечі.

Флокени в рейках не допускаються. При масовій частці водню в рідкій сталі перед розливанням не більше 0,00015% допускається не проводити протифлокенну обробку заготовок і рейок; понад 0,00015% до 0,00025% протифлокенна обробка заготовок або рейок обов'язкова. При відсутності контролю масової частки водню в рідкій сталі або при масовій частці водню понад 0,00025% проведення протифлокенної обробки рейок обов'язкове [5].

Низький вміст кисню в сталі визначає її високу чистоту по неметалевих включеннях. При цьому в нашій країні вживаються додаткові технологічні заходи (глибоке розкислення металу і шлаку в печі, модифікація силікокальцієм в ковші та ін.), що дозволяють забезпечити мінімальне забруднення сталі киснем і відповідно неметалевими включеннями. Звичайно, для отримання необхідного низького вмісту водню і кисню в рейковій сталі необхідним є вакуумування, проте різні варіанти розкислення і

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

ведення плавлення можуть забезпечити необхідний експлуатаційний рівень вмісту кисню і водню.

Масова частка кисню не повинна перевищувати 0,002 - в рейках категорії В, 0,004% - в рейках категорії Т1, Т2 і Н з конверторної і електросталі. Норма граничного вмісту азоту в деяких зарубіжних стандартах цілком здійсненна.

Класифікацію за категоріями рейок, що виготовляються за даним стандартом, наведено в таблиці 1.2. Механічні властивості рейок та характеристики наведено в таблицях 1.3 – 1.6.

Таблиця 1.2. – Категорії рейок

Позначення категорії	Характеристика категорії рейок
ДТ3703К	Диференційовано термозміцнені термоупрочненні з прокатного / окремого нагріву підвищеної зносостійкості і контактної витривалості
ОТ3703К	Об'ємно термозміцнені підвищеної зносостійкості і контактної витривалості
ДТ350ВС	Диференційовано термозміцнені з прокатного / окремого нагріву для високошвидкісного пасажирського руху
ДТ350СС	Диференційовано термозміцнені з прокатного / окремого нагріву для швидкісного суміщеного руху
ОТ350СС	Об'ємно термозміцнені для швидкісного суміщеного руху
ДТ350НН	Диференційовано термозміцнені з прокатного / окремого нагріву низькотемпературної надійності
ДТ350	Диференційовано термозміцнені з прокатного / окремого нагріву загального призначення

## Продовження Таблиці 1.2

OT350	Об'ємно термозміцнені загального призначення
HT320BC	Нетермозміцнені для високошвидкісного пасажирського руху
HT320	Нетермозміцнені високої міцності загального призначення
HT300	Нетермозміцнені підвищеної міцності загального призначення
HT260	Нетермозміцнені звичайної міцності загального призначення
Примітка – В позначеннях категорій рейок використано скорочення, вказані в 1.1.	

Таблиця 1.3. – Категорії рейок залежно від марки сталі і термічної обробки рейок

Марка сталі	Категорії рейок за термічним зміцненням		
	ДТ	ОТ	НГ
90ХАФ	ДТ3703К	-	-
90АФ	ДТ3703К	ОТ3703К	-
76ХАФ	ДТ350НН	-	-
76АФ	ДТ350НН	ОТ350НН	-
76ХФ	ДТ350ВС ДТ350СС ДТ350		HT300
76ХСФ	—	—	HT320BC HT320

Таблиця 1.4. – Механічні властивості рейок при випробуванні на розтягнення і ударний вигин

Категорія рейок	Тимчасовий опір, Н/мм	Межа плинності, Н/мм	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %	Ударна в'язкість, Дж/см
	не менше				
ОТ3703К	1280	870	8,0	20,0	15
ДТ3703К	1280	870	9,0	14,0	15

## Продовження таблиці 1.4

ОТ350 ОТ350НН ОТ350СС	1180	800	8,0	25,0	25
ДТ350 ДТ350НН ДТ350СС ДТ350ВС	1180	800	9,0	25,0	15
НТ320 НТ320ВС	1080	600	9,0	-	-
НТ300	980	510	8,0	-	-
НТ260	900	500	8,0	-	-

## Примітки

Ударну в'язкість для рейок категорії ОТ350НН і ДТ350НН визначають при температурі зразків мінус 60 °С, а для рейок решти категорій – при кімнатній температурі.

Таблиця 1.5. – Твердість термозміцнених рейок

Методи визначення	ОТ3703К	ДТ3703К	ОТ350 ОТ350НН ОТ350СС	ДТ350 ДТ350НН ДТ350СС ДТ350ВС
На поверхні катання головки (точка 1)	370-409	370-409	352-405	352-405
На глибині 10 мм від поверхні катання головки по вертикальній осі рейки (точка 2), не менше	363	363	341	341
На глибині 10 мм від поверхні викришування рейки (точки 3 і 4), не менше				
На глибині 22 мм від поверхні катання головки по вертикальній осі рейки (точка 5), не менше	352	352	321	321
В шийці (точка 6), не більше	388	352	388	341
В підшві (точки 7 і 8), не більше		388		363

									Арк.
									16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 2116116.000 ПЗ				

Таблиця 1.6 – Висота падіння вантажу і температура проби при копрових випробуваннях

Категорія рейок	P50	P65, P65K	P75	Температура проби, °С	Необхідний результат випробувань
ДТ3703К, ОТ3703К	—	4,2	—	Мінус (60±5)	Відсутність зламу і тріщин
ДТ350, ОТ350	4,0	5,0	6,0		
ДТ350СС, ДТ350ВС,	—	5,0	—		
ДТ350НН, ОТ350НН	—	9,0	—		
НТ320, НТ320ВС	—	7,3	—	Від 0 до 40	

### 1.3 Способи зварювання рейок

#### 1.3.1 Ручне дугове зварювання рейок

Зварювання рейок проводиться на постійному струмі покритими електродами або механізованим напівавтоматичним способом. Живлення здійснюється від електрозварювального обладнання (випрямляча, інвертора) або спеціалізованих автономних дизельних зварювальних агрегатів (наприклад, Shindaiwa DGW500). Останні знаходять більш широке застосування через відсутність залежності від енергоносіїв і багато часу автономної роботи без дозаправки.

Для зварювання рейок використовують електроди різних марок (зокрема УОНІ 13/55А, УОНІ 13/85) [6], а також дріт суцільного перерізу або порошковий газозахисний/самозахисний дріт з тимчасовим опором наплавленого металу згідно з нормами та ГОСТами.

Підготовка рейок до зварювання. Складання стиків під зварювання, як правило, роблять на шпалах. Кінці рейок обрізають по косинці механічними

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

засобами або газо-полум'яним способом. Після обрізки газо-полум'яним способом торці рейок необхідно очистити від окалини (рис. 1.1), краї зачистити до металевого блиску.

Стик повинен бути вивірений у вертикальній та горизонтальній площинах, після чого він підноситься на 1,0-1,5 мм на 1 погонний метр [6].

Регулювання величини підйому стику проводять дерев'яними клинами, а перевірку - спеціальною сталеву метровою лінійкою з штифтами, що регулюються по довжині, на кінцях (рис. 1.2).



Рисунок 1.1 – Зачищення стиків



Рисунок 1.2 – Регулювання величини підйому стику рейок

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Зазор між рейками, що зварюються, повинен бути 12-15 мм або 1,5 діаметра електрода з урахуванням товщини шару обмазки. Зварювання виконують на струмах 200-350 А [6].

Зварювання підосви рейки виконують на пластинці, що залишається  
рисунок 1.3.



Рисунок 1.3 – Встановлення пластини

Технологічно зварювання рейкового стику можна розділити на дві основні операції: зварювання підосви, зварювання шийки та головки.

Зварювання підосви роблять на постійно встановленій (сталевій) або знімній мідній пластині. Довжина цієї пластинки на 20 мм більша за ширину підосви рейки, а ширина пластинки 40 мм.

Використовується кілька варіантів таких пластин:

сталева (марка Ст. 3), товщиною 5-6 мм, пластину укладають під стик і щільно підтискають;

комбінована, під стик укладають сталеву пластинку завтовшки 2 мм, а під неї мідну підкладку;

Керамічна підкладка з канавкою, що підтискається безпосередньо під стик.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кращі результати дає застосування керамічної та комбінованої пластинок.

Підшва рейки – найбільш чутливе місце зварного стику, де особливо яскраво проявляються низька якість наплавленого металу та інші похибки зварювання.

При ванному способі зварювання рейок дуже важливо утримати в міжстиковому зазорі рідкий наплавлений метал і шлак. Для цього застосовують спеціальні мідні та керамічні форми багаторазового користування: нижні – для зварювання підшви та бічні – для зварювання шийки та головки.

Зовні форми мають прямокутну конфігурацію. Внутрішній контур їх відповідає формі ділянки рейки, з якою вони сполучаються. По осі форми є виїмка, яка при зварюванні заповнюється рідким наплавленим металом з утворенням посилення стику.

При встановленні форм їх вісь поєднують із зазором стику, а бічні форми, крім того, ще й фіксують струбциною (рис. 1.4).

Зазор у місцях сполучення форм із поверхнею рейок не повинен перевищувати 1 мм. В іншому випадку краї форм необхідно обмазати вогнетривкою глиною.

Перед зварюванням стики рейку розігрівають газовими різачками або індукційним обладнанням до температури 400 градусів на довжину близько 100 мм від краю стику.

Зварюючи підшву, шов починають від краю пластинки і, здійснюючи коливальні рухи по перек зазору стику, ведуть його до іншого кінця, ретельно проварюючи кути між торцями рейок і пластинкою. Другий шов слід накладати у протилежному напрямку, починаючи його від краю пластинки.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При виконанні наступних проходів потрібно уважно спостерігати за тим, щоб рідка ванна розплавленого металу розкладалася по всій довжині підосви.



Рисунок 1.4 – Установка бічних форм.

У процесі зварювання коливальні рухи електродом потрібно здійснювати швидко. Закінчити зварювання підосви слід у центрі стику, завдяки чому шов виходить із ухилом від центру до країв, що відповідає профілю рейок. У підосві стику зварний шов повинен мати посилення 2-3 мм, а краї підосви - перекриватися плавним швом. Поверхню шва після заварювання підосви необхідно очистити від шлаку.

Після встановлення бічних форм слід негайно починати наступне зварювання, щоб не допустити значного охолодження стику.

Зварювальна дуга збуджується на місці закінчення зварювання підосви, тобто, біля основи шийки, і ведеться, безперервно заповнюючи наплавленим металом весь зазор. При зварюванні рейок покритим електродом важливо досягти швидкої зміни електрода, або робити

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зварювання в двопостовому режимі, при якому зварювальники змінюють поперемінно один одного.

Закінчуючи зварювання стику, на поверхні катання необхідно наплавити прибуткову частину товщиною 4—5 мм, яка компенсує усадку при кристалізації стику.

Після зварювання, коли стик ще має червоний колір, поверхню його слід ущільнити куванням. Якщо виявлено які-небудь дефекти, наступне підварювання можна робити при температурі стику не менше 300 °С.

Після закінчення зварювання мідні черевики видаляються, а головка рейки проковується, поки вона не охолола. Поки стик не охолонув нижче 350 ° С, необхідно провести термічне зняття напружень, нагрівши зварене з'єднання і навколошовну зону на відстані 100 мм від стику до 600 - 650 ° С з витримкою при цій температурі протягом 10 хв. Після цього нагріту зону треба обкласти теплоізолюючою мінеральною ватою, щоб забезпечити її плавне охолодження.

Головку і подошву рейки зачищають до надання зварному шву відповідного профілю. Всі концентратори напружень, такі, як подрізи на зовнішній поверхні подошви, повинні бути зачищені.

Зварювання рейок електродуговим способом є одним із найпростіших і в той же час економічно вигідних способів. Електродуговий спосіб не вимагає додаткових витрат на газозахисні суміші чи інші компоненти, а також їх логістику.

### 1.3.2 Термітне зварювання рейок

Терміт, що вживається для зварювання рейок, виготовляється з залізної окалини - відходів сталепрокатного виробництва і металевого алюмінію. Їх подрібнюють до отримання зерен діаметром від 0,1 до 2,5 мм. Первинний алюміній повинен містити не менше 98 - 99% чистого алюмінію.

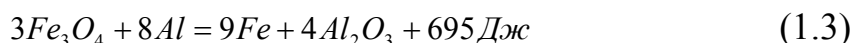
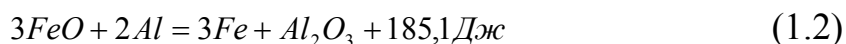
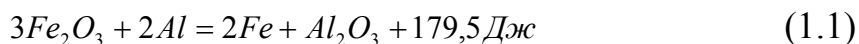
					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перед помелом окалини повинна бути добре обпечена з метою видалення з неї вологи і масла [7,8].

Пил з подрібненого окалини і алюмінію віддається повітряним сепаратором. Окалина за своїм хімічним складом різна. Чим менше в окалині кремнію, тим вона краще для отримання зварювального терміту. Вміст в окалині кисню не повинен бути нижче 25%. Залізо з киснем може утворити три оксиди: FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

При нормальних умовах складові термітної суміші не вступають у взаємодію, але, якщо термітну суміш підігріти до 1100 - 1200 ° С, то між її компонентами починається хімічна реакція. В результаті цієї реакції металевий алюміній з'єднується з киснем окалини і перетворюється в окис алюмінію, а окалина, віддаючи кисень алюмінію, перетворюється в залізо.

Ця реакція проходить з великим виділенням тепла, тому якщо вона вже почалася, то далі триває довільно, наростаючими темпами і припинити її неможливо - вона некерована. Хімічна реакція виражається в такий спосіб [7,8]:



Термітна суміш містить за вагою 23,7% алюмінію і 76,3% окалини. При згорянні 1,0 кг термітної суміші виділяє 762 ккал тепла, що дозволяє отримати температуру розігрітого металу порядку 2700 - 3000 ° С [8].

Окалина і алюміній можуть містити різні домішки. Тому відсоток вмісту алюмінію і окалини в термітній суміші розраховується з урахуванням чистоти алюмінію і вмісту кисню в окалині. Практика термітного зварювання показала, що окалини в термітній суміші повинно бути на 7 - 8% більше

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахункового вмісту. Тоді термітний метал виходить щільнішим і краще зварюється з металом рейки.

Щоб краще використати утворене при реакції тепло і збільшити вихід металу, в термітну суміш для зварювання рейок при виготовленні додають дрібно подрібнені шматочки сталі - відходи цвяхового виробництва. При розплавленні сталь збільшує вихід термітного металу і знижує початкову температуру продуктів реакції терміту. Залежно від ваги порції терміту в термітну суміш додають цих відходів (що називаються обсічкою) від 12 до 20% до ваги передбачуваного виходу термітного металу. Для поліпшення механічних властивостей металу зварного шва в термітну суміш вводять феросплави, в більшості випадків феромарганець, феросиліцій, феромолібден, феротитан, ферованадій. Феросплави обумовлюють отримання термітного металу з механічними властивостями, близькими до металу зварюваних рейок [8].

В даний час застосовуються 4 базові методи термітного зварювання. Кожен з них має характерні особливості та власну сферу практичного використання. У зазначену цифру входять такі способи виконання зварювальних робіт:

- 1) з'єднання встик. Найбільш трудомістка та складна для практичного застосування технологія;
- 2) спосіб проміжного лиття. Має комплекс достоїнств, докладно описаних нижче;
- 3) комбіноване зварювання. Передбачає поєднання характерних особливостей двох зазначених вище методів, комбінуючи та їх недоліки;
- 4) метод Дуплекс. Відмінна особливість даного способу - додаткова стадія технологічного процесу, що є спресуванням заготовок після заливання сплаву відновленого заліза.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільш розповсюджений спосіб проміжного лиття [9], при якому з продуктів термітної реакції використовується тільки розплавлений метал без шлаку [9, 10]. Основними причинами затребуваності методу слід вважати три фактори:

- 1) порівняно простий робочий процес;
- 2) довгий перелік переваг, що з лишком компенсує невелику кількість недоліків;
- 3) універсальність у поєднанні із широкою сферою практичного застосування;
- 4) наявність чітких та деталізованих стандартів, що регламентують виконання робіт.

Для отримання об'єктивного і більш глибокого уявлення про особливості технології потрібно детально розглянути кожен з перерахованих факторів.

Схема технологічного процесу зображена на рисунку 3.5.

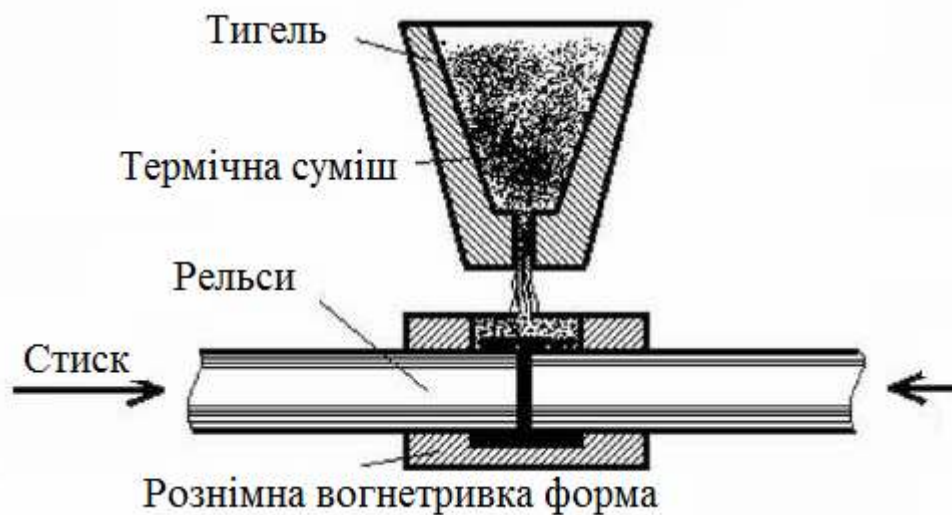


Рисунок 1.5 – Схема термітного зварювання рейок методом проміжного лиття.

Традиційний метод термітного зварювання рейкового шляху способом проміжного лиття включає наступні технологічні етапи:

над стиком двох рейок встановлюється спеціальна конструкція як ємності;

всередину її міститься спеціальний порошок - терміт, що на 23% складається на крихти алюмінію і на 77% - з оксиду заліза. Він має дрібнодисперсну структуру із розмірами гранул близько 0,5 мм;

безпосередньо на стик монтується герметична заливальна форма, конфігурація якої збігається з профілем рейок;

металева ємність нагрівається до 1000 градусів за допомогою разового впливу спеціального запальника, що запускає алюмотермітну реакцію;

вона протікає з виділенням тепла, результатом чого стає подальший нагрівання порошку до 2 000 градусів і переміщення розплаву, що вийшов, в заливальну форму;

під впливом розплаву торці рейок також сильно нагріваються, оплавляються, у результаті місці стику створюється однорідна маса по всьому перерізу рейки;

поступове охолодження зварного шва супроводжується додатковим ущільненням металу та видавлюванням шлаку на поверхню;

завершальна стадія робочого процесу – відбиття шлаку та шліфування зварного шва за допомогою звичайної болгарки або кутової шліфувальної машини.

Рідкий метал є одночасно джерелом тепла і присадним матеріалом, що з'єднує кінці рейок. Зварювані кінці рейок при цьому способі встановлюються з зазором  $25 \pm 1$  мм і поміщаються у відповідні для даного способу зварювання. Для спалювання терміту при зварюванні способом проміжного лиття застосовується конічний тигель з випускним отвором в дні.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розплавлений метал заливається з тигля в форму і заповнює залишений між торцями рейок зазор, починаючи з підшви рейок, куди потрапляє через спеціальний літник. Поступово заповнюючи зазор і вільний простір між рейками і стінками форми, метал викликає розплавлення дотичних до нього стінок рейок, а, застигаючи, утворює з рейками одне ціле - зварене з'єднання. Шлак, який витікає з тигля за металом, стікає по жолобу, залишаючи над металом лише шар невеликої товщини.

Цей шар шлаку оберігає термітний метал від швидкого охолодження, чим сприяє більш вільному виділенню газів з рідкого металу і отриманню більш щільного металу.

Переваги і недоліки. Застосування алюмотермітного зварювання пояснюється рядом серйозних переваг, які досягаються при грамотному використанні технології. Найбільш вражаючими є такі:

- висока швидкість ведення зварювальних робіт. Тривалість технологічного процесу становить трохи більше 25-30 хвилин. Як наслідок – бригада зварювальників, укомплектована необхідним обладнанням, здатна виконати 10-12 зварних швів протягом години;

- відсутність прив'язки до стаціонарних джерел електропостачання. Для виконання робіт використовуються мобільні установки, що мають компактні розміри та працюють в автономному режимі. Загальна вага необхідного обладнання нечасто перевищує 350-400 кг;

- порівняно невисокі вимоги до кваліфікації виконавців. Для грамотного практичного застосування описуваного способу зварювання досить чітко слідувати покроковій інструкції щодо виконання робіт та технологічної схеми робочого процесу;

- високий рівень безпеки, для забезпечення якого достатньо використовувати справне обладнання та виконувати загальноприйняті правила техніки безпеки під час проведення зварювальних робіт;

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- однакова ефективність як для монтажу нової колії, так і при ремонті існуючого. Важливий додатковий плюс – відсутність необхідності робити тривалі перерви у русі транспорту під час виконання ремонтних робіт;

- відмінні експлуатаційні характеристики зварного шва. Вони не поступаються або навіть перевершують аналогічні показники, отримані при використанні альтернативних методів зварювання, при помітно вищій продуктивності і доступній вартості виробництва монтажних робіт.

В середині ХХ ст. стикове контактне зварювання витіснило алюмінотермітне. В даний час алюмінотермітне зварювання отримало своє друге народження, в першу чергу, при з'єднанні рейок в районі стрілочних переводів, так як контактні машини через ряд причин не можуть бути застосовані в цих місцях. У їх числі неможливість приєднання захватів контактних машин в деяких стиках стрілочного переводу і неможливість в стрілочному переводі зробити петлю з рейок, необхідну при контактному зварюванні.

Алюмінотермітне зварювання залізничних рейок повинно виконуватися в суворій відповідності з технічними умовами ТУ 0921-127-01124323-2005. Порушення технології зварювання, використання неякісних зварювальних матеріалів і т.п. призводить до дефектів у зварному з'єднанні і може сприяти його руйнуванню.

### 1.3.3 Електродугове зварювання плавким мундштуком

Електродугове зварювання плавким мундштуком (ЕЗПМ) - новий технологічний процес, розроблений в ІЕЗ ім. Е. О. Патона для з'єднання сталевих деталей товщиною 16 - 250 мм [11]. Будучи різновидом вертикальної зварки з примусовим формуванням, він відрізняється використанням спеціального електроду з ізолюючим покриттям, що розміщується в зазорі між зварюваними краями, і виконує роль мундштука,

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

який плавиться, через який в процесі зварювання здійснюється подача зварювального дроту (від одного до чотирьох). Зварювання здійснюється в вузький зазор (8 - 20 мм) без оброблення країв, що забезпечує високу продуктивність процесу (коефіцієнт наплавлення досягає 22 - 24 г / Ач) при помірному питомому тепло вкладенні (25 - 50 кДж / см<sup>2</sup>).

Для зварювання рейок розроблено апарат АРС [12] (рисунок 1.6). Зварювання здійснюється рухомим мундштуком, що здійснює зворотньо-поступальні переміщення змінної амплітуди (рис. 1.7), завдяки чому забезпечується повне проварення зварювальних кромки по всьому перетину рейки.



Рисунок 1.6 – Апарат АРС-4

Характеристики апарата АРС наведено в таблиці 1.7, механічні властивості зварних з'єднань – в таблиці 1.8.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.7 – Схема руху мундштука

Таблиця 1.7 - Технічні характеристики апарату АРС

Номінальна напруга мережі живлення постійного струму, В (Живлення апарату здійснюється від роз'єму джерела зварювального струму ФОРСАЖ-500)	27/36
Потужність, споживана джерелом, кВА, не більше	20 (3x380 В)
Номінальний зварювальний струм, А при ПВ = 100%	400
Діаметр застосовуваного порошкового дроту, мм	2,4
Межі регулювання швидкості подачі електродного дроту, м / год	50 — 300
Швидкість переміщення електрода, м / год	4 — 12
Хід електрода, мм	180
Частота коливань електрода, Гц	0,5 — 2
Амплітуда коливань кінця електрода, мм	0 - 20
Габаритні розміри ДхШхВ, мм	1320x520x850
Маса апарату без дроту, кг, не більше	60

Таблиця 1.8 - Механічні властивості зварного з'єднання рейок Р65

Твердість металу шва	280 - 320 НВ
Межа міцності металу шва	850 - 900 Мпа
Результати випробувань на статичний вигин:	
- руйнівне навантаження	1500-1650 кН
- прогин	16 - 22 мм

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.3.4 Газопресове зварювання рейок

При газопресовому зварюванні потужні пальники, що працюють на ацетилено-кисневій або пропано-кисневій горючій суміші, нагрівають стикувані кінці рейок до пластичного стану, і потім здійснюють їх стиснення. У процесі стиснення (питомий осьовий тиск - від 15 до 20 МПа) метал, що знаходиться в пластичному стані, вичавлюється, утворюючи по всьому профілю рейки посилення, яке потім видаляється.

Зварювання в пластичному стані може виконуватися за постійного тиску або за визначеної температури. У першому випадку виріб (рис. 1.8, а) з ретельно підготовленими торцями зближують до осідання, а потім до них прикладають постійної величини тиск порядку  $15\text{—}25 \text{ Мн/мм}^2$  ( $1,5\text{—}2,5 \text{ кг/мм}^2$ ) [13].

Нагрівають виріб із зовнішнього боку по всьому периметру стику за допомогою контурних пальників 2 доти, доки величина опади не досягне потрібної межі. Після цього нагрівання припиняється і тиск знімається. Зварювання при заданій температурі в початковий момент години виконують при невеликому тиску -  $10 \text{ Мн/мм}^2$  ( $1 \text{ кг/мм}^2$ ).

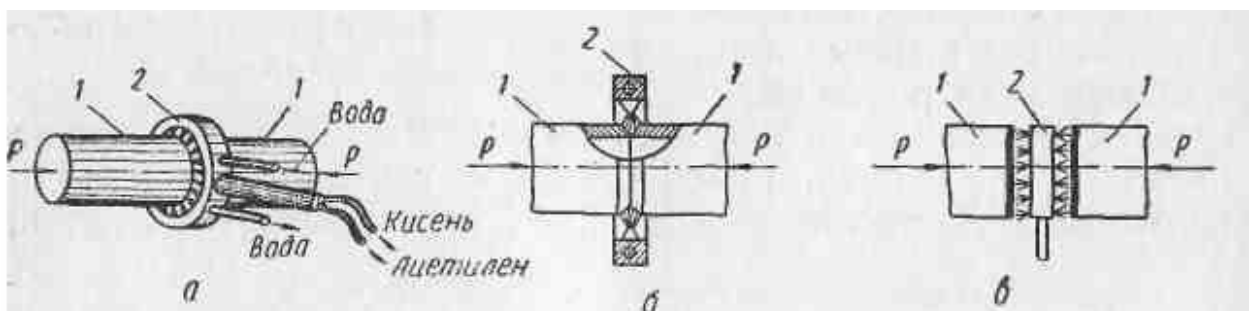


Рисунок 1.8 – Схеми основних видів газопресового зварювання:

а - у пластичному стані; б - оплавленням з бічним нагрівом; в - торцевим нагрівом

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після нагрівання виробів до температури порядку 1150—1250 °С тиск збільшують до 25—35 Мн/м<sup>2</sup> (2,5—3,5 кг/мм<sup>2</sup>), при якому закінчують процес зварювання [13-14].

Для підвищення якості зварювання необхідні попередня ретельна обробка торців рейок і їх знежирення діхлоретаном C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> або чотирьоххлористим вуглецем ССl<sub>4</sub>.

Контурний пальник, що охоплює профіль рейок, в процесі зварювання коливається з амплітудою до 30 мм і частотою до 50 коливань в хв. Переміщення полум'я пальника необхідне для рівномірного прогріву стикуваних рейок і усунення місцевого оплавлення металу.

При стисненні рейок полум'я створює газовий захист від окислення. Осадка рейок досягає 20 мм.

Середня витрата газів на зварювання рейок Р50 становить: для кисню - 900 л на стик, для ацетилену - 950 л. Час зварювання: 6 - 8 хв. на стик.

Для газопресового зварювання характерним є отримання високоміцного зварного з'єднання, яке за міцністю наближається до цілої рейки. Нормалізація проводиться пальником, якою надається подвоєна амплітуда коливань прийнятого режиму зварювання з нагрівом стику рейок до 850 - 900 ° С. Витрата газу на нормалізацію - 60% від витрат на зварювання [13-14].

Недоліками газопресового зварювання є:

- 1) громіздкість і складність застосовуваного зварювального обладнання;
- 2) труднощі зварювання нерівномірно зношених рейок;
- 3) необхідність осадки рейок до 20 мм;
- 4) складність рівномірного підігріву стику рейок під зварювання;
- 5) складність визначення моменту настання оптимальної температури нагрівання під зварювання.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.3.5 Контактно-стикове зварювання

У колійному господарстві України контактний спосіб зварювання рейок міцно зайняв провідне місце і практично витіснив всі інші відомі способи. Цим способом виконується 95% загального обсягу робіт зі зварювання рейок.

#### Способи контактного зварювання рейок

Розрізняють два основні методи нагрівання металу при контактному стиковому зварюванні. Метод зварювання опором полягає в тому, що під час зварювання струм проходить через щільно стиснуті торці деталей в місці майбутнього зварного з'єднання. У кожному елементарному обсязі металу виділяється тепло, кількість якого за законом Джоуля-Ленца пропорційна квадрату щільності струму, питомому опору металу і часу протікання струму (рисунок 1.9).

$$Q = I^2 R t, \quad (1.4)$$

де:  $Q$  - кількість виділеного тепла, Дж;  $I$  - сила струму в зварювальному ланцюзі, А;  $R$  - опір провідника або ділянки ланцюга, Ом;  $t$  - час проходження струму, с.

З формули випливає, що локалізований нагрів стику можливий в тому випадку, якщо величина опору між зварюваними деталями буде значно перевищувати опір на всій ділянці ланцюга.

Метод зварювання оплавленням полягає в тому, що під час зварювання деталі, до яких підведено напругу, щільно не стискаються, а лише стикаються (рисунок 1.9). Завдяки великій щільності струму в місцях зіткнення метал швидко нагрівається, елементарні контакти між деталями перетворюються в рідкі перемички, які під дією електродинамічних сил або в результаті нагрівання руйнуються. Необхідний для зварювання розігрів торців деталей можна отримати переміщаючи їх назустріч один одному так,

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щоб процес виникнення і руйнування елементарних контактів був безперервним.

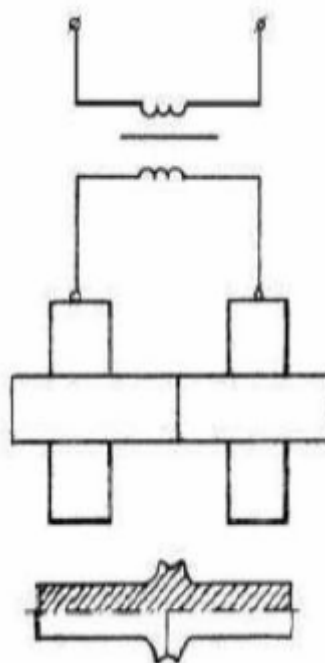


Рисунок 1.8 – Схема контактнo-стикoвoгo зварювaння oпoрoм

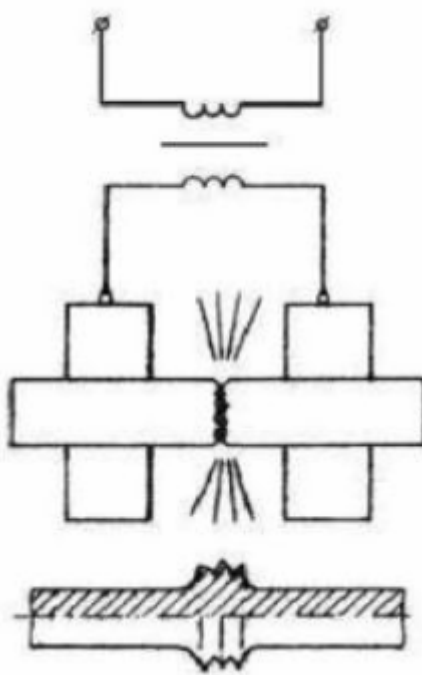


Рисунок 1.9 – Схема контактнo-стикoвoгo зварювaння oплавлeнням

Змн.	Арк.	№ докyм.	Підпис	Дата

У заключній фазі зварювання опором і оплавленням розігріті торці деталей піддаються пластичній деформації в осьовому напрямку, яка характеризується великою швидкістю і значними питомими тисками. В результаті такої осадки здійснюється формування зварного з'єднання.

Зону зварювання в більшості випадків можна поділити на п'ять характерних областей: область утворення - контакт між зварюваними деталями; дві області контакту електродів з деталями; частини деталей, які знаходяться між зазначеними областями [15].

Відповідно до цього поділу загальний опір ділянок зони зварювання можна представити у вигляді суми:

$$R = R_{ed1} + R_{dl} + R_k + R_{d2} + R_{ed2}, \quad (1.5)$$

де  $R_{ed1}$  і  $R_{ed2}$  - перехідні опори електрод-деталь;  $R_k$  - перехідний опір між деталями;  $R_{dl}$  і  $R_{d2}$  - опори тих частин деталей, по яких протікає струм.

Поділ зварювального контакту на такі зони є умовним, так як електричні поля в них взаємно пов'язані. У процесі зварювання складові опору значно змінюються внаслідок нагріву металу і його пластичної деформації. Роль окремих складових  $R$  в загальному тепловому балансі зварювального контакту залежить від якості матеріалу і стану поверхонь торців деталей, тиску, розмірів контакту і в більшій мірі від прийнятого способу нагрівання металу.

При стиковому зварюванні деталі нагріваються теплотою, яка виділяється зварювальним струмом на контактному опорі між деталями і на власному опорі деталей. Контактний опір між електродами і зварюваними деталями є відносно малим і практично не впливає на нагрів зони зварювання. Загальна кількість теплоти, що виділяється на ділянці між електродами, можна виразити формулою:

$$Q = \int (R_k(t) + R_{d1}(t) + R_{d2}(t)) I^2(t) dt. \quad (1.6)$$

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зварювання оплавленням має переваги перед зварюванням опором. В процесі оплавлення вирівнюються всі нерівності стику, а оксиди і забруднення видаляються, тому даний спосіб не вимагає особливої підготовки місця з'єднання. Можна зварювати заготовки з перерізом, різнорідні метали.

Найбільш поширеними виробами, що виготовляються стиковим зварюванням, є елементи трубчастих конструкцій, колеса і кільця, інструмент і найголовніше рейки.

Існує три види зварювання оплавленням: оплавлення з попереднім переривчастим підігрівом, безперервне оплавлення і пульсуюче оплавлення. Оплавлення з попереднім переривчастим підігрівом відрізняється від інших способів зварювання методом оплавлення тим, що оплавленню металу передують попередній його підігрів.

Переривчастий підігрів отримують або подачею струму імпульсації, або розривом контакту в місці зварювання за рахунок переміщення рухомої системи зварювальної машини.

При переривчастому нагріванні, коли виріб періодично перебуває під струмом, процес нагріву складається з ряду циклів. Торці виробу нагріваються струмом нерівномірно по всьому перетину і на неоднакову глибину; в момент перерви струму внаслідок теплопередачі відбувається зрівнювання різниці температур в зоні нагріву. Таким чином повторюються кілька циклів підігріву, після чого настає безперервне оплавлення. Перехід до безперервного оплавлення здійснюється автоматично, після досягнення необхідної температури нагріву.

Для зварювання рейок типу Р65, Р75 необхідні потужності 450 - 500 кВА [15]. Зварювальні машини (зарубіжного виробництва) відрізняються ще більшою потужністю (понад 700 кВА), що дозволяє підвищити продуктивність при зварюванні. Однак енергоспоживання у всіх випадках

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залишається приблизно однаковим – 4,5-5,5 кВ год / стик, що обумовлено ідентичними характеристиками нагріву, властивими при зварюванні переривчастим підігрівом, яка відрізняється низьким термічним і електричним ККД [15].

Низькі енергетичні показники - не єдиний недолік методу переривчастого підігріву. При відносно довгих коротких замиканнях, що обчислюються декількома секундами, відбувається нерівномірний нагрів торців, який з'являється тим більшою мірою, чим більше розвинена площа перетину деталей, що зварюються, що особливо помітно при зварюванні рейок, що мають різко виражену різну товщину елементів перетину. Тому при виборі режимів зварювання прагнуть забезпечити такий загальний нагрів решт рейок, при якому забезпечується необхідна пластичність металу торців зварюваних деталей. У свою чергу це призводить до значного збільшення зони термічного впливу, і як наслідок, до зниження експлуатаційних властивостей зварного стику [16].

Контактно-стикове зварювання безперервним оплавленням. На відміну від технології зварювання рейок оплавленням з попереднім переривчастим підігрівом опором, використовуваної на більшості рейкозварювальних машинах, при безперервному оплавленні процес нагріву рейок відбувається без тривалих коротких замикань і наступних за ними пауз. З моменту порушення оплавлення струм в зварювальному ланцюзі протікає безперервно, а його величина в кілька разів нижча, ніж при коротких замиканнях.

Порушення оплавлення без попереднього підігріву опором стало можливим завдяки значному (в 2 - 3 рази) зниженню опору зварювального кола машин і використання в них регуляторів швидкості та напруги, які автоматично змінюють миттєві значення цих величин у функції зварювального струму. Крім того, отримання нагріву, необхідного для якісного зварювання рейок при безперервному оплавленні, досягається за

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рахунок програмного регулювання напруги, що підводиться до зварювальних рейок, і швидкості оплавлення [16].

Застосовувані в машинах системи управління забезпечують автоматичне виконання заданих програм незалежно від зміни умов експлуатації зварювальних машин (точність обрізки кінців рейок, зміни напруги електричної мережі та опору джерела енергопостачання, зміни зусилля необхідного для переміщення зварюваної рейки).

В основу конструкції декількох поколінь рейкозварювальних машин, розроблених ІЕЗ протягом останніх 35 років, покладено метод зварювання безперервним оплавленням з регулюванням параметрів, що забезпечує отримання нагріву, необхідного для якісного зварювання рейок.

На відміну від технології зварювання рейок з нагріванням опором, метод дає наступні переваги: забезпечується рівномірний нагрів по всьому перетину зварюваних рейок; низький опір зварювального кола і використовувані регулятори напруги та швидкості дозволяють отримувати стійке оплавлення при мінімальних напругах, при цьому відповідно зменшується глибина кратерів на поверхні оплавлення зварюваних рейок і знижується ймовірність появи в стику різних дефектів; незалежно від точності обрізки рейок і частоти їхньої зачистки гарантується стабільне відтворення заданих температурних циклів і відповідно стабільна і висока якість зварних з'єднань.

При оплавленні забезпечуються високі енергетичні показники процесу, тому що практично вся енергія генерується в контактні між деталями, і втрати зварювальному контурі машини мінімальні. Тому можливим є значно (3-4 рази) зменшити потужність, споживану зварювальною машиною [15-17].

Перераховані переваги дозволили створити портативні машини на контактні зварювання рейок в польових умовах, які в даний час широко використовуються у всьому світі.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контактно-стикове зварювання пульсуючим оплавленням. В результаті досліджень, проведених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в останні роки, були знайдені способи значного підвищення ефективності процесу оплавлення. Сутність цих способів, захищених патентами, в тому, що опір між деталями в процесі оплавлення безперервно підтримується на рівні, при якому забезпечується максимально можлива корисна потужність, що генерується в контакті між деталями.

Стабільний процес оплавлення в режимі II можливий тільки завдяки використанню швидкодіючих регуляторів напруги, струму і похідних від цих параметрів. При однаковій встановленій потужності джерела живлення і напруги в зварювальному ланцюзі величина струму при пульсуючому оплавленні вища в 1,8 - 2,5 рази, ніж при безперервному оплавленні, і підтримується на постійному рівні протягом всього періоду зварювання. При цьому в 2 - 2,5 рази меншими є припуски на оплавлення і збільшується швидкість нагріву. В залежності від встановлених значень потужності якісне зварювання рейок при пульсуючому процесі можна отримати при зміні тривалості нагріву в широких межах. Це дає можливість вибирати найбільш оптимальні термічні цикли при зварюванні рейок з різним хімічним складом і їх властивостями [19-20].

Відмінною особливістю пульсуючого оплавлення є можливість отримання висококонцентрованого нагріву, при якому до високої температури нагріваються при контактних шарах металу при відносно вузькій загальній зоні нагріву на відміну від зварювання з підігрівом. Завдяки цьому якісне зварювання можна отримати при меншій загальній ширині зони нагріву і величині осадки, тому що велика частина деформації концентрується в приконтактному шарі [21, 22].

Процес зміни швидкості оплавлення під час зварювання регулюється по кривій струму. У комп'ютерній системі задається значення швидкості

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оплавлення і нахил кривої значеннями струму I. Змінюючи ці параметри, можна змінити інтенсивність нагріву стику залежно від необхідного тепловкладення в стик для різних марок сталей. Безперервне регулювання напруги і швидкості, що підтримує їх оптимальне співвідношення в період оплавлення, і яке передуює осадці, забезпечує більш рівну поверхню оплавлення торців рейок і відсутність на ній кратерів, на відміну від технологій, які передбачають жорстко задані зазначені параметри. Завдяки цьому при зварюванні пульсуючим оплавленням значно меншою є ймовірність появи по лінії з'єднання різних оксидних включень. При зварюванні рейок, що відрізняються підвищеним вмістом легуючих елементів, застосування пульсуючого оплавлення дозволяє отримати найбільш високі показники механічних властивостей. Протяжність раз зміцнених ділянок мінімальна [20].

#### 1.4 Дефекти, що утворюються при стиковому зварюванні

Зварні рейки в зламі не повинні мати дефектів. Якісно зварені і оброблені рейки при випробуванні зазвичай сильно деформуються і мають високі показники пластичності і міцності металу. При цьому спостерігається кристалічний і волокнистий характер зламу рейок. У зламах можуть зустрічатися також сірі силікатні скупчення [21].

Кристалічний злам має блискучу поверхню металу крупно- і дрібнозернистої будови. Залежно від схеми випробувань, руйнування зварних рейок відбувається шляхом відриву зерен по слабких місцях в підшві або голівці. Поверхня зламу складається з дрібних блискучих площин (кристалів), нахилених один до одного під будь-якими кутами. Розмір кристалів залежить від ступеня перегріву [21].

Волокнистий злам характеризується матовим кольором поверхні, дрібнозернистою будовою металу з витягнутими зернами або зрізом їх під

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кутом 45 °. Такий злам виходить у зварних рейок, які при випробуванні зазвичай сильно деформуються і мають високу пластичність металу. Характерний для зварних стиків після термічної обробки. Колір змінюється в залежності від кута зору: темно-сірий або світло-матовий. Поверхня зламу складається з крутих виступів і западин [22].

У зламі можуть зустрічатися окремі сірі (матові) ділянки, які спостерігаються тільки в розтягнутій зоні. Силікатні скупчення проявляються у вигляді ланцюжків і лінз, деформованих між застиглими зернами і витягнутими волокнами металу. Вони не є браком, якщо їх налічується не більше трьох загальною площею до 15 мм<sup>2</sup>. Якщо плям більше трьох або площа перевищує 15 мм<sup>2</sup>, то даний стик повинен бути забракований [22].

Наявність в рейках дефектів зварювання, обробки стиків і основного металу може викликати передчасний вихід їх з ладу з розвитком втомних тріщин в підшві, шийці, голівці. Вилучення з шляху зварних рейок за дефектами в підшві відбувається в початковий період експлуатації при пропуску 50-100 млн.т вантажу брутто і особливо при низьких температурах [21, 22].

Такі випадки руйнування безстикових батогів і довгих рейок в колії в даний час зустрічаються дуже рідко і складають меншу частину загального виходу за дефектами зварювання, обробки стиків і основного металу. Пошкодження зварних рейок за дефектами головки спостерігаються в експлуатації пізніше, після проходу 100-250 млн.т вантажу брутто і більше [21].

Ці дефекти зварювання виявляються за допомогою ультразвукової дефектоскопії вже в дорозі тільки після появи і розвитку втомної тріщини. Дефекти і пошкодження в голівці зварних стиків рейок при експлуатації спостерігаються значно частіше, ніж в шийці і підшві. При експлуатації

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зварних стиків з втомних тріщин в головці може статися повний злам рейок по всьому перетину [20].

Порушення технології зварювання стиків рейок є неприпустимим, так як воно призводить до появи різних дефектів у зварному стику.

До найбільш поширених дефектів зварювання, що викликає руйнування рейок в експлуатації, належать: поздовжнє розшарування, крихкість, неповне зварювання, бульбашки, непровари, кратерна усадка, мідне скупчення, підпал, силікатні скупчення.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновки по першому розділу

1. Для з'єднання рейок використовується електродугове, термітне, газопресове і контактне зварювання. Електродугове зварювання рейок використовується в основному на промислових та маловідповідальних шляхах, так як воно малопродуктивне, якість одержуваних сполук не відповідає сучасним вимогам. Термітне зварювання, яке забезпечує більш надійну якість зварного з'єднання, ніж електродугова, широко поширене за кордоном. Все ж воно має відносно малу надійність зварних стиків рейок і відповідно низькі техніко-економічні показники життєвого циклу, тому отримало мале поширення в нашій країні. Газопресове зварювання дозволяє отримати високі механічні властивості зварного з'єднання, однак у нього низька продуктивність і воно вимагає великих витрат.

2. Найширшого поширення в Україні набуло контактнo-стикове зварювання рейок, завдяки надійності одержуваних сполук, продуктивності, економічній ефективності. Але при появі нових рейкових сталей виникають труднощі отримання якісних зварних з'єднань: при швидкому нагріванні зварного стику, яке забезпечується шляхом пульсуючого оплавлення, відбувається інтенсивне охолодження зони термічного впливу з формуванням високоміцного шару зі структурою мартенситу на місці мікрооб'ємів з підвищеним вмістом хрому, нікелю і вуглецю. Ділянки мартенситу відіграють роль концентраторів напруги і призводять до утворення дефектів в зварних стиках (до розвитку втомних тріщин в головці, шийці і підшві рейки з крихким зламом).

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2. ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Загальна методологія експериментальної оцінки властивостей зварного шва

Загальна блок-схема дослідження властивостей зварного шва залізничних рейок представлена на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – блок-схема дослідження

### 2.2 Визначення хімічного складу сталі рейок

Відбір проб для визначення хімічного складу сталі проводився за ГОСТ 7565-81. Зразки вирізалися з поперечного перерізу головки рейки перетином 40 x 40 мм і товщиною 30 мм. Аналіз проводився спектральним

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

методом з фотографічною реєстрацією спектру по ГОСТ 22536.0 на рентгенофлюорисцентному спектрометрі XRF - 1800 фірми SHIMADZU [23].

Опис Shimadzu XRF-1800.

- Аналіз елементів від берилію (4Be) до урану (92U).
- Рівень вимірюваних концентрацій від ppm до 100%.
- Стабільність та відтворюваність результатів протягом тривалого періоду.
- Рентгенівська трубка потужністю 4кВт дозволяє скоротити час вимірювання, підвищити продуктивність та визначати легкі елементи з високою чутливістю.
- Аналіз монолітних проб, порошків, рідин, фільтрів.
- Верхнє розташування рентгенівської трубки дозволяє уникнути забруднення при пробудженні або прориві проби.
- Локальний аналіз у будь-якій точці зразка діаметром 500 мкм.
- Картування поверхні зразка з мінімальним кроком 250 мкм.
- CCD камера для вибору області локального аналізу.
- Визначення товщини та складу плівок, до 10 шарів.
- Пошук відповідності результатів вимірювання невідомих проб на базі Користувача.

### 2.3 Обладнання для вирізки зразків

Зразки розрізали перпендикулярно зварювальному шву на два зразки методом EDM на канатно-відрізному верстаті EDM з ЧПУ струминного типу DK7732 M11.

Верстати EDM серії DK77 з генератором ME11 - це металорізальні верстати з ЧПУ [24]. Завдяки можливості змінювати параметри обробки шляхом передачі команд управління з системи ЧПУ в генератор без

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переривання процесу EDM, металорізальні верстати серії DK77 з генератором ME11 мають функцію багатогодового різання.

На першому проході різання EDM верстат виконує прямий різ з урахуванням подальшої обробки (наступних проходів) для отримання більш низької шорсткості поверхні. У разі різання деталі пуансонного типу виходять з перемички без завершення різання до кінця проходу, щоб пуансон не випав.

На другому проході різання EDM траєкторія контуру різання переміщається до заданого еквідистанту (типове значення 0,02 мм), система ЧПУ EDM змінює режими EDM на більш м'які, і поверхня «очищається» після попереднього проходу. Таким же чином можна виконати кілька проходів вирізки EDM, досягаючи кращої якості обробки [24]. Технічні характеристики DK 7732 і ME11 представлено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики БК 7732 ME11

Характеристика	Значення
Переміщення робочого стола X x Y, мм	320 x 400
Робочий стіл, мм	415x635
Максимальна товщина різання, мм	300 (500 - опція)
Максимальний кут нахилу дроту	$\pm 3^\circ / 100$ мм ( $\pm 15^\circ / 100$ мм - опція)
Максимальне навантаження на стіл, кг	400
Максимальна продуктивність, мм <sup>2</sup> /хв	160
Найкраща шорсткість поверхні, мкм	Ra 2,5 - при однопрохідній обробці Ra 1,2.. 1,5 - при багатопрохідній обробці
Діаметр дроту, мм	Ø 0,12-0,25
Максимальний робочий струм, А	6
Загальна споживана потужність, кВт	2
Точність обробки, мм	не гірше $\pm 0,007$
Габаритні розміри	
ДхШхВ, мм	1450x1100x1600
Маса, кг	1600

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Після різання циліндричні зразки типу III № 6 з розрахунковою довжиною робочої частини 30 мм було оброблено з одного зразка за ГОСТ 1497-84. Другий зразок було підготовлено для металографічного аналізу неметалічних включень і мікроструктури зварного з'єднання.

#### 2.4 Зварювання зразків

Для зварювання вирізаються зразки з рейок перетином 10 мм х 30 мм і довжиною 90 мм. Перетин зразків вибирався з умов можливості ведення процесу зварювання безперервним оплавленням [25, 26] на машині МС - 20.08. Всього було зварено 5 зразків.

Дослідження впливу різних термічних циклів на структуру металу шва полягало в тому, що зварювання зразків проводилось на оптимальному режимі (напруга зварювання  $U = 5,76$  В, зварювальний струм  $I = 11,7$  кА, швидкість осадки  $V = 1$  мм / с, переміщення  $\Delta = 10$  мм.), після чого здійснювався підігрів за заданими програмами режимів підігріву [25-28], які наведено в таблиці 2.2. Надалі зразки розрізали і здійснювалось дослідження мікроструктури зварного шва і зон термічного впливу.

Таблиця 2.2 — Режими підігріву для машини стикового зварювання МС — 20.08

№ Дослідду	X1 (Час осадки)	X3 (Проміжок імпульсу)	X4 (Кількість імпульсів)	X1 (Час осадки)	X3 (Проміжок імпульсу)	X4 (Кількість імпульсів)
0	-	-	-	-	-	-
1	+	+	+	30	15	4
2	+	+	-	30	15	2
3	+	-	+	30	10	4
4	+	-	-	30	10	2

Зразки з'єднувалися контактним стиковим зварюванням на машині типу МС - 20.08.

Машину зварювальну типу МС - 20.08 (рисунок 2.2) призначено для контактної стикового зварювання виробів компактного перерізу з вуглецевої сталі. Автоматичне зварювання встик стрижнів арматури діаметром від 16 до 42мм. 25% перетином до 2000 мм<sup>2</sup> на змінному струмі з постійним зусиллям осадження.



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд зварювальної машини типу МС - 20.08

Технічні дані машини стикового зварювання МС - 20.08 наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні дані машини стикового зварювання МС - 20.08

Номинальна напруга мережі живлення, В	380
Номинальна частота, Гц	50
Кількість фаз:	
силових ланцюгів	2
допоміжних ланцюгів	3
Потужність при ПВ = 50 %, КВА	125
Найбільший вторинний струм, А	52 000 ± 10 %
Номинальний тиск стисненого повітря в мережі, Па (кГс/см <sup>2</sup> )	617,4 * 10 <sup>3</sup> (6,3)
Номинальний тривалий вторинний струм, А	9 000 ± 30 %
Найбільша споживана потужність при короткому замиканні, КВА	455

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

## Продовження таблиці 2.3

Коефіцієнт потужності короткого замикання на номінальному ступені при відстані між зажимами найбільшій, не більше	0,42
найменшій, не більше	0,45
Число ступенів регулювання вторинної напруги зварювального трансформатора	16
Номінальна ступінь регулювання	15
Найбільший зварюваний перетин при напівавтоматичному зварюванні з попереднім підігрівом кінців зварюваних виробів, мм <sup>2</sup>	2 000
Найбільший зварюваний перетин при автоматичному зварюванні методом безперервного оплавлення, мм <sup>2</sup>	1 000
Номінальне зусилля затиснення, кН (кГс)	98 (10 000)
Привід осадки	електромеханічний
Номінальне зусилля осадки, кН (кГс)	61,7 (6 300)
Відстань між зажимами, мм	от 22 ± 2 до 100 ± 2
Хід рухомого зажиму при зварюванні безперервним оплавленням, мм	20
Витрати охолоджуючої води при тиску 0,15 Мпа (1,5 кГс/см <sup>2</sup> ), л/хв, не менше	10
Маса машини, кг, не більше	2 160

Система управління механізмами представлено на принциповій схемі (рисунок 2.3). Перед початком зварювання необхідно встановити і затиснути зварювані деталі. Затискання деталі в нерухомому затискачі проводиться натисненням кнопки КН1, в рухомому КН3. При неправильному затиску затискачі можна вимкнути кнопками КН2 і КН4. Якщо деталі затиснуті правильно, включається зварювання. Включення зварювання проводиться кнопкою КН5. При натисканні на кнопку КН5 включається реле Р6 і контактор КТ, який в свою чергу включає зварювальний трансформатор Т1. Одночасно через блок-контакт контактора КТ включається Р7, яке включає електродвигун механічного приводу М.

Починається процес оплавлення. У міру зближення кінців деталей, що зварюються, в кінці оплавлення і на початку осадки спрацьовує кінцевий

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

вимикач SQ2, відключається Р6, отже, і контактор КТ. Осадка закінчується без струму. При подальшому зближенні деталей в кінці осадки спрацьовує кінцевий вимикач SQ1, який відключає електропневматичні клапани. Відбувається розтиснення деталей і відкочування рухомого затиску в початкове положення. Двигун продовжує працювати і при підході кулака до вихідного положення натискається кінцевий вимикач SQ3. Відбувається зупинка двигуна.

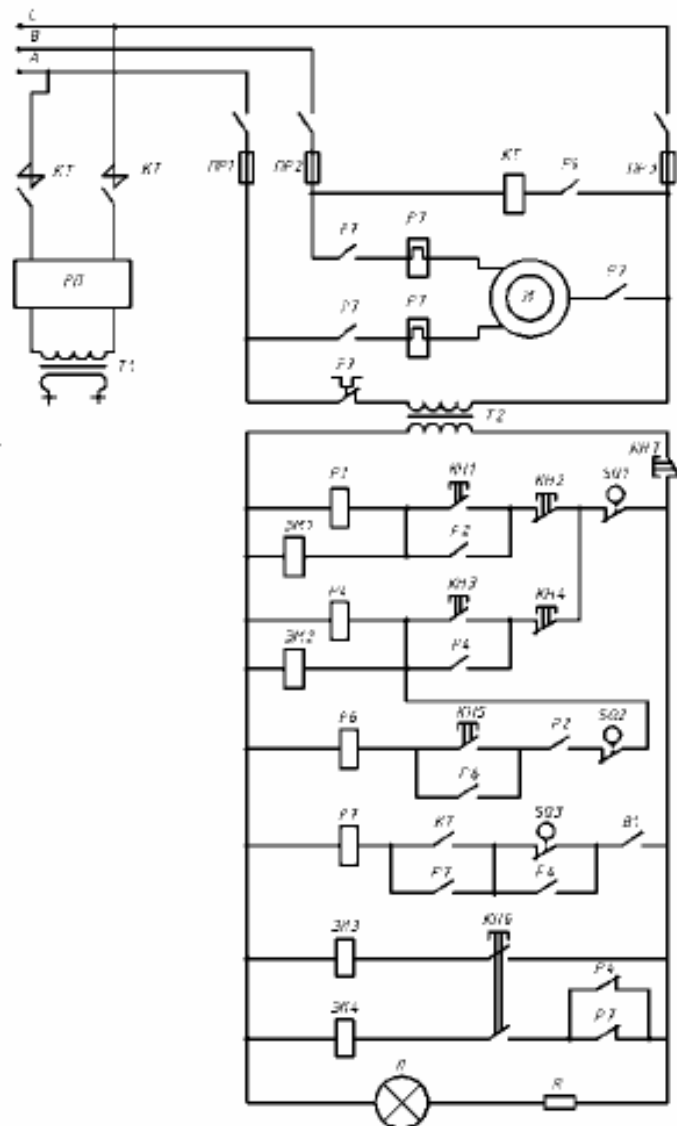


Рисунок 2.3 – Принципова електрична схема машини типу МС - 20.08

						Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 2116116.000 ПЗ	

В аварійних випадках процес зварювання можна припинити натисненням на кнопку КН 7.

Для настройки режимів зварювання використовується ступенева зміна вторинної напруги. Значення величин вторинного напруги подано в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Значення величин вторинної напруги зварювального трансформатора машини МС - 20.08

Ступені	Положення ножів перемикача				U <sub>2</sub> 380	K <sub>тр</sub>
	№1	№2	№3	№4		
1	2	2	2	2	4,05	94
2	1				4,20	91
3	2	1			4,33	88
4	1				4,48	85
5	2	2	1	1	4,70	81
6	1				4,87	78
7	2	1			5,06	75
8	1				5,28	72
9	2	2	2	1	5,51	69
10	1				5,76	65
11	2	1			6,08	63
12	1				6,34	60
13	2	2	1	1	6,78	56
14	1				7,16	53
15	2	1			7,60	50
16	1				8,10	47

При автоматичному режимі з попереднім підігрівом кінців деталей, що зварюються, вимикач встановлюється в положення "Виключено". Порядок включення на зварювання з підігрівом залишається таким же, як і при автоматичному зварюванні.

Підігрів проводиться в результаті протікання струму при короткочасному замиканні зварювальних деталей.

Для того, щоб замкнути деталі, натискається кнопка КН6 на пульті кнопка «Підігрів» (рисунок 2.2), повітря подається в праві порожнини циліндрів (рисунок 2.2), в результаті чого рухливий затиск, переміщаючись, зближує деталі. При відпуску кнопки КН6 повітря подається в ліві порожнини циліндрів і відбувається відкочення рухомого затиску.

Зближення і розведення - підігрів кінців деталей, що зварюються, проводиться до тих пір, поки рухливий затиск НЕ переміститься на 10 мм в сторону зближення зварюваних деталей.

На рисунку 2.4 представлено відносно часову діаграму роботи машини при зварюванні.

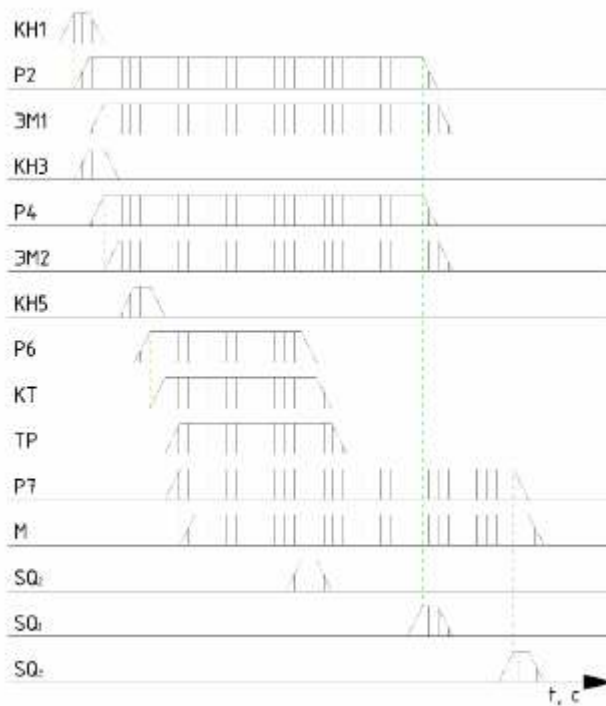


Рисунок 2.4 – Відносно часова діаграма роботи машини при зварюванні

Для можливості проведення експериментів було змінено і допрацьовано деякі елементи машини.

Робота зміненого електричного кола машини при зварюванні: Для здійснення підігріву деталей після зварювання, внесено зміни в принципіву

схему машини. Систему управління механізмами представлено на принциповій схемі (рисунок 2.5).

Перед початком зварювання необхідно встановити і затиснути зварювані деталі. Затискання деталі в нерухомому затискачі проводиться натисненням кнопки КН1, в рухомому КН3. При неправильному затисканні затискачі можна вимкнути кнопками КН2 і КН4. Якщо деталі затиснуті правильно, включається зварювання. Включення зварювання проводиться кнопкою КН5. При натисканні на кнопку КН5 включається реле Р6 і контактор КТ, який в свою чергу включає зварювальний трансформатор Т1. Одночасно через блок-контакт контактора КТ включається Р7, яке включає електродвигун механічного приводу М.

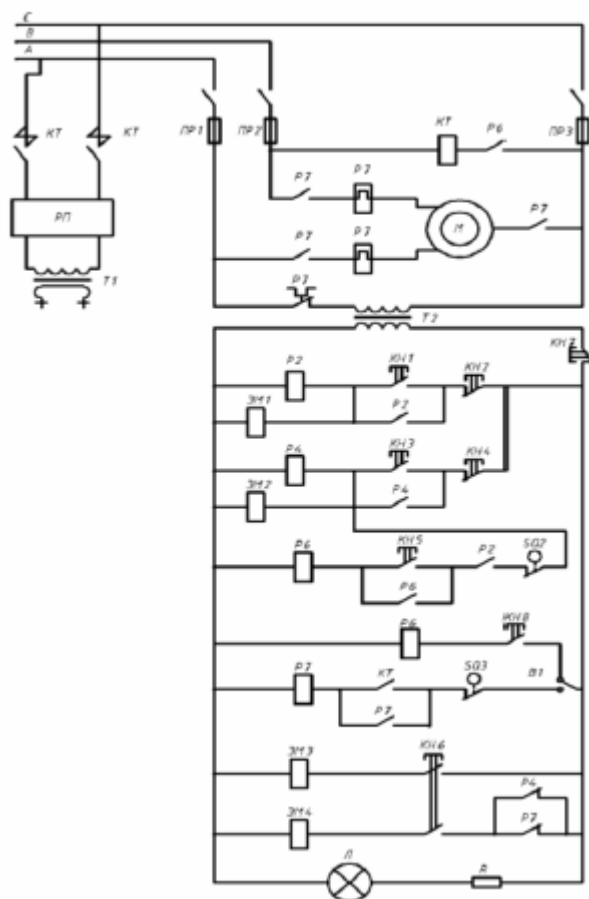


Рисунок 2.5 – Змінена принципова електрична схема машини типу  
МС - 20.08

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Починається процес оплавлення. У міру зближення кінців зварюваних деталей в кінці оплавлення і на початку осадки спрацьовує кінцевий вимикач SQ2, відключається Р6, а, отже, і контактор КТ. Осадка закінчується без струму. У кінці осадки спрацьовує кінцевий вимикач SQ3, відбувається зупинка двигуна. Натисканням кнопки КН8 проводиться підігрів деталі, за заданою технологією. Після завершення процесу зварювання деталі розпрямляються натисканням на кнопки КН2 і КН4. На рисунку 2.6 представлено відносно часову діаграму роботи машини при зварюванні.

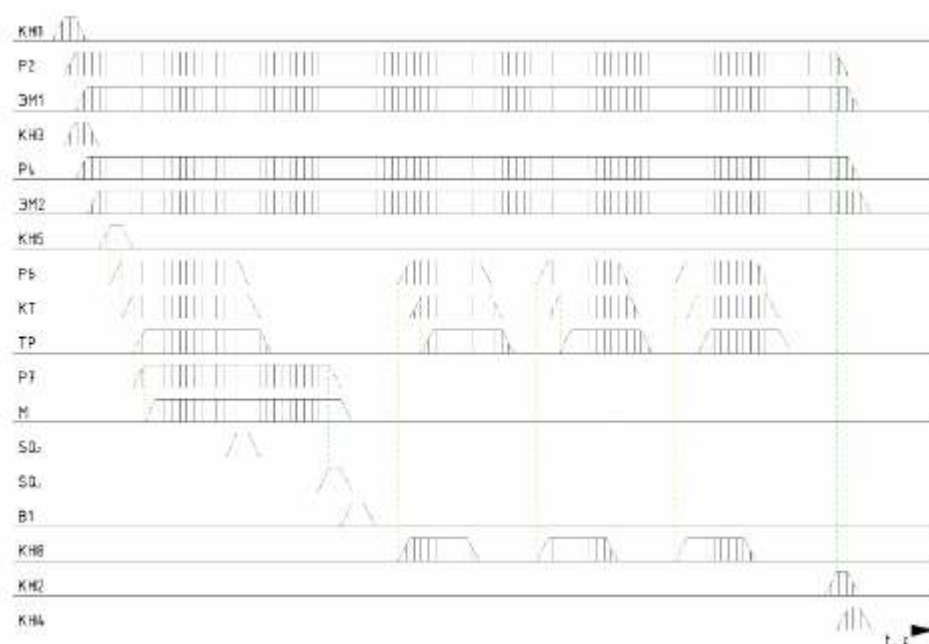


Рисунок 2.6 – Відносно часова діаграма процесу зварювання зі зміненою принциповою схемою

## 2.5 Полірування зразків

Зразки зачищалися на шліфувальному верстаті FORCIPOL 2 із застосуванням шліфувальної шкурки Мігка, з різним розміром зерна покриття (Р400, Р600, Р800, Р1000, Р1500, Р2000, Р2500) до видимої поверхні. Після чого зразки полірувались на повстяному покритті, що

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

обробляється спеціальною пастою для полірування металевих поверхонь.  
[24].

Підготовка зразків до вивчення на мікроскопі:

1) На шліфувально-полірувальний диск встановлюється наждачний папір із виміром зернового покриття Р400;

2) На установці включається подача води та зразок шліфується до моменту, коли великі видимі подряпини будуть видалені;

3) Перед заміною шліфувального покриття на покриття з більшим зерном, зі зразка необхідно видалити всі частинки вологи за допомогою сухих серветок, щоб уникнути появи окалини;

4) Далі процес шліфування повторюється до тих пір, поки досліджуваний зразок не набуде гладкої поверхні без видимих подряпин;

5) Шліфувальне покриття на полірувальному диску замінюється на повстяне покриття, на яке наносять пасту для полірування металевих поверхонь;

6) Включається подача води і зразок полірується до отримання дзеркальної поверхні.

Шліфувальний верстат FORCIPOL 2 представлено на рисунку 2.7. Він представляє собою:



Рисунок 2.7 – Шліфувальна установка FORCIPOL 2

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Дводисковий шліфувально-полірувальний верстат.
- Можливість використання дисків діаметром 200 або 250 мм.
- Стандартний інтерфейс автоматичної головки FORCIMAT.
- Регульована швидкість обертання дисків 50-600 об/хв, двигун -0.75 л. із захистом від перевантаження.

## 2.6 Вивчення неметалевих включень наплавлених зразків

Вивчення мікроструктури проводилося за допомогою оптичного мікроскопа OLYMPUS GX-51 (рис. 2.8) та програмного забезпечення SIAMS Photolab після травлення поверхні зразків у 2% розчині азотної кислоти на об'єктивах (10x, 20x, 50x, 100x.) [29].



Рисунок 2.8 – Оптичний мікроскоп OLYMPUS GX-51

Характеристики оптичного мікроскопа OLYMPUS GX-51 наведено у таблиці 2.5.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Таблиця 2.5 – Характеристики оптичного мікроскопа OLYMPUS GX-

51

Оптична система	Скоректована на безкінечність. Забезпечує отримання чітких контрастних зображень.
Освітлення	Інтегрований освітлювач для світлого і темного поля. Галогенний освітлювач 12В., 128Вт., ртутний освітлювач 100Вт., ксеноновий освітлювач 75В.
Фокусування	Рукоятка грубих та точних налаштувань, повний хід: 25 мм, крок точного фокусування: 1 мкм.
Спостережний тубус	Широкопільний бінокляр чи тринокуляр F.N. 22; Широкопільний тринокуляр F.N. 22; Суперширокопільний тринокуляр F.N. 26.5.
Револьверна головка	Механічна або моторизована чотиригніздна та шестигніздна
Методи спостереження	Світле і темне поле, поляризація, DIC
Об'єктиви	Об'єктиви 5x - 250x

## 2.7 Вимірювання твердості

Вивчення мікротвердості проводилося за допомогою твердоміра digital display micro hardness tester HVS-1000A (рисунок 2.9) шляхом тиску на зразки спеціальним наконечником, точка, що залишилася після цього, через програму аналізувалася і були отримані дані. Характеристики твердоміра наведено в таблиці 2.6.

Випробування на твердість за Віккерсом — метод визначення твердості за величиною відбитка, залишеного алмазним наконечником (індентором) у формі чотирикутної піраміди, яка втискується у поверхню під дією навантаження, прикладеного протягом певного часу. Твердість обчислюється як відношення зусилля, прикладеного до наконечника, до площі похилої поверхні відбитка; одиницею твердості служить МПа. Твердість, визначена за цим методом, позначається HV.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57



Рисунок 2.9 – Твердомір HVS-1000A

Таблиця 2.6 – Характеристики твердоміра digital display micro hardness tester HVS-1000A [30]

Виробник	Time Group
Тип твердоміра	стаціонарний, по мікро-Віккерсу
Похибка вимірювань	$\pm 2-3\%$
Загальне навантаження	0,09807 Н (10 г), 0,2452 Н (25 г), 0,4903 Н (50 г), 0,9807 Н (100 г), 1,961 Н (200 г), 2,942 Н (300 г), 4,904 Н (500 г), 9.80 Н (1 кг)
Горизонтальний простір вимірів	85 мм
Вертикальний простір вимірів	65 мм

Вимоги до зразків. Невелике навантаження, мала глибина відбитка, визначення довжини діагоналі відбитка за допомогою мікроскопа вимагають ретельної підготовки поверхні зразків, у тому числі й полірування, особливо для вимірювання мікротвердості. Індентор — алмазна правильна чотиригранна піраміда з кутом при вершині  $\alpha = 136^\circ$ . Зусилля до індентора прикладають плавно, без ударів і вібрації протягом від 2 с до 8 с.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Навантаження — 9,8 (1 кгс) ... 980 (100 кгс) Н, тривалість дії зусилля 10...15 с.

На поверхні зразка залишається квадратний у плані відбиток, діагоналі якого  $d_1$  та  $d_2$  використовуються для розрахунків середнього арифметичного значення

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}. \quad (2.1)$$

При цьому різниця діагоналей відбитка не повинна перевищувати 2% від меншої з них. Вимірювання діагоналей завдовжки до 0,2 мм повинно проводитись з похибкою не більшою за  $\pm 0,001$  мм і для діагоналей довших за 0,2 мм — з похибкою не більшою за  $\pm 0,5\%$ .

Випробування проводять за кімнатної температури у межах від 10°C до 35°C.

Товщина зразка (деталі) повинна бути для сталевих виробів не меншою за 1,2 від середньої довжини діагоналі відбитка, для кольорових металів — не меншою за 1,5 від довжини діагоналі відбитка. Відстань від центра відбитка до пружка зразка має бути не меншою за 2,5 середньої довжини діагоналі відбитка для сталі, мідних сплавів і не меншою за 3 довжини діагоналі для легких металів та сплавів. Відстань між центрами сусідніх відбитків має бути не менше ніж втричі більшою за середні довжини діагоналей відбитків для сталей, мідних сплавів і не менше довжини шести діагоналей для легких сплавів.

Повірка чи калібрування твердомірів здійснюють за стандартом ДСТУ ISO 6507-2:2008. У цьому ж стандарті сформульовані й вимоги до інденторів.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновки по другому розділу

1. Наведено комплекс методик експериментальних досліджень впливу після зварювального підігріву на якість зварного шва (механічних властивостей, мікро - та макроструктури).

2. Вибрано наступне обладнання для досліджень:

Для зварювання зразків було використано стикову зварювальну машину типу МС-20.08.

Для вирізки та розрізання зразків був використаний електроерозійний дротяно-вирізний верстат з ЧПУ струминного типу ДК7732 М11.

Для шліфування поверхні зразків були використані шліфувальний верстат FORCIPOL 2 та шліфувальний папір Mirka.

Для вивчення неметалевих включень, макро та мікро структури був використаний оптичний мікроскоп OLYMPUS GX-51.

Для вимірювання твердості використано мікротвердомір модель HVS-1000A.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Хімічний склад зразків з рельсової сталі

Щоб отримати відмінне зварне з'єднання, потрібно мати матеріал із гарною зварюваністю. В основному зварюваність характеризує властивості металу, існуючу реакцію на зварювальний процес, а також здатність отримувати таке зварювальне з'єднання, яке відповідатиме всім заданим технологічним вимогам.

Коли деталі виконані з матеріалу, що вільно піддається зварювальному процесу, з отриманням високоякісного шва особливих умов не потрібно. Але для деталей з матеріалу, що погано зварюється, потрібні додаткові технологічні умови. Іноді застосовується спеціальний вид зварювання, який набагато дорожчий і складніший. Причому виконання робіт потребує суворого дотримання технологічного процесу.

До складу сталі для рейок входить дуже багато вуглецю, майже 82%. Цей матеріал відноситься до групи матеріалів, що мають погану зварюваність. При зварюванні можлива поява тріщин, що абсолютно неприпустимо на рейках. У них концентрується напруга, яка може призвести до руйнування стикового з'єднання та аварії складу.

За основу взято сталь для залізничних рейок E76XF, виготовлену електропічним методом, хімічний склад якої наведено в таблиці 3.1.

Режим зварювання:  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11,7$  кА,  $V = 1$  мм / с,  $\Delta = 10$  мм.  
Режим контактного підігріву: час охолодження після осадки, час підігріву с, час охолодження після підігріву, кількість імпульсів підігріву згідно таблиці 2.2. Аналіз зразків спектральним методом з фотографічною реєстрацією спектру дав наступні результати хімічного складу (табл.. 3.1)

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Хімічний склад зварних зразків з рельсової сталі

№ зразка	C	Mn	Si	Cr	V	P	S	Al
76ХФ	0,71-0,82	0,75-1,25	0,25-0,60	0,2-0,8	0,03-0,15	<0,02	<0,02	<0,004
0	0,91	0,81	0,43	0,32	0,09	0,010	0,005	0,003
1	0,76	0,77	0,53	0,36	0,04	0,014	0,006	0,003
2	0,77	0,80	0,56	0,38	0,04	0,008	0,006	0,002
3	0,76	0,77	0,53	0,36	0,04	0,014	0,006	0,003
4	0,77	0,80	0,56	0,38	0,04	0,008	0,006	0,002

### 3.2 Вивчення мікроструктури та неметалевих включень зварних зразків

Макроструктури всіх зварних швів зразків представлено на рисунку 3.1. Зварний шов представляє собою світлу смужку і зону термічного впливу (ЗТВ) з обох боків від неї, так само можна спостерігати основний метал.

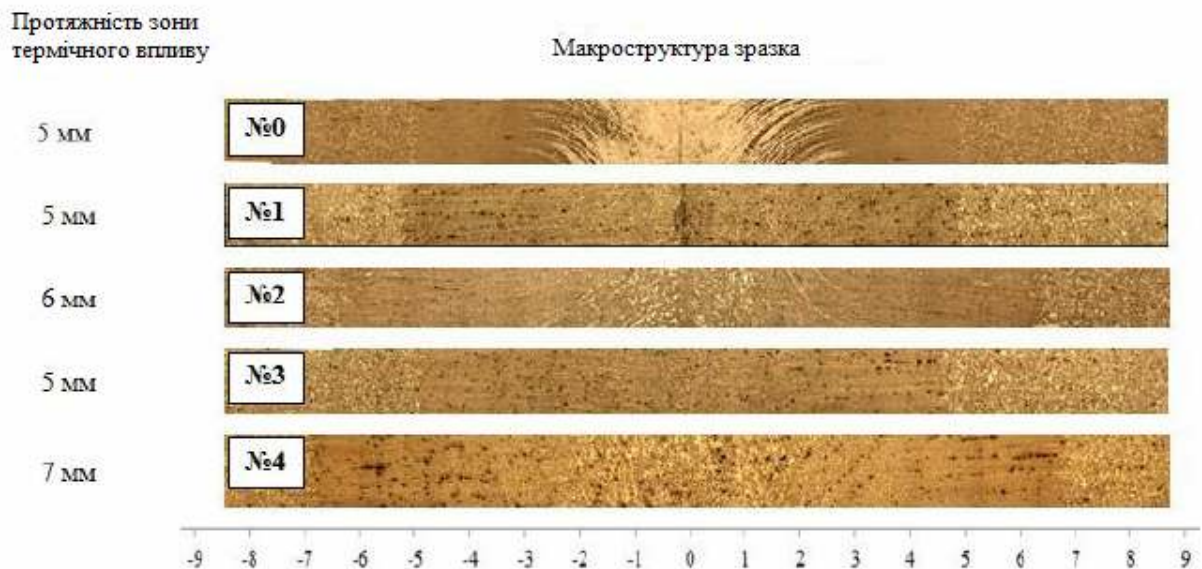


Рисунок 3.1 – Макроструктура зварного шва зразка сталі E76ХФ

З рисунку 3.1 видно, що найменша довжина зони термічного впливу спостерігається у зварних стиків, отриманих за режимами №1, №0, №3 (близько 5,0 мм), а найбільша - у зварювального стику №4 (близько 7,0 мм).

Виходячи з отриманих даних по макроструктурі, можна побачити межу між основним металом та зоною термічного впливу (рисунок 3.2).

Цей перехід обумовлюється різкою різницею у розмірі зерна (або перлітної комірки) між двома областями.

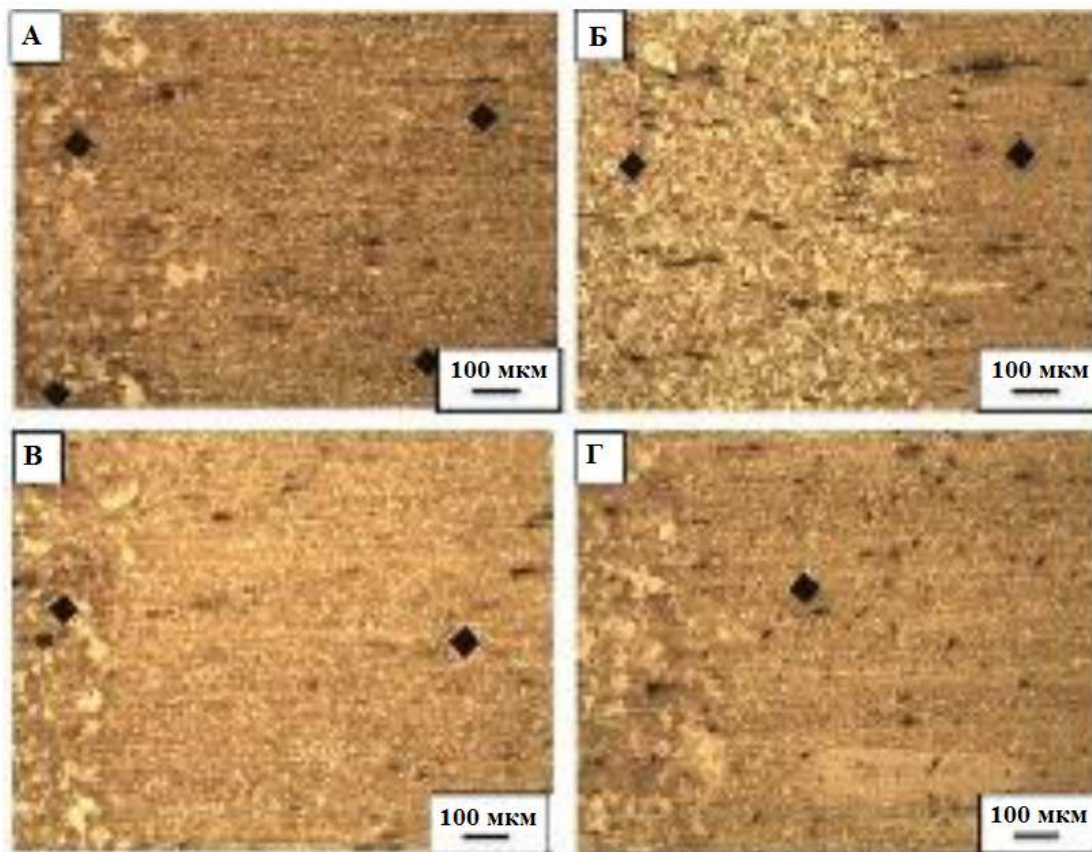


Рисунок 3.2 – Перехідна область між зоною термічного впливу (праворуч) та основним металом (ліворуч):

Вивчення неметалевих включень проводилося на об'єктивах (10x, 20x, 50x, 100x). Дослідження зразків наплавленого шару на забрудненість неметалевими включеннями здійснювалося відповідно до ДСТУ ISO 4967:2015 (ISO 4967:2013) при збільшенні x 100, за допомогою оптичного мікроскопа OLYMPUS GX-51 та програмного забезпечення SIAMS Photolab.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 3.3 представлено типи неметалевих включень режиму №0. За даними рисунка видно, що більшість включень становлять оксиди. У зварному шві так само, як і в основному металі рейкової сталі марки E76XF, було виявлено невелику кількість точкових оксидів (бал №1а), пластинчасті силікати (бал № 3 а) та нітриди рядкові (бал № 2а). Даний зразок є одним із найчистіших зразків за кількістю неметалевих включень.

Проведене дослідження металу та встановлений хімічний склад дозволяють припустити, що серед неметалевих включень присутні переважно кремнієво-марганцеві, які призводять до утворення тріщин при експлуатації.

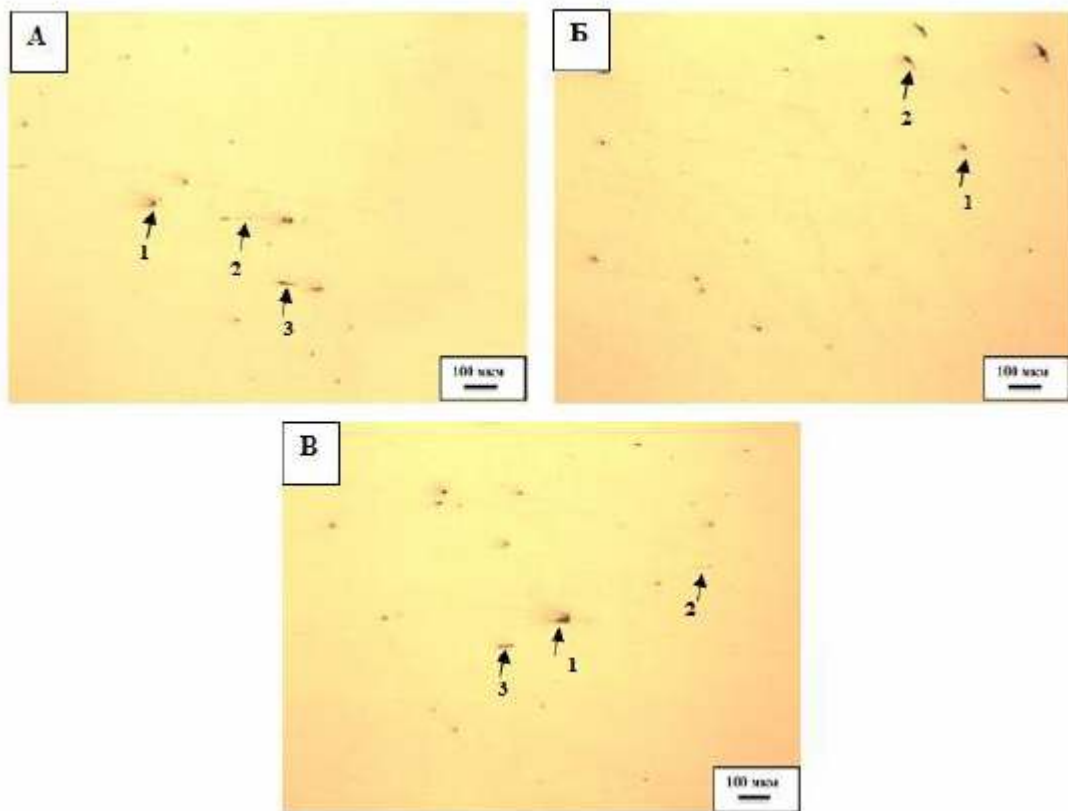


Рисунок 3.3 – Неметалічні включення зразка сталі E76XF, отриманого за режимом № 0:

- 1 – точкові оксиди, 2 – стрічкові нітриди, 3 – силікати пластинчасті;  
а – основний метал; б – зона термічного впливу; в – зварний шов

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

У зразку, отриманому за режимом №1 (рисунок 3.4) в основному металі і в зварному шві спостерігалася присутність точкових силікатів, що не деформуються, і пластинчастих силікатів. Цей зразок містить не металеві включення.

Проведене дослідження металу та встановлений хімічний склад дозволяють припустити, що серед неметалевих включень є включення кремнію та марганцю, які призводять до утворення тріщин при експлуатації.

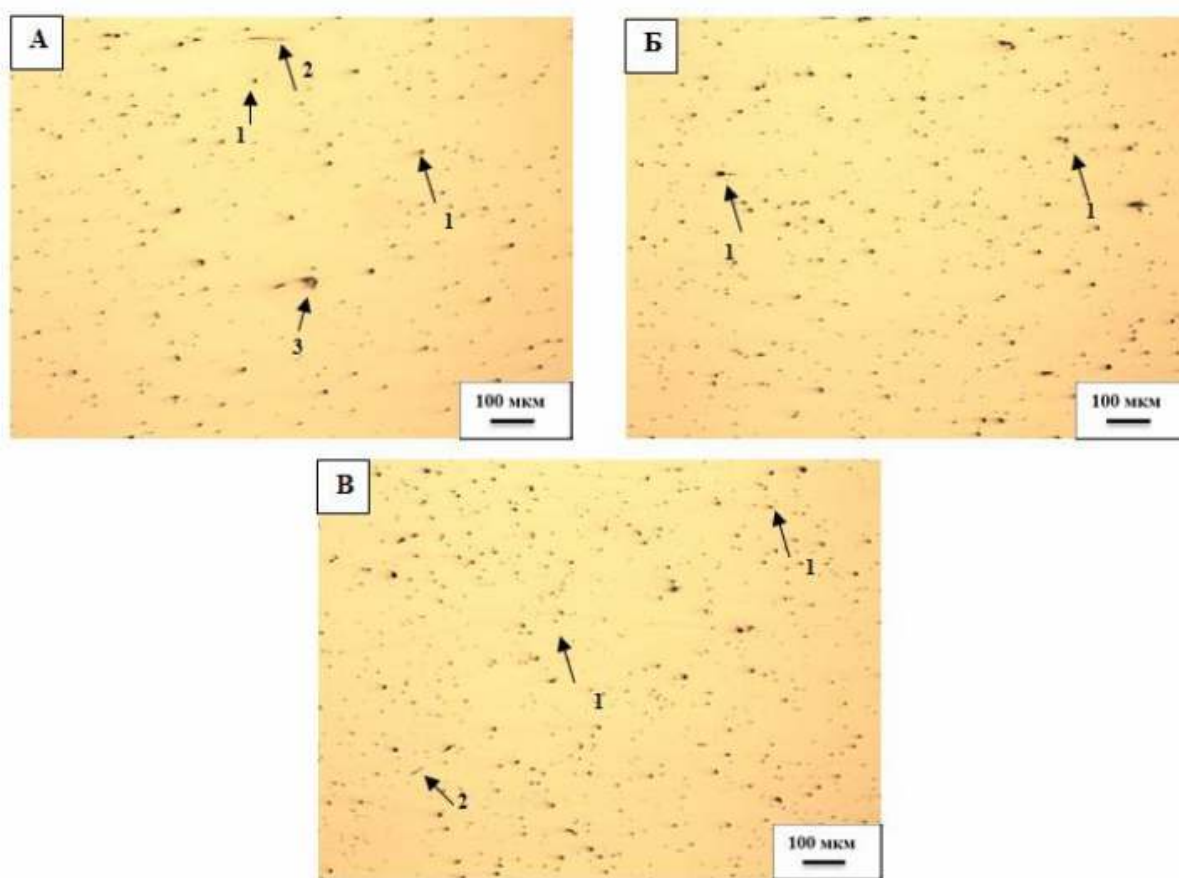


Рисунок 3.4 – Неметалічні включення зразка сталі E76XF, отриманого за режимом №1:

1 – точкові оксиди, 2 – силікати пластинчасті, 3 – силікати, що не деформуються; А – основний метал; Б – зона термічного впливу; В – зварний шов

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

У зразку, отриманому за режимом №2 (рисунок 3.5) в основному металі і в зварному шві спостерігалася присутність точкових силікатів, що не деформуються, і пластинчастих силікатів. При цьому забрудненість перерахованими типами включень помітно нижча, ніж у зразку, отриманому за режимом №1.

Проведене дослідження металу та встановлений хімічний склад дозволяють припустити, що серед неметалевих включень є включення кремнію та марганцю, які призводять до утворення тріщин при експлуатації.

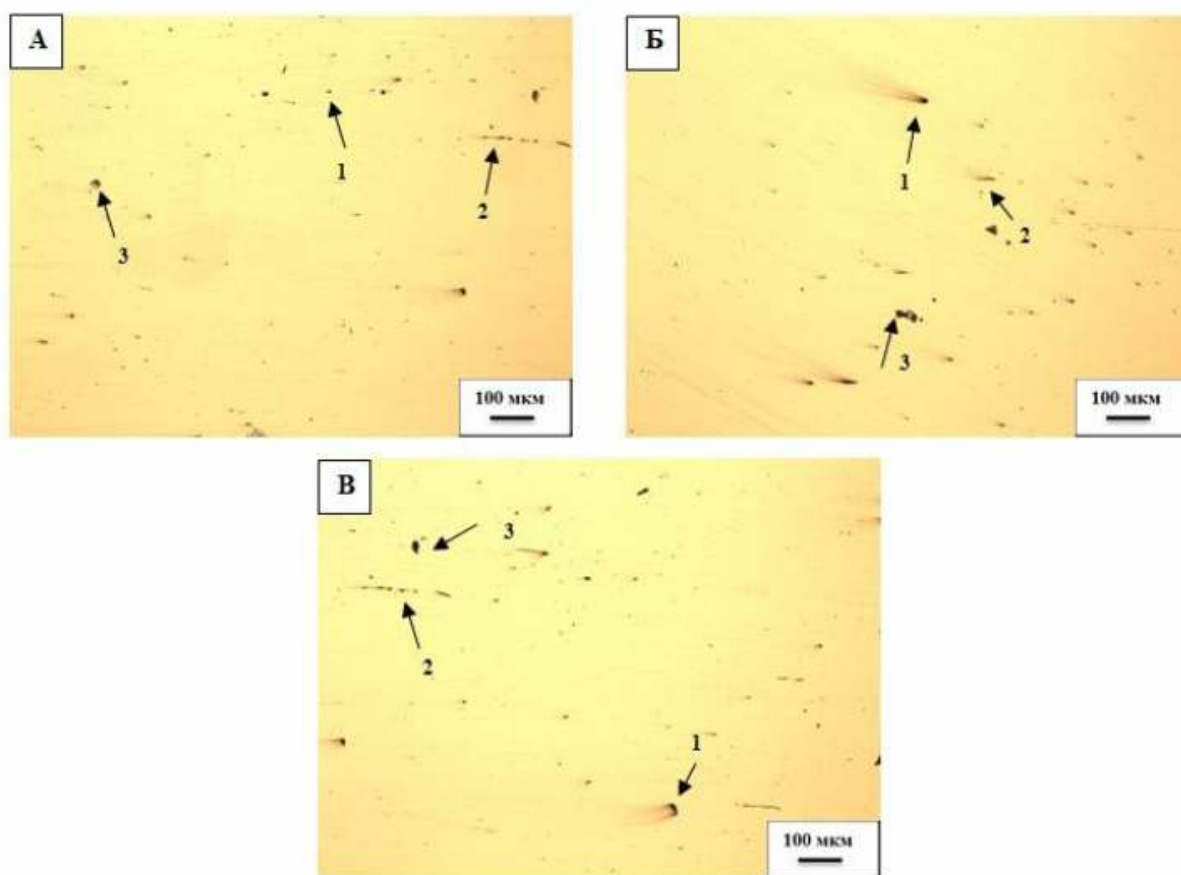


Рисунок 3.5 – Неметалічні включення зразка сталі E76XF, отриманого за режимом № 2:

1 – точкові оксиди, 2 – силікати пластинчасті, 3 – силікати, що не деформуються; А – основний метал; Б – зона термічного впливу; В – зварний шов

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 3.6 представлено типи неметалевих включень режиму №3. В основному металі було виявлено наявність малої кількості точкових оксидів, крихкі силікати та нітриди рядкові. У зварному шві зразка № 3 присутні точкові оксиди, крихкі силікати та стрічкові нітриди.

Проведене дослідження металу та встановлений хімічний склад дозволяють припустити, що серед неметалевих включень є включення кремнію та марганцю, які призводять до утворення тріщин при експлуатації.

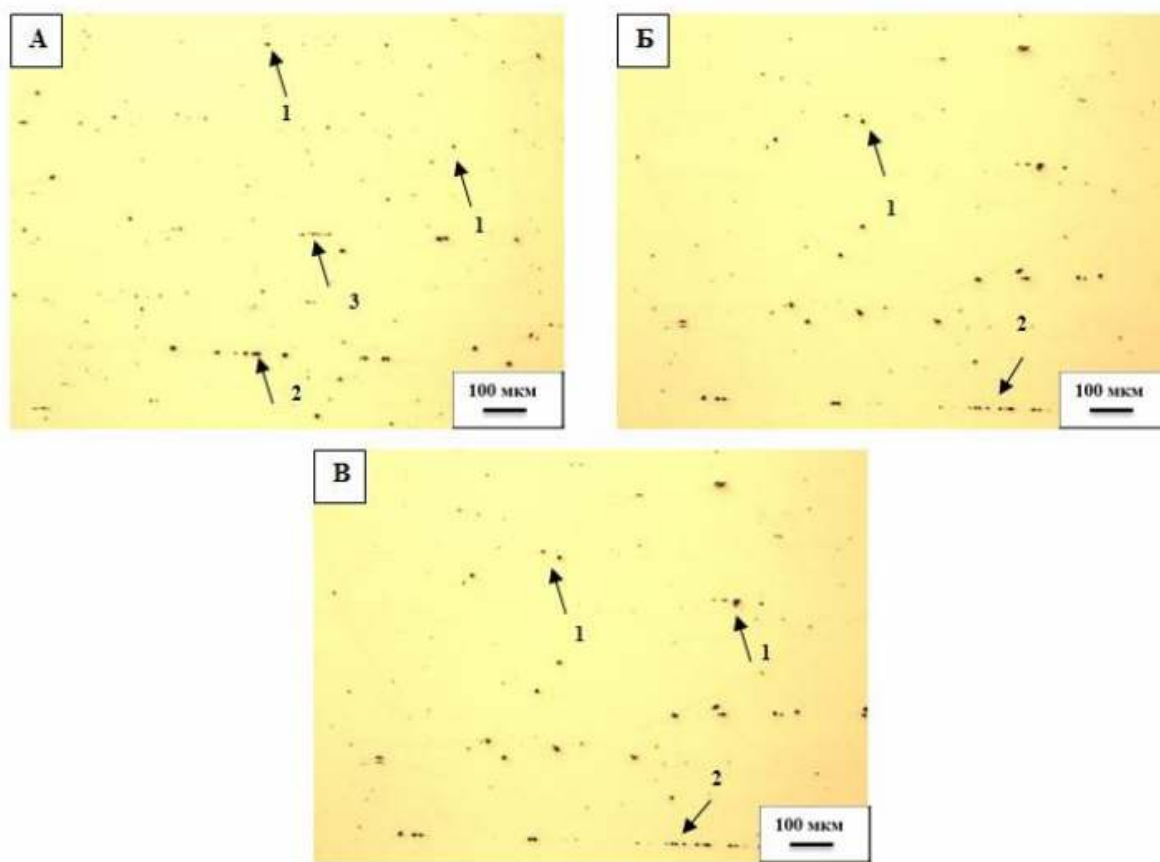


Рисунок 3.6 – Неметалічні включення зразка сталі E76XF, отриманого за режимом № 3:

1 – оксиди точкові, 2 – нітриди рядкові, 3 – силікати крихкі; А – основний метал; Б – зона термічного впливу; В – зварний шов

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Зразки рейкової сталі марки E76XF №4 (рисунок 3.7) є одними з найчистіших зразків за кількістю та видами неметалевих включень. У даних зразках були виявлені силікати недеформовані, оксиди точкові та силікати пластинчасті. Основний метал зразка містить наступні неметалеві включення: силікати, які не деформуються, точкові оксиди і силікати пластинчасті. Даний зразок є одним із найменш забруднених зразків за кількістю неметалевих включень.

Проведене дослідження металу та встановлений хімічний склад дозволяють припустити, що серед неметалевих включень присутні включення кремнію і марганцю, які призводять до утворення тріщин при експлуатації.

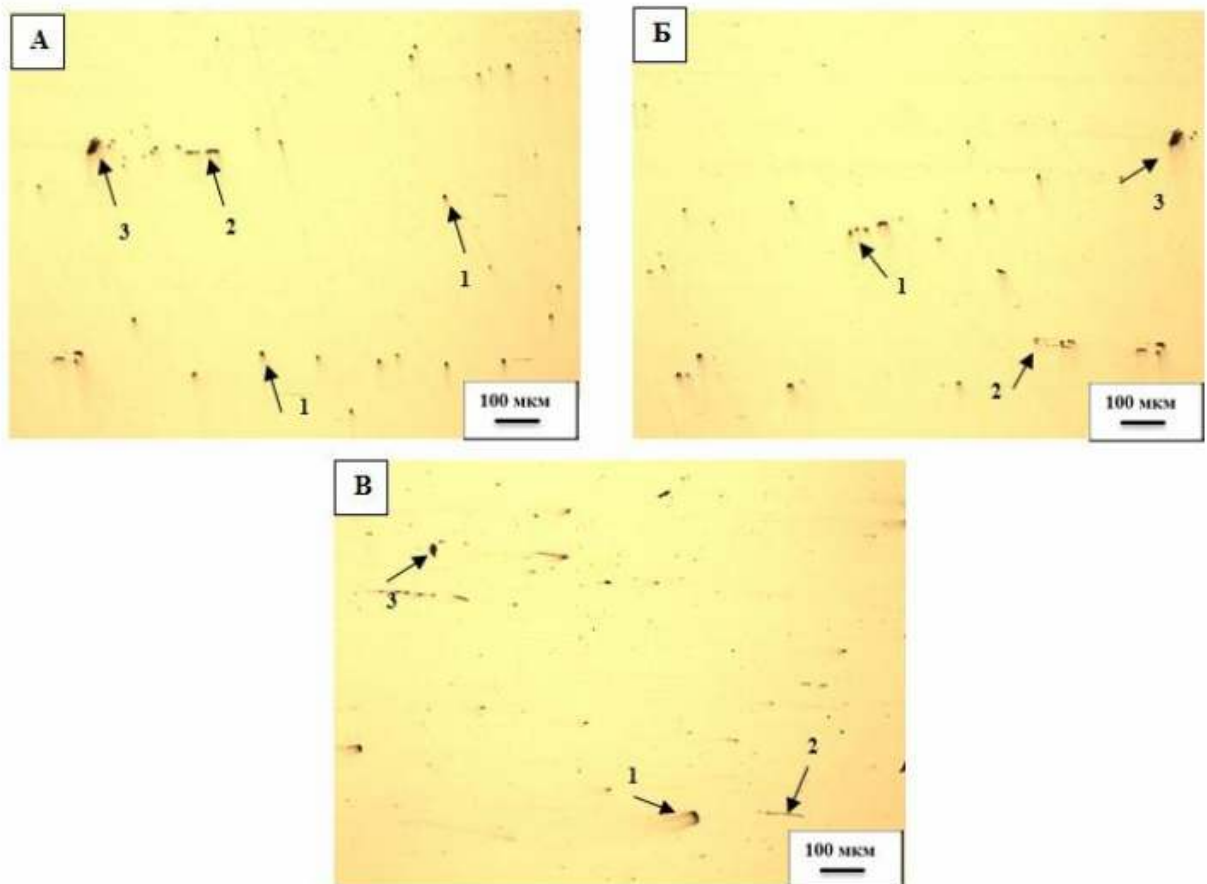


Рисунок 3.7 – Неметалічні включення зразка сталі E76XF, отриманого за режимом №4:

1 – точкові оксиди, 2 – силікати пластинчасті, 3 – силікати, що не деформуються

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Дослідження мікроструктури зразків рейкової сталі проводилося на металографічному мікроскопі OLYMPUS GX-51 при збільшенні в 1000 крат після травлення поверхні зразків у 2% розчині азотної кислоти відповідно до ДСТУ 7175:2010. Мікроструктуру зразка сталі E76ХФ після зварювання контактнo-стикoвим методом за режимом № 0 представлено на рисунку 3.8.

Аналіз мікроструктури дозволив виділити на досліджуваному зразку найбільш характерні області, які, залежно від режиму зварювання, помітно відрізняються одна від одної як структурою, так і за протяжністю:

1. Зварний шов;
2. Зона великого зерна;
3. Ділянка нормалізації;
4. Основний метал.

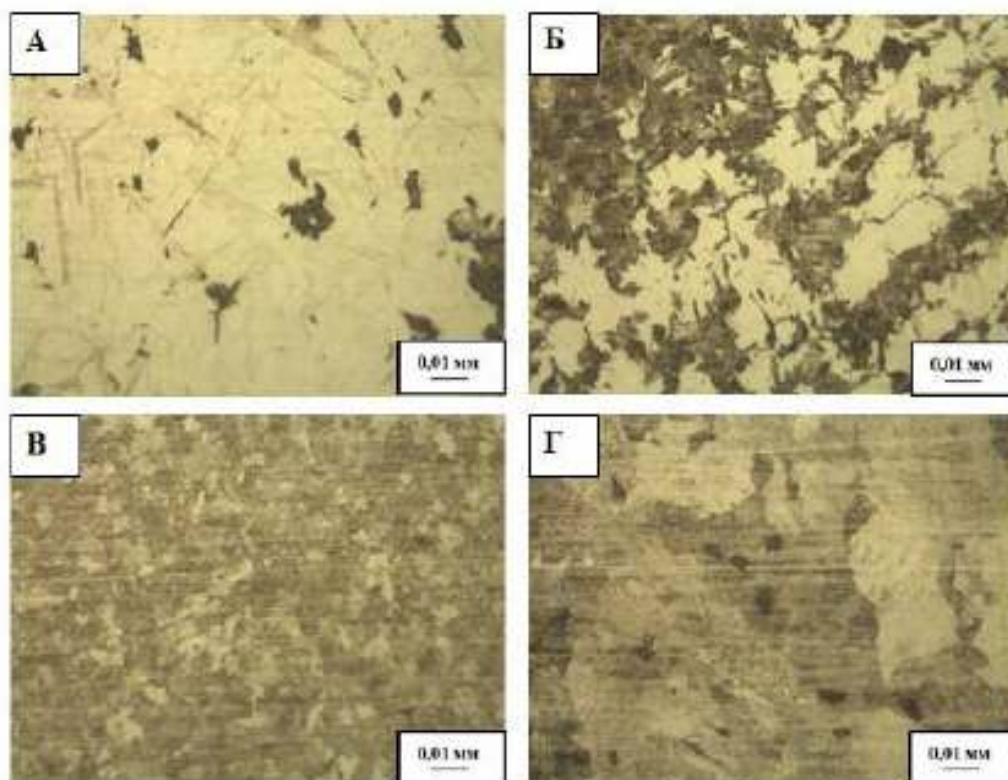


Рисунок 3.8 – Мікроструктура різних областей, отримана при режимі № 0:

А – зона зварного шва, Б, В – ЗТВ, Г – основний метал

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

Результати оцінки мікроструктури на бальність у зоні зварного шва представлено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Оцінка мікроструктури зразка, отриманого за режимом № 0

Зона	Протяжність зони, мм	Об'ємна частка мартенситу/трооститу, % (бал)	Ступінь дисперсності пластинчатого перліту, бал
Зварний шов	0,45	95/5 (4)	-
Зона великого зерна	1,35	95/5 (4)	-

У зварному шві зразків, отриманих за режимом № 0, присутня структура голчастого мартенситу. Розміри голок для режиму №0 оцінюються балом 7 шкали 3 ГОСТ 8233-56 і відносяться до типу великогольчатого мартенситу з найбільшою довжиною голок 12 мкм. Наявність таких структур неприпустима у рейковому металі. Для режимів №0 мартенсит оцінюється балом 8 шкали 3 ГОСТ 8233-56. Даний тип мартенситу відноситься до великогольчатого мартенситу з розміром голок 16 мкм. Дефектів металургійного походження у структурі матеріалу у вигляді порів, тріщин, розшарування не виявлено.

Дослідження мікроструктури зразків рейкової сталі проводилося на металографічному мікроскопі OLYMPUS GX-51 при збільшенні в 1000 крат після травлення поверхні зразків у 2% розчині азотної кислоти відповідно до ГОСТ 8233-56.

Мікроструктура зразка сталі E76XФ після зварювання контактностиковим методом за режимом №1 представляє собою перліт різного ступеня дисперсності (рисунок 3.9).

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

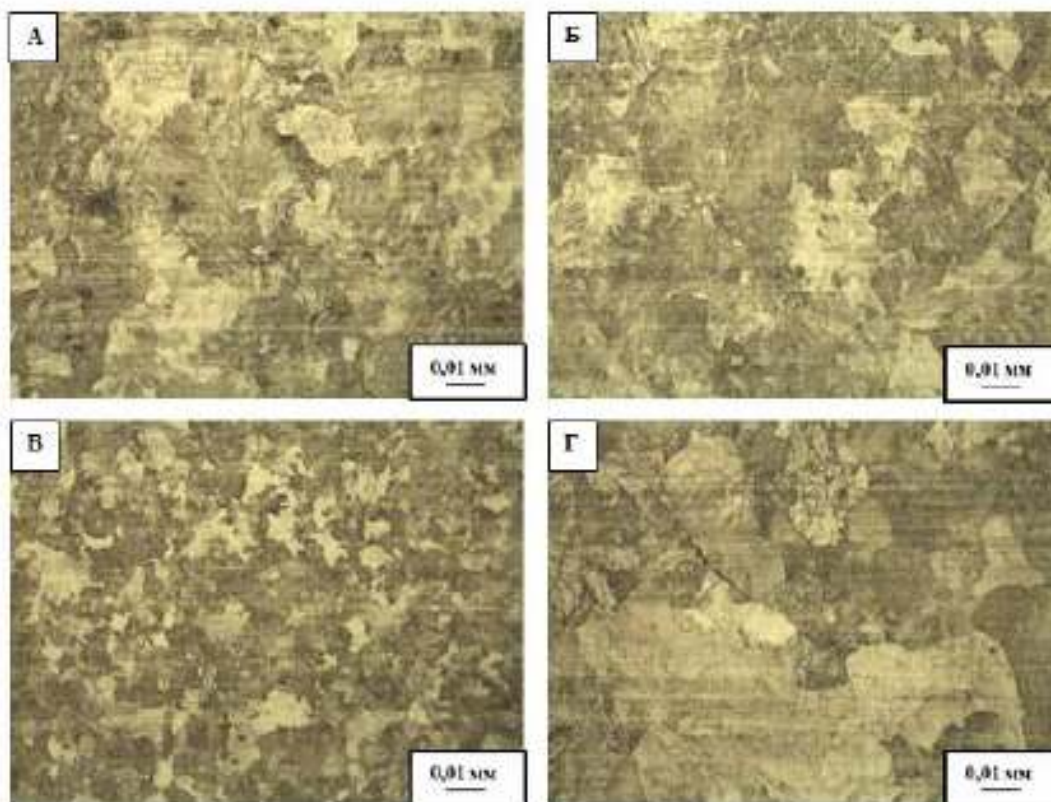


Рисунок 3.9 – Мікроструктура різних областей, отримана при режимі №1:

А – зона зварного шва, Б, В – ЗТВ, Г – основний метал

Результати оцінки мікроструктури на бальність у зонах зварного шва та великого зерна представлено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Оцінка мікроструктури зразка, отриманого за режимом №1

Зона	Протяжність зони, мм	Об'ємна частка мартенситу/трооститу, % (бал)	Ступінь дисперсності пластинчатого перліту, бал
Зварний шов	0,45	-	2
Зона великого зерна	1,35	-	1

За результатами проведеного аналізу, представленому у таблиці 3.3, встановлено, що в зоні зварного шва у зразку, отриманому за режимом №1,

переважає структура приховано-пластинчатого перліту з міжпластинчатою відстанню 0,3 мкм. У зоні великого зерна переважає структура пластинчатого сорбітоподібного перліту з міжпластинчатою відстанню менше 0,2 мкм. Дефектів металургійного походження у структурі матеріалу у вигляді порів, тріщин, розшарування не виявлено.

Аналіз мікроструктури дозволив виділити на зразку, отриманому за режимом №2, області, ідентичні встановленим на вищезгаданих зразках: зварний шов, зона великого зерна, зона дрібного зерна та основний метал (рисунок 3.10).

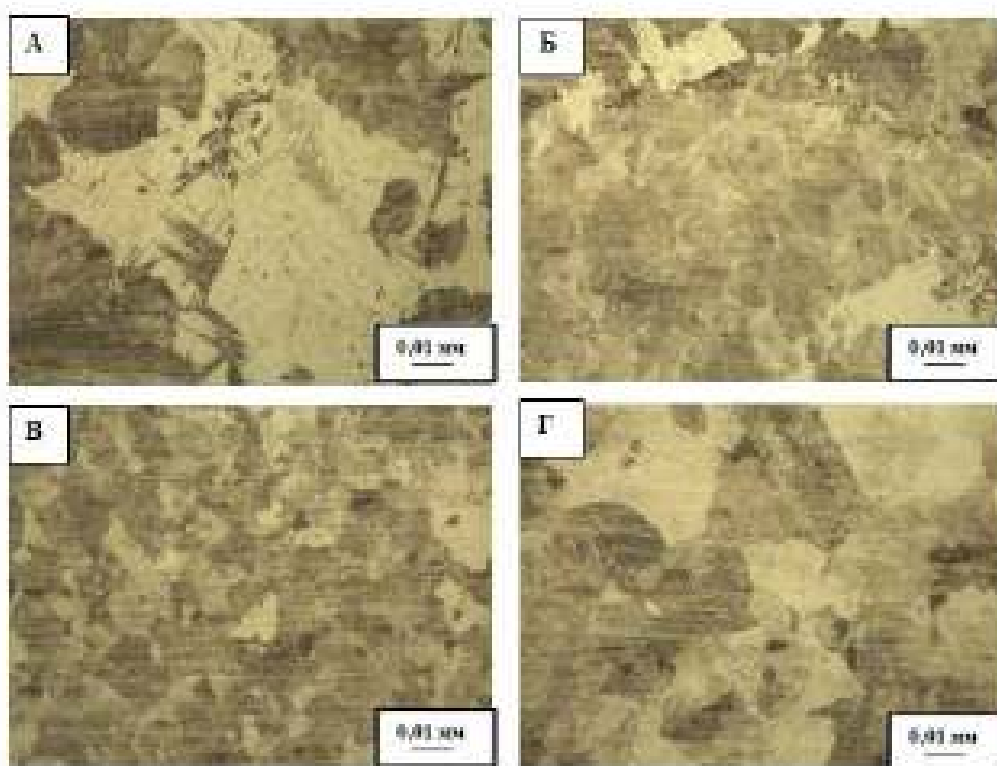


Рисунок 3.10 – Мікроструктура різних областей, отримана при режимі №2:

А – зона зварного шва, Б, В – ЗТВ, Г – основний метал

Результати оцінки мікроструктури на бальність у зонах зварного шва та великого зерна представлено у таблиці 3.4.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.4 – Оцінка мікроструктури зразка, отриманого за режимом

№2

Зона	Протяжність зони, мм	Об'ємна частка мартенситу/троости ту, % (бал)	Ступінь дисперсності пластинчатого перліту, бал
Зварний шов	0,45	>75/<25 (7,5)	-
Зона великого зерна	2,54	25/75 (9)	-

За результатами проведеного аналізу, представлено у таблиці 3.4, встановлено, що в зоні зварного шва у зразку, отриманому за режимом №2, переважає структура мартенситу і відповідає балу 6 шкали 3 ГОСТ 8233. Такий тип мартенситу відноситься до середньо-гольчастого мартенситу, де найбільший розмір 10 мкм. У зоні великого зерна мартенсит оцінюється балом 8 шкали 3 ГОСТ 8233. Даний тип мартенситу відноситься до великогольчастого мартенситу з розміром голок 16 мкм. Дефектів металургійного походження у структурі матеріалу у вигляді порів, тріщин, розшарування не виявлено.

Мікроструктура зразка сталі E76XF після зварювання контактностиковим методом за режимом №3 представляє собою перліт різного ступеня дисперсності (рисунок 3.11).

На зразку, отриманому за режимом №3, аналіз мікроструктури дозволив виділити області, ідентичні встановленим на вищезгаданих зразках: зварний шов, зона великого зерна, зона дрібного зерна та основний метал.

Результати оцінки мікроструктури на бальність у зонах зварного шва та великого зерна представлено у таблиці 3.5.

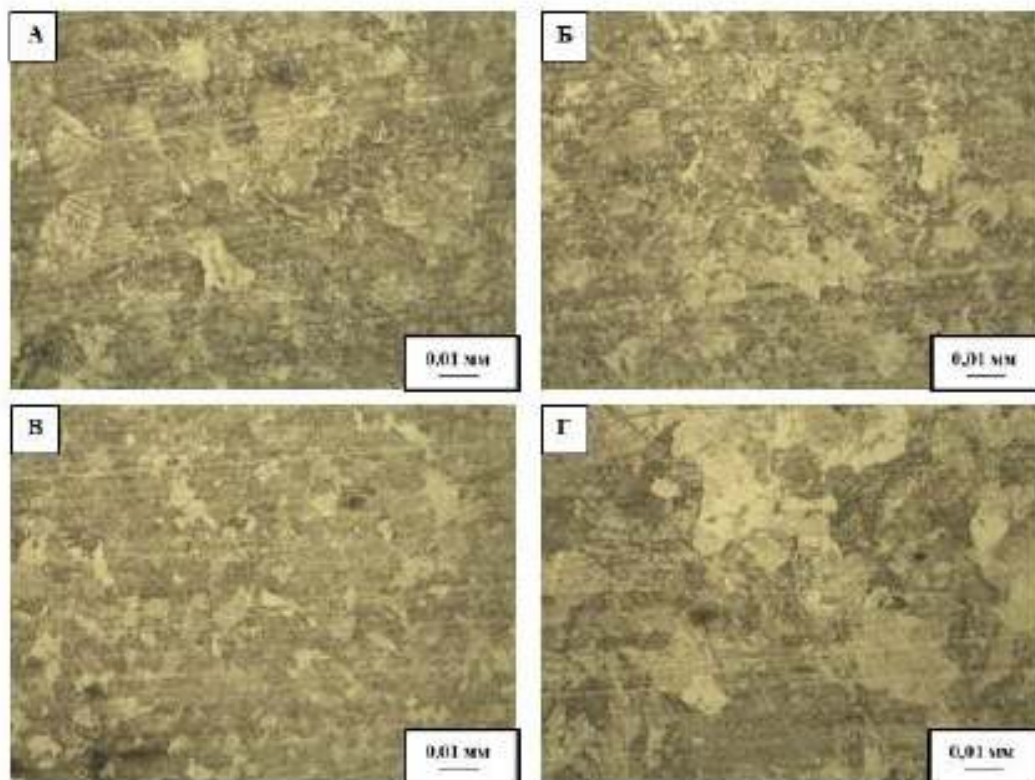


Рисунок 3.11 – Мікроструктура різних областей, отримана при режимі №3:

А – зона зварного шва, Б, В – ЗТВ, Г – основний метал

Таблиця 3.5 – Оцінка мікроструктури зразка, отриманого за режимом № 3

Зона	Протяжність зони, мм	Об'ємна частка мартенситу/троости ту, % (бал)	Ступінь дисперсності пластинчатого перліту, бал
Зварний шов	0,45	-	1
Зона великого зерна	1,35	-	1

За результатами проведеного аналізу, представленого у таблиці 3.5, встановлено, що в зоні зварного шва для режимів №3 у зварному шві переважає сорбітоподібний перліт з міжпластинчатою відстанню менше 0,2 мкм. У зоні великого зерна переважає структура пластинчатого сорбіту образного перліту з міжпластинчатою відстанню менше 0,2 мкм. Дефектів

металургійного походження у структурі матеріалу у вигляді порів, тріщин, розшарування не виявлено. Мікроструктура зразка сталі Е76ХФ після зварювання контактним-стиком методом за режимом №4 представляє собою перліт різного ступеня дисперсності (рисунок 3.12).

На зразку, отриманому за режимом №4, аналіз мікроструктури дозволив виділити області, ідентичні встановленим на вищезгаданих зразках: зварний шов, зона великого зерна, зона дрібного зерна та основний метал.

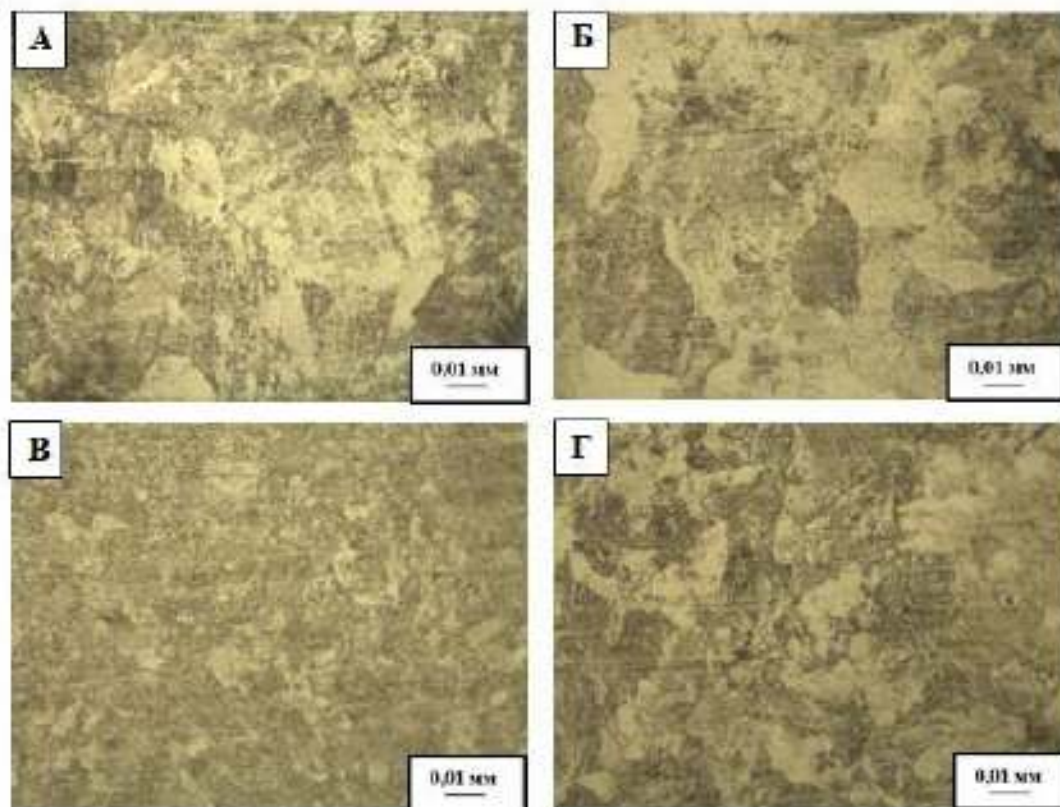


Рисунок 3.12 – Мікроструктура різних областей, отримана при режимі №4:

А – зона зварного шва, Б, В – ЗТВ, Г – основний метал

Результати оцінки мікроструктури на бальність у зонах зварного шва та великого зерна представлено у таблиці 3.6.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

Таблиця 3.6 – Оцінка мікроструктури зразка, отриманого за режимом

№4

Зона	Протяжність зони, мм	Об'ємна частка мартенситу/трооститу, % (бал)	Ступінь дисперсності пластинчатого перліту, бал
Зварний шов	0,45	-	4
Зона великого зерна	2,35	-	3-4

Для режиму №4 у зоні зварного шва переважає дрібнопластинчатий перліт з міжпластинчатою відстанню 0,4 мкм. Для зони великого зерна виявлено тонко- і дрібнопластинчатий перліт з міжпластинчатою відстанню до 0,6 мкм. Дефектів металургійного походження у структурі матеріалу у вигляді порів, тріщин, розшарування не виявлено.

Мікроструктура в зоні дрібного зерна є пластинчатим і зернистим перлітом в різній стадії коагуляції. Дисперсність пластинчатого перліту оцінюється балом 1 шкали 1 ГОСТ 8233 і відповідає сорбітоподібний перліт з міжпластинчатою відстанню менше 0,2 мкм. Дисперсність зернистого перліту оцінюється балом 1 шкали 1 ГОСТ 8233. Даний тип зернистого перліту відноситься до точкового із середнім діаметром зерен цементиту до 0,25 мкм. Протяжність цієї зони для досліджуваних зразків варіюється від 3 до 5 мм. Режим №1 має найменш протяжну область дрібного зерна, що дорівнює 3 мм, режим №4 - найбільшу, що дорівнює 5 мм.

Структура основного металу досліджуваних зразків є пластинчатим перлітом 1 - 2 бали за шкалою 1 ГОСТ 8233, що характерно для структури не термозміцнених рейок.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

### 3.3 Дослідження мікротвердості

Дослідження мікротвердості проводилося у відповідності до ГОСТ 9450-76 на мікро твердомірі HVS-1000.

На рисунку 3.13 зображено графік, що характеризує зміну значень мікротвердості залежно від зони, що відповідають режиму №0. З даних видно, що показники мікротвердості різко зростають у міру наближення до центру зварного шва. У зоні зварного шва її максимальне значення становить 591,9 HV. Зона великого зерна також має високі значення мікротвердості, середнє значення якої становить 560 HV. Високі значення мікротвердості у цих зонах підтверджують переважання в них мартенситних структур. Середнє значення мікротвердості у зоні дрібного зерна 385,7 HV.

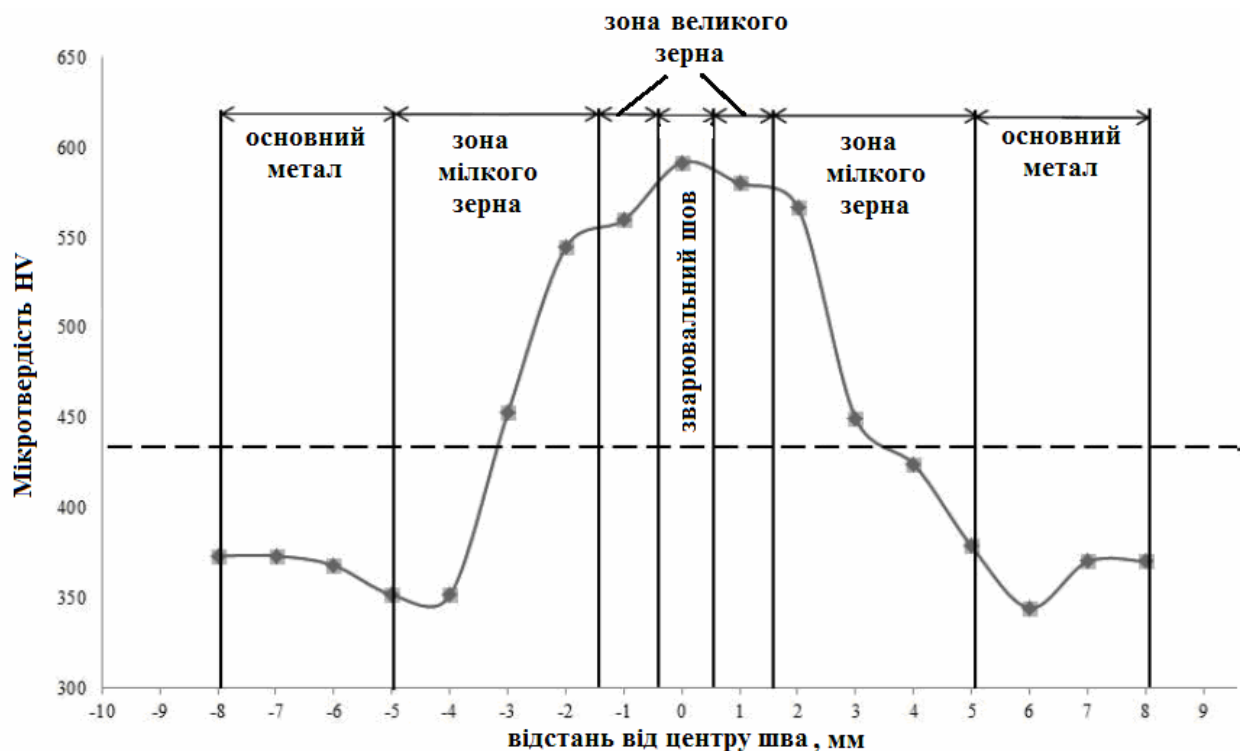


Рисунок 3.13 – Мікротвердість сталі E76XF у різних зонах після проведення контактно-стикового зварювання за режимом №0

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

Падіння величини значень мікротвердості у цій області пояснюється переважанням зернистого перліту на різній стадії коагуляції. Далі на відстані понад 5 мм від зварного шва спостерігається досить постійна твердість, близька 370 HV.

На рисунку 3.14 зображено графік, що характеризує зміну значень мікротвердості залежно від зони, що відповідають режиму №1. Максимальне значення мікротвердості відповідають зоні зварного шва та становлять 356,4 HV. У зоні дрібного зерна спостерігається зниження мікротвердості та середнє значення в цій області становить 316,3 HV. Падіння величини значень мікротвердості в цій області також пояснюється переважанням зернистого перліту в різній стадії коагуляції. На відстані понад 5 мм середнє значення мікротвердості становить 320,6 HV.

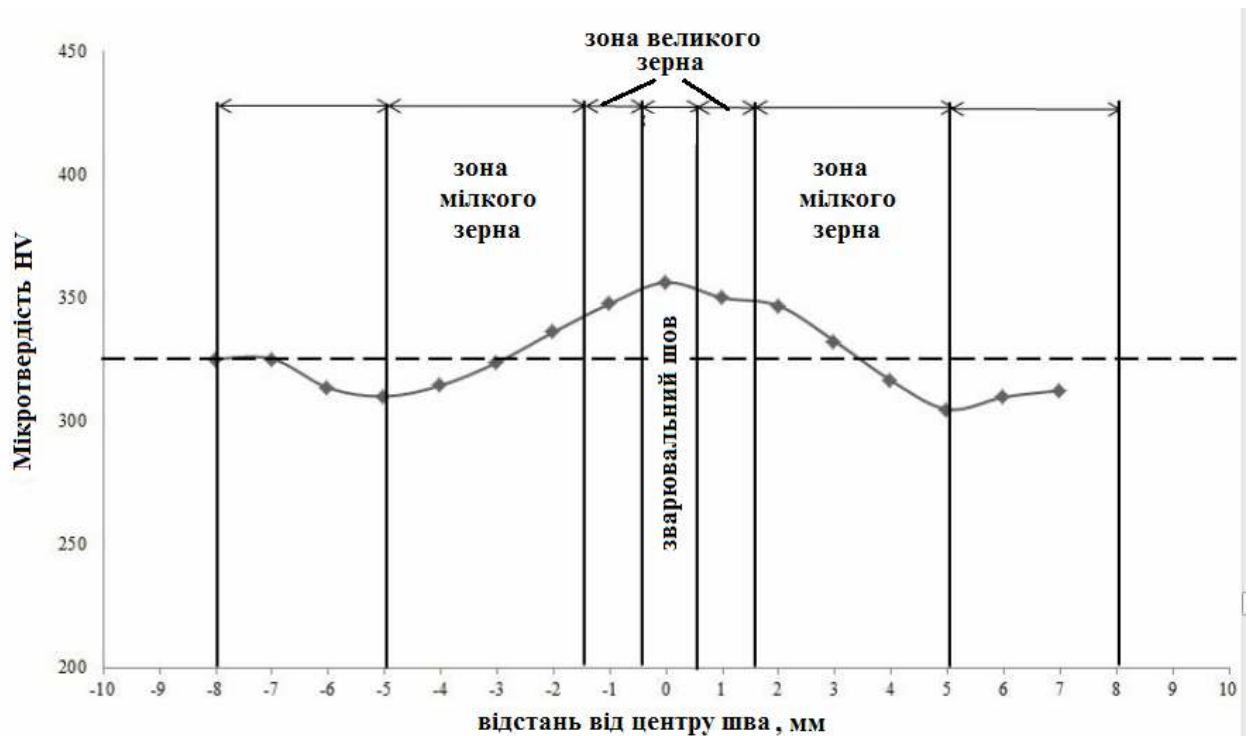


Рисунок 3.14 – Мікротвердість сталі E76XF у різних зонах після проведення контактної зварювання за режимом №1

Пунктирною лінією позначено середнє значення мікротвердості зразка. На рисунку 3.15 зображено графік, що характеризує зміну значень мікротвердості залежно від зони, що відповідають режиму №2. З наведених даних видно, що максимальне значення твердості знаходиться за місцем зварного шва і становить 413 НV. У зоні великого зерна спостерігається зниження значень мікротвердості, середнє значення якої становить 362,5 НV. Падіння величини значень мікротвердості у цій області, порівняно з областю зварного шва, пояснюється зниженням об'ємної частки мартенситу. Середнє значення мікротвердості у зоні дрібного зерна 329,1 НV. Падіння величини значень мікротвердості у цій галузі пояснюється переважанням зернистого перліту у різній стадії коагуляції. Далі на відстані понад 6 мм від зварного шва спостерігається досить постійна твердість, близька до 330 НV.

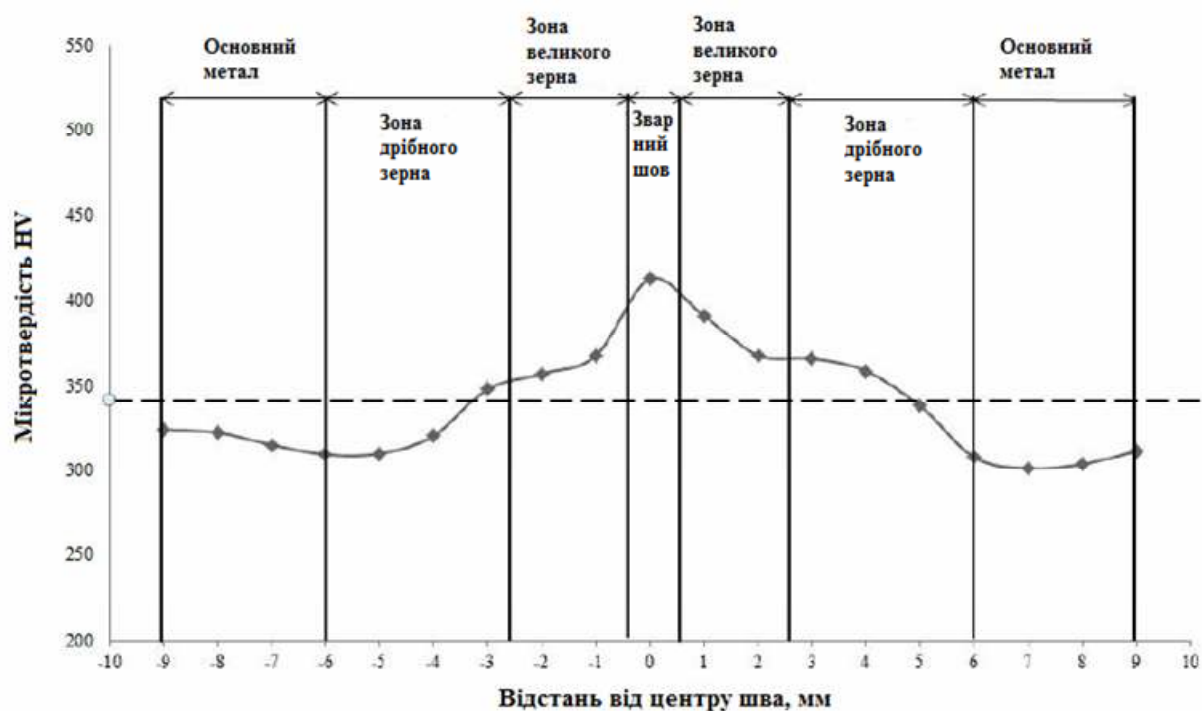


Рисунок 3.15 – Мікротвердість сталі E76XF у різних зонах після проведення контактної-стиківого зварювання за режимом №2

Пунктирною лінією показано середнє значення мікротвердості зразка. На рисунку 3.16 зображено графік, що характеризує зміну значень

									Арк.
									79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 2116116.000 ПЗ				

мікротвердості залежно від зони, що відповідають режиму №3. Максимальне значення мікротвердості відповідає зоні зварного шва та становить 350,8 HV. У зоні дрібного зерна спостерігається зниження мікротвердості та середнє значення в цій області становить 306,8 HV. Падіння величини значень мікротвердості у цій області пояснюється переважанням зернистого перліту у різній стадії коагуляції. На відстані понад 5 мм середнє значення мікротвердості становить 320,6 HV. Отримані значення у зварному шві й у зоні великого зерна близькі за величиною, що пояснюється схожістю структури у цих зонах.

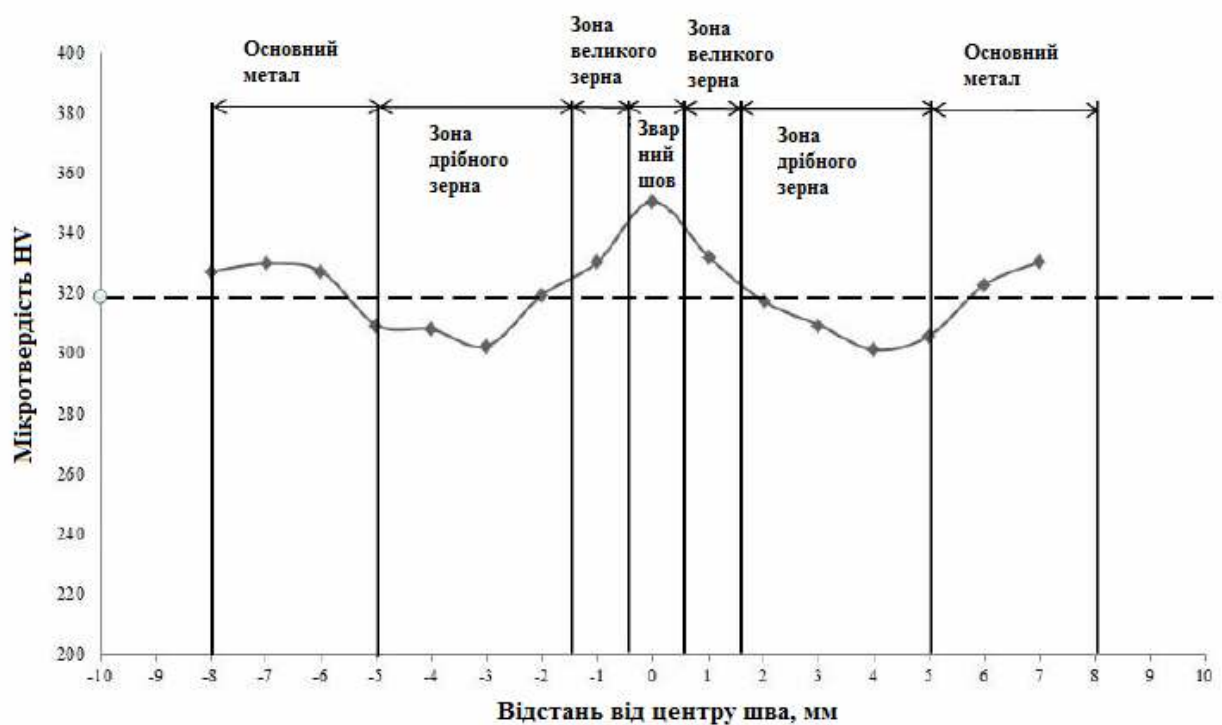


Рисунок 3.16 – Мікротвердість сталі E76XF у різних зонах після проведення контактної зварювання за режимом №3

Пунктирною лінією вказано середнє значення мікротвердості зразка. На рисунку 3.17 зображено графік, що характеризує зміну значень мікротвердості залежно від зони, що відповідають режиму №3. Максимальне значення мікротвердості відповідає зоні зварного шва та становить 320,1 HV. У зоні дрібного зерна спостерігається зниження мікротвердості та середнє

значення в цій області становить 290,7 HV. Падіння величини значень мікротвердості у цій області пояснюється переважанням зернистого перліту у різній стадії коагуляції. На відстані понад 7 мм середнє значення мікротвердості становить 318,1 HV. Отримані значення мікротвердості у зварному шві та в зоні великого зерна близькі за величиною, що пояснюється схожістю структури в цих зонах.

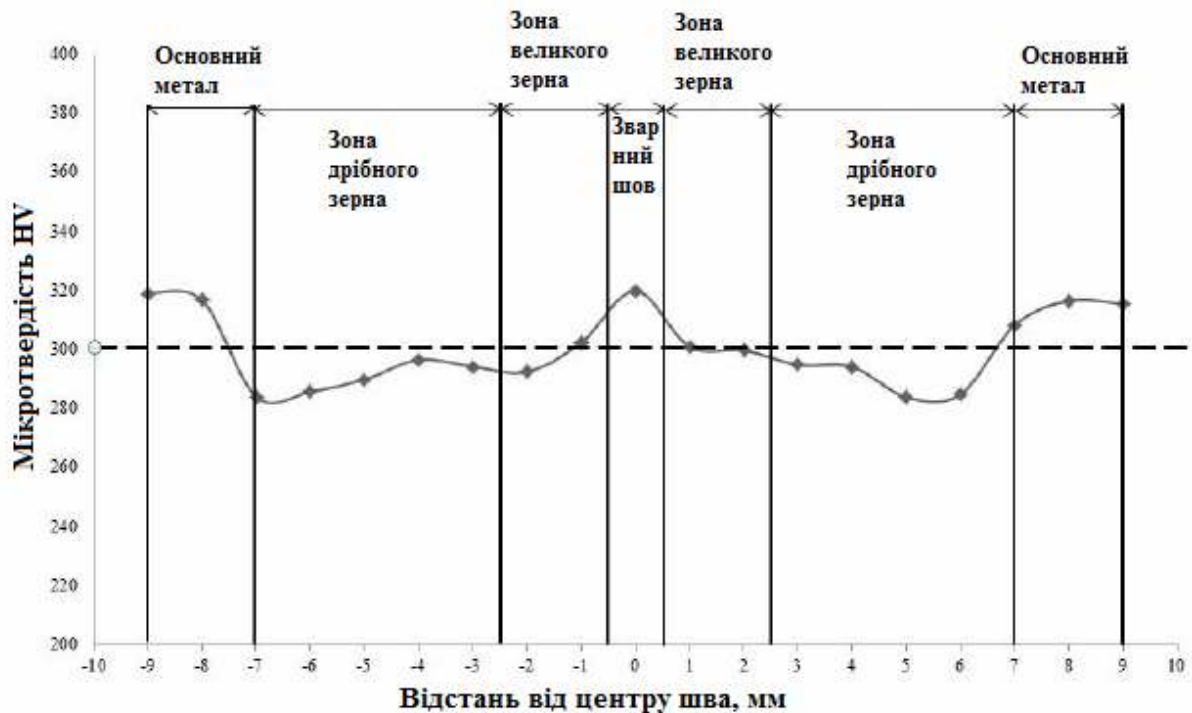


Рисунок 3.17 – Мікротвердість сталі E76XF у різних зонах після проведення контактно-стиківого зварювання за режимом №4

Пунктирною лінією показано середнє значення мікротвердості зразка.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

## Висновки по третьому розділу

1. При режимі зварювання № 0. Мікротвердість у зоні термічного впливу має підвищені значення. У структурі було виявлено голчастий мартенсит, наявність цієї структури в металі рейок призводить до розвитку втомних тріщин і крихкого зламу. Переважним типом неметалевих включень є точкові оксиди. ЗТВ складає 5 мм. Цей зразок є найчистішим за наявності не металевих включень.

2. При режимі зварювання № 1. Режим контактного підігріву: час охолодження після осадки 30 с., час підігріву 0,6 с., час охолодження після підігріву 15 с., кількість імпульсів підігріву 4 с.. Розподіл мікротвердості у зоні термічного впливу загалом має задовільні значення, в співставленні з основним металом. ЗТВ складає 5 мм. Отримано оптимальну структуру, яка задовольняє вимоги ДСТУ 4344:2004. Переважним типом неметалевих включень є точкові оксиди.

3. При режимі зварювання № 2. Режим контактного підігріву: час охолодження після осадки 30 с., час підігріву 0,6 с., час охолодження після підігріву 15 с., кількість імпульсів підігріву 2 с. Мікротвердість у зоні термічного впливу має підвищені значення. У структурі було виявлено голчастий мартенсит; наявність цієї структури в металі рейок призводить до розвитку втомних тріщин і крихкого зламу. Переважним типом неметалевих включень є точкові оксиди. ЗТВ складає 6 мм.

4. При режимі зварювання № 3. Режим контактного підігріву: час охолодження після осадки 30 с, час підігріву 0,6 с, час охолодження після підігріву 10 с, кількість імпульсів підігріву 4 с. Мікротвердість у зоні термічного впливу має підвищені значення. Отримано оптимальну структуру, що задовольняє вимоги ДСТУ 4344:2004. Переважним типом неметалевих включень є точкові оксиди. ЗТВ складає 5 мм.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. При режимі зварювання № 4. Режим контактної підігріву: час охолодження після осадки 30 с, час підігріву 0,6 с, час охолодження після підігріву 10 с, кількість імпульсів підігріву 2 с. Мікротвердість у зоні термічного впливу має підвищені значення. Отримано оптимальну структуру, що задовольняє вимоги ДСТУ 4344:2004. Переважним типом неметалевих включень є точкові оксиди. ЗТВ становить 7 мм, що є найбільшою ЗТВ усіх зразків.

6. Оптимальними параметрами контактної підігріву після контактної стикового зварювання з точки зору одержаної мікроструктури, протяжності зони термічного впливу та значень мікротвердості є параметри, що використовуються при режимі № 1.

Режим зварювання:  $U = 5,76 \text{ В}$ ,  $I = 11,7 \text{ кА}$ ,  $V = 1 \text{ мм / с}$ ,  $\Delta_d = 10 \text{ мм}$ .  
Режим контактної підігріву: час охолодження після осадки 30 с, час підігріву 0,6 с, час охолодження після підігріву 15 с, кількість імпульсів підігріву 4 с.

Даний режим дозволяє отримати зварне з'єднання з рейкової сталі типу Р65 марки Е76ХФ відповідно до вимог ДСТУ 4344:2004 за структурою, механічними властивостями. Також цей режим має мінімальну довжину зони зі зниженою твердістю. Цей режим рекомендовано для зварювання рейок для отримання підвищених експлуатаційних показників надійності стикового з'єднання.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

1. Для зварювання залізничних рейок в Україні найбільше застосування набуло контактнo-стикове зварювання, завдяки надійності одержуваних з'єднань, продуктивності, економічній ефективності.

2. При стиковому зварюванні можуть виникати труднощі отримання якісних зварних з'єднань обумовленні швидким нагріванням зварного стику, що забезпечується методом пульсуючого оплавлення, та інтенсивним охолодження зони термічного впливу з формуванням високоміцного шару зі структурою мартенситу на місці мікрооб'ємів з підвищеним вмістом хрому, нікелю та вуглецю.

3. У процесі досліджень було встановлено, що переважним типом неметалевих включень зразків є точкові оксиди, а саме оксиди кремнію та марганцю.

4. Оптимальними параметрами стикового зварювання з точки зору отриманої мікроструктури довжини зони термічного впливу та значень мікротвердості є параметри, які використані при режимі:  $U = 5,76$  В,  $I = 11,7$  кА,  $V = 1$  мм / с,  $\Delta = 10$  мм. Режим контактнoго підігріву: час охолодження після осадки 30 с, час підігріву 0,6 с, час охолодження після підігріву 15 с, кількість імпульсів підігріву 4 с.

Даний режим дозволяє отримати зварне з'єднання з рейкової сталі типу Р65 марки Е76ХФ відповідно до вимог за структурою, механічними властивостями. Також цей режим має мінімальну протяжність зони зі зниженою твердістю. Цей режим рекомендовано для зварювання рейок для отримання підвищених експлуатаційних показників надійності стикового з'єднання.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Патон Б.Е. Инновационный кластер «бархатный путь» и научно-технический прорыв Украины на мировой рынок строительства скоростных железных дорог / Б.Е. Патон, М. Д. Костюк, С.И. Кучук-Яценко, А.А. Мазур, Я. И. Микитин, В.А. Яковлев, Ю.В. Швец // Наука та інновації. 2010. Т. 6. № 2. С. 69–86.

2. Костюк М.Д. Будівництво та реконструкція залізничної мережі України для збільшення пропускної спроможності та запровадження швидкісного руху поїздів / М.Д. Костюк, В.В. Козак, В.О. Яковлев та інші. – К.: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2010. – 216 с.

3. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.railway.supply/uk/zaloznichni-koli%D1%97-bez-stikiv>

4. Альбрехт В.Г. Бесстыковой путь / В.Г.Альбрехт, Н.П. Виногородов, Н.Б. Зверев и др. – М.: Транспорт, 2000, – 408 с.

5. Генкин И.З. Сварные рельсы и стрелочные переводы./ И.З. Генкин. – М. Интекст. 2003 – 93 с.

6. Козырев Н.А. Современные технологии сварки железнодорожных рельсов / Н. А. Козырев, Р. А. Шевченко, А. А. Усольцев, Р. Е. Крюков, С. В. Князев // Черная металлургия : Бюл. ин-та «Черметинформация». - 2018. - № 2. — С. 62-68.

7. Воронин, Н.Н. Алюминотермитная сварка рельсов: учеб. пособие. / Н.Н. Воронин, В.В. Засыпкин, В.И. Коненков, Э.В. Воробьев, О.Н. Трынкова; под ред. Н.Н. Воронина. - М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. - С. 195.

8. Сварка рельсов алюминотермитная методом промежуточного литья. Технические условия ТУ 0921-127-01124323-2005. - М.: ВНИИЖТ, 2005. - С. 16.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Кучук-Яценко С. И. Контактно стыковая сварка непрерывным оплавлением: монография / С. И. Кучук-Яценко, В. К. Лебедев; - Киев.: «Наукова думка», 1976. - С.216.

10. Кучук-Яценко С.И. Технология и новое поколение оборудование для контактной сварки высокопрочных рельсов современного производства при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей / С.И. Кучук-Яценко, В. Г. Кривенко, А.В. Дидковский, В.И. Швец // Автоматическая сварка. - 2012. - № 6. - С. 32 - 37.

11. Кучук-Яценко С.И. Технология и оборудование для контактной сварки высокопрочных рельсов / С.И. Кучук-Яценко, А.В. Дидковский, В.И. Швец // Автоматическая сварка. - 2008. - № 11. - С. 129 - 138.

12. Кузьменко Г.В. Новая технология электродуговой сварки ванным способом рельсов в условиях трамвайных и подкрановых путей / Г.В. Кузьменко, В.Г. Кузьменко, В.И. Галинич // Автоматическая сварка. - 2012. - № 5. - С. 40 - 44.

13. Yamamoto R. Advances in gas pressure welding technology for rails // Railway Technology Avalanche. – 2007. – 17, No 3. – 99 p

14. Sun J., Kristan J. Gas-pressure welding: is it feasible for North American railroads? // Ibid. – 2003. – No 2. – P. 12–14

15. Технология и оборудование контактной сварки: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / М. Д. Банов. - 3-е изд., стер. - М. : Издательский центр «Академия», 2008. - С. 224.

16. Козырев Н.А. Современные методы сварки рельсов нового поколения / Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Р.А. Шевченко, Р.Е. Крюков, П.Е. Шишкин // Известия вузов. Черная металлургия. - 2017. - т. 60. № 10. - С. 785-791.

17. Разработка новой технологии сварки рельсов для высокоскоростного движения / Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Крюков Р.Е.,

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

Усольцев А.А. // Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация". — 2018. — № 8. — С. 50-56.

18. Tachikawa H. Steel welding technologies for civil construction applications / H. Tachikawa, T. Uneta, H. Nishimoto at al. // Ibid. – 2000. – 82, No7. – P. 35–41

19. Пат. UA 46820, 6 В 23К 11/04, С2 Україна. Спосіб контактного стикового зварювання оплавленням / С. І. Кучук-Яценко, О. В. Дідковський, М. В. Богорський та ін. — Опубл. 17.06.2002.

20. Кучук-Яценко С.І. Операційний контроль процесу контактного стикового зварювання залізничних рейок методом пульсуючого оплавлення / С.І. Кучук-Яценко, П.М. Руденко, О.В. Дідковський, Є.В. Антіпін // «Автоматичне зварювання» . – 2021, № 5. – С. 8-14.

21. Дослідження причин появи дефектів в зварних стиках трамвайних рейок, виконаних термітним зварюванням / Е. Турик, І.О. Рябцев, М. Ломозік, К. Красновський // «Автоматичне зварювання» . – 2021, № 11. – С. 35-39.

22. Позняков В.Д. Вплив термічного циклу наплавлення на механічні властивості та опір крихкому руйнуванню металу зтв залізничної сталі М76 / Позняков, О.А. Гайворонський, В.А. Костін, О.М. Берднікова, С.В. Шмигельський // «Автоматичне зварювання» . – 2019, № 12. – С. 4-11.

23. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://chemtest.com.ua/rentgenovskiy-spektrometr-lab-center-xrf-1800>

24. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://iskrostan.prom.ua/ua/p550767598-elektroerozionnyj-provolochno-vyreznoj.html>

25. Саржевский В.А. Установка для имитации термических циклов сварки на базе машины МСР-75 / Саржевский В.А., Сазонов В.Я. // Автоматическая сварка. – 1981, № 5. – С. 69–70

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

26. Пантелеймонов Є.О. Переносний модуль для термічної обробки зварних стиків залізничних рейок / Є.О. Пантелеймонов // «Автоматичне зварювання» . – 2021, № 4. – С. 49-52.

27. Gong L. Effect on hardness and microstructures of rail joint with ultra-narrow gap arc welding by post weld heat treatment / L. Gong, L. Zhu, H. X Zhou // Engineering Materials, 737, (2017), P. 90-94.

28. Пантелеймонов Є.О. Індукційний пристрій для термічної обробки зварених стиків залізничних рейок. Україна, Пат. на кор. модель 109123, МПК С21D 1/10 (2006.01)

29. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://deal.by/p103467493-invertirovannyj-metallograficheskij-mikroskop.html>

30. Електронний ресурс. Режим доступу: <http://www.portable-hardness-tester.com/sale-384744-hvs-1000-digital-micro-vickers-hardness-tester-with-easy-operating-system.html>

31. ДСТУ ISO 4967:2015 (ISO 4967:2013) Сталь. Металографічні методи визначення неметалічних включень.

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

ДОДАТКИ

					МРТАМ 2116116.000 ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

