

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
Національної академії наук України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**АНТІПІН ЄВГЕН ВАЛЕНТИНОВИЧ**

УДК 621.791.762.5

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ТЕХНОЛОГІЯ КОНТАКТНОГО СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ  
ОПЛАВЛЕННЯМ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК КОНВЕРТОРНОГО  
ВИРОБНИЦТВА**

Спеціальність 132 – Матеріалознавство  
13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Є.В. Антіпін

Науковий керівник:  
Зяхор Ігор Васильович  
кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник

Київ – 2023

## АНОТАЦІЯ

**Антінін Є.В. Технологія контактного стикового зварювання оплавленням залізничних рейок конверторного виробництва». –** Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня поданої доктора філософії за спеціальністю 132 – «Матеріалознавство» (13 – Механічна інженерія). – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена розробленні ефективної технології контактного стикового зварювання оплавленням термічнозміцнених залізничних рейок конверторного виробництва.

Експлуатаційні показники зварних стиків залізничних рейок є важливою складовою довговічності залізниць і регламентуються чинними вітчизняними і міжнародними стандартами. Нероз’ємне з’єднання рейок при виготовленні та укладанні в колію довгомірних рейкових плітей переважно виконується контактним стиковим зварюванням оплавленням (КСЗО). Провідні світові виробники залізничних рейок постійно удосконалюють рейкові сталі з метою збільшення показників твердості, опору крихкому руйнуванню, зносостійкості, зокрема у головці рейки. Перехід на киснево-конверторний спосіб виплавки рейкових сталей суттєво вплинув на зварюваність залізничних рейок. На залізницях України переважно використовуються термічнозміцнені рейки конверторного виробництва класу твердості 350HV30 марок сталей K76Ф, R350HT. Показники міцності та зносостійкості рейок забезпечуються за рахунок регламентованого розподілу твердості по перерізу рейки.

Забезпечення відповідності зварних стиків залізничних рейок вимогам національного стандарту ДСТУ EN 14587-2:2015 (EN 14587-2:2009, IDT), гармонізованого з відповідним європейським нормативним документом, обумовлює необхідність врахування енергетичних параметрів процесу КСЗО, які визначають термічні цикли при оплавленні та розподіл температур у зоні термічного впливу (ЗТВ) зварних стиків рейок. До теперішнього часу не

визначений надійний алгоритм забезпечення відповідності зварних з'єднань рейок нормативним вимогам при зміні технологічних параметрів КСЗО і зовнішніх факторів (виробник рейок, марка сталі, стан рейкозварювальної машини, параметри дизель-генератора, якість підготовки торців рейок та інше). Тому, на практиці технологія КСЗО оптимізується дослідним шляхом для наявної партії залізничних рейок і умов виконання робіт, зокрема конкретних рейкозварювальної машини і дизель-генератора.

Актуальність теми дисертації полягала в необхідності наукового обґрунтування розроблення ефективної технології КСЗО залізничних рейок конверторного виробництва класу твердості 350HV30, яка забезпечить відповідність зварних стиків рейок вимогам чинних нормативних документів.

Мета роботи – розробити ефективну технологію контактного стикового зварювання оплавленням залізничних рейок конверторного виробництва, яка забезпечує відповідність зварних з'єднань рейок вимогам чинних стандартів.

Для досягнення мети роботи проводили розрахунково-експериментальне дослідження термічних циклів КСЗО і розподілу температур в зоні з'єднань, оцінку їх впливу на структуру та показники механічних властивостей зварних стиків залізничних рейок, на цій основі визначали діапазони зміни основних технологічних параметрів КСЗО залізничних рейок класу міцності 350HV30, при яких забезпечується відповідність зварних з'єднань вимогам чинних нормативних документів.

В роботі досліджено процес формування зварних з'єднань рейок при КСЗО, реалізований на стаціонарних та мобільних рейкозварювальних машинах К1000 і К922-1 розробки Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Розроблено математичні моделі та відповідні засоби комп'ютерної симуляції кінетики температурних полів при КСЗО залізничних рейок. Використано чисельне розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності поряд із комплексом необхідних лабораторних вимірювань впливу технологічних параметрів зварювання на температурні цикли в рейках, що зварюються. Це дозволило врахувати мультифізичні

процеси оплавлення торців рейок, визначити характерну теплову ефективність процесу КСЗО та підтвердити належну точність розрахунків на рівні 8 %.

*У першому розділі* проаналізовано вітчизняні та закордонні літературні джерела, в яких висвітлюються особливості рейкових сталей конверторного виробництва, сучасні способи нероз'ємного з'єднання залізничних рейок, вимоги чинних стандартів до зварних з'єднань залізничних рейок, визначено проблеми КСЗО рейок конверторного виробництва, обумовлені структурою основного металу. В цьому розділі обґрунтовано використання КСЗ пульсуючим оплавленням у якості базового процесу при розробленні ефективної технології зварювання сучасних залізничних рейок конверторного виробництва. Аналіз вимог чинних стандартів до зварних стиків рейок показує необхідність врахування енергетичних параметрів процесу КСЗО, які визначають термічний цикл і розподіл температури в зварних стиках рейок, обумовлюють швидкість охолодження в інтервалі температур перетворення аустеніту, визначають розподіл показників твердості в зоні з'єднання рейок. На основі аналізу літературних джерел визначено мету і завдання дисертаційної роботи.

*Другий розділ* присвячено характеристиці досліджуваних матеріалів, методів, устаткування і приладів для проведення досліджень. В роботі використовували розрахункові та експериментальні методи досліджень. Для проведення розрахункових досліджень використовували математичну модель нагрівання рейок при оплавленні та відповідні засоби комп'ютерної симуляції кінетики температурних полів при КСЗО залізничних рейок, розроблені спільно з відділом №34 ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Експерименти по КСЗО проводили на рейкозварювальних машинах – стаціонарній К1000 та мобільній К922-1, оснащених системами контролю та управління, які забезпечують варіювання технологічними параметрами в широких межах.

*У третьому розділі* представлено результати розрахунково-експериментальних досліджень термічних циклів КСЗО і розподілу температур в зоні з'єднань рейок. Зокрема проведено розрахункову оцінку величини

теплового коефіцієнта корисної дії (ККД) при КСЗ безперервним і пульсуючим оплавленням, наведено результати дослідження кінетики температурного поля при КСЗ пульсуючим оплавленням рейок, визначено вплив основних параметрів КСЗО на процеси нагрівання і охолодження зварних стиків рейок. У розділі 3 також обґрунтовано використання процесу КСЗО з програмною зміною в часі напруги джерела живлення, уточнено циклограму процесу КСЗ пульсуючим оплавленням, яка передбачає поетапну зміну значення  $U$  у визначених діапазонах. Розрахунковим шляхом визначено залежність мінімального  $H_{зТВmin}$  та максимального  $H_{зТВmax}$  значень ширини зони термічного впливу зварного з'єднання від тривалості процесу оплавлення  $t_{опл}$  і величини енерговкладення  $Q$ . Встановлено, що при КСЗ пульсуючим оплавленням залізничних рейок типу Р65 (60Е1) при збільшенні  $t_{опл}$  в діапазоні від 50 до 140 с і величини енерговкладення  $Q$  від 9 до 18 МДж, значення  $H_{зТВmin}$  зростає від 16 до 22 мм, а значення  $H_{зТВmax}$  – від 36 до 54 мм.

*Четвертий розділ* присвячено розробленню ефективної технології КСЗО залізничних рейок конверторного виробництва. Визначено особливості мікроструктури основного металу (ОМ) рейок марок К76Ф і Р350НТ. Розрахунковим шляхом встановлено залежність швидкості охолодження  $W_{8/5}$  зварного з'єднання рейок типу Р65 (60Е1) в інтервалі температур 800-500°C від тривалості процесу оплавлення  $t_{опл}$  і величини енерговкладення  $Q$  при КСЗО. Встановлено, що максимальне значення швидкості охолодження у зварному з'єднанні досягається по лінії з'єднання і змінюється від  $W_{8/5}=8,7$  до  $W_{8/5}=2,4$  °C/с при збільшенні  $t_{опл}$  і  $Q$  в межах  $t_{опл} = 50...140$  с і  $Q=9...18$  МДж. Визначено мінімальне значення тривалості процесу оплавлення  $t_{оплmin}=55$  с і енерговкладення  $Q_{min}=9,72$  МДж при КСЗО рейок типу Р65 (60Е1) марок К76Ф і Р350НТ, при якому швидкість охолодження з'єднання в інтервалі температур 800-500°C не перевищує  $W_{8/5}=7,0$  °C/с, забезпечується відсутність у зоні з'єднання бейніту, мартенситу і формується перлітна структура різної дисперсності (перліт, сорбіт, троостит).

На основі результатів механічних випробувань, металографічних досліджень та вимірювання твердості визначено спільний діапазон зміни величини енерговкладення  $Q$ , в якому забезпечуються вимоги чинних нормативних документів для зварних стиків рейок марок К76Ф і R350НТ, який становить  $Q=11,88-14,0$  МДж.

У *п'ятому розділі* представлено результати розроблення експертної системи управління процесом КСЗО залізничних рейок, яка реалізує можливість прогнозування ширини зони термічного впливу (ЗТВ) з'єднань відповідно до вимог діючих нормативних документів. Показано, що прогнозування ширини ЗТВ при операційному контролі розширює можливості його застосування для КСЗО сучасних рейок конверторного виробництва. Розроблений алгоритм нечіткої логіки з розрахунком ширини ЗТВ по регресійній залежності дозволив збільшити точність і надійність операційного контролю процесу КСЗО в реальному часі. Для стабільного відтворення процесу КСЗО рейок та точного контролю величини енерговкладення, розроблені алгоритми та програми статистичної обробки даних. Показано, що проведення оцінки відповідності зварних стиків рейок нормативним вимогам за архівними даними процесу КСЗО рейок успішно реалізовано на рейкозварювальних підприємствах АТ «Українська залізниця».

**Ключові слова:** залізничні рейки, контактне стикове зварювання оплавленням, пульсуюче оплавлення, термічний цикл, зварне з'єднання, енерговкладення, перлітна структура.

## ABSTRACT

**Antipin Y.V. Technology of flash-butt welding of railway rails of converter production".** – Qualifying scientific work on manuscript rights. Dissertation for obtaining the scientific degree of submitted Doctor of Philosophy in specialty 132 - "Materials Science" (13 - Mechanical Engineering). - E.O. Paton

Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to the development of an effective technology of flash-butt welding of heat-strengthened railway rails of converter production.

Operational indicators of welded joints of railway rails are an important component of the durability of railways and are regulated by current domestic and international standards. The non-separable joining of the rails during the manufacture and laying in the track of long-dimension rail plates is mainly performed by flash-butt welding. The world's leading manufacturers of railway rails are constantly improving rail steels in order to increase hardness, resistance to brittle fracture, and wear resistance, particularly in the rail head. The transition to the oxygen-converter method of smelting rail steels significantly affected the weldability of railway rails. On the railways of Ukraine, heat-strengthened rails manufactured by converters of the hardness class 350HV30 of steel grades K76F, R350HT are mainly used. Indicators of strength and wear resistance of the rails are provided due to the regulated distribution of hardness along the cross-section of the rail.

Ensuring compliance of welded joints of railway rails with the requirements of the national standard DSTU EN 14587-2:2015 (EN 14587-2:2009, IDT), harmonized with the relevant European regulatory document, necessitates taking into account the energy parameters of the FBW process, which determine thermal cycles during flashing and temperature distribution in the heat affected zone (HAZ) of rails welded joints. Until now, no reliable algorithm has been developed to ensure the compliance of welded rail joints with regulatory requirements when changing the technological parameters of FBW and external factors (rail manufacturer, steel grade, condition of the rail welding machine, diesel generator parameters, quality of rail end preparation, etc.). Therefore, in practice, the FBW technology is optimized experimentally for the available batch of railway rails and the conditions of work, in particular, the specific rail welding machine and diesel generator.

The relevance of the dissertation topic was the need for a scientific justification for the development of an effective technology of FBW railway rails of

converter production of hardness class 350HV30, which will ensure compliance of welded rail joints with the requirements of current regulatory documents.

The purpose of the work is to develop an effective technology of flash-butt welding of railway rails of converter production, which ensures compliance of welded rail joints with the requirements of standards in force.

In order to achieve the purpose of the work, a computational and experimental study of the thermal cycles of FBW and temperature distribution in the joint zone was carried out, an assessment of their influence on the structure and mechanical properties of welded joints of railway rails was carried out, on this basis, the ranges of changes in the main technological parameters of FBW of railway rails of strength class 350HV30 were determined, which ensure compliance of welded joints with the requirements of current regulatory documents.

The paper examines the process of forming welded joints of rails at FBW, implemented on stationary and mobile rail welding machines K1000 and K922-1 developed by the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. Mathematical models and corresponding means of computer simulation of the kinetics of temperature fields at the FBW of railway rails have been developed. The numerical solution of the non-stationary heat conduction equation was used along with a set of necessary laboratory measurements of the influence of welding technological parameters on temperature cycles in the welded rails. This made it possible to take into account the multiphysical processes of rail end flashing, to determine the characteristic thermal efficiency of the FBW process, and to confirm the proper accuracy of calculations at the level of 8%.

*In the first section*, domestic and foreign literary sources are analyzed, which highlight the features of rail steels of converter production, modern methods of non-separable joining of railway rails, the requirements of current standards for welded joints of railway rails, the problems of FBW of rails of converter production, caused by the structure, are determined base metal. In this section, the use of FBW by pulsed flashing as a basic process in the development of an effective technology for welding modern railway rails of converter production is substantiated. The analysis of the



requirements of the current standards for welded rail joints shows the need to take into account the energy parameters of the FBW process, which determine the thermal cycle and temperature distribution in the welded rail joints, determine the cooling rate in the austenite transformation temperature range, and determine the distribution of hardness indicators in the rail joint zone. Based on the analysis of literary sources, the purpose and tasks of the dissertation work are determined.

*The second section* is devoted to the characteristics of researched materials, methods, equipment and devices for conducting research. Calculation and experimental research methods were used in the work. To carry out calculation studies, we used a mathematical model of the heating of rails during flashing and the corresponding means of computer simulation of the kinetics of temperature fields at FBW of railway rails, developed jointly with department No. 34 of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. Experiments on FBW were carried out on rail welding machines - stationary K1000 and mobile K922-1, equipped with control and management systems that provide variations in technological parameters within wide limits.

*The third section* presents the results of computational and experimental studies of the thermal cycles of FBW and temperature distribution in the area of rail joints. In particular, a calculated estimate of the value of the thermal efficiency coefficient (Efficiency) was carried out during continuous and pulsed flashing of FBW, the results of the study of the kinetics of the temperature field at FBW with pulsed flashing of rails were given, the influence of the main parameters of FBW on the processes of heating and cooling of welded joints of rails was determined. section 3 also substantiates the use of the FBW process with a program change in time of the voltage of the power source, specifies the cyclogram of the FBW process by pulsed flashing, which provides for a stepwise change in the value of  $U$  in the specified ranges. The dependence of the minimum  $H_{3TBmin}$  and the maximum  $H_{3TBmax}$  values of the width of the heat affected zone of the welded joint on the duration of the flashing process of  $t_{opl}$  and the amount of energy input  $Q$  was determined by calculation. It was established that in case of pulsed flashing of railway rails of the P65 (60E1) type

with an increase of  $t_{opl}$  in the range from 50 to 140 s and the amount of energy input  $Q$  from 9 to 18 MJ, the value of  $H_{3TBmin}$  increases from 16 to 22 mm, and the value of  $H_{3TBmax}$  - from 36 to 54 mm.

*The fourth section* is devoted to the development of an effective technology of FBW railway rails of converter production. The peculiarities of the microstructure of the base metal (BM) of rails of the K76F and R350HT grades have been determined. The dependence of the cooling rate  $W_{8/5}$  of the welded joint of rails of the P65 (60E1) type in the temperature range of 800-500°C on the duration of the  $t_{opl}$  flashing process and the amount of energy input  $Q$  at FBW was determined by calculation. It was established that the maximum value of the cooling rate in the welded joint is reached along the joint line and changes from  $W_{8/5}=8,7$  to  $W_{8/5}=2,4$  °C/s with increasing  $t_{opl}$  and  $Q$  within  $t_{opl} = 50...140$  s and  $Q=9...18$  MJ. The minimum value of the duration of the flashing process  $t_{oplmin}=55$  s and energy input  $Q_{min}=9,72$  MJ was determined for FBW rails of the P65 (60E1) type K76F and R350HT grades, at which the cooling rate of the joining in the temperature range of 800-500°C does not exceed  $W_{8/5} = 7,0$  °C/s, the absence of bainite and martensite in the joint zone is ensured and a pearlite structure of different dispersion (perlite, sorbite, troostite) is formed.

Based on the results of mechanical tests, metallographic studies and hardness measurements, a common range of changes in the amount of energy input  $Q$  was determined, which meets the requirements of current regulatory documents for welded joints of K76F and R350HT rails, which is  $Q=11.88-14.0$  MJ.

*The fifth section* presents the results of the development of an expert system for management of the FBW process of railway rails, which implements the possibility of predicting the width of the heat affected zone (HAZ) of joints in accordance with the requirements of current regulatory documents. It is shown that the prediction of the width of the HAZ during operational control expands the possibilities of its application for FBW of modern rails of converter production. The developed algorithm of fuzzy logic with the calculation of the HAZ width according to the regression dependence made it possible to increase the accuracy and reliability of the operational control of the FBW process in real time. Algorithms and programs

for statistical data processing have been developed for the stable reproduction of the FBW rail process and precise control of the amount of energy input. It is shown that the assessment of compliance of rail welded joints with regulatory requirements based on archival data of the FBW process of rails was successfully implemented at the rail welding enterprises of JSC "Ukrainian Railway".

**Key words:** railway rails, flash-butt welding, pulsed flashing, thermal cycle, welded joint, energy input, pearlite structure.

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати  
дисертації**

1. Кучук-Яценко, С., Швець, В., Дидковский, А., Антипин Е., Капитанчук, Л., (2013). Дефекты соединений высокопрочных рельсов, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением. *Автоматическая сварка*. (9), 3–9. (Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК).
2. Кучук-Яценко, С., Швець, В., Дидковский, А., Антипин Е., (2016). Влияние неметаллических включений рельсовой стали на формирование сварного соединения. *Автоматическая сварка*. (5-6), 28–32 (Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК).
3. Кучук-Яценко, С., Дидковский, А., Швець, В., Руденко, П., Антипин, Е., (2016). Контактная стыковая сварка высокопрочных рельсов современного производства. *Автоматическая сварка*. (5-6), 7–16 (Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК).
4. Кучук-Яценко, С., Руденко, П., Гавриш, В., Дидковский, А., Антипин, Е., (2016). Статистическое управление процессом контактной стыковой сварки рельсов. Двухуровневая система управления. *Автоматическая сварка*. (5-6), 17–20 (Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК)..

5. Kuchuk-Yatsenko, S., Shvets, V., Didkovsky, A., Rudenko, P., Antipin, E., (2016). Flash-butt welding of high-strength rails. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*. (528), 40–47.
6. Руденко, П., Гавриш, В., Кучук-Яценко, С., Дидковский, А., Антипин, Е., (2017). Влияние параметров процесса стыковой контактной сварки оплавлением на прочностные характеристики стыков железнодорожных рельсов. *Автоматическая сварка*. (5-6), 87–90 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*).
7. Kuchuk-Yatsenko, S., Didkovsky, A., Antipin, E., Shvets, V., Wojtas, P., Kozłowski, A., (2017). Real-time operational control in information management system for flash-butt welding of rails. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*. (529), 35–42.
8. Кучук-Яценко, С., Миленин, А., Великоиваненко, Е., Дидковский, А., Антипин, Е., (2018). Математическое моделирование процесса нагрева металла при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением. *Автоматическая сварка*. (10), 3–10 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*).
9. Кучук-Яценко, С., Антіпін, Є., Дідковський, О., Швець, В., Кавуніченко, О., (2020). Оцінка якості зварних з'єднань високоміцних залізничних рейок сучасного виробництва з урахуванням вимог українського та європейського стандартів. *Автоматическая сварка*. (7), 3–11 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*).
10. Kuchuk-Yatsenko, S., Rudenko, P., Gavrish, V., Didkovsky, A., Antipin, Y. та Ziakhor, I., (2020). Operational control as a means of the evaluation of quality of welded connections for flash-butt welding of modern high-strength steels. *Science and Innovation*. **16**, 72–78 (*Журнал входит до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS, Q3*).
11. Кучук-Яценко, С., Руденко, П., Дідковський, О., Антіпін, Є., (2021). Операційний контроль процесу контактного стикового зварювання залізничних

рейок методом пульсуючого оплавлення. *Автоматическая сварка*. (5), 8–14 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*).

12. Руденко, П., Зяхор, І., Дідковський, О., Антіпін, Є., (2022). Програма статистичного контролю процесу контактного стикового зварювання оплавленням залізничних рейок. *Автоматичне зварювання*. (11), 28–35 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*). Режим доступу: doi: 10.37434/as2022.11.04

13. Швець, В., Зяхор, І., Дідковський, О. та Антіпін, Є., (2023). Дослідження структури з'єднань рейок марки R260MN при контактнo-стиковому зварюванні. *Автоматичне зварювання*. (1), 3–10 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*). Режим доступу: doi:10.37434/as2023.01.01.

14. Швець, В., Дідковський, О., Антіпін, Є., Зяхор, І., Капітанчук, Л., Qichen, W., (2022). Особливості мікроструктури з'єднань заевтектоїдної рейкової сталі марки AREAL-136HE-X при контактнo-стиковому зварюванні. *Автоматичне зварювання*. (3), 26-33 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*). doi: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.03.04>

15. Зяхор, І., Антіпін, Є., Дідковський, О., Кавуніченко, О., Левчук, А., Шило, Ю., Truska Yan., (2023). Сучасні технології зварювання залізничних рейок (огляд). *Автоматичне зварювання*. (5), 5–17 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*). Режим доступу: doi: <https://doi.org/10.37434/as2023.04.01>

16. Машина для контактнo-стикового зварювання рейок, (2022). Винахідники: І. Зяхор, М. Коваль, Є. Дідковський, А., Левчук, Ю. Шило, О., Антіпін, А., та ін. Патент на корисну модель, Україна №151797 Опубл. 14.09.2022.

### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

17. Антипин, Е., Дидковский, А., Кавуниченко, А., Гуцин, К. Проблемы свариваемости высокопрочных рельсов производства комбината

«Азовсталь» марки К76Ф. У: *Матеріали 8-ї Між-нар. конф. молодих учених та спеціалістів, 20 травня 2015, Київ, Україна.* с. 22.

18. Антіпін, Є., Кавуніченко, О. Розробка алгоритму контролю якості зварних з'єднань при контактному стиковому зварюванні оплавленням сучасних високоміцних сталей. У: *Всеукраїнська конференція з міжнародною участю «Проблеми зварювання та споріднених технологій», 17 вересня 2019, Коблево, Україна.* с. 15.

19. Антіпін, Є., Дідковський, О., Зяхор, І., Кавуніченко, О. Технологія контактного стикового зварювання оплавленням залізничних рейок високої та надвисокої зносостійкості. У: *Матеріали 11 міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості і технологічних процесів та систем», 26 травня 2021, Чернігів, Україна.* с. 72.

20. Кучук-Яценко, С., Руденко, П., Дідковський, О., Антіпін, Є. Операційний контроль процесу контактного стикового зварювання залізничних рейок методом пульсуючого оплавлення. У: *Матеріали міжнародної конференції «Сучасні технології з'єднання матеріалів», 31 травня 2021, Київ, Україна.* с. 27.

21. Кучук-Яценко, С., Руденко, П., Дідковський, О., Левчук, А. Математичне моделювання процесу нагріву металу при контактному стиковому зварюванні безперервним оплавленням. У: *Матеріали міжнародної конференції «Сучасні технології з'єднання матеріалів», 31 травня 2021, Київ, Україна.* с. 33.

22. Руденко, П., Антіпін, Є., Дідковський, О., Зяхор, І., Кавуніченко, О., та ін. Система контролю і управління процесом контактного стикового зварювання оплавленням залізничних рейок на основі штучного інтелекту У. *Матеріали 21-ї міжнародної науково-практичної конференції «Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика» 06-10 вересня 2021 р., м. Одеса.* 76-79

23. Антіпін, Є., Руденко, П., Дідковський, О. Контроль і регулювання електричних параметрів контактного стикового зварювання оплавленням

(КЗСО) в системі управління процесом. У: *Матеріали міжнародної конференції «Сучасні технології з'єднання матеріалів», 31 травня 2021, Київ, Україна.* с. 34.

24. Руденко, П., Антіпін, Є., Дідковський, О., Зяхор, І., Кавуніченко, О. Контроль відповідності якості зварних з'єднань залізничних рейок вимогам діючих стандартів. У: *Матеріали 21-ї міжнародної науково-практичної конференції «Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика», 6 вересня 2021, Одеса, Україна.* с. 72–76.

25. Руденко, П., Зяхор, І., Дідковський, О., Антіпін, Є., Шило, Ю. Міжнародні стандарти у програмі статистичного контролю процесу контактного стикового зварювання оплавленням (КСЗО) залізничних рейок. У: *Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика: Матеріали 22-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 5 жовтня 2022, Київ, Україна.* с. 51–55.

26. Antipin, E., Ziakhor, I., Didkovsky, O., Kavunichenko, O. Technologies of flash-butt welding of modern rails based on pulsating flashing process. У: *Матеріали 22-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інженерія поверхні та реновація виробів», 15 червня 2022, Київ, Україна.* с. 3–7.

27. Антіпін, Є., Зяхор, І., Дідковський, О., Кавуніченко, О., Левчук, А., Шило, Ю., (2023). Технологія контактного стикового зварювання оплавленням термічнозмцнених рейок. У. *Матеріали XIII міжнародної науково-практичної конференції. 25 - 26 травня 2023 р., Чернігів. Україна,* с. 91-92. Режим доступу: doi: <http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/28253>

28. Антіпін, Є., Зяхор, І., Міленін, О., (2023). Розрахунково-експериментальне дослідження термічних циклів контактного стикового зварювання оплавленням залізничних рейок. У. *Матеріали 23-ї міжнародної науково-технічної конференції. 20–22 червня 2023 р. м. Київ.* с. 92-94.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....		19
РОЗДІЛ 1.	СУЧАСНИЙ СТАН ВИРОБНИЦТВА І НЕРОЗ'ЄМНОГО З'ЄДНАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК КОНВЕРТОРНОГО ВИРОБНИЦТВА .....	25
1.1.	Характеристика рейкових сталей конверторного виробництва.....	25
1.2.	Вимоги до основного металу сучасних рейкових сталей .....	29
1.3.	Способи нероз'ємного з'єднання залізничних рейок .....	32
1.4.	Аналіз вимог чинних стандартів до зварних з'єднань залізничних рейок, виконаних КСЗО .....	50
1.5.	Проблеми КСЗО рейок конверторного виробництва, обумовлені структурою основного металу.....	54
Висновки до розділу 1, мета та завдання роботи.....		57
РОЗДІЛ 2.	МАТЕРІАЛИ, УСТАТКУВАННЯ, МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	59
2.1.	Досліджувані матеріали.....	59
2.2.	Методи досліджень, устаткування для КСЗО рейок .....	60
2.3.	Методи та устаткування для дослідження мікроструктури з'єднань та розподілу твердості .....	65
2.4.	Методи та устаткування для механічних випробувань .....	69
Висновки до розділу 2.....		72
РОЗДІЛ 3.	РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНИХ ЦИКЛІВ КСЗО РЕЙОК І РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУР В ЗОНІ З'ЄДНАНЬ.....	73
3.1.	Оцінка величини теплового коефіцієнта корисної дії (ККД) при КСЗ безперервним і пульсуючим оплавленням рейок.....	73
3.2.	Дослідження кінетики температурного поля при КСЗ пульсуючим оплавленням залізничних рейок.....	77



3.3.	Розрахунково-експериментальне дослідження термічних циклів КСЗО і розподілу температур в зоні з'єднань рейок типу Р65 (60Е1).....	85
3.4.	Дослідження впливу основних параметрів КСЗО на процеси нагрівання і охолодження зварних стиків рейок.....	91
	Висновки до розділу 3.....	98
4.	РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЯ КОНТАКТНОГО СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ОПЛАВЛЕННЯМ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК КОНВЕРТОРНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	100
4.1.	Дослідження основного металу (ОМ) рейок конверторного виробництва марок К76Ф і R350НТ.....	100
4.2.	Дослідження швидкості охолодження зварних з'єднань рейок в інтервалі температур 800-500°С від енергетичних параметрів КСЗО.....	112
4.3.	Визначення рекомендованих значень параметрів КСЗО залізничних рейок марки К76Ф і R350НТ за результатами механічних випробувань та металографічних досліджень....	116
4.3.1.	Зварні з'єднання рейок марки К76Ф.....	116
4.3.2.	Зварні з'єднання рейок 60Е1 марки R350НТ.....	125
4.4.	Технологія КСЗО термічнозміцнених залізничних рейок К76Ф і R350НТ конверторного виробництва.....	132
	Висновки до розділу 4.....	134
РОЗДІЛ 5	РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ КСЗО ПРИ ЗВАРЮВАННІ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК .....	135
5.1	Система керування та контролю процесом КСЗО рейок стикового зварювання оплавленням залізничних рейок.....	139
5.2	Особливості процесу КСЗО у логічних залежностях.....	148
5.3	Алгоритм контролю на етапі прискореного оплавлення	

підвищенням швидкості укорочення перед осадкою (форсування).....	148
5.4 Алгоритм контролю КСЗО на базі розроблених моделей.....	149
Висновки до розділу 5.....	153
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	157
ДОДАТКИ.....	173
Додаток А Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	173
ДОДАТОК Б Акт впровадження.....	178
ДОДАТОК В Акт технологічних випробувань.....	179
ДОДАТОК В Акт технологічних випробувань.....	180

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Безстикова колія є найбільш прогресивною конструкцією сучасних залізниць. Повна відсутність стиків з механічним кріпленням створює безперервну поверхню кочення для коліс рухомого складу. У сучасній конструкції безстикової колії з'єднання рейок і рейкових плітей проводиться зварюванням. Аналіз умов експлуатації залізниць показує, що на надійність і довговічність зварних стиків рейок впливає якість сталі та структура металу у зоні термічного впливу (ЗТВ) з'єднань. Провідні світові виробники залізничних рейок постійно удосконалюють рейкові сталі з метою збільшення показників твердості, опору крихкому руйнуванню, зносостійкості, зокрема у головці рейки. Перехід на киснево-конверторний спосіб виплавки рейкових сталей суттєво вплинув на зварюваність залізничних рейок.

На залізницях України переважно використовуються рейки конверторного виробництва марок сталей К76Ф (комбінат «Азовсталь», Україна), R350HT (Франція). Показники міцності та зносостійкості рейок конверторного виробництва забезпечуються за рахунок регламентованого розподілу твердості по перерізу рейки. Серед відомих способів зварювання плавленням і тиском залізничних рейок сучасним вимогам найбільшою мірою відповідає контактне стикове зварювання оплавленням (КСЗО). У той же час, технологічні режими КСЗО визначаються експериментально при тестових випробовуваннях для наявного типу рейок і конкретної рейкозварювальної машини. Дотепер в Україні не визначений єдиний алгоритм забезпечення якості зварних з'єднань рейок при зміні зовнішніх факторів (виробник рейок, марка сталі, стан рейкозварювальної машини, параметри дизель-генератора, якість підготовки торців рейок та інше).

Актуальність теми дисертації полягала в необхідності наукового обґрунтування і розробки ефективної технології КСЗО термічнозміцнених залізничних рейок конверторного виробництва.

**Мета і завдання досліджень.** Мета роботи – розробити ефективну технологію контактного стикового зварювання оплавленням залізничних рейок конверторного виробництва, яка забезпечує відповідність зварних з'єднань рейок вимогам чинних стандартів.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити особливості мікроструктури основного металу термічнозміцнених рейок конверторного виробництва класу міцності 350HV30, зокрема марок К76Ф, R350НТ;

2. Виконати розрахунково-експериментальне дослідження термічних циклів КСЗО і розподілу температур в зоні з'єднань рейок, визначити вплив основних технологічних параметрів на термічний цикл КСЗО рейок та встановити залежність мінімального та максимального значень ширини зони термічного впливу (ЗТВ) зварного з'єднання термічнозміцнених рейок типу Р65 (60Е1) від енергетичних параметрів процесу КСЗО.

3. Встановити залежність швидкості охолодження  $W_{8/5}$  зварного з'єднання термічнозміцнених залізничних рейок класу міцності 350HV30 в інтервалі температур 800-500°C від тривалості процесу оплавлення і величини енерговкладення при КСЗО.

4. Розрахунково-експериментальним шляхом визначити мінімальне значення тривалості процесу оплавлення і енерговкладення при КСЗО термічнозміцнених рейок типу Р65 (60Е1) марок К76Ф і R350НТ, при якому забезпечується відсутність у зоні з'єднання структур мартенситу і бейніту.

5. Визначити допустимий діапазон зміни основних технологічних параметрів КСЗО рейок типу Р65 (60Е1) та розробити ефективну технологію КСЗО термічнозміцнених залізничних рейок конверторного виробництва, яка забезпечує відповідність зварних з'єднань вимогам чинних стандартів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась у відділі №26 «Стикове зварювання» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в рамках державних науково-технічних програм «Дослідження і розробка технологій,

устаткування, систем автоматичного керування для способів зварювання тиском заевтектоїдних рейкових сталей, високоміцних мікролегованих трубних сталей, високолегованих алюмінієвих та нікелевих сплавів у однорідному та різнорідному сполученнях» (Державний реєстраційний номер 0115U006759), «Розробка фундаментальних та технологічних основ твердофазного з'єднання перспективних конструкційних матеріалів у одно- та різнорідному сполученнях» (0117U001897), «Дослідження формування з'єднань рейкових сталей з вираженою структурною неоднорідністю та удосконалення технології контактного стикового зварювання оплавленням (КСЗО) довгомірних рейкових плітей методом «натягу» з одночасним введенням їх у розрахунковий температурний інтервал закріплення» (0118U005295), «Дослідження та удосконалення методів багатofакторного керування процесами структуроутворення та фізико-механічними властивостями твердофазних з'єднань сучасних конструкційних матеріалів у одно- та різнорідному сполученнях, розробка технологій пресового зварювання відповідальних конструкцій для промислових об'єктів машинобудування і транспортної інфраструктури» (0118U100526), «Дослідження зварюваності рейок високої та надвисокої зносостійкості, зокрема закордонного виробництва, розробка технології їх контактного стикового зварювання, модернізація мобільних рейкозварювальних комплексів стосовно до умов спорудження безстикових колій України» (0120U100537), «Дослідження процесів нагрівання та деформації, формування структури та фазового складу, механічних і службових характеристик твердофазних з'єднань виробів із легованих сталей і сплавів на основі алюмінію та нікелю, удосконалення технологій та устаткування для способів стикового зварювання тиском» (01122U000834).

**Об'єкт дослідження** – формування нероз'ємних з'єднань сучасних залізничних рейок конверторного виробництва при контактному стиковому зварюванні оплавленням.

**Предмет дослідження** – макроструктура, мікроструктура, механічні властивості зварних з'єднань залізничних рейок.

### **Методи дослідження.**

В роботі використані розрахункові та експериментальні методи досліджень. Для проведення розрахункових досліджень використовувалась розроблена математична модель нагрівання рейок при оплавленні. Для проведення експериментальних досліджень використовувались стаціонарна машина K1000, мобільна рейкозварювальна машина K922, апаратура та прилади для реєстрації зміни технологічних параметрів та термічних циклів. Для металографічних досліджень використовувались методи світлової мікроскопії (“Neophot-32”), скануючої мікроскопії (Оже-мікрозонд JAMP-9500F), для досліджень твердості – твердомір NOVOTEST ТС-БРВ, мікротвердості – М400 «Лесо». Механічні випробування проводили на гідравлічному пресі ПГ-500 та машині для втомних випробувань ZDM-200Pu.

### **Наукова новизна:**

1. Вперше розрахунковим шляхом з використанням розробленої математичної моделі процесу нагрівання при контактному стиковому зварюванні оплавленням (КСЗО) рейок типу Р65 (60Е1) встановлено залежність мінімального  $H_{ЗТВ\min}$  та максимального  $H_{ЗТВ\max}$  значень ширини зони термічного впливу (ЗТВ) зварного з’єднання від тривалості процесу оплавлення  $t_{\text{опл}}$  і величини енерговкладення  $Q$ , а саме: при збільшенні  $t_{\text{опл}}$  в діапазоні від 50 до 140 с і  $Q$  від 9 до 18 МДж значення  $H_{ЗТВ\min}$  зростає від 16 до 22 мм, а  $H_{ЗТВ\max}$  – від 36 до 54 мм.

2. Вперше розрахунковим шляхом встановлено залежність швидкості охолодження  $W_{8/5}$  зварного з’єднання рейок типу Р65 (60Е1) в інтервалі температур 800-500°C від тривалості процесу оплавлення  $t_{\text{опл}}$  і величини енерговкладення  $Q$  при КСЗО та показано, що максимальне значення швидкості охолодження у зварному з’єднанні досягається по лінії з’єднання і змінюється від  $W_{8/5}=8,7$  до  $W_{8/5}=2,4$  °C/с при збільшенні  $t_{\text{опл}}$  і  $Q$  в діапазонах  $t_{\text{опл}}=50\dots140$  с і  $Q=9\dots18$  МДж.

3. Вперше розрахунково-експериментальним шляхом визначено

мінімальне значення тривалості процесу оплавлення  $t_{\text{опл}}=55$  с і енерговкладення  $Q_{\text{min}}=9,72$  МДж при КСЗО рейок типу Р65 (60Е1) марок К76Ф і R350НТ, при якому швидкість охолодження з'єднання в інтервалі температур 800-500°C не перевищує  $W_{8/5}=7,0$  °C/с та забезпечується відсутність у зоні з'єднання бейніту, мартенситу і формується перлітна структура різної дисперсності (перліт, сорбіт, троостит).

### **Практичне значення отриманих результатів**

Вперше в Україні розроблено науково обґрунтовану технологію КСЗО термічнозміцнених рейок конверторного виробництва. Визначено діапазон зміни енерговкладення  $Q$  при КСЗО, в якому забезпечується регламентовані вимоги чинних стандартів до зварних стиків рейок марок К76Ф і R350НТ та показано, що величина  $Q$  може бути використана у якості комплексного параметра, який враховує вплив всіх енергетичних параметрів процесу КСЗО на розподіл температур та структуру металу в зоні з'єднання.

На основі отриманих результатів розроблену технологію КСЗО рейок К76Ф за безпосередньою участю здобувача успішно впроваджено на рейкозварювальному підприємстві (РЗП) АТ «Укрзалізниця» на мобільних машинах К900М і К922, що засвідчено актами технологічних випробувань.

### **Апробація результатів дисертації**

Результати роботи і наукові положення дисертації доповідались і обговорювались на: 8-й Міжнародній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», (2015 р., Київ); Всеукраїнській конференції з міжнародною участю «Проблеми зварювання та споріднених технологій», (2019 р., Коблево); 11-й міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості і технологічних процесів та систем» (2021 р., Чернігів); Міжнародна конференція «Сучасні технології з'єднання матеріалів» (2021 р., Київ); 21-й Міжнародній науково-практичній конференції «Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика», (2021 р., Одеса); 22-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інженерія

поверхні та реновація виробів» (2022 р., Київ); 22-й Міжнародній науково-практичній конференції «Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика» (2022 р., Київ); 13-й Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості і технологічних процесів та систем» (2023 р., Чернігів); 23-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інженерія поверхні та реновація виробів» (2023 р., Київ).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 28 наукових праць, із яких 15 - статті у наукових фахових виданнях України і періодичних виданнях іноземних держав, 1 – стаття у періодичному науковому виданні, проіндексованому у базі даних Scopus, 1 патент України на винахід, та 12 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є результатом експериментальних і теоретичних досліджень, які автор проводив особисто. Постановка завдань, аналіз та узагальнення отриманих результатів досліджень проводились спільно з науковим керівником. Автор особисто провів експерименти по дослідженню термічних циклів при КСЗО залізничних рейок, за допомогою математичної моделі дослідив вплив основних технологічних параметрів на термічні цикли КСЗО рейок, розподіл температур та структуру металу у характерних зонах зварних з'єднань. Автор на основі результатів досліджень визначив діапазони зміни основних технологічних параметрів та величини енерговкладення, в яких забезпечуються регламентовані чинними нормативними документами показники якості зварних стиків, та розробив технологію КСЗО рейок К76Ф і R350НТ конверторного виробництва.

### **Структура і обсяг дисертації.**

Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи – 180 сторінок машинописного тексту, в тому числі 71 рисунок, 31 таблиця, список використаних джерел із 150 найменувань на 16 сторінках і 4 додатків на 8 сторінках.



## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН ВИРОБНИЦТВА І НЕРОЗ'ЄМНОГО З'ЄДНАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК КОНВЕРТОРНОГО ВИРОБНИЦТВА

#### 1.1. Характеристика рейкових сталей конверторного виробництва

У зв'язку з інтенсифікацією руху на залізницях України, збільшення жорсткості колії, числа та вантажонапруженості перевезень постійно зростають показники, що визначають термін служби рейок: швидкість руху та напруженість на вісь [1]. Будівництво в перспективі швидкісних і високошвидкісних залізничних магістралей, постійне збільшення ваги, вантажів, що перевозяться, використання залізобетонних шпал та ін., призводять до збільшення динамічного впливу на колісну пару і посилення вимог, що пред'являються до експлуатаційних властивостей і якості залізничних рейок.

У всіх економічно розвинених країнах завжди актуальною залишається проблема експлуатаційної стійкості та надійності залізничного шляху. Безстиківий шлях зарекомендував себе надійною та ресурсозберігаючою конструкцією сучасних залізничних магістралей, що масово будується у всьому світі [2-7].

Безстиківий шлях має ряд переваг [4-6]:

- зменшення на 30 – 40 % витрат на поточне утримання колії й підвищення безпеки руху поїздів, надійність конструкції;
- збільшення термінів служби верхньої будови колії за рахунок меншої, в порівнянні з болтовим з'єднанням, пошкодженням рейок (тріщини, сколи головки рейки, зминання й сідловини);
- скорочення витрат металу на стикові скріплення (до 4,5 т-км);
- зменшення витрат на ремонт ходових частин вагонів і локомотивів;
- підвищення комфортабельності проїзду пасажирів;

Можливості підвищення працездатності рейок, що раніше використовуються, за рахунок збільшення їх перерізу (ваги), підвищення вмісту вуглецю і легування стали фактично вичерпані [8, 9].

В даний час основні напрямки підвищення якості рейок пов'язують з удосконаленням технології їх виробництва, що включає комплекс заходів з виплавки, позапічної обробки, розливання та термообробки металу, націлених на оптимізацію хімічного складу рейкової сталі та забезпечення раціональної структури кінцевої металопродукції [10].

Практично на всіх металургійних заводах, що виробляють залізничні рейки, широко застосовується киснево-конверторний процес виплавки сталі. Використовується продування інертними газами, вакуумування та перемішування розплаву електромагнітним полем, безперервне розливання сталі. Ці заходи достатньо підвищують чистоту сталі, забезпечують мінімальний вміст у ній кисню і водню, вирівнюють хімічний склад, покращують макроструктуру і знижують утворення дефектів на поверхні катання головки рейки [11-15].

В наш час в Україні відбувається поступовий перехід на укладання в залізничних коліях високоміцних рейок нового покоління із високовуглецевих сталей конверторного виробництва. На залізницях України використовуються термічнозмцнені і рейки марки К76Ф, виготовлені ПрАТ МК «Азовсталь» згідно до вимог ДСТУ 4344-2004. Також використовують термічнозмцнені рейки закордонного виробництва типу 60E1 марки R350HT, виготовлені згідно до вимог стандарту EN 13674-1 [16].

Удосконалення технологічної схеми виробництва рейкової сталі здійснюється у напрямку збільшення частки металу, що виплавляється в конверторах та електропечах (мають перевагу за вмістом газів, неметалічних включень (НВ), сірки [17]) з розливом металу на вертикальних та радіальних МБЛЗ, що дозволяє покращити якісні та експлуатаційні показники рейок [18, 19]. Постійно ведуться роботи з уточнення та модернізації технології безперервного розливання рейкової сталі, націлені на підвищення

металургійної якості безперервно литої заготівлі (БЛЗ) [20-23]. Керування структурою досягається, головним чином, за рахунок ефективних режимів термообробки, які забезпечують необхідні глибину та рівень міцності загартованого шару і визначають комплекс експлуатаційних властивостей рейок. На сучасних рейкобалоочних заводах використовуються, в основному, три варіанти термообробки: об'ємне загартування з подальшим відпуском, поверхнєве загартування з індукційного нагріву і поверхнєве загартування з об'ємного пічного нагріву [24]. Структура з пластичного фериту і цементиту є базовою для рейок із високоміцних перлітних сталей, в яких механічні властивості значною мірою визначаються відстанню між ламелями цементиту ( $Fe_3C$ ), їх товщиною та розміром зерна [25 – 30].

В роботах [31 – 34] сформульовані основні вимоги до структури рейкової сталі для підвищення ресурсу залізничних рейок:

- мікроструктура головки рейки має бути однотипною і максимально однорідною на всій глибині дії контактних напружень;
- міжпластинчаста відстань в перліті має бути мінімальною;
- кількість карбідів у псевдоевтектоїді має бути максимальною;
- наявність зернограничного структурно вільного цементиту та бейніту в перлітній структурі є неприпустимою, а наявність зернограничного структурно вільного фериту – небажаною;
- величина дійсного аустенітного зерна у структурі матриці має не перевищувати 20...60 мкм.

Для забезпечення високої працездатності рейок структура металу повинна бути однорідною та однотипною по всій глибині ділянок [33 – 36]. Важливим показником експлуатаційної довговічності залізничних рейок є їх зносостійкість. Численні дослідження показують [37-41], що зносостійкість на пряму залежить від твердості виробу. На даний час найвищу конструктивну міцність мають рейки з однорідною структурою сорбіту загартування найбільшої дисперсності (троостит) з твердістю 330...400 НВ. Як було сказано вище параметри мікроструктури рейкової сталі, такі як міжпластинчаста

відстань у перліті, величина його колоній, наявність надлишкового фериту, впливають на властивості рейок. Відомо, що перлітна структура утворюється при дифузійному перетворенні аустеніту в широкому інтервалі температур – від  $\sim 720$  до  $\sim 450$  °С, і внаслідок цього має різну дисперсність, яка може змінюватися більше, ніж на порядок: від  $\sim 1,0$  до  $\sim 0,05$  мкм. Відповідно змінюється твердість сталі та інші показники механічних властивостей [42].

Слід зазначити, що перехід на сучасні рейкові сталі при будівництві залізничних магістралей актуалізувало проблему отримання якісного та надійного зварного з'єднання залізничних рейок. По-перше це пов'язано з постійно зростаючою протяжністю безстикowego шляху, по-друге зварні з'єднання сучасних високоміцних рейок із сталі киснево-конверторної плавки показують нижчі показники при механічних випробуваннях в порівнянні з рейками виготовленими із мартенівських сталей, при рівній кількості вихідних виробничих дефектів. Для підвищення зносостійкості високоміцні рейки мають значний вміст вуглецю С –  $0,72 \dots 0,82\%$  і розрахунковий вуглецевий еквівалент [43] складає в них Секв –  $0,8 \dots 1,1\%$ .

Підвищений вміст вуглецю в сучасних рейкових сталях суттєво впливає на можливість їх якісного зварювання, зокрема і методами зварювання тиском. За основними показниками зварюваності, високовуглецеві рейкові сталі близькі до високоміцних середньолегованих сталей з вмістом вуглецю С –  $0,3 \dots 0,45\%$  і вуглецевим еквівалентом Секв –  $0,8 \dots 1,0\%$ . Значення показників Секв у даних сталях практично однакові.

Отже, високовуглецеві рейкові сталі, як і високоміцні середньолеговані сталі, по якісному критерію зварюваності відносяться до таких, які задовільно зварюються. Тому без розробки і використання спеціальних режимів зварювання важко забезпечити необхідні показники якості та механічних властивостей зварних з'єднань [44, 45].

## 1.2. Вимоги до основного металу сучасних рейкових сталей

На залізницях України переважно використовуються термічно зміцнені рейки конверторного виробництва марок сталей К76Ф (комбінат «Азовсталь», Україна) і R350НТ (Франція). Показники міцності та зносостійкості рейок конверторного виробництва забезпечуються за рахунок регламентованого розподілу твердості по перерізу рейки. Основні вимоги до вітчизняних рейок марки К76Ф регламентуються ДСТУ 4344: 2004 [46], а до рейок марки R350НТ – ДСТУ EN 13674-1:2018 (EN 13674-1-2011:2005, IDT), який гармонізовано з відповідним європейським нормативним документом [47].

*Основні вимоги до рейок марки К76Ф згідно до [46].*

Мікроструктура металу головки поверхнево-загартованих рейок повинна являти собою троостит, тростосорбіт або сорбіт загартування з переходом до сорбітоподібного перліту і вихідної перлітної структури. Допускають дрібні розрізнені ділянки фериту [46]. У мікроструктурі загартованого шару головки на кінцях рейок до 0,2 м від торця допускається наявність локальних ділянок бейніту. Хімічний склад рейкових сталей повинен відповідати нормам, наведеним у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1- Хімічний склад рейкової сталі К76Ф згідно до [46]

Марка сталі	Вміст елементів, %						
	C	Mn	Si	V	S	P	Al
К76Ф	0,71...0,82	0,80... 1,30	0,25...0,45	0,03...0,07	≤0,04	≤0,035	≤0,015

У рейках допускається наявність неметалічних включень у вигляді витягнутих у напрямку прокатки рядків глинозему, нітридів титану і ванадію, а також глинозему, зцементованого силікатами. Для рейок вищої категорії довжина рядків не повинна перевищувати 1,0 мм; для рейок I і II категорій - 2,0 мм; для рейок III категорії першої групи - 2,0 мм і другої групи - 8,0 мм.

Твердість за глибиною загартованого шару рейки повинна бути постійна або знижуватися до значень, наведених у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Твердість за глибиною загартованого шару рейки K76Ф

Місце вимірювання	Значення твердості рейок категорій, HB (HRC)
Поверхня катання головки на кінцях до 0,2 м від торця	374...401 (41,5...43,5)
В головці на глибині 5 мм від поверхні катання по осі, не менше	341 (37,5)
В головці на глибині 11 мм від поверхні катання по осі, не менше	321 (35,0)
В головці на глибині 13 мм від поверхні катання по, не менше	321 (35,0)

*Основні вимоги до рейок марки R350HT згідно до [47].*

Мікроструктура металу головки поверхнево-загартованих рейок R350HT повинна являти собою сорбіто-тросітну структуру з незначними виділеннями фериту по межах зерен. Не допускається наявність мартенситних чи бейнітних структур [47]. Хімічний склад рейкової сталі повинен відповідати нормам, наведеним у таблиці 1.3

Таблиця 1.3 - Хімічний склад рейкової сталі R350HT згідно до [47]

Марка сталі	Хімічний склад, %						
	C	Mn	Si	Cr	S	P	Al
R350HT	0,70...0,82	0,65... 1,25	0,13...0,60	≤0,15	≤0,03	≤0,025	≤0,004

Продовження таблиці 1.3

Марка сталі	Хімічний склад, %							
	Mo	Ni	Cu	Sn	Sb	Ti	Nb	Cu + 10 Sn
R350HT	0,02	0,1	0,15	0,030	0,020	0,025	0,04	0,035

Дані робіт [48-50] і проведений аналіз показали наявність відмінностей у вимогах чинних стандартів [46] і [47], які представлено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняння вимог до рейкової сталі згідно ДСТУ 4344: 2004 та EN 13674- 1: 2011 + A1:2017 (E)

<b>Показники якості рейкової сталі</b>	
<b>Євростандарт EN 13674- 1: 2011 + A1:2017 (E).</b>	<b>ДСТУ 4244:2004 (Україна)</b>
<b>1. Хімічний склад</b>	
Метал контролюється за змістом водню ( $\leq 2$ ррт)	За змістом водню метал не контролюється
Метал контролюється за вмістом кисню ( $\leq 20$ ррт)	За змістом кисню метал не контролюється
Зміст азоту в металі регламентується (100-200 ррт)	Зміст азоту в металі не регламентується
Вміст фосфору і сірки обмежується 0,02% (не більше кожного елемента)	Зміст фосфору по стандарту 0,035% (не більше) сірки 0,04% (не більше)
Вміст алюмінію обмежена до 0,004%	Вміст алюмінію складає 0,015-0,025%
<b>Наявність неметалічних включень</b>	
У рейках допускають неметалеві включення які регламентуються вмістом та розмірами відповідно стандарту вздовж лінії прокату: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ глобулярні 353-705 мкм;</li> <li>▪ окремі глобулярні включення - 0,004%.</li> </ul>	Допускається наявність включень глинозему, нітридів титану, алюмосилікатів вздовж лінії прокату наступних розмірів: <ul style="list-style-type: none"> <li>1,0 мм для вищої категорії;</li> <li>4,0 мм для категорії I, III першої групи;</li> <li>8,0 мм для категорії II і III другої групи.</li> </ul>
Сумарний коефіцієнт забрудненості (K) не повинен перевищувати 30 мкм/мм.	Показник загальної забрудненості не встановлюється.
<b>Мікроструктура</b>	
Мікроструктура головки термозміцнених рейок повинна мати структуру пластинчастого перліту з балом зерна не вище 4, а рейки підвищеної міцності не балом зерна не вище 8.	Мікроструктура металу головки поверхнево загартованих рейок повинна мати структуру троститу або тростосорбіту або сорбіт закалки.

### 1.3. Способи нероз'ємного з'єднання залізничних рейок

З'єднання рейок при виготовленні довгомірних рейкових плітей (200...800 м) у стаціонарних умовах, а також у польових умовах при їхньому укладанні в колію виконується зварюванням [51].

Для зварювання рейок при будівництві та ремонті залізничних колій застосовуються способи зварювання плавленням і тиском [52-54]. Способи зварювання плавленням почали використовувати з 1920-х років, зокрема при ремонті, а згодом і спорудженні залізничних колій. Практичне застосування отримали способи – термітне електродугове (ручне штучними електродами, напівавтоматичне у середовищі захисних газів і порошковим дротом, автоматичне електродугове ванним способом з використанням плавкого мундштука). Серед способів зварювання тиском застосовуються газопресове, індукційне [55-56], лінійним тертям [57–60], електроконтактне, різновидами останнього є контактне стикове зварювання (КСЗ) безперервним оплавленням, КСЗ з попереднім підігрівом опором і КСЗ пульсуючим оплавленням. Проводились роботи по розробці і дослідженню технології електрошлакового зварювання рейок [61, 62], але інформації про широке практичне застосування цього способу в наявних публікаціях знайти не вдалось.

При оцінці ефективності різних способів зварювання залізничних рейок приймалися до уваги технологічні особливості формування зварних стиків, показники механічних властивостей, макро- та мікроструктура з'єднань, імовірність утворення дефектів, придатність до контролю (прогнозування) якості стиків, продуктивність та можливість автоматизації процесу зварювання [63, 64]. Оскільки практичного застосування при будівництві і ремонті залізничних колій набули термітне, електродугове [64], газопресове і електроконтактне зварювання, то огляд присвячено аналізу саме цих способів.



### *Газопресове зварювання рейок*

Газопресове зварювання (ГПЗ) – метод зварювання тиском, при якому ділянку з'єднання і область навколо нього нагрівають газом в той час, як торцеві поверхні рейок стискаються [65-67]. Процес зварювання складається з процесів нагрівання, осадки, проковки і зрізання грату (рис 1.1). Процес нагрівання виконується вручну оператором-зварювальником з використанням киснево-ацетиленової суміші, тому ступінь автоматизації процесу зварювання є низькою. Оскільки щільність контакту торців, що зварюються, значно впливає на якість з'єднання, торцеві поверхні обробляють спеціальними шліфувальними пристроями, що обумовлює відповідні вимоги до кваліфікації персоналу та організації підготовчих робіт.

У роботі [68] показано, що найменша температура, при якій відбувається з'єднання двох металів при газопресовому зварюванні, тобто, утворюються загальні зерна у місці стику, що дорівнює  $910^{\circ}\text{C}$ . Торцеві поверхні як центр ділянки шва і навколишній метал нагріваються до високої температури, і температура поверхні навколо торців в кінцевому підсумку досягає  $1200\text{-}1300^{\circ}\text{C}$  [68]. Тиск на торцях зазвичай залишається постійним,  $20\text{-}30$  МПа, протягом усього процесу нагрівання. Загальний час зварювання варіюється в залежності від профілю рейки та в середньому становить 6-7 хвилин.

Ширина ЗТВ з'єднань рейок, становить близько 100 мм (рис.1.2), значення твердості знижується приблизно до  $270\text{...}290\text{HV } 30$ , тому при ГПЗ термічнозміцнених рейок використовується післязварювальна термічна обробка. Характерним видом дефектів, які утворюються у з'єднаннях при ГПЗ, є плівки оксидів.

Зона зниження твердості має значну ширину. Отже, в разі термооброблених рейок, для отримання такого ж рівня твердості, що і у базового рейки, використовується метод повторного нагріву до області аустеніту.

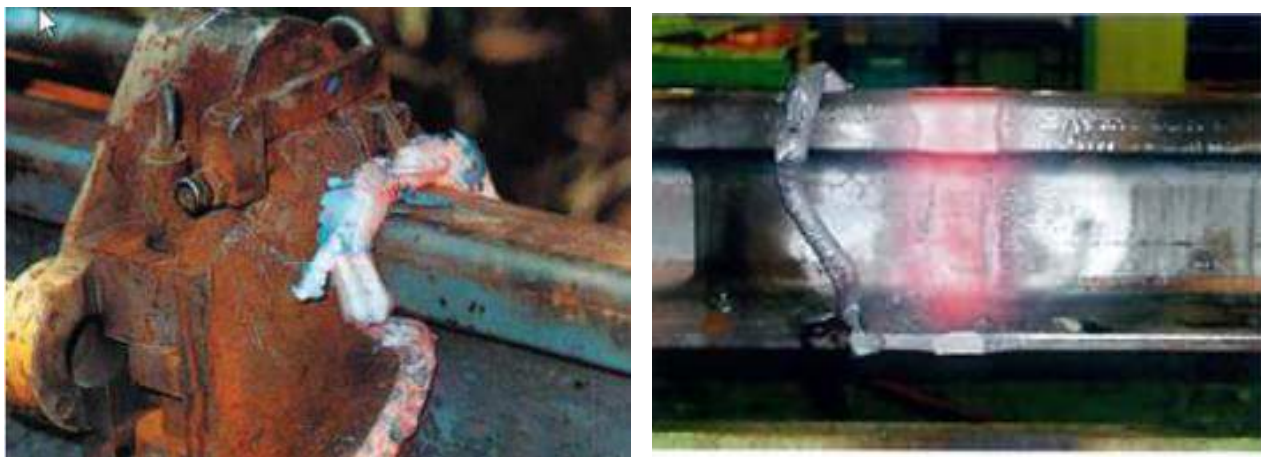


Рисунок 1.1 – Зварний стик залізничних рейок після видалення ґрату [66]

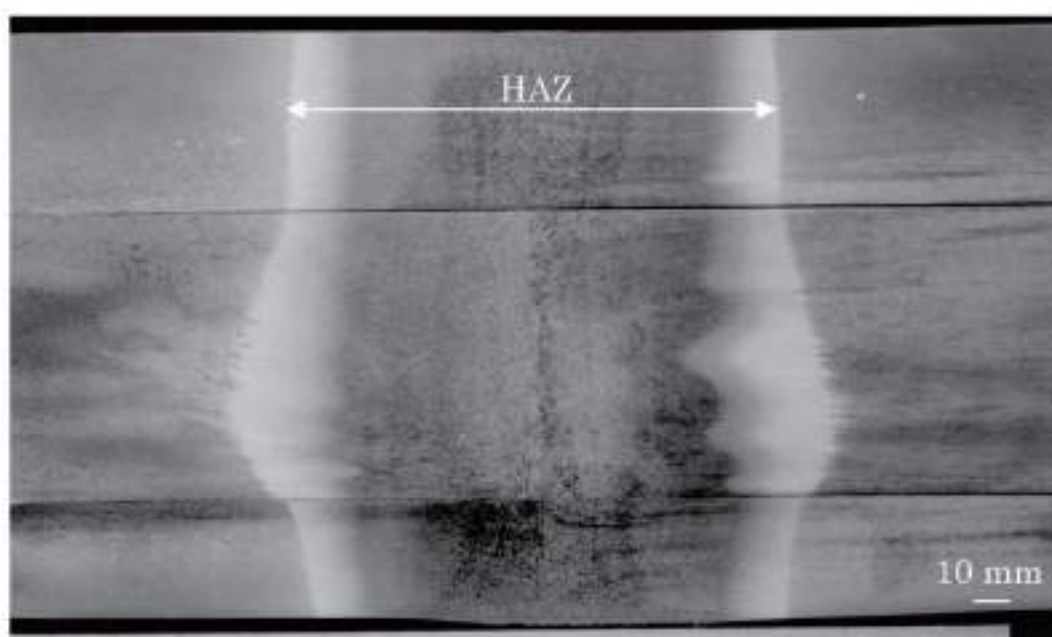


Рисунок 1.2 – Зона термічного впливу при газопресовому зварюванні залізничних рейок [68]

### *Електродугове зварювання рейок*

Електродугове зварювання (ЕДЗ) покритими електродами в даний час широко застосовується в основному для з'єднання трамвайних та кранових рейок. Однак цей спосіб зварювання не забезпечує належної якості зварних з'єднань, так як у великій мірі залежить від кваліфікації зварника, і значно поступається іншим способам зварювання по продуктивності [69-71]. З метою підвищення продуктивності розроблений процес напівавтоматичного електродугової ванного зварювання стиків рейок, застосовуваний, зокрема, Берлінської транспортною компанією при ремонті залізничних колій метрополітену. При цьому використовується спеціальний подовжений струмопідвідний мундштук і самозахисна порошковий дріт. Повідомляється, що підвищення продуктивності становить 30% в порівнянні з ручним електродуговим зварюванням покритими електродами [72]. Для запобігання утворенню тріщин у зоні зварного з'єднання проводили попередній підігрів до температури 300...350°C. В роботі [73] описується досвід використання ЕДЗ закритою дугою з використанням високовуглецевих електродів для з'єднання рейок із високоміцних сталей, при цьому у технологічний цикл зварювання передбачав попередній підігрів і післязварювальну термічну обробку.

Процес ЕДЗ рейок включає накладання кореневого валика з наскрізним проплавленням, багатопрохідне зварювання підосви, безперервне зварювання від шийки до головки та багатопрохідне зварювання головки рейок. Зварювальний дріт класу 800-1100 МПа використовуються для стандартних рейок із вуглецевої сталі. Оскільки вміст вуглецю у дроті низький, метал зварного шва має бейнітну структуру. Щоб покращити зносостійкість та стійкість до стирання металу шва високоміцних рейок, використовували високовуглецевий зварювальний дріт для отримання перлітної структури металу шва [74, 75]. Продуктивність зварювання (один стик за 60...75 хвилин) знаходиться на низькому рівні.

Компанією Nippon Steel розроблено процес ЕДЗ [76], який є комбінацією зварювання в захисних газах електродом, що обертається, (зварювання

підшви) і електрошлакового зварювання (зварювання шийки і головки рейок). Весь процес здійснюється автоматично за допомогою апарата, контрольованого комп'ютером. Час зварювання стику становить близько 100 хв.

В Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України розроблено технологію автоматичного ЕДЗ ванним способом з використанням плавкого мундштука. Його відмінною особливістю (рис. 1.3, а, б) є використання самозахисного порошкового дроту, що подається через поздовжній канал в плоскому мундштуку, який плавиться, що дозволяє виконувати зварювання при зазорі 12–16 мм, а в окремих випадках 8–22 мм.

Розроблена технологія ЕДЗ завдяки механізації процесу зварювання дозволяє в 2...3 рази збільшити продуктивність робіт і значно покращити якісні показники зварних з'єднань, зберігаючи високу мобільність та універсальність обладнання (рис. 1.3, в). Спеціальні зварювальні матеріали та технологія автоматичного ЕДЗ забезпечують задовільні показники механічних властивостей з'єднань. Так, твердість металу шва зварного з'єднання рейок Р65 становить НВ 2600...3200 МПА, межа міцності – 800...900 МПа, руйнівне навантаження при випробуванні на статичний згин – 1500...1650 кН при стрілі прогину 16...22 мм. Дана технологія придатна для зварювання рейкових колій промислових підприємств, трамвайних та підкранових шляхів, а також у перспективі – для виконання оперативних ремонтних робіт на залізницях.

На рис. 1.4 наведено макроструктуру шва та розподіл твердості в зоні з'єднання термічнозміцнених рейок. Ширина шва становить приблизно 20 мм, а загальна ширина ЗТВ – приблизно 100 мм.

Твердість металу шва близька до твердості основного матеріалу НВ390, але наявні зони пониженої твердості з обох боків шва. При повторному нагріванні та прискореному охолодженні зварного стику, яке проводять для зменшення градієнта твердості, розташування зон пониженої твердості зміщується на відстань до 60 мм від центру шва [76].

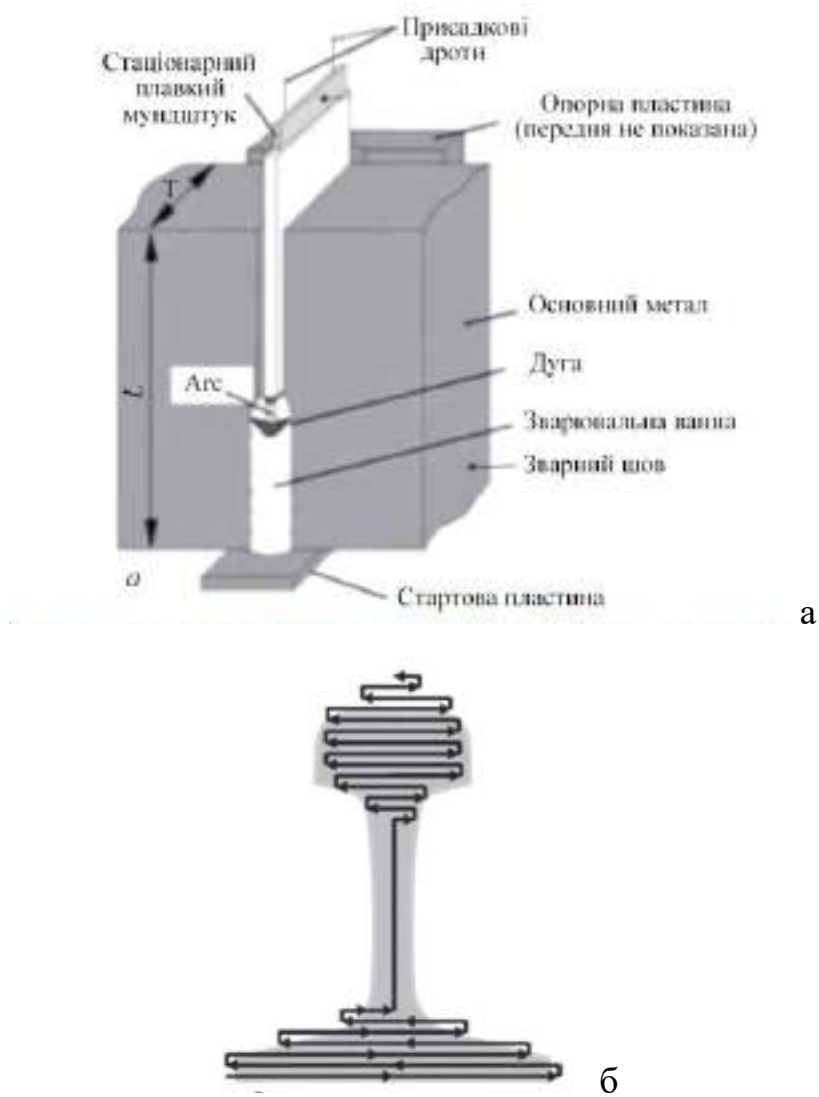


Рисунок 1.3 – Схема процесу (а), напрям переміщення мундштука (б), мобільне устаткування для ЕДЗ (в)

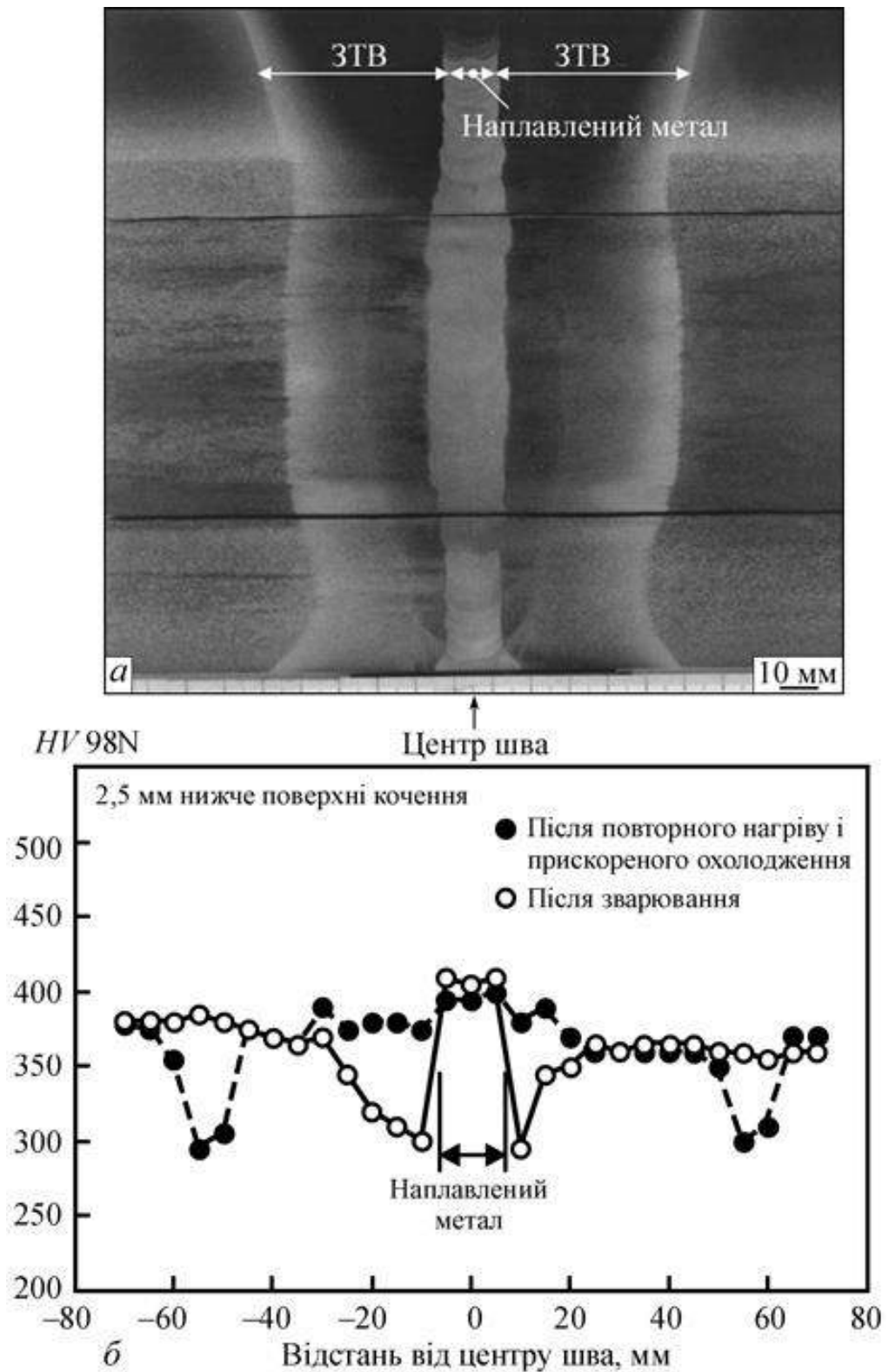


Рисунок 1.4 – Макроструктура шва (а), розподіл твердості в ЗТВ (б) з'єднання термічнозміцнених рейок у стані після ЕДЗ і після повторного нагріву з прискореним охолодженням [51]

### *Термітне (алюмінотермітне) зварювання рейок*

Термітне зварювання (ТЗ), як технологія зварювання залізничних рейок застосовується в багатьох країнах світу, в тому числі і в Україні. Даний метод зварювання, вже понад сто років застосовується для з'єднання рейок різного призначення, має високу мобільність і універсальністю і служить для вирішення завдань по ремонту та заміни рейок в польових умовах.

Аналіз технології ТЗ рейок проведено в роботах [77–84]. Технологія ТЗ передбачає подачу розплавленого металу в форму, що охоплює торці двох стикуються рейок. Завдяки високим відновним властивостям алюмінієвого порошку на окисли заліза, досягається дуже висока температура розплаву металу.

Якість зварювання залежить, головним чином, від дотримання умов підготовчих робіт. Перед початком зварювальник виставляє зазор, після виставки зазору, приступає до центрування рейок [77, 78]. Процес термітної реакції забезпечує термітна суміш, яка складається з окисленого заліза і металевого алюмінію як реагуючих складових, поряд з легуючими добавками, такими як феромарганець, склад цієї суміші регулюється так, щоб склад металу шва наближався до складу рейки. Термітну суміш виливають в тигель, встановлений над формою, і реакція запускається засобом для займання у вигляді піротехнічного реагенту і триває 15-30 с. У результаті реакції утворюються розплавлена сталь і розплавлений глиноземний шлак, вони залишаються в розплавленому стані і розділяються в тиглі за рахунок різниці в питомій вазі [79–82].

Отримана таким чином розплавлена сталь заливається на ділянку шва. Торці рейки розплавляються залитої розплавленої сталлю (рис. 1.5). Час термітного зварювання залізничних рейок становить близько 30 хвилин. Оскільки хімічний склад рейки і металу шва практично однаковий, межа між металом шва і ЗТВ нечітка. Як видно з рис. 1.6, ширина металу шва становить приблизно 75 мм у верхній частині, а ширина ЗТВ - приблизно 20 мм по обидва боки [85-88].



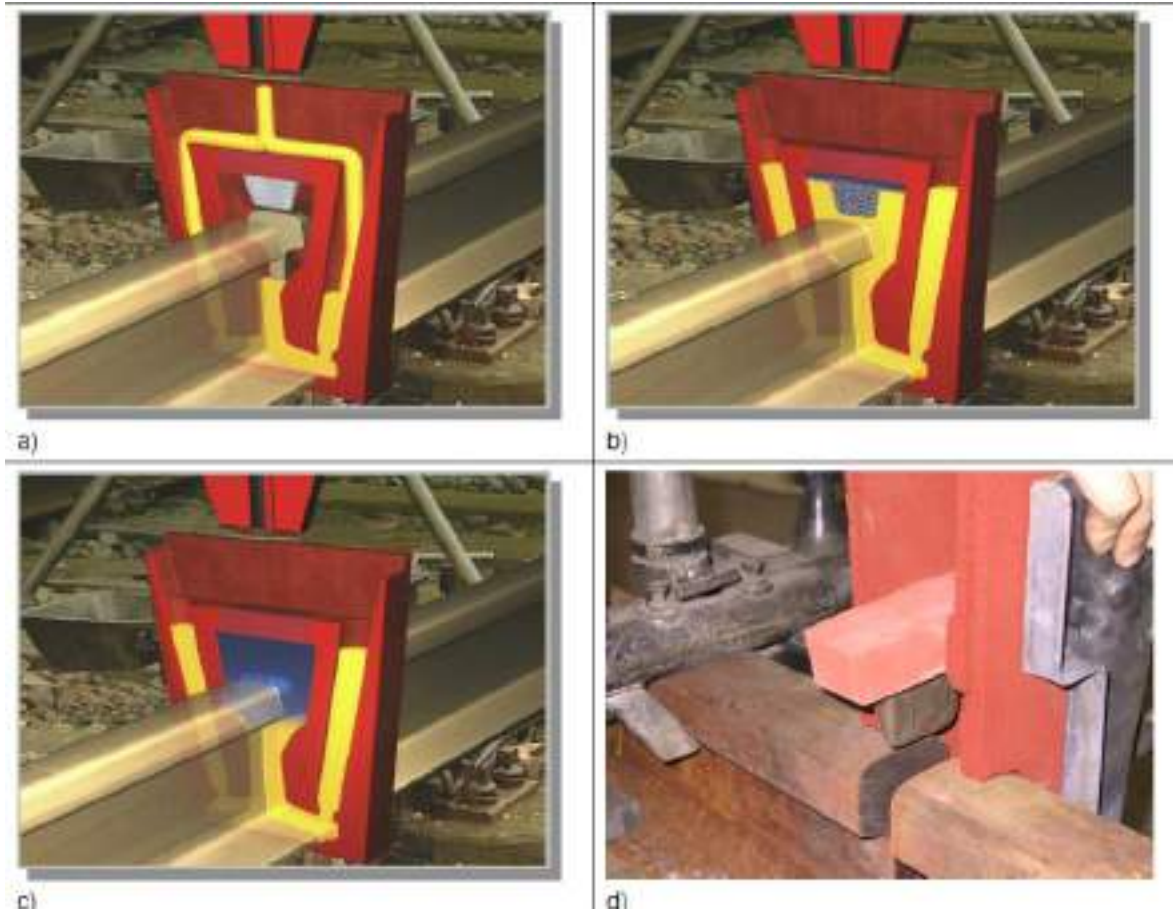


Рисунок 1.5 – Схема термітного зварювання залізничних рейок [77]

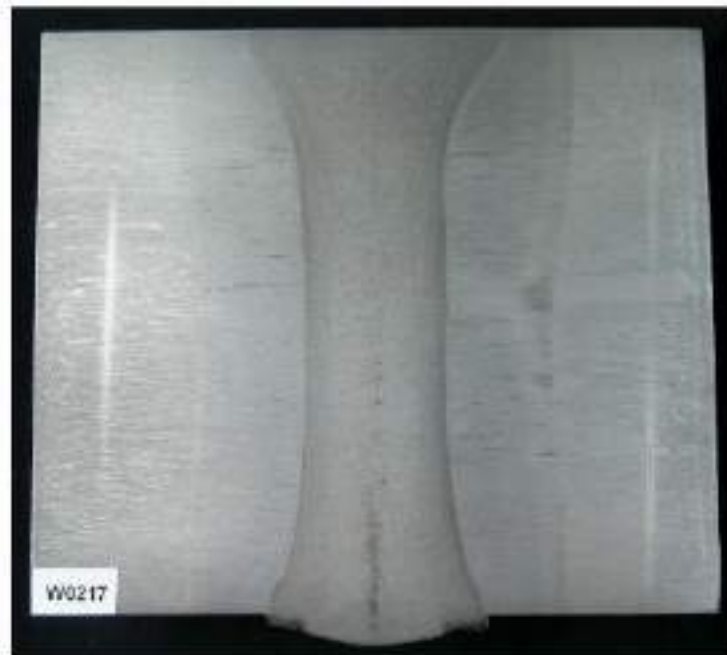


Рисунок 1.6 – Зона термічного впливу при термітному зварюванні залізничних рейок [85]



### *Електроконтактне зварювання рейок*

Різновидами цього найпоширенішого способу зварювання рейок є контактне стикове зварювання (КСЗ) безперервним оплавленням, КСЗ з попереднім підігрівом опором і КСЗ пульсуючим оплавленням. Контактне стикове зварювання оплавленням (КСЗО) – це різновид стикового зварювання тиском, при якому деталі з'єднуються по поверхні торців, що стикуються, в результаті підведення струму і застосування зусилля стиснення [89–95].

#### *Контактне стикове зварювання оплавленням з підігрівом опором*

При зварюванні оплавленням з підігрівом опором необхідне температурне поле отримують нагріванням деталей методом опору. Попереднє підігрів здійснюється частіше шляхом надання однієї з деталей назад-поступального руху, яке забезпечує періодичне замикання і розмикання зварювального кола (рис. 1.7). Внаслідок періодичного переривання струму досягається вирівнювання температурних полів по поперечному перерізу деталей. Ступінь вирівнювання температури залежить від точності підготовки торців деталей до зварювання і точності встановлення деталей в затискних пристроях машини. Параметри режиму попереднього підігріву опором визначають температурне поле в зоні зварювання на момент переходу від нагрівання до оплавлення. Роль оплавлення зводиться в розглянутому випадку до утворення шару рідкого металу на торцях заготовок і відповідної захисної атмосфери в іскровому проміжку.

Підігрів опором служить як технологічний прийом для розширення зони розігріву металу. При нагріві опором зона розігріву майже повністю охоплює метал, що знаходиться між затискними губками зварювальної машини. У більшості випадків КСЗ з підігрівом опором використовується з короткочасним пропусканням струму під час імпульсів (рис.1.8). Основним розробником устаткування є компанія Schlatter (Швейцарія) (рис.1.9). Компанія виготовляє переважно стаціонарні рейкозварювальні комплекси [96]. Макроструктура зварного з'єднання, звареного КСЗ з підігрівом опором зображена на рис.1.10. Якість зварювання задовольняє сучасним вимогам Європейського стандарту.

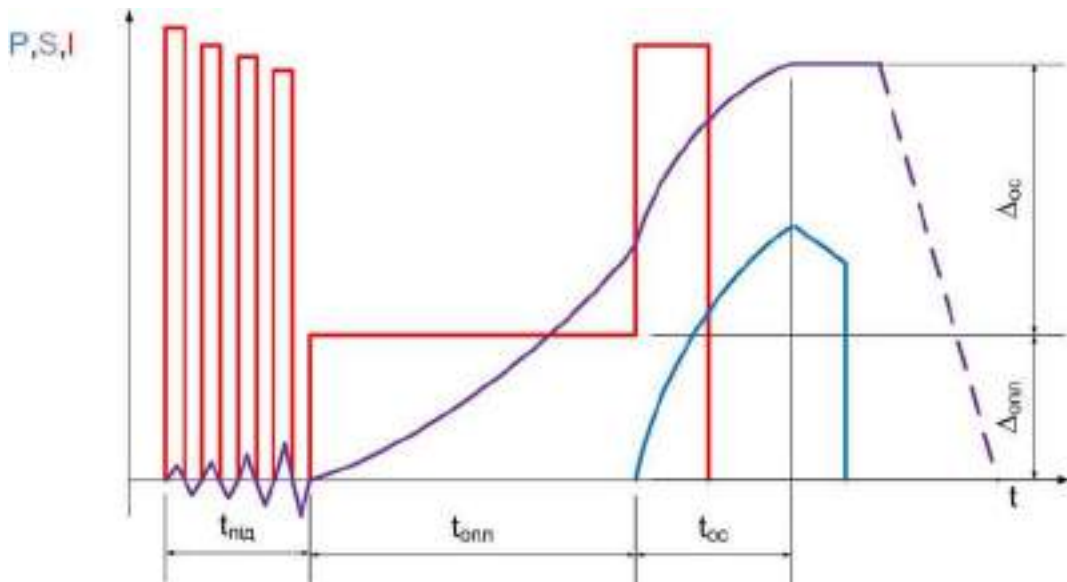


Рисунок 1.7 - Типова циклограма процесу стикового зварювання оплавленням з підігрівом опором, де  $t_{під}$ ,  $t_{опл}$  і  $t_{ос}$  тривалість підігріву, тривалість оплавлення і тривалість осаджування, а  $\Delta_{опл}$  і  $\Delta_{ос}$  припуск на оплавлення і осаджування відповідно [90-92]

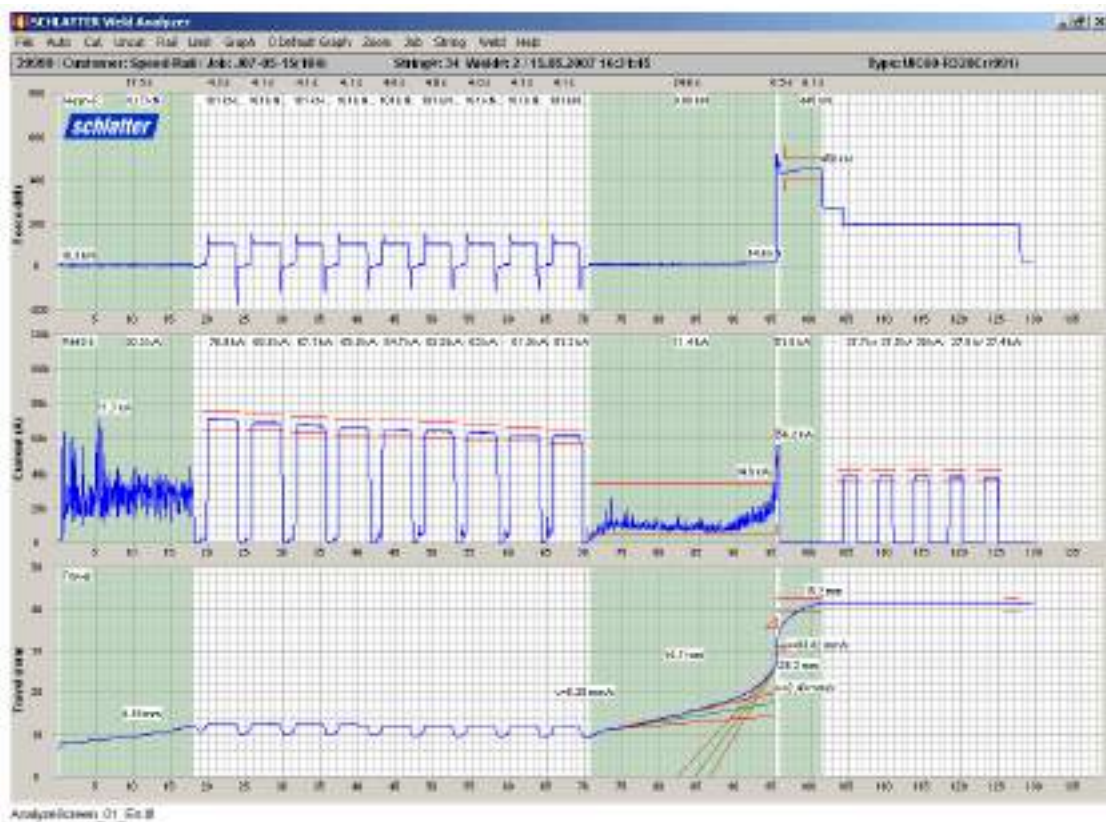


Рисунок 1.8 - Запис основних параметрів зварювання залізничних рейок КСЗ оплавленням з підігрівом опором



Рисунок 1.9 – Стационарна рейкозварювальна установка Schlatter GAAS 80 [96]



Рисунок 1.10 - Макроструктура зварного з'єднання, звареного КСЗО з підгрівом опором на зварювальній машині Schlatter GAAS 80 [96]

Головна проблема методу КСЗО з підігрівом опором це стабілізація теплового поля, що виникає під час зварювання. Даному методу властиві й інші серйозні недоліки. Зі збільшенням площі поперечного перерізу деталі енергетичний ККД процесу значно падає, також знижується коефіцієнт потужності. Технологічним недоліком є те, що КСЗО з підігрівом опором дає надмірно широку зону розігріву, в результаті чого знижуються механічні властивості зварного з'єднання і неефективно використовується витрачених на зварювання енергія. Також реалізація даної технології зварювання ускладнена в польових умовах за рахунок значних габаритних розмірів мобільних рейкозварювальних машин.

#### *Контактне стикове зварювання безперервним оплавленням*

При КСЗ безперервним оплавленням деталі поступово зближують при включеному джерелі струму. Дотик торців відбувається по окремим виступам (контактам). Оскільки площа утворення контактів-перемичок дуже мала, то через високу щільність струму що протікає через них вони швидко нагріваються і розплавляються. Частина металу вибухає і у вигляді іскор вилітає зі стику. У розплавленому металі що викидається присутні і забруднення з поверхонь заготовок. Подальше зближення деталей призводить до утворення і оплавлення нових контактів-перемичок. В результаті цього безперервного процесу деталі прогріваються всередину, на потрібну величину, а на торцях утворюється шар рідкого металу. Після того, як торці оплавляються по всій поверхні, виконується осадка. Торці швидко зближуються з великим зусиллям. При цьому рідкий метал з оксидними плівками видавлюється зі стику назовні і при затвердінні утворює грат, який зазвичай видаляють в гарячому вигляді. Циклограма контактного стикового зварювання безперервним оплавленням показана на рисунку 1.11.

Режим безперервного оплавлення визначають швидкістю переміщення рухомої плити машини  $V_{\text{п}}$ , вторинною напругою холостого ходу трансформатора  $U_{2\text{х.х}}$ , опором машини  $Z_{\text{кз}}$ , припуск на оплавлення  $\Delta_{\text{опл}}$ . Найбільший вплив на формування температурного поля в зварювальних

деталях виявляє швидкість переміщення. Чим більша швидкість  $V_{\text{п}}$ , тим вищий градієнт температурного поля і температура в об'ємах металу, які безпосередньо прилягають до поверхонь що оплавляються. Якщо на торцях досягається температура, близька до температури плавлення металу, то встановлюється рівноважний теплове стан і подальше оплавлення не призводить до збільшення нагрівання деталей. Зі збільшенням швидкості  $V_{\text{п}}$  рівноважний тепловий стан встановлюється за меншої тривалості оплавлення, а загальна кількість накопиченої в деталях теплоти знижується [89].

Підвищення коефіцієнту корисної дії (ККД) процесу можна досягти при зміні напруги  $U_2$  в функції температури на торцях рейок [89-92]. Типовий запис основних параметрів КСЗ безперервним оплавленням наведено на рис. 1.12.

#### *Контактне стикове зварювання пульсуючим оплавленням*

Недоліками технології КСЗ безперервним оплавленням рейок є відносно великі значення припуску на оплавлення (близько 40 мм) і загального часу зварювання (180...240 с). Революційним удосконаленням технології зварювання рейок стала технологія КСЗ пульсуючим оплавленням, розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона. За рахунок багатофакторного регулювання процесу оплавлення забезпечується інтенсифікація контактного нагрівання, скорочуються втрати металу, підвищується термічний ККД процесу. Завдяки висококонцентрованому нагріванню, загальне енерговкладення, тривалість процесу і припуск на зварювання скорочується у 1,5...2,0 рази [93, 94]. Розроблені системи керування зварювальними машинами дозволили варіювати в широких межах величину енерговкладення в зону зварювання і забезпечувати високу відтворюваність заданих режимів нагріву [95].

Як видно з осцилограм (рис 1.13), при пульсуючому оплавленні величина і інтенсивність струму, що протікає в деталях вища, ніж при КСЗ безперервним оплавленням. Типовий запис основних параметрів КСЗ пульсуючим оплавленням представлено на рис. 1.14.

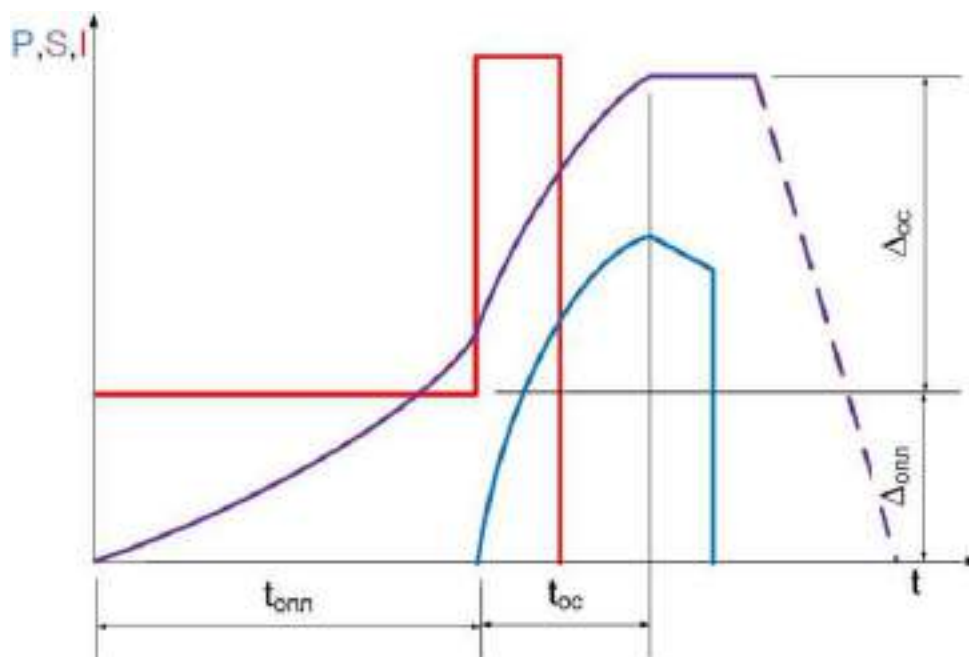


Рисунок 1.11 – Циклограма КСЗ безперервним оплавленням, де  $t_{\text{опл}}$  і  $t_{\text{ос}}$  тривалість оплавлення і тривалість осаджування, а  $\Delta_{\text{опл}}$  і  $\Delta_{\text{ос}}$  припуск на оплавлення і осаджування відповідно [89]

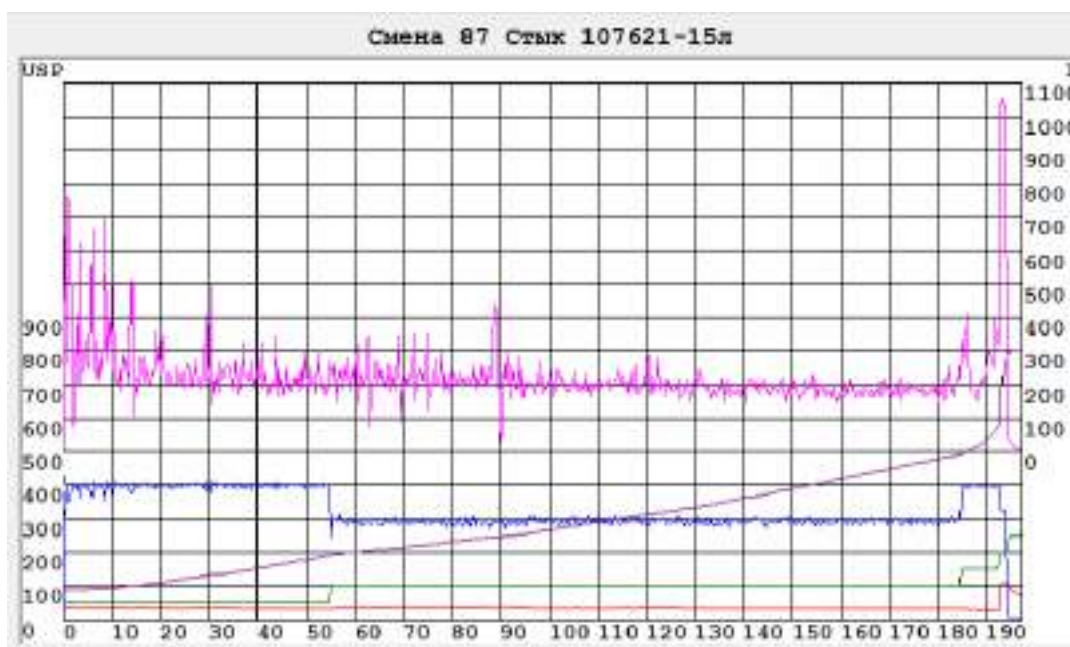


Рисунок 1.12 - Запис основних параметрів при КСЗ безперервним оплавленням



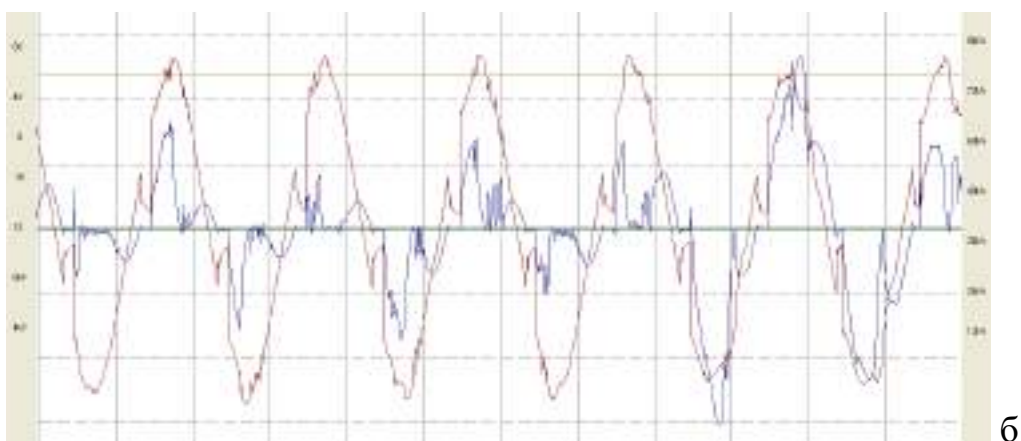
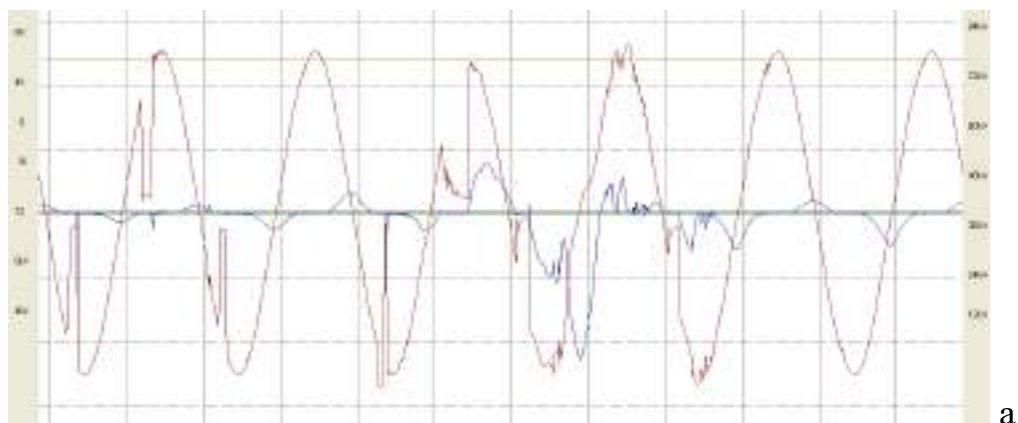


Рисунок 1.13 – Осцилограми напруги і струму при КСЗ безперервним (а) та пульсуючим оплавленням (б)

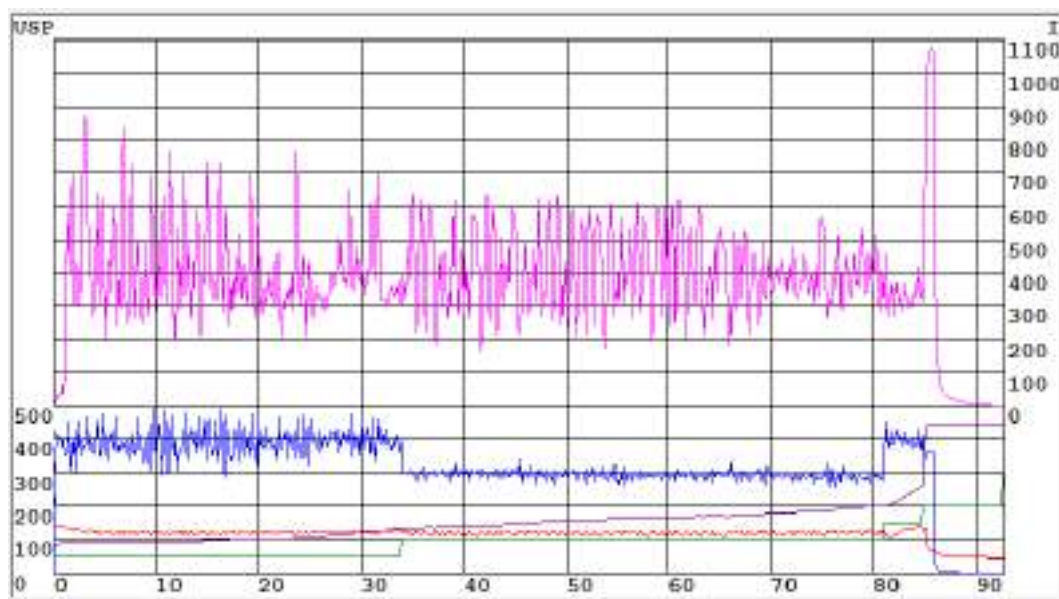


Рисунок 1.14 - Типовий запис параметрів КСЗ пульсуючим оплавленням

### *Порівняння різних способів зварювання рейок*

При оцінці ефективності різних способів зварювання залізничних рейок приймалися до уваги технологічні особливості формування зварних стиків, показники механічних властивостей, макро- та мікроструктура з'єднань, імовірність утворення дефектів, придатність до контролю (прогнозування) якості стиків, продуктивність та можливість автоматизації процесу зварювання [96-99].

У таблиці 1.5 наведено оціночне порівняння розглянутих способів зварювання рейок за декількома показниками із літературного джерела, а у таблиці 1.6 – оцінку за іншими розглянутими критеріями.

Таблиця 1.5 – Порівняння способів зварювання залізничних рейок [51]

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

Таблиця 1.6 – Оціночне порівняння способів зварювання рейок

Характеристика (показник)	КСЗ	ГПЗ	ЕДЗ-ПМ	ТЗ
Металургія процесу	ковка	ковка	плавлення	плавлення
Автоматизація процесу	висока	середня	середня	низька
Ширина ЗТВ, мм	20-45	120-150	80-100	115-140
Придатність до контролю (прогнозування) якості з'єднань	висока	середня	низька	низька

Незважаючи на порівняно низьку продуктивність, складність автоматизації процесу, способи зварювання плавленням (ТЗ і ЕДЗ) завдяки невисокій вартості початкових інвестицій, високій мобільності понад сто років застосовується для з'єднання рейок різного призначення на трамвайних і



залізничних коліях, підкранових шляхів промислових підприємств, а ТЗ успішно використовується для приварки хрестовин стрілочних переводів на залізничних коліях. Незважаючи на невисоку ступінь автоматизації процесів підготовки кінців рейок, нагрівання, контролю якості з'єднань, ГПЗ при умові наявності кваліфікованого персоналу, правильній організації допоміжних і зварювальних робіт забезпечує надійне зварювання рейок, про що свідчить успішний досвід використання цієї технології в Японії. Найбільш поширеним у світі процесом зварювання залізничних рейок є КСЗ оплавленням.

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

Починаючи з 1960-х до 2010-х років технологія КСЗ безперервним оплавленням успішно застосовувалась при з'єднанні рейок у стаціонарних і польових умовах, зокрема всіх типів рейок мартенівського виробництва. Недоліками технології КСЗ безперервним оплавленням рейок є відносно великі значення припуску на оплавлення, загального часу зварювання і складність забезпечення заданих нормативними документами термічних циклів, що необхідно для якісного з'єднання сучасних зносостійких рейок конверторного виробництва. У 2000-х роках освоєно виробництво мобільних і стаціонарних рейкозварювальних машин, оснащених швидкодіючими силовими приводами і комп'ютеризованими системами керування процесом КСЗ пульсуючим оплавленням [94, 97]. Процес КСЗ пульсуючим оплавленням дозволяє у широких межах регулювати термічні цикли при з'єднанні залізничних рейок різних категорій, класу міцності із сталей з різним хімічним складом.

Тому обґрунтованим є використання КСЗ пульсуючим оплавленням у якості базового процесу при розробленні ефективної технології зварювання залізничних рейок конверторного виробництва.

#### **1.4. Аналіз вимог чинних стандартів до зварних з'єднань залізничних рейок, виконаних КСЗО**

Для оцінки ефективності технології КСЗ оплавленням необхідно розглянути вимоги діючих стандартів України і ЄС до зварних стиків залізничних рейок. Порівняння вимог діючих стандартів до зварних стиків рейок при КСЗ, виконаних КСЗ мобільними і стаціонарними рейкозварювальними машинами, наведено в таблиці 1.7.

У табл. 1.7 наведені вимоги стандартів [100-103] до зварних рейок.

Відповідно до нормативних документів – вітчизняного [100] і європейських [101 - 103] вимоги до зварних з'єднань залізничних рейок можна умовно розділити на групи:

- показники механічних властивостей – стріла прогину і навантаження до руйнування при випробуваннях стиків на статичний поперечний згин;
- наявність дефектів – види недопустимих і максимальні розміри та кількість допустимих дефектів при неруйнівному (магнітопорошковому контролю поверхні стиків) і руйнівному (у зламі з'єднань після їх випробувань на статичний згин) методах контролю, та при аналізі макроструктури з'єднань;
- параметри зони термічного впливу (ЗТВ) – її допустимі максимальна і мінімальна ширина та нерівномірність по довжині та перерізу рейок при аналізі макроструктури зварних стиків;
- розподіл твердості у ЗТВ (мінімальне і максимальне значення, HV30);
- мікроструктура металу в зоні з'єднання і ЗТВ – допустима перлітна структура різної дисперсності (перліт, сорбіт, троостит), виключається наявність ділянок з мартенситною та бейнітною структурою;
- показники при випробуваннях стиків на циклічну міцність.

Аналіз даних таблиці 1.7 показує, що існують суттєві відмінності у вимогах вітчизняного і європейських стандартів, перш за все, в необхідності визначення показників міцності при циклічних навантаженнях зварних стиків, по-друге, кількісної оцінки параметрів ЗТВ з'єднань, по-третє, виключення утворення структур мартенситу і бейніту в зоні з'єднання.

Таблиця 1.7 - Порівняння вимог стандартів до зварних стиків рейок

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

Наявні публікації і багаторічний практичний досвід свідчать, що як і для будь-яких способів зварювання для КСЗО залізничних рейок проблемою є утворення в зоні термічного впливу градієнту твердості (рис. 1.15): для термічнозміцнених рейок – зон пониженої твердості з обох боків від лінії з'єднання («Double Dip Hardness») [51, 104].

Отже, параметри ЗТВ (ширина, рівномірність по перерізу рейок), мікроструктура зони з'єднання є надзвичайно важливими в прогнозуванні зносостійкості зварних стиків в умовах циклічних навантажень залізничної колії та є визначальними критеріями оцінки ефективності технології зварювання рейок.

Міністерством інфраструктури України затверджено Перелік національних стандартів, відповідність яким надає презумпцію відповідності вимогам Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту (Наказ від 20.11.2019 р. №815). До вказаного переліку включено національний стандарт *ДСТУ EN 14587-2:2015 (EN 14587-2:2009, IDT)*, гармонізований з відповідним європейським нормативним документом. Це означає, що при будівництві та ремонті вітчизняних залізничних колій з використанням рейок закордонного виробництва показники якості зварних стиків повинні оцінюватись на основі вимог європейського стандарту.

Аналіз вимог чинних стандартів до зварних стиків рейок показує необхідність врахування енергетичних параметрів процесу КСЗО, які визначають термічний цикл і температурне поле, обумовлюють час перебування металу ЗТВ в аустенітній області та швидкість охолодження в інтервалі температур перетворення аустеніту, визначають розподіл показників твердості в зоні з'єднання рейок.

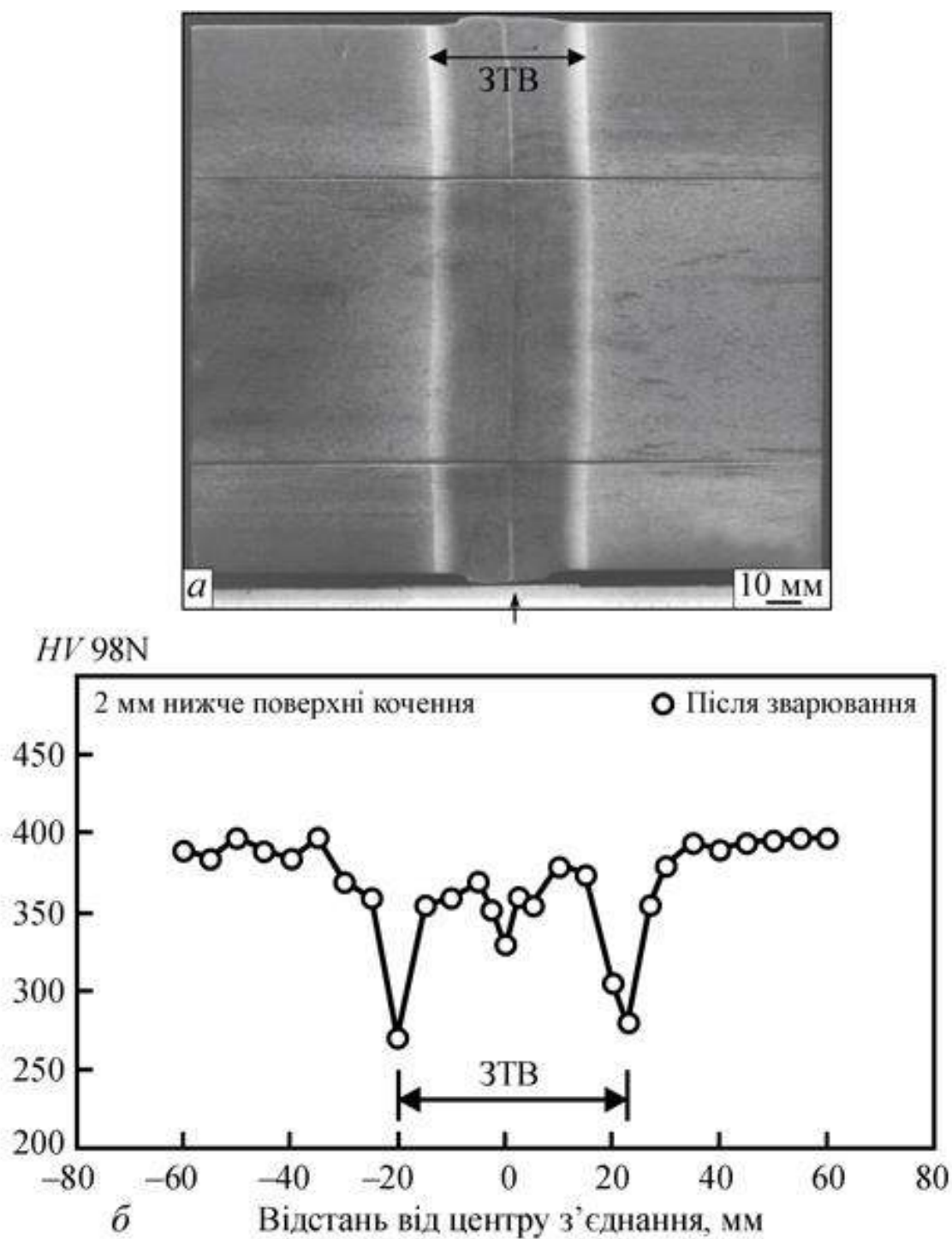


Рисунок 1.15 – Макроструктура з'єднання рейок класу міцності 350HV30 при КСЗ оплавленням (а) розподіл твердості у з'єднанні [51]

### **1.5. Проблеми КСЗО рейок конверторного виробництва, обумовлені структурою основного металу**

В умовах зростаючих осьових навантажень на рейкове полотно підвищуються вимоги до структурної однорідності рейкової сталі, а саме, її чистоти по неметалічним включенням (НВ) [105, 106]. НВ в сталі бувають двох видів: ендогенні та екзогенні. НВ, які утворюються в результаті хімічних реакцій при виплавці сталі, її розкислення, а також внаслідок вторинного окислення при контактуванні струменя розплавленого металу з атмосферою при розливанні сталі відносяться до ендогенних.

Неметалічні включення є частинками, різних сполук, що містяться в шихтових матеріалах. Це шматки шлаку, що не спливли на поверхню рідкої сталі, а також вогнеупорів, якими футерований ківш та жолоби належать до екзогенних [107]. Усі неметалеві включення порушують суцільність металу та знижують його якість. Однак, шкідливий вплив їх на працездатність рейок неоднакова і більшою мірою залежить від природи, форми, величини та взаємного розташування неметалевих включень [108].

Доведено, що у ряді випадків руйнування рейок локалізуються у місцях зосередження великих та комплексних включень окисного та сульфідного типів. Найнебезпечнішими є неметалеві включення які мають малий коефіцієнт термічного розширення (глинозем, шпинелі). НВ складаються з оксидів алюмінію (глинозем) та оксидів кремнію (кремнезем). Вони викликають більш високу напругу в рейці і значно знижують втомну міцність сталі та суттєво знижують зварюваність рейок. Найбільш несприятливими для зварювання є присутність НВ у вигляді оксидів складного складу, що не деформуються, а також включення оксидів алюмінію [109].

Для всіх різновидів КСЗ необхідно підтримувати стійкість процесу оплавлення. Через порушення стійкості оплавлення процес може припинитися або переходити на окремих ділянках в тривале коротке замикання торців. У цьому випадку через більшу частину поверхні оплавлення струм не проходить і

рідкий метал, покритий плівкою оксидів, встигає кристалізуватися до етапу осаджування, що призводить до появи небезпечних дефектів в з'єднанні. У більшості випадків основу таких дефектів складають оксиди металів і інших хімічних елементів, які містяться в вихідному металі у вигляді НВ, їх утворення безпосередньо пов'язано з окисними реакціями, які відбуваються на оплавлених поверхнях [110].

Розплавлені оксиди легко видалити з стику за допомогою осаджування. Тугоплавкі оксиди видаляються з стику разом з рідким металом лише частково. Послабити окислювальні реакції на поверхнях оплавлення можна підбором режиму зварювання. Чим інтенсивніше проходить оплавлення, тим вищий тиск газів в іскровому проміжку. Вміст кисню зменшується, поверхня, яка оплавляється частіше відновлюється і утворення оксидів послаблюється. Тому кінцева стадія процесу оплавлення характеризується різким збільшенням швидкості переміщення заготовок). Величина кінцевої швидкості оплавлення має істотний вплив на виникнення дефектів. Зменшення кінцевої швидкості на 10% призводить до появи окремих дефектів, а через великі відхилення - групи дефектів по площині з'єднання.

Поряд з традиційними силікатними «матовими плямами» в зламах рейок марок сталі К76Ф виробництва ПАТ МК «Азовсталь», зруйнованих під час випробування на згин по основному металу і по зоні термічного впливу, спостерігалися чіткий контур матових плям іншої природи. Площа їх в окремих випадках досягала десятків міліметрів. Такі плями на поверхні зламу на відміну від силікатних можна класифікувати як оксидні «матові плями». Через дуже малу товщину плівки виявити їх в металі рейки УЗК дуже важко. Це ускладнює попередній контроль рейок.

При зварюванні рейок конверторного виробництва, як показують результати великої кількості контрольних партій зварних рейок, ймовірність утворення дефектів зростає в порівнянні з аналогічними даними, отриманими при зварюванні рейок мартенівського виробництва [111-114]. Це пов'язано з попаданням в сталь великої кількості легуючих елементів такі як Mn та

використання Al як супутнього елемента, наприклад, при введенні ванадію, титану, ніобію або інших технологічних операціях. Підвищена схильність до формування дефектів в рейках конверторного виробництва створює труднощі при визначенні необхідної технології зварювання [115, 116].

Дослідженнями дефектів зварних з'єднань рейок, отриманих КСЗО, встановлено, що більшість дефектів знаходиться по лінії з'єднання [117, 118]. За своєю структурою і впливом на механічні властивості дефекти можуть бути розбиті на три групи. Першу групу складають непровари. Друга група дефектів являє собою не видавлені при осадці залізомарганцеві силікати. Третя група – скупчення включень марганцевих алюмосилікатів, так звані матові плями. Дефекти першої та другої груп значно знижують показники при механічних випробуваннях. Їх наявність в зварних з'єднаннях недопустимі. Дефекти третьої групи при загальній площі до  $15 \text{ мм}^2$  не чинять значного впливу на показники механічних властивостей рейки. Дефекти першої, другої груп, а також третьої групи площею понад  $15 \text{ мм}^2$  виявляються сучасними засобами неруйнівного ультразвукового контролю [119-122].

Дослідженнями [123] встановлено, що використання КСЗ безперервним оплавленням не забезпечує необхідну якість зварних з'єднань рейок конверторного виробництва відповідно до вимог нормативних документів. Основною причиною зниження показників механічних властивостей зварних стиків при КСЗ безперервним оплавленням є наявність у зламах зварних стиків рейок дефектів третьої групи (МП) загальною площею більше  $15 \text{ мм}^2$ , що не відповідає вимогам чинних стандартів.

Процес пульсуючого оплавлення дозволяє в широких межах регулювати термічні цикли при з'єднанні рейок різних категорій, тому з точки зору виникнення дефектів, пов'язаних із структурою основного металу рейок, обґрунтованим є використання КСЗ пульсуючим оплавленням у якості базового процесу при розробленні ефективної технології зварювання термічнозміцнених залізничних рейок конверторного виробництва.



## Висновки до розділу1, мета та завдання роботи

1. Провідні світові виробники залізничних рейок постійно удосконалюють рейкові сталі з метою збільшення показників опору крихкому руйнуванню, зносостійкості, твердості, зокрема у головці рейки. При спорудженні залізниць в Україні переважно використовуються термічнозміцнені рейки конверторного виробництва класу міцності 350HV30, зокрема марок K76Ф, R350HT. Перехід на киснево-конверторний спосіб виплавки рейкових сталей суттєво вплинув на зварюваність залізничних рейок.

2. Практичне застосування при будівництві та ремонті залізничних колій отримали способи зварювання – термітне, електродугове, газопресове. Найбільш поширеним у світі процесом нероз’ємного з’єднання залізничних рейок є електроконтактне зварювання, різновидами якого є контактне стикове зварювання (КСЗ) безперервним оплавленням, КСЗ з попереднім підігрівом опором і КСЗ пульсуючим оплавленням.

3. Процес пульсуючого оплавлення дозволяє в широких межах регулювати термічні цикли при з’єднанні рейок різних категорій і класу міцності, зменшити імовірність утворення дефектів, пов’язаних із структурою основного металу рейок, тому обґрунтованим є використання КСЗ пульсуючим оплавленням у якості базового процесу при розробленні ефективної технології зварювання термічнозміцнених залізничних рейок конверторного виробництва, які використовуються в Україні.

4. Аналіз вимог чинних стандартів до зварних стиків рейок показує необхідність врахування енергетичних параметрів процесу КСЗО, які визначають термічний цикл і температурне поле, обумовлюють час перебування металу ЗТВ в аустенітній області та швидкість охолодження в інтервалі температур перетворення аустеніту, визначають розподіл показників твердості в зоні з’єднання рейок.

5. На основі аналізу літературних джерел визначено мету і завдання дисертаційної роботи.

Мета дисертаційної роботи – розробити ефективну технологію контактного стикового зварювання оплавленням залізничних рейок конверторного виробництва, яка забезпечує відповідність зварних з'єднань рейок вимогам чинних стандартів.

Завдання роботи:

1. Визначити особливості мікроструктури основного металу термічнозміцнених рейок конверторного виробництва класу міцності 350HV30, зокрема марок К76Ф, R350НТ;

2. Розрахунковим шляхом оцінити вплив основних технологічних параметрів на термічний цикл КСЗО рейок та встановити залежність мінімального та максимального значень ширини зони термічного впливу (ЗТВ) зварного з'єднання термічнозміцнених рейок типу Р65 (60Е1) від енергетичних параметрів процесу КСЗО.

3. Встановити залежність швидкості охолодження  $W_{8/5}$  зварного з'єднання термічнозміцнених залізничних рейок класу міцності 350HV30 в інтервалі температур 800-500°C від тривалості процесу оплавлення і величини енерговкладення при КСЗО.

4. Розрахунково-експериментальним шляхом визначити мінімальне значення тривалості процесу оплавлення і енерговкладення при КСЗО термічнозміцнених рейок типу Р65 (60Е1) марок К76Ф і R350НТ, при якому забезпечується відсутність у зоні з'єднання структур мартенситу і бейніту.

5. Визначити допустимий діапазон зміни основних технологічних параметрів КСЗО рейок типу Р65 (60Е1) та розробити ефективну технологію КСЗО термічнозміцнених залізничних рейок конверторного виробництва, яка забезпечує відповідність зварних з'єднань вимогам чинних стандартів.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕРІАЛИ, УСТАТКУВАННЯ, МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1. Досліджувані матеріали

В роботі досліджували формування зварних з'єднань залізничних рейок конверторного виробництва типу Р65 марки К76Ф, та типу 60Е1 марки R350НТ. В таблиці 2.1 приведено хімічний склад, а у табл. 2.2 - механічні властивості рейок.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад досліджуваних рейок

Марка сталі	Хімічний склад, %							
	С	Mn	Si	Al	V	Cu	Ni	Cr
К76Ф	0,79	0,9	0,35	0,005	0,06	0,03	0,02	0,03
R350НТ	0,78	1,1	0,36	0,001	-	0,02	0,01	0,05

Таблиця 2.2 - Механічні властивості досліджуваних рейок

Марка сталі	Твердість, НВ	Межа міцності, $\sigma_b$ , МПа	Межа текучості, $\sigma_t$ , МПа	Відносне подовження, $\delta$ , %	Відносне звуження, $\psi$ , %	Завод виробник
К76Ф	370-380	1324	980	12	27	ПАО МК «Азовсталь» (Україна)
R350НТ	350-355	1260	970	11	25	British Steel French Rail (Франція)

Аналіз таблиці 2.1 показує, що хімічний склад досліджених рейок подібний. а показники механічних властивостей відрізняються дещо відрізняються, очевидно, внаслідок різних режимів термічної обробки - прискороного охолодження з прокатного нагріву головки рейки.

## 2.2. Методи досліджень, устаткування для КСЗО рейок

В роботі використовували розрахункові та експериментальні методи досліджень. Для проведення розрахункових досліджень використовували математичну модель нагрівання рейок при оплавленні та відповідні засоби комп'ютерної симуляції кінетики температурних полів при КСЗО залізничних рейок, розроблені спільно з відділом №34 «Математичні методи дослідження фізико-хімічних процесів при зварюванні і спецелектрометалургії ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Використано чисельне розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності поряд із комплексом необхідних лабораторних вимірювань впливу технологічних параметрів зварювання на температурні цикли в рейках, що зварюються. Це дозволило врахувати мультифізичні процеси оплавлення торців рейок, визначити характерну теплову ефективність процесу КСЗО та підтвердити належну точність розрахунків.



Рисунок 2.1 – Стационарна рейкозварювальна машина типу K1000

Експерименти по КСЗ проводили на рейкозварювальних машинах – стаціонарній К1000 (рис. 2.1) та мобільній К922-1 (рис. 2.2). Машина рейкозварювальна К1000 призначена для КСЗ безперервним оплавленням або пульсуючим оплавленням рейок площею перерізу від 5000 мм<sup>2</sup> до 10000 мм<sup>2</sup> в стаціонарних умовах зі зняттям грата безпосередньо після зварювання.

Мобільна машина К922-1 призначена для КСЗ пульсуючим оплавленням рейок площею поперечного перерізу від 6500 мм<sup>2</sup> до 10000 мм<sup>2</sup> зі зняттям грата безпосередньо після зварювання в польових умовах. Мобільна машина К922-1 нового покоління має привід осадки, що розвиває зусилля в 2,5 рази більше, ніж машини попередніх поколінь (типу К355А-1) та обладнана пристроями автоматичного зрізання грата в гарячому стані.



Рисунок 2.2 – Мобільна рейкозварювальна машина типу К922-1

Рейкозварювальна машини K922-1 поставляється в складі контейнера, який встановлений на локомотив або вантажівку (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Рейкозварювальна машина типу K922-1 на базі локомотива (а), вантажівки (б)



Машини К1000 і К922-1 оснащені системами контролю та управління, які розроблені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [124-126]. Порівняльні технічні характеристики мобільних рейкозварювальних машин К1000 і К922-1 наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики рейкозварювальних машин типу К1000 і К922-1

Технічні характеристики	Тип машини	
	К1000	К922-1
Номінальна напруга джерела живлення, В	380	380
Найбільший вторинний струм, не менше кА	540	67
Номінальна потужність, (ПВ 50%), кВА	300	210
Робочий тиск в гідросистемі, МПа	160	210
Зусилля осадки, кН	640	1200
Зусилля затискання, кН	1600	2900
Хід рухомої колони машини, мм	70	100
Маса машини, кг	8800	3100

При проведенні експериментальних досліджень параметри режимів КСЗ пульсуючим оплавленням рейок на машинах К1000 і К922-1 змінювали в діапазонах, передбачених у ТУ У 24.1-40075815-002:2016 [100], які наведено у табл. 2.4 і 2.5.

Таблиця 2.4 – Діапазони зміни основних параметрів режиму КСЗ пульсуючим оплавленням рейок на машинах типу K1000 [100]

Параметри режимів	Значення параметрів для рейок типів P75, P65, UIC60, P50
Тиск в гідравлічній системі, МПа	від 12 до 15
Тиск осадки, МПа	від 9 до 12
Тиск зарядки акумулятору, МПа	10±1
Швидкість осадки під час холостого ходу мінімальна, мм/с	30
Швидкість оплавлення, мм/с	від 0,07 до 0,20
Швидкість форсування, мм/с	від 0,7 до 2,5
Напруга первинної обмотки зварених трансформаторів, В: перший період другий період третій період	від 355 до 440 від 250 до 360 від 355 до 440
Переміщення, мм	від 12 до 18
Величина осадки, мм	від 11,5 до 17
Час осадки під струмом, с	від 1,0 до 2,0

Таблиця 2.5 – Діапазони зміни основних параметрів режиму КСЗ пульсуючим оплавленням рейок на машинах типу K922-1 [100]

Параметри режимів	Значення параметрів для рейок типів P65, UIC60
Тиск осадки, МПа	від 9 до 12
Тиск зарядки акумулятору, МПа	9±1
Швидкість осадки під час холостого ходу мінімальна, мм/с	20
Швидкість оплавлення, мм/с	від 0,065 до 0,20
Швидкість форсування, мм/с	від 0,7 до 2,5
Напруга первинної обмотки зварювальних трансформаторів, В: перший період другий період третій період	від 355 до 440 від 250 до 360 від 355 до 440
Переміщення, мм	від 9 до 18
Величина осадки, мм	від 11,5 до 17
Час осадки під струмом, с	від 0,8 до 1,8

Для проведення експериментальних досліджень використовували прилади та відповідні датчики для реєстрації зміни технологічних параметрів (напруги, струму, тиску, лінійного переміщення) та хромель-алюмелеві термомпари діаметром 0,5 мм для реєстрації термічних циклів КСЗ рейок.



### 2.3. Методи та устаткування для дослідження мікроструктури з'єднань та розподілу твердості

Для металографічних досліджень використовувались методи світлової мікроскопії, скануючої електронної мікроскопії (СЕМ), вимірювання твердості, випробування на статичний згин. Дослідження проводили у відділі №22 ІЕЗ ім. Є.О. Патона на обладнанні, сертифікованому органами Держспоживстандарту України. Дослідження мікроструктури проводилося на оптичному мікроскопі “Neophot-32” (Німеччина) та Оже-мікрозонді JAMP-9500F фірми JEOL (Японія) (рис. 2.4).



а



б

Рисунок 2.4 – Загальний вигляд оптичного мікроскопу “Neophot-32” (а),  
Оже-мікрозонда JAMP-9500F (б)

Оже-мікрозонд JAMP-9500F – це комплексний агрегат, який включає в себе декілька приладів на базі однієї ультрависоковакуумної системи:

- скануючий електронний мікроскоп з роздільною здатністю у вторинних електронах 3 нм на 24-міліметровому робочому відрізку, що дозволяє виконувати знімки при збільшеннях від 15 до 500000. Система безмасляної відкачування вакууму забезпечує тиск в камері аналізу 10<sup>-8</sup> Па;

- Оже-мікроскоп, що дозволяє не лише спостерігати структуру металу в Оже-електронах (фізична картина), але і будувати карти розподілу тих чи інших хімічних елементів по поверхні металу та окремим фазовим складовим, в тому числі і за неметалевими включеннями;

- Оже-мікрозонд, що дозволяє виконувати кількісний елементний аналіз матеріалу в точці діаметром 8 нм та проводити сканування по лінії, площі чи глибині (з допомогою додаткового іонного травлення) для виявлення розподілу хімічних елементів;

- енергодисперсійний рентгенофлуоресцентний спектрометр, що дозволяє здійснювати кількісний елементний аналіз в точці діаметром близько 1 мкм;

- кількісний морфологічний аналіз структур, що виконується з допомогою багатофункціонального програмного забезпечення «Стіман».

Установка JAMP-9500F обладнана енергодисперсійним спектрометром (ЕДС) OXFORD EDS INCA Energy 350 для аналізу елементів – від берилію до урану. Вона дозволяє визначати масову і атомну частку (концентрацію) хімічних елементів у зразках методом неруйнівного енергодисперсійного рентгенофлуорисцентного аналізу з використанням еталонів і без нього.

JAMP-9500F дозволяє здійснювати іонне травлення шліфів з допомогою установку ВУП-5. Підготовлені шліфи піддаються фінішному очищенню ультразвуком в розчині гексану, після чого розміщуються в камері установки JAMP-9500F з метою попереднього відкачування вакууму. Для зняття адсорбованого шару зразка установка оснащена вбудованою іонною гарматою з мінімальним діаметром іонного зонду 200 мкм. Швидкість травлення іонами аргону - 130 нм/хв.

Для досліджень розподілу твердості HV30 (при навантаженні 30 кг) використовували твердомір NOVOTEST TC-БРВ, розподілу мікротвердості (при навантаженні 1,0...5,0 Н ) – прилад М400 «Лесо», США (рис. 2.5). Вимірювання твердості проводили відповідно до EN ISO 6507-1. Основні технічні характеристики твердоміра NOVOTEST TC-БРВ приведені в табл. 2.6.



а



б

Рисунок 2.5 – Стационарний твердомір NOVOTEST TC-БРВ (а), мікротвердомір прилад М400 «Лесо» (б)

Таблиця 2.6 - Основні технічні характеристики NOVOTEST TC-БРВ

Шкали за Роквеллом	HRA, HRB, HRC, HRD, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK
Шкали за Бріннелем	Усі можливі комбінації з випробувальними навантаженнями 30 кг (294,2 Н); 31,25 кг (306,5 Н); 62,5 кг (612,9 Н); 100 кг (980,7 Н); 187,5 кг (1839 Н) та діаметром кульки індентора 1; 2,5; 5; 10 мм
Шкали за Віккерсом	HV 30, HV100
Випробувальні навантаження	294,2 Н (30 кг), 980,7 Н (100 кг)
Індикація значення твердості	Роквелл: циферблат Брінелль і Віккерс: Вимірювальний мікроскоп
Збільшення мікроскопа	37.5X, 75X
Час витримки	1 ~ 60 сек
Габаритний розмір	520 x 240 x 700 мм (Д x Ш x В)
Вага, не більше, кг	85 кг
Максимальна висота зразка	Роквелл: 170 мм Брінелль та Віккерс: 140 мм
Максимальна глибина зразка	165 мм
Живлення	220В ± 5%, 50 ~ 60 Гц

#### 2.4. Методи та устаткування для механічних випробувань

Згідно до вимог чинних стандартів [100 - 102] механічні випробування зварних стиків рейок проводили на пресі методом трьох точкового згину; випробування проводили з розтягуванням головки і підшви відповідно. Методика випробувань однакова для вищенаведених стандартів. Відмінність

європейського стандарту лише в тому, що випробовування проводили лише з розтягнення підошви. Схема випробувань наведена на рис. 2.6.

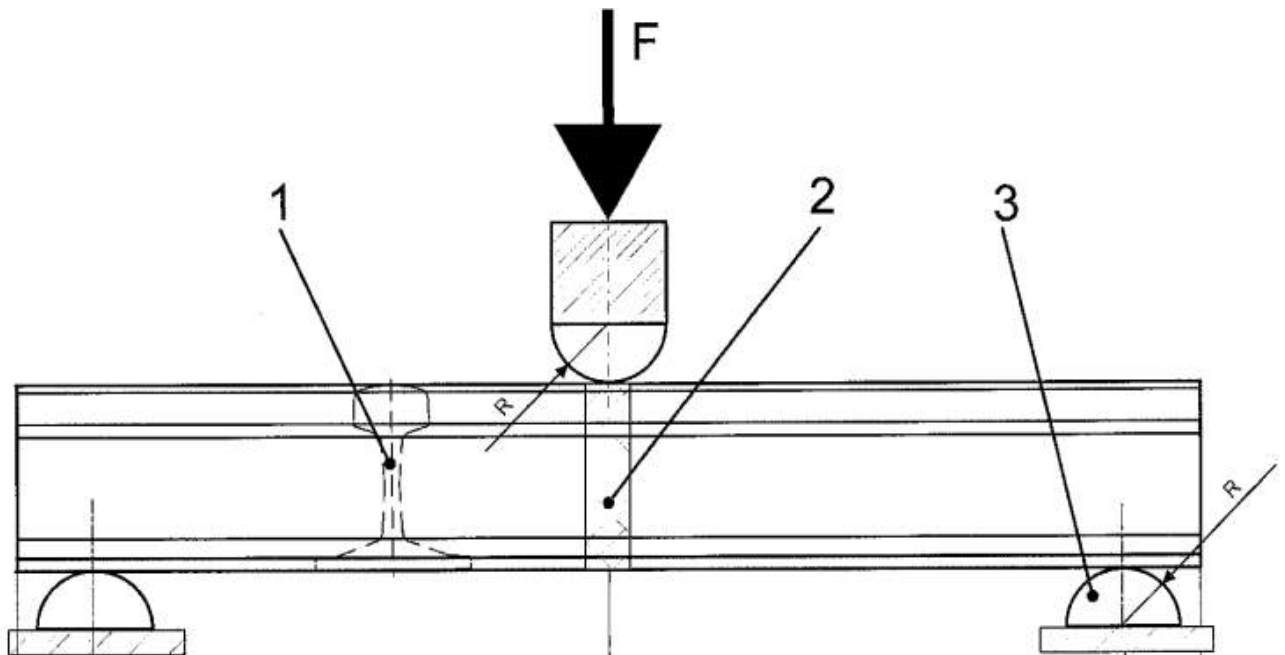


Рисунок 2.6 - Схема випробування зварного стику рейок на статичний механічний згин: F - зусилля, 1 – переріз рейки, 2 - зварний стик, 3 - опора [97]

Відповідно до вимог європейського стандарту проводили втомні випробування зварних рейок (випробування на циклічну міцність - рис. 2.7). Тестові зварні стики рейок контрольних партій повинні мати довжину 1,2 м при чистому вигині циклічним навантаженням з максимальними напруженнями циклу 190 МПа і асиметрією циклу навантаження 0,1. Зварне з'єднання повинно витримати 5,0 млн. циклів, з частотою навантаження - 5Гц.

Механічні випробування зварних рейок на згин проводили на гідравлічному пресі ПГ-500 (рис. 2.8) та машині для втомних випробувань ZDM-200Pu (рис. 2.9).

Частота пульсації (циклу навантаження) складала  $\approx 5,4$  Гц. Втомні випробування рейок виконували на гідропульсаторних випробувальних

машинах ZDM-200Pu, які щорічно проходять перевірку Державним підприємством «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт»).

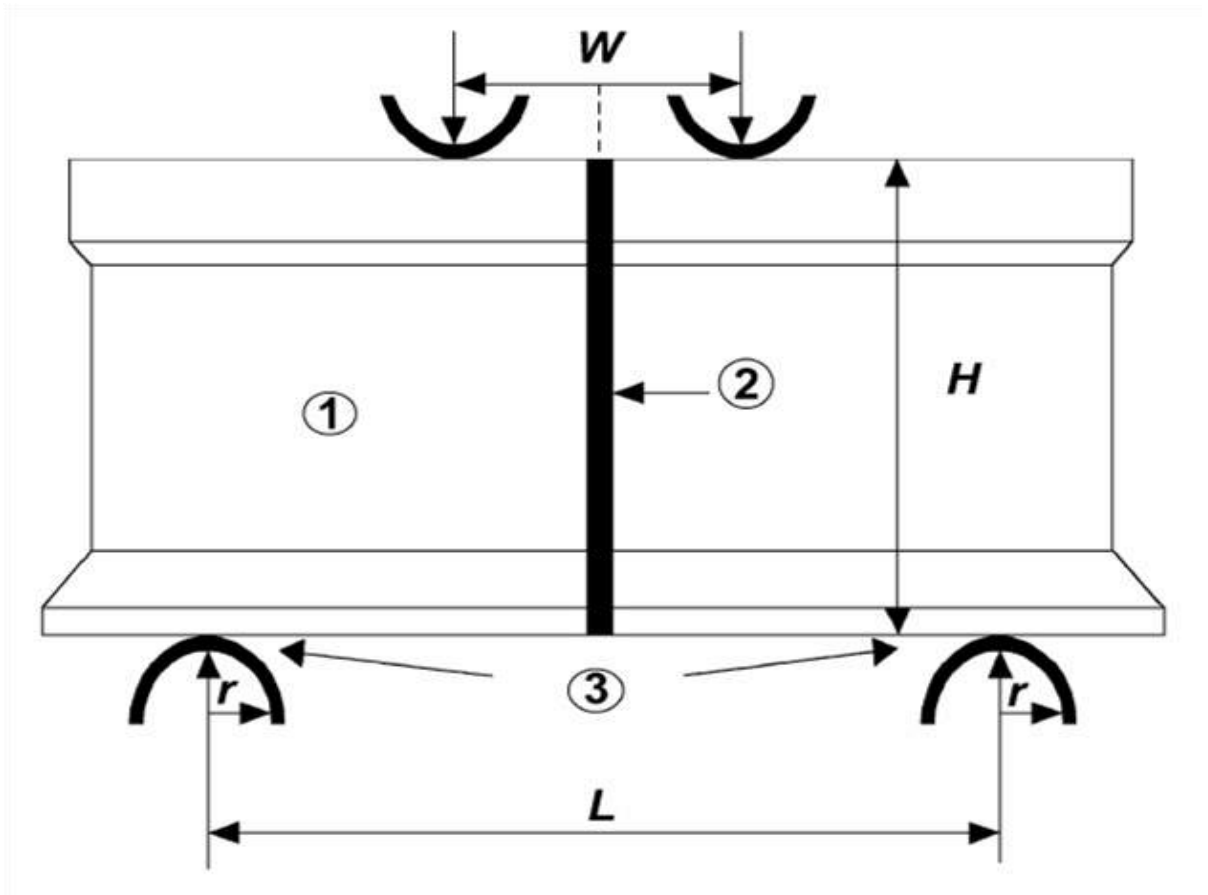


Рисунок 2.7 – Схема проведення випробувань зварних рейок на циклічну міцність:  $W$ ,  $L$  – відстань між верхніми та нижніми опорами,  $W = 150$  мм;  
 $L$  – має перевищувати внутрішній проліт принаймні на подвійну висоту рейки ( $H$ ) [101]



Рисунок 2.8 - Прес гідравлічний ПГ-500

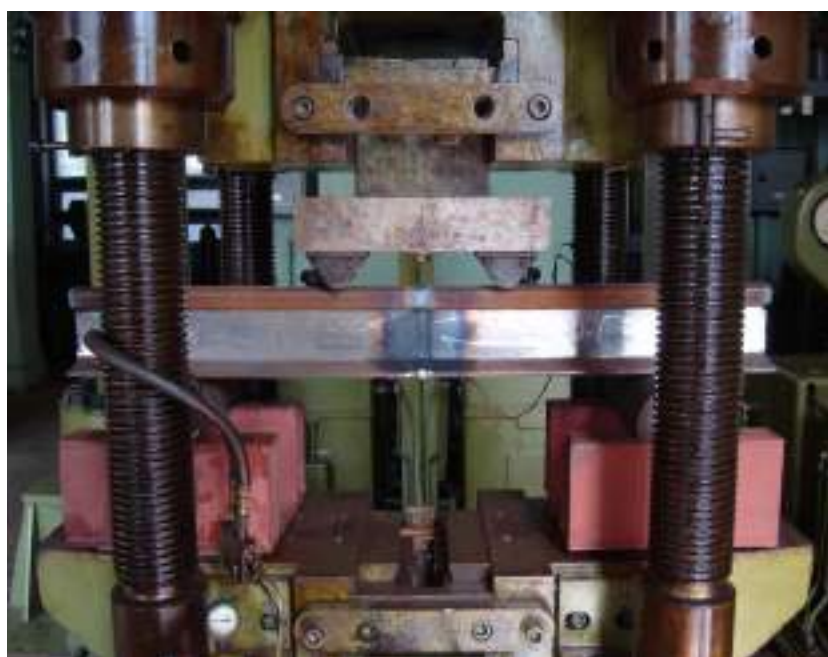


Рисунок 2.9 – Машина для проведення втомних випробувань  
ZDM-200Pu.

Використовували методику випробувань відповідно до вимог діючих українського та європейського стандартів [101–103]

## Висновки до розділу 2

1. В роботі використовували розрахункові та експериментальні методи досліджень. Для проведення розрахункових досліджень використовували математичну модель нагрівання рейок при оплавленні та відповідні засоби комп'ютерної симуляції кінетики температурних полів при КСЗО залізничних рейок, розроблені спільно з відділом №34 ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

2. Експерименти по КСЗО проводили на рейкозварювальних машинах – стаціонарній К1000 та мобільній К922-1, оснащених системами контролю та управління, які забезпечують варіювання технологічними параметрами в широких межах.

3. При проведенні експериментальних досліджень параметри режимів КСЗ пульсуючим оплавленням рейок типу Р65 (60Е1) на машинах К1000 і К922-1 змінювали в діапазонах, передбачених у вітчизняному нормативному документі - ТУ У 24.1-40075815-002:2016.

4. Для металографічних досліджень використовувались методи світлової мікроскопії, скануючої електронної мікроскопії (СЕМ), вимірювання твердості. Дослідження проводили у відділі №22 ІЕЗ ім. Є.О. Патона на обладнанні, сертифікованому органами Держспоживстандарту України.

5. Механічні випробування зварних стиків рейок проводили у відповідності до чинних вітчизняних і європейських стандартів: методом трьохточкового статичного згину на пресі ПГ-500, втомні випробування – методом циклічного навантаження на згин на машині ZDM-200Pu.



### РОЗДІЛ 3

## РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНИХ ЦИКЛІВ КСЗО І РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУР В ЗОНІ З'ЄДНАНЬ РЕЙОК

### 3.1. Оцінка величини теплового коефіцієнта корисної дії (ККД) при КСЗ безперервним і пульсуючим оплавленням рейок

Формування просторово неоднорідного поля температур при КСЗО можна розділити на два різних за просторовим масштабом етапи, а саме: оплавлення торців і поступове прогрівання металу вглиб рейок та охолодження рейок після завершення процесу КСЗО. В силу того, що ці два етапи мають певні особливості як при математичному описанні тепловкладення, плавлення та з'єднання металу зварюваного виробу, так і різні задачі оптимізації відповідних технологічних процесів, тому раціональним є побудова окремих моделей.



а



б

Рисунок 3.1 - Оплавлені поверхні залізничних рейок (а) та кратер, який утворюється при руйнуванні елементарного контакту (б)

Так, стосовно процесу оплавлення торцевої поверхні зварюваної рейки, яка зближується з заданою швидкістю  $V_{п}$ , при їх взаємодії в місцях, що мають мікронерівності, формуються контакти з осередками нагріву, де метал розплавляється, і відбувається локальне нагрівання. При нагріванні і розплавлення кожного елементарного контакту (ЕК) на поверхні оплавлення формуються поглиблення-кратери [127-129], що утворюють рельєф, що відрізняється нерівномірним розподілом виступів і поглиблень (рис. 3.1).

В процесі оплавлення на контактуючих поверхнях дрібних нерівностей утворюються відносно рівні ділянки поверхні, що створює умови для формування ЕК великої площі. Перед утворенням електричного контакту по всій площі цих поверхонь спостерігається заповнення зазору між шарами розплавом металу, що формується при нагріванні і розплавлення контактів на сусідніх ділянках (рис. 3.2).

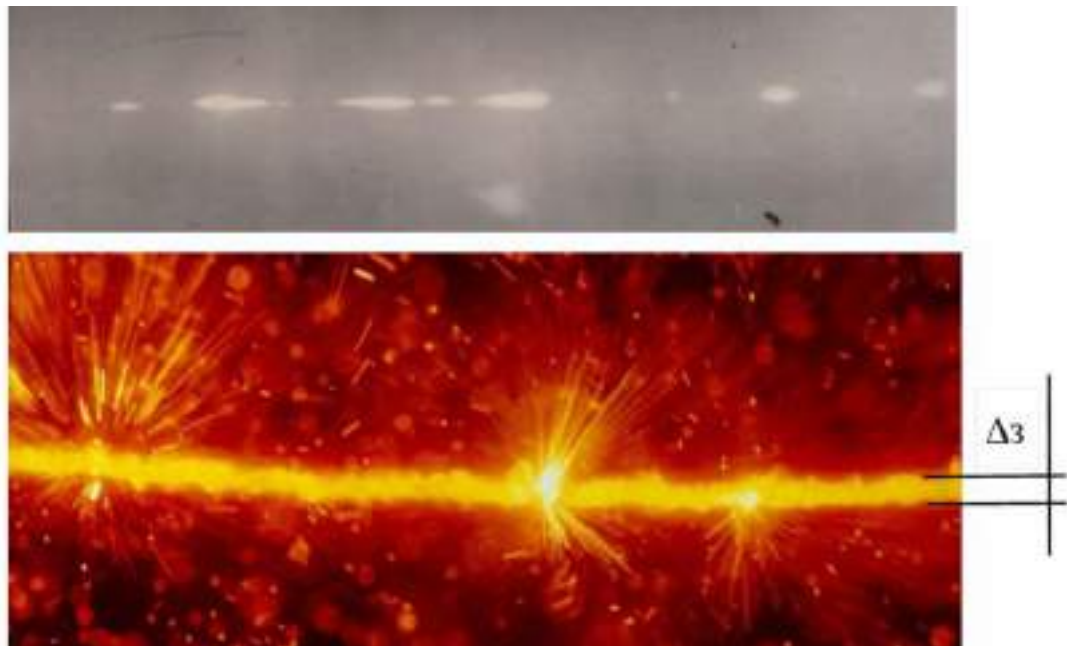


Рисунок 3.2 - Рентгенограма іскрового зазору при зварюванні рейок.

Через цей розплав, при досить малому зазорі, починають формуватися і плавитися окремі контакти, площа яких менше можливої площі нового

контакту. Явище вторинного плавлення, як показано в роботі [129], має досить істотний вплив на тепловий баланс при оплавленні товстостінних деталей.

З врахуванням втрат тепла через виплавлення металу, конвективних втрат та втрат на випромінювання з зони зварювання був визначений тепловий ККД, який обчислювався наступним чином:

$$\eta = \frac{q_{уст} - q_{ном}}{q_{уст}} \quad (3.1)$$

де, **тепові втрати** визначалися як:

$$q_{ном} = V_{свп} \int_{T_0}^{T_{свп}} c \gamma dT + \int \int_{t \Gamma} [\alpha(T - T_0) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_c^4)] d\Gamma dt, \quad (3.2)$$

де,  $q_{уст} = \int_t W dt$ ,  $W$  - теплова потужність джерела в області елементарного

контакту, яка була прийнята рівною  $0,035 I \cdot U$  Вт, що відповідає встановленим режимам при експериментальних дослідженнях температур під час зварювання ( $I$ ,  $U$  - сила струму і напруга, що подаються на зварювану деталь).

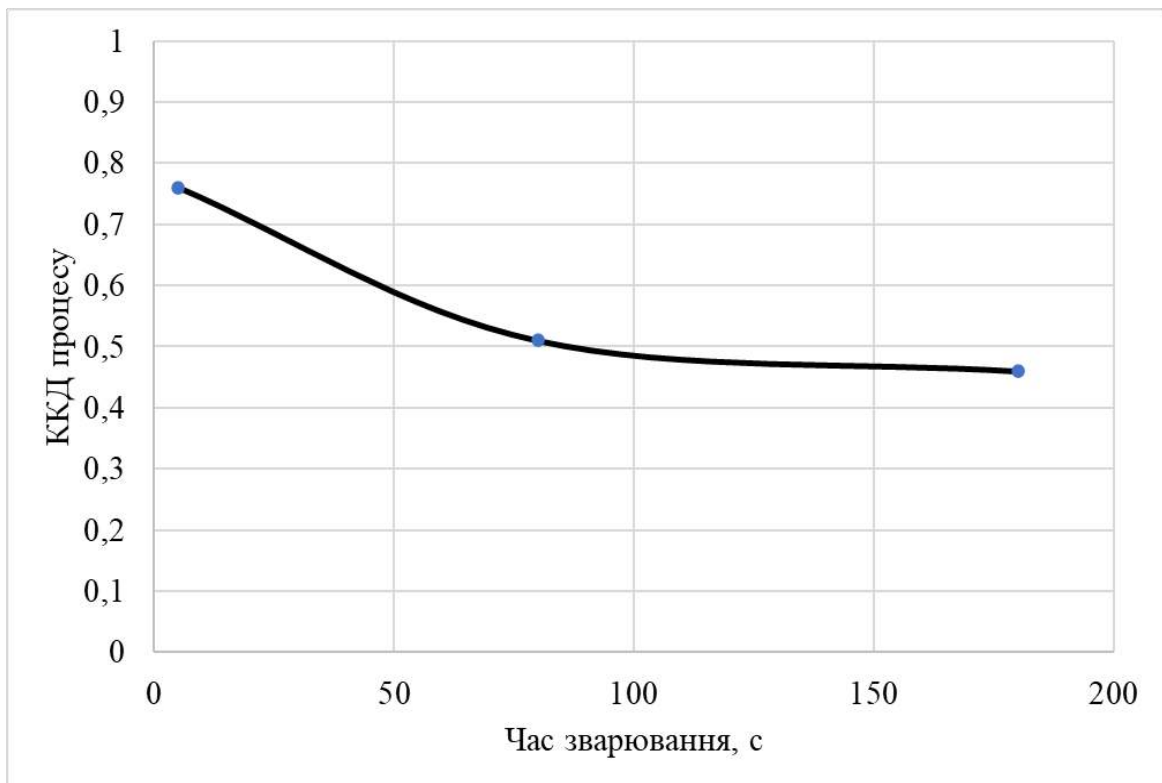


Рисунок 3.3 - Зміна термічного ККД в процесі КСЗ безперервним оплавленням залізничних рейок

Розрахунками теплового коефіцієнта корисної дії при КСЗ безперервним оплавленням рейок [130], проведеними за формулами 3.1 і 3.2, встановлено (рис. 3.3), що в початковий період оплавлення ККД досить високий (близько 0,7), але в процесі оплавлення він знижується до значення 0,45.

Залежно від споживаної потужності, якісне зварювання при пульсуючому оплавленні можна отримати за зміни тривалості нагріву в широких межах. Це дає можливість обирати найбільш оптимальні термічні цикли при зварюванні рейок з різним хімічним складом та механічними властивостями.

Доказом цього є результати дослідження термічного ККД показали, що придушення вибухоподібної фази нагрівання деталей, коли метал доводиться до кипіння, скорочує частку енергії, що втрачається, це дає можливість проводити зварювання з більшим ККД на всіх етапах нагрівання (рис. 3.4).

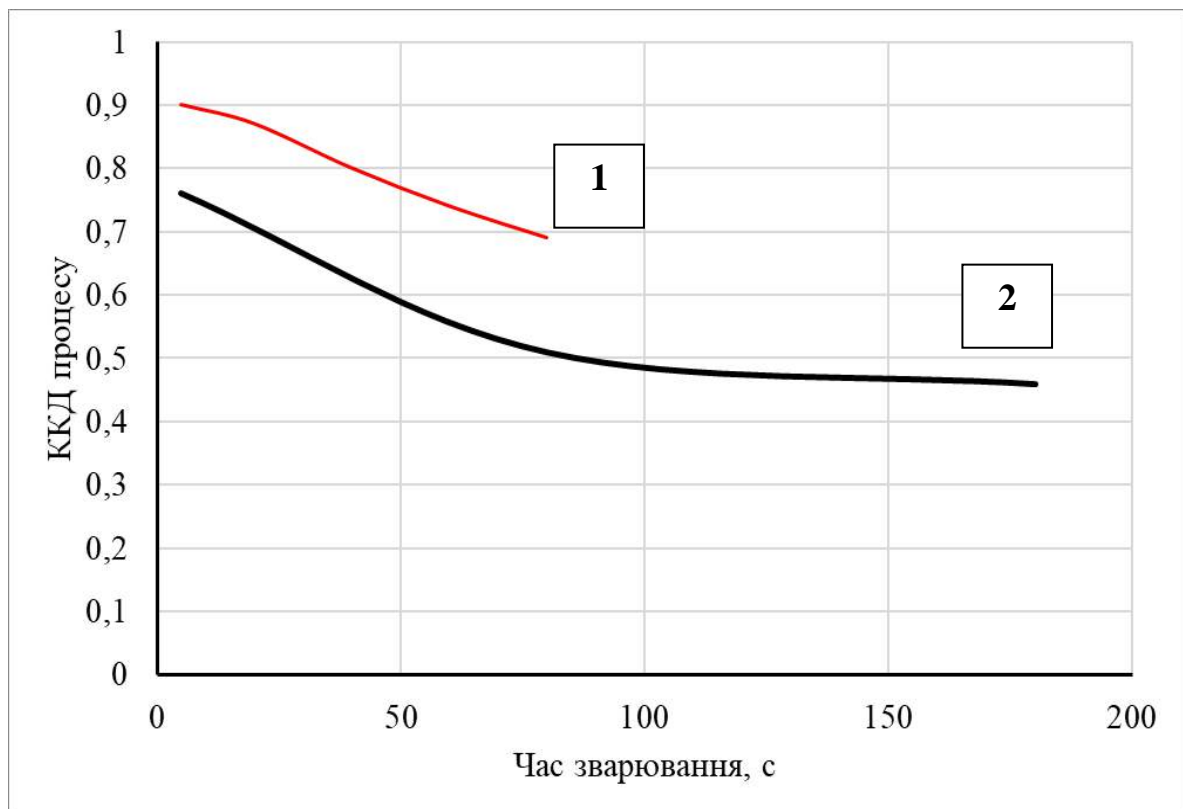


Рисунок 3.4 – Зміна ККД при контактному стиковому зварюванні:

1 – пульсуючим оплавленням; 2 – безперервним оплавленням

### 3.2. Дослідження кінетики температурного поля при КСЗ пульсуючим оплавленням залізничних рейок

Одним із важливих факторів що впливають на формування якісного зварного з'єднання є товщина рідкого шару металу, що сформувався на торцях рейок при оплавленні та швидкість кристалізації цього шару. Саме ці фактори впливають формування якісного (бездефектного) зварного з'єднання. Експериментально дуже важко виміряти температуру на таких малих відстанях до поверхні оплавлення, адже товщина рідкого шару металу сягає до 0,6 мм. Тому, для вирішення даної задачі була розроблена математична модель нагріву залізничних рейок методом КСЗО, яка б дала можливість визначити температуру рідкого шару металу, що утворюється при КСЗ оплавленням в залежності від параметрів зварювання та швидкість кристалізації даного шару металу, в залежності від температурного поля що утворилось.

Кінетика теплового поля у рейках що оплавляються може бути описана рівнянням теплопровідності зі змінними термодинамічними характеристиками матеріалу (теплоємністю і теплопровідністю) [131], яке в цьому випадку має вигляд:

$$C\rho(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\lambda(T) \cdot \nabla T], \quad (3.3)$$

де  $T$  – температура, °С;  $\lambda(T)$  – теплопровідність, Дж/(мм·с·°С);  $C\rho(T)$  – об'ємна теплоємність, Дж/(мм<sup>3</sup>·°С).

В прямокутній системі координат  $(x, y, z)$ , яка приведений на рис. 3.5, тобто при описі розповсюдженні тепла в пластині, рівняння (3.3) має вигляд:

$$C\rho(x, y, z, T) \cdot \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(x, y, z) \cdot \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(x, y, z) \cdot \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(x, y, z) \cdot \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} \right] \quad (3.4)$$

Для коректної постановки задачі (3.3) потрібно врахування початкових і граничних умов. Так, початковими умовами є вихідні розподілу температур в розглянутому виробі, а саме, рівномірний розподіл кімнатної температури:

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (3.5)$$

де  $T_0$  – температура навколишнього середовища, °С.

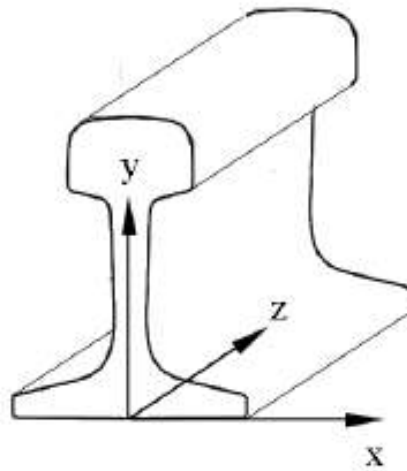


Рисунок. 3.5 - Виріб, що зварюється в прямокутній системі координат

Вибір конкретного значення  $T_0$  залежить від умов на різних поверхнях досліджуваної конструкції. Кондуктивний стік тепла з поверхні може бути описаний за допомогою закону Ньютона:

$$q_L = \alpha \cdot (T - T_C), \quad (3.6)$$

де  $q_L$  – питомий потік тепла з поверхні металу, Вт/(мм<sup>2</sup>);  $\alpha$  – коефіцієнт теплопереносу, Вт/(мм<sup>2</sup>·°С);  $T_C$  – температура навколишнього середовища, °С.

Необхідно відзначити, що значення  $\alpha$  залежить від роду контакту на поверхні виробу, що зварюється. Так, в разі зіткнення з силовим оснащенням (наприклад, з механічними закріпленнями або опорним столом), значення коефіцієнта перенесення в цьому місці будуть в кілька разів вище, ніж в разі контакту з атмосферою.

Альтернативним механізмом дисипації теплової енергії через поверхню нерівномірно розігрітої конструкції є випромінювання, яке описується відповідно до закону Стефана-Больцмана:

$$q_l = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_c^4), \quad (3.7)$$

де  $q_l$  – питомий потік інфрачервоного випромінювання з поверхні металу, Вт/(мм<sup>2</sup>);  $\varepsilon$  – ступінь чорноти поверхні досліджуваної конструкції;  $\sigma$  – коефіцієнт Стефана-Больцмана, Вт/(мм<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>); розмірність температури, яка фігурує в (3.7), приймається за шкалою Кельвіна.

Відповідно до закону Фур'є питомий потік тепла до поверхні теплопровідного тіла може бути виражений наступним чином:

$$q_r = -\lambda(T) \cdot \frac{\partial T(t)}{\partial n}, \quad (3.8)$$

де  $n$  – нормаль до поверхні.

Граничні умови, таким чином, можуть бути визначені з умови рівності потоків енергії, що надходить до поверхні і відводять від неї:

$$q_r = q_L + q_l. \quad (3.9)$$

Підстановка в (3.9) функціональних значень (3.7) - (3.8) дозволяє висловити граничні умови в наступному вигляді:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(t)}{\partial n} = \alpha(T - T_c) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_c^4). \quad (3.10)$$

Джерелом тепла при контактному зварюванні є тепла енергія від протікаючого через контактну поверхню електричного струму. Більш високий контактний опір викликає локальну інтенсифікацію тепловиділення, тому можна вважати, що тепловиділення на поверхні стику істотно перевершує те, що в обсязі металу виробу, що зварюється. Якщо додатково врахувати, що

конструкція є симетричною відносно площини стику, то джерело тепла може бути математично описане постановкою граничних умов в наступному вигляді:

$$\lambda(T) \frac{\partial T(t)}{\partial n} \Big|_{z=0} = 0,5 \cdot \eta \cdot U \cdot I. \quad (3.11)$$

де  $n$  – нормаль до поверхні,  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії,  $U$  – напруга, прикладена до виробу,  $I$  – щільність струму, що проходить через стик.

Для чисельного розв'язання задачі теплопровідності досить скористатися кінцево-різницевої схемою розщеплення Писмено-Рекфорда. В цьому випадку диференціальне співвідношення (4.2) на деякому просторовому розбитті  $\{j, i, k\}: j \in (0, N), i \in (0, M), k \in (0, P)$  має вигляд:

$$\begin{aligned} C\rho_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{jik}^*}{t - t^*} &= \frac{2}{(x_{j+1} - x_{j-1})} \left[ \lambda_{j+1ik} \cdot \frac{T_{j+1ik} - T_{jik}}{(x_{j+1} - x_j)} - \lambda_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{j-1ik}}{(x_j - x_{j-1})} \right] + \\ &+ \frac{2}{(y_{j+1} - y_{j-1})} \left[ \lambda_{ji+1k} \cdot \frac{T_{ji+1k} - T_{jik}}{(y_{i+1} - y_i)} - \lambda_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{ji-1k}}{(y_i - y_{i-1})} \right] + \\ &+ \frac{2}{(z_{k+1} - z_{k-1})} \left[ \lambda_{jik+1} \cdot \frac{T_{jik+1} - T_{jik}}{(z_{k+1} - z_k)} - \lambda_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{jik-1}}{(z_k - z_{k-1})} \right], \quad j \in (1, N-1), i \in (1, M-1), k \in (1, P-1) \end{aligned} \quad (3.12)$$

де  $T_{jik}$  ( $T_{jik}^*$ ) – температура в вузлі  $(j, i, k)$  в поточний (попередній) момент часу та  $t$  ( $t^*$ );  $C\rho_{jik} = C\rho(x_j, y_i, z_k, T_{jik}^*)$ ;  $\lambda_{jik} = \lambda(x_j, y_i, z_k, T_{jik}^*)$ .

Якщо позначити кроки по простору як  $h_x^j = (x^{j+1} - x^j) / 2$ ,

$$h_y^i = (y^{i+1} - y^i) / 2, \quad h_z^k = (z^{k+1} - z^k) / 2, \quad \bar{h}_x^j = (h_x^{j+1} + h_x^j) / 2, \quad \bar{h}_y^i = (h_y^{i+1} + h_y^i) / 2,$$

$$\bar{h}_z^k = (h_z^{k+1} + h_z^k) / 2,$$

а по часі  $\Delta t = t - t^*$ , то (4.10) приймає вигляд:



$$\begin{aligned}
C\rho_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{jik}^*}{\Delta t} &= \lambda_{j+1ik} \cdot \frac{T_{j+1ik}^* - T_{jik}}{\bar{h}_x^j h_x^j} - \lambda_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{j-1ik}}{\bar{h}_x^j h_x^{j-1}} + \lambda_{ji+1k} \cdot \frac{T_{ji+1k} - T_{jik}}{\bar{h}_y^i h_y^i} - \lambda_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{ji-1k}}{\bar{h}_y^i h_y^{i-1}} + \\
&+ \lambda_{jik+1} \cdot \frac{T_{jik+1}^* - T_{jik}}{\bar{h}_z^k h_z^k} - \lambda_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{jik-1}}{\bar{h}_z^k h_z^{k-1}}, \quad j \in (1, N-1), \quad i \in (1, M-1), \quad k \in (1, P-1)
\end{aligned} \tag{3.13}$$

де  $\bar{h}_x^j = (h_x^{j+1} + h_x^j) / 2$ ,  $\bar{h}_y^i = (h_y^{i+1} + h_y^i) / 2$ ,  $\bar{h}_z^k = (h_z^{k+1} + h_z^k) / 2$ .

Ця схема передбачає шаблон пошуку розв'язку типу хрест, що складається з п'яти вузлів сітки розбиття, що визначає, зокрема, вибір способу просторового кінцево-різницевого розбиття. Для розв'язання цієї різницевої задачі необхідна постановка граничних і початкових умов [132]. Що стосується початкових умов, то виходячи з (3.5) початковий стан може бути задано як:

$$T_{jik} = T_0, \quad j \in (1, N-1), \quad i \in (1, M-1), \quad k \in (1, P-1). \tag{3.14}$$

Що стосується граничних умов, то без обмеження спільності можна вважати, що нормаль до поверхні паралельна осі  $Oy$  і в різницевій формі вони приймають вид:

в разі якщо зовнішня нормаль до розглянутої поверхні спільно направлені з віссю  $Oy$

$$-\lambda_{jik} \frac{T_{jik} - T_{ji-1k}}{h_y^i} \Big|_{(j,i,k) \in G'} = \alpha (T_{jik} - T_C) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left[ (T_{jik}^*)^4 - T_C^4 \right]; \tag{3.15}$$

в разі якщо зовнішня нормаль до розглянутої поверхні різно-направлені з віссю  $Oy$

$$-\lambda_{jik} \frac{T_{jik} - T_{ji+1k}}{h_y^{i+1}} \Big|_{(j,i,k) \in G'} = \alpha (T_{jik} - T_C) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left[ (T_{jik}^*)^4 - T_C^4 \right], \tag{3.16}$$

де  $G'$  – масив вузлів, які розглядаються як належні границі.

Розв'язання задачі (4.11) може бути отримано методом прогонки. Для класичного уявлення розглянутого диференціального рівняння другого порядку завдання можна переписати у вигляді:

$$\begin{aligned} A_{jik} \cdot T_{ji+1k} + B_{jik} \cdot T_{jik} + C_{jik} \cdot T_{ji-1k} &= F_{jik}, \\ j \in (1, N-1), i \in (1, M-1), k \in (1, P-1), \end{aligned} \quad (3.17)$$

де коефіцієнти рівняння відповідно рівні

$$\left\{ \begin{aligned} A_{jik} &= \frac{\lambda_{ji+1k}}{\bar{h}_y^i h_y^i}; \\ B_{jik} &= -\frac{C\rho_{jik}}{\tau} - \frac{\lambda_{jik}}{\bar{h}_x^j h_x^{j-1}} - \frac{\lambda_{jik}}{\bar{h}_y^i h_y^{i-1}} - \frac{\lambda_{jik}}{\bar{h}_z^k h_z^{k-1}} - \frac{\lambda_{j+1ik}}{\bar{h}_x^j h_x^j} - \frac{\lambda_{ji+1k}}{\bar{h}_y^i h_y^i} - \frac{\lambda_{jik+1}}{\bar{h}_z^k h_z^k}; \\ C_{jik} &= \frac{\lambda_{jik}}{\bar{h}_y^i h_y^{i-1}}; \\ F_{jik} &= -\frac{C\rho_{jik} T_{jik}^*}{\tau} - \frac{T_{j-1ik} \lambda_{jik}}{\bar{h}_x^j h_x^{j-1}} - \frac{T_{j+1ik}^* \lambda_{j+1ik}}{\bar{h}_x^j h_x^j} - \frac{T_{jik-1} \lambda_{jik}}{\bar{h}_z^k h_z^{k-1}} - \frac{T_{jik+1}^* \lambda_{jik+1}}{\bar{h}_z^k h_z^k}. \end{aligned} \right. \quad (3.18)$$

В основу методу прогонки покладено припущення лінійного зв'язку між значеннями шуканої змінної на сусідніх вузлах з невизначеними коефіцієнтами:

$$T_{jik} = \tilde{\alpha}_{ji+1k} T_{ji+1k} + \tilde{\beta}_{ji+1k}. \quad (3.19)$$

Підстановка (4.17) в (4.15) дозволяє отримати рекурентні співвідношення для коефіцієнтів прогонки:

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{\alpha}_{ji+1k} &= \frac{B_{jik}}{C_{jik} - \tilde{\alpha}_{jik} A_{jik}}; \\ \tilde{\beta}_{ji+1k} &= \frac{A_{jik} \tilde{\beta}_{jik} + F_{jik}}{C_{jik} - \tilde{\alpha}_{jik} A_{jik}}; \\ j \in (1, N), i \in (0, M), k \in (1, P). \end{aligned} \right. \quad (3.20)$$

Якщо граничні умови представимо у вигляді

$$\begin{cases} T_{j0k} = \mu_1 T_{j1k} + \mathcal{G}_1; \\ T_{jMk} = \mu_2 T_{jM-1k} + \mathcal{G}_2, \end{cases} \quad (3.21)$$

тоді

$$\begin{cases} \tilde{\alpha}_{j1k} = \mu_1; \\ \tilde{\beta}_{j1k} = \mathcal{G}_1; \\ T_{jMk} = \frac{\mu_2 - \mathcal{G}_2 \tilde{\beta}_{jMk}}{1 - \tilde{\alpha}_{jMk} \mathcal{G}_2}. \end{cases} \quad (3.22)$$

Плавлення і кристалізація металу супроводжується, відповідно, поглинанням і виділенням теплоти фазового перетворення  $g_{ft}$ . Це явище має місце в досить вузькому діапазоні температур (а саме між температурами ліквідус  $T_L$  і солідус  $T_S$ ), тому його вплив на поточний температурне поле досить локально. Одним з поширених підходів, що дозволяють врахувати виділення/поглинання теплоти фазового переходу при зварюванні, є використання ефективної теплоємності неоднорідно нагрітого матеріалу в такій формі:

$$c\rho(T) = \begin{cases} c\rho(T_S) + \frac{g_{ft}}{T_L - T_S}, T_S < T < T_L \\ c\rho(T_L), T \geq T_L \end{cases}. \quad (3.23)$$

Важливим параметром розрахунку з точки зору коректності отриманих результатів і мінімізації часу рахунки є вибір розбиття по часу, який має бути досить дрібним, щоб забезпечувалася мінімальна похибка розв'язання різницевої задачі.

Для визначення часового розбиття може бути використано правило Панова, яке полягає в тому, що якщо в міру зменшення кроку за часом розв'язання різницевої задачі стало в певний момент стійким, то подальше подрібнення розбиття не зможе збільшити похибки розрахунку. Це правило можна переформулювати наступним чином: оптимальним розбиттям за часом є таке, при якому збільшення кроку за часом призводить до похибки отриманого чисельного розв'язання, що перевищує деяке встановлене максимальне значення.

Плавлення і перегрів металу що зварюється вище температури ліквідусу  $T_L$  може привести до того, що сил поверхневого натягу мало для утримання всього обсягу розплаву на вертикальній поверхні і відбувається поступове сплавлення виробу. Для обліку цього явища в рамках запропонованого алгоритму приймалося, що якщо середня температура в деякому поперечному шарі перевищує критичну  $T_Z$ , то шар видаляється, а температурне поле, що залишилося зміщується на величину сплавлення (товщину перегрітого шару).

З практичної точки зору для оцінки якості зварного з'єднання важлива оцінка швидкості повної кристалізації металу  $v_s$  після фінальної стадії осадки. Для цього, після того як припиняється подача струму і зварений виріб починає охолоджуватись, фіксується товщина шару рідкого металу в області зварювання, тобто ізотерма  $T_S$ .

По мірі охолодження ізотерма зміщується до стику, проходячи відстань  $l_s$  за деякий час  $t_s$ , який являється, фактично, часом існування оплавлення після закінчення зварювання. Таким чином, швидкості повної кристалізації обчислюється як  $v_s = l_s / t_s$ .

Важливим аспектом в постановці задачі прогнозування температурного поля при контактному зварюванні залізничних рейок є поступове сплавлення його торців в рідкий метал та грат. Цей процес важко моделювати, тому в якості консервативного наближення можна вважати, що шар металу сплавляються в тому разі, якщо його температура по всій площині перевищує певний критичний рівень [133, 134].

### 3.3. Розрахунково-експериментальне дослідження термічних циклів КСЗО і розподілу температур в зоні з'єднань рейок типу Р65 (60Е1)

За допомогою математичної моделі розраховувались термічні цикли КСЗ пульсуючим оплавленням та розподіл температур в зоні термічного впливу зварного з'єднання залізничних рейок типу Р65 (60Е1) марки К76Ф. При проведенні розрахунків значення основних параметрів режимів КСЗ (табл. 3.1) встановлювали в межах, передбачених [100], зокрема, первинну напругу на різних стадіях оплавлення встановлювали як середнє арифметичне від значень, вказаних у табл. 2.4, 2.5.

Таблиця 3.1 – Режим КСЗ пульсуючим оплавленням рейок К76Ф

Параметр	Тип рейок
Первинна напруга на різних стадіях оплавлення $U, В$	$U_1=400, U_2=305, U_3=400$
Середнє значення первинного струму $I$ на різних стадіях оплавлення, $A$	$I_1=420, I_2=380, I_3=420$
Тривалість оплавлення загальна $t_{опл}$ ( $t_{1,2,3}$ - по стадіям), $c$	$t_{опл}=80$ ( $t_1=30, t_2=45, t_3=5 c$ )
Час осадки під струмом, $c$	1,0
Припуск на оплавлення $\Delta_{опл}$ загальний ( $\Delta_{1,2,3}$ - по стадіям), $мм$	14 ( $\Delta_1=3, \Delta_2=7, \Delta_3=4 мм$ )
Величина осадки $\Delta_{ос}$ , $мм$	12
Розрахункова величина енерговкладення $Q$ , $МДж$	12,8

Залежності теплофізичних властивостей рейкової сталі К76Ф від температури, які використовувались при розрахунках, наведено в таблиці 3.2. Для оцінки достовірності математичної моделі проводили експериментальне дослідження термічних циклів і визначали розподіл температур у зварних з'єднаннях, отриманих при режимі КСЗ пульсуючим оплавленням згідно до табл. 3.1.

Таблиця 3.2 – Теплофізичні властивості рейкової сталі К76Ф

T, °C	$c_p \cdot 10^3, \text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$
50	$0,871 \cdot 10^{-3}$	$0,920 \cdot 10^{-2}$
100	$0,910 \cdot 10^{-3}$	$0,920 \cdot 10^{-2}$
200	$0,996 \cdot 10^{-3}$	$0,920 \cdot 10^{-2}$
300	$0,108 \cdot 10^{-2}$	$0,900 \cdot 10^{-2}$
400	$0,116 \cdot 10^{-2}$	$0,870 \cdot 10^{-2}$
500	$0,129 \cdot 10^{-2}$	$0,870 \cdot 10^{-2}$
600	$0,145 \cdot 10^{-2}$	$0,890 \cdot 10^{-2}$
700	$0,176 \cdot 10^{-2}$	$0,890 \cdot 10^{-2}$
800	$0,180 \cdot 10^{-2}$	$0,890 \cdot 10^{-2}$
900	$0,132 \cdot 10^{-2}$ ,	$0,890 \cdot 10^{-2}$
1000	$0,130 \cdot 10^{-2}$	$0,890 \cdot 10^{-2}$
1100	$0,129 \cdot 10^{-2}$	$0,890 \cdot 10^{-2}$
1200	$0,129 \cdot 10^{-2}$	$0,890 \cdot 10^{-2}$

Використовували систему термопар, закріплених у головці рейки на різній відстані від торця рейки з кроком 5 мм. Перша термопара розміщувалась на відстані 18 мм від торця рейки, що передбачало її розташування від лінії з'єднання на відстані 5 мм після закінчення процесу КСЗ.

Порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних показує, що математична модель має похибку розрахунку близько 8%, що дає можливість із задовільною точністю прогнозувати кінетику температурного поля в рейках при КСЗ пульсуючим оплавленням. Це дозволяє використання математичної моделі для дослідження впливу основних параметрів КСЗО на процеси нагрівання і охолодження зварних стиків рейок.

Результати розрахунків наведено на рис. 3.6 і рис. 3.7.

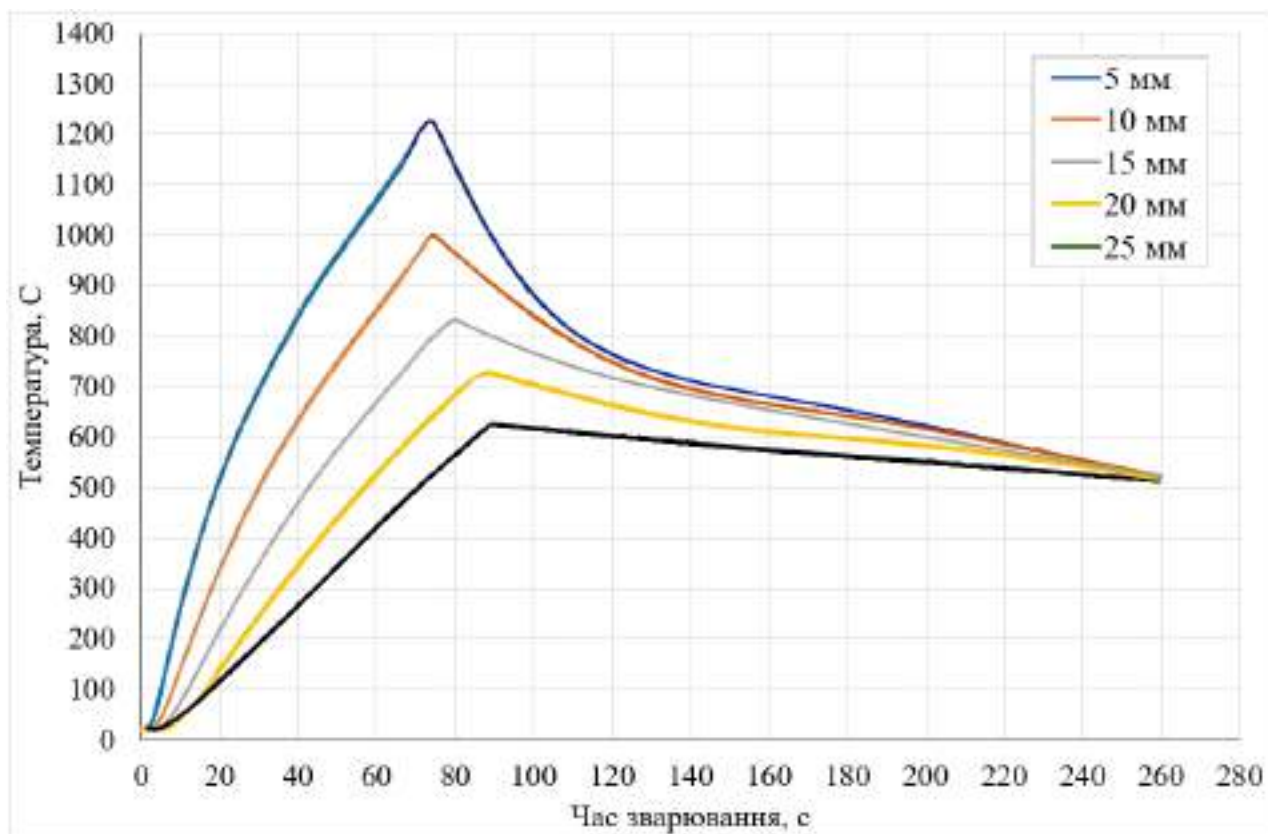


Рисунок 3.6 – Розрахункові термічні цикли при КСЗ згідно до табл. 3.1.

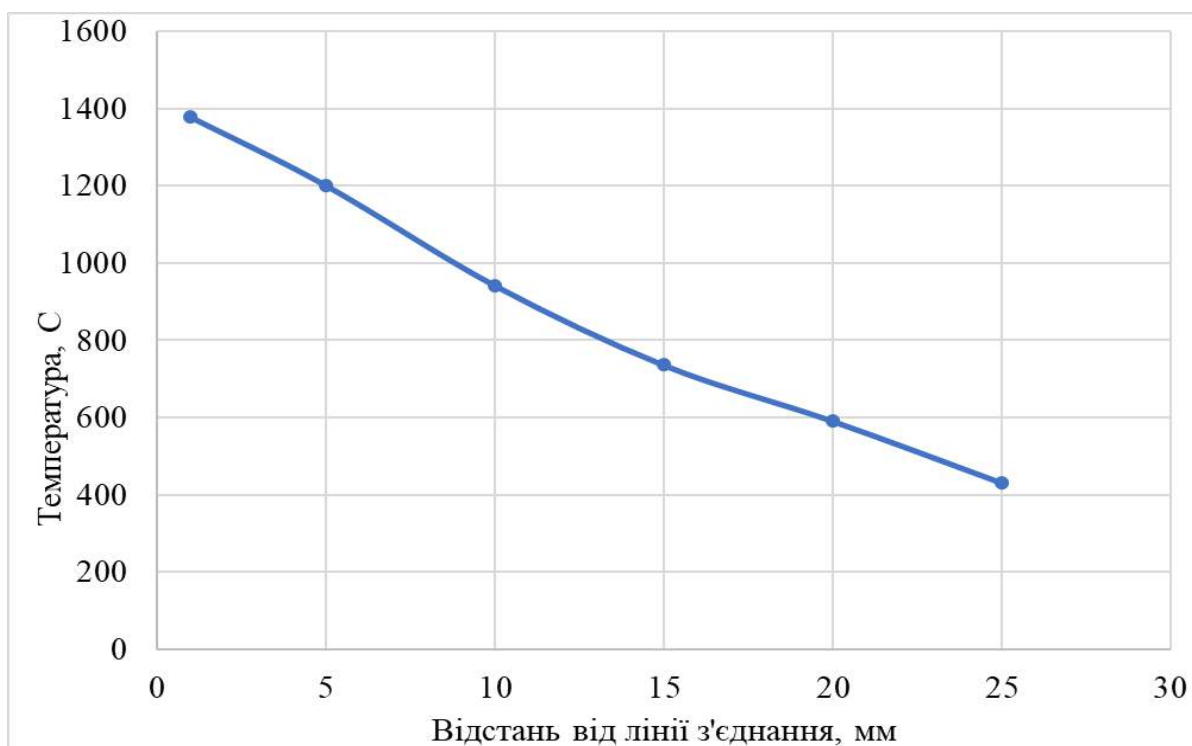
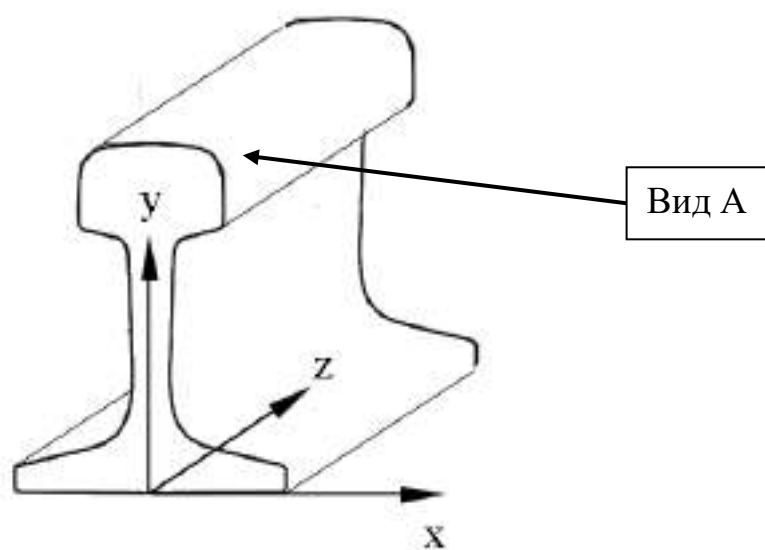


Рисунок 3.7 – Розрахунковий розподіл температури вздовж осі зварного стику рейки при КСЗ згідно до табл. 3.1.

Схему розташування термопар наведено на рис. 3.8.



Вид А

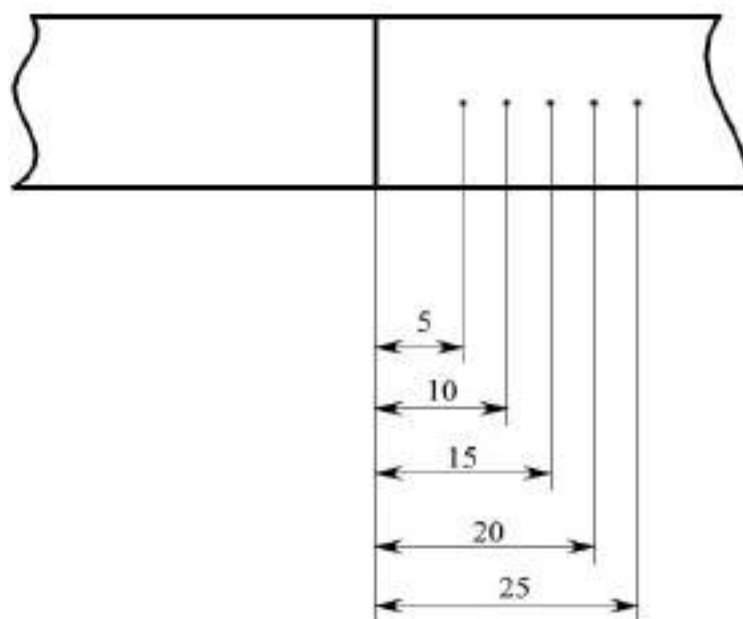


Рисунок 3.8 – Схема розміщення термопар на головці рейки (після виконання оплавлення і осадки) при експериментальному дослідженні термічних циклів при КСЗ рейок К76Ф на режимі згідно до табл. 3.1



Результати експериментів наведено на рис. 3.9 і 3.10.

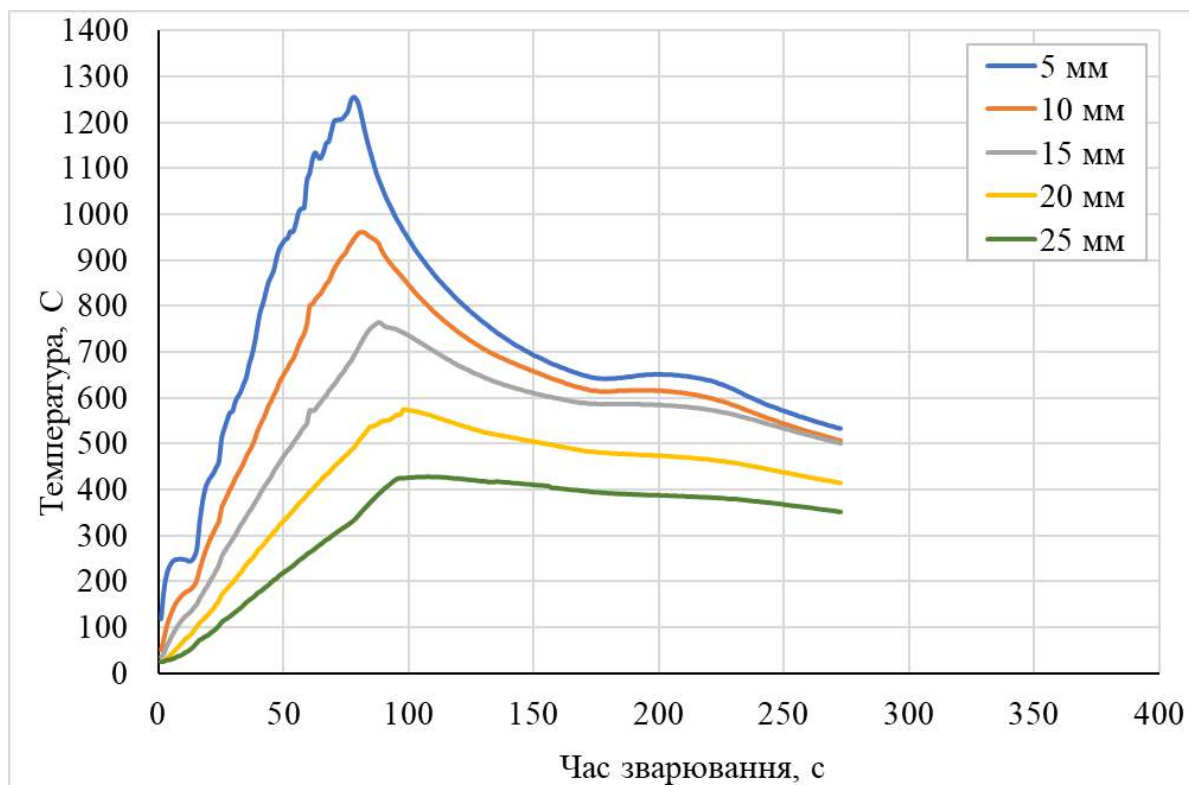


Рисунок 3.9 – Термічні цикли при КСЗ пульсуючим оплавленням залізничних рейок К76Ф, отримані за допомогою вимірювання

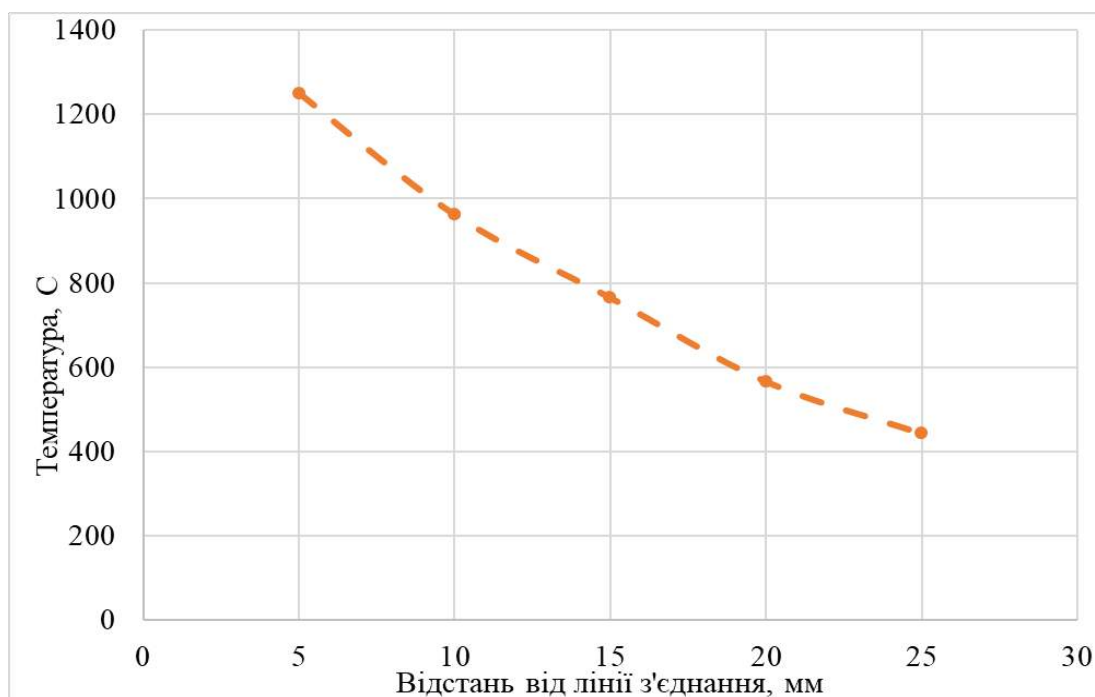


Рисунок 3.10 – Розподіл температури при КСЗ пульсуючим оплавленням залізничних рейок К76Ф, отриманий за допомогою вимірювання.

Результати порівняльного аналізу розрахункових та експериментальних даних наведено на рис. 3.11 і рис. 3.12.

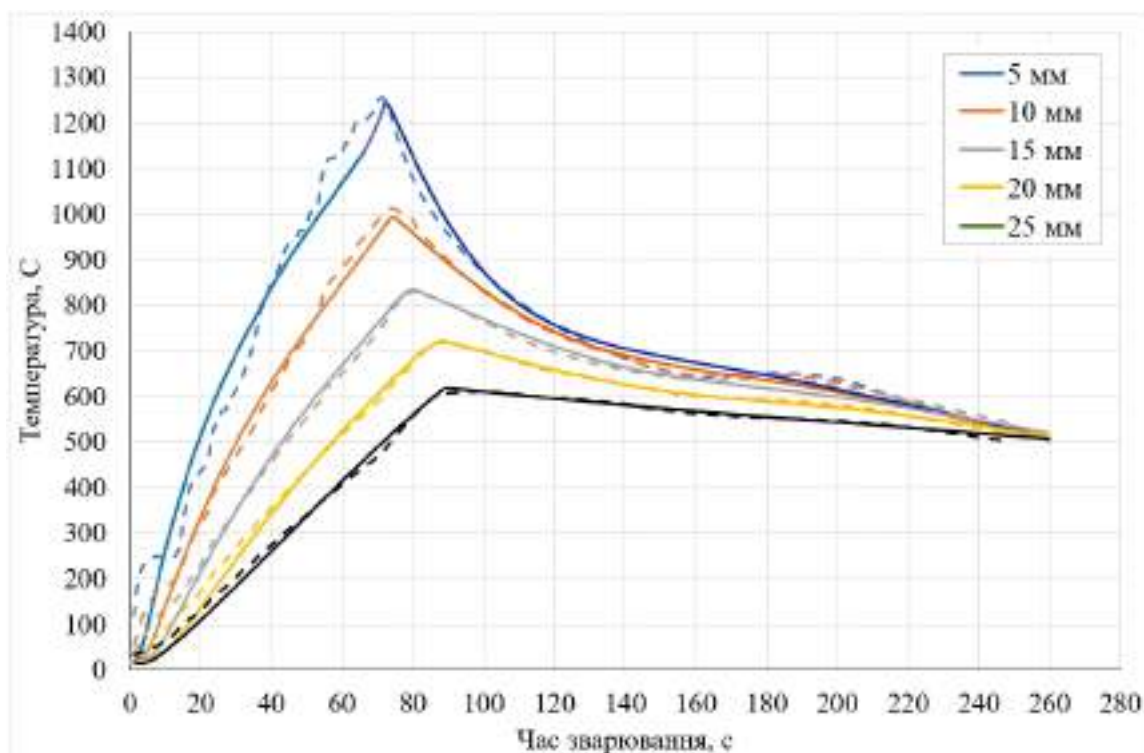


Рисунок 3.11 – Розрахункові (пунктирні лінії) та експериментальні (суцільні лінії) термічні цикли при КСЗ пульсуючим оплавленням рейок К76Ф на різній відстані від лінії з'єднання

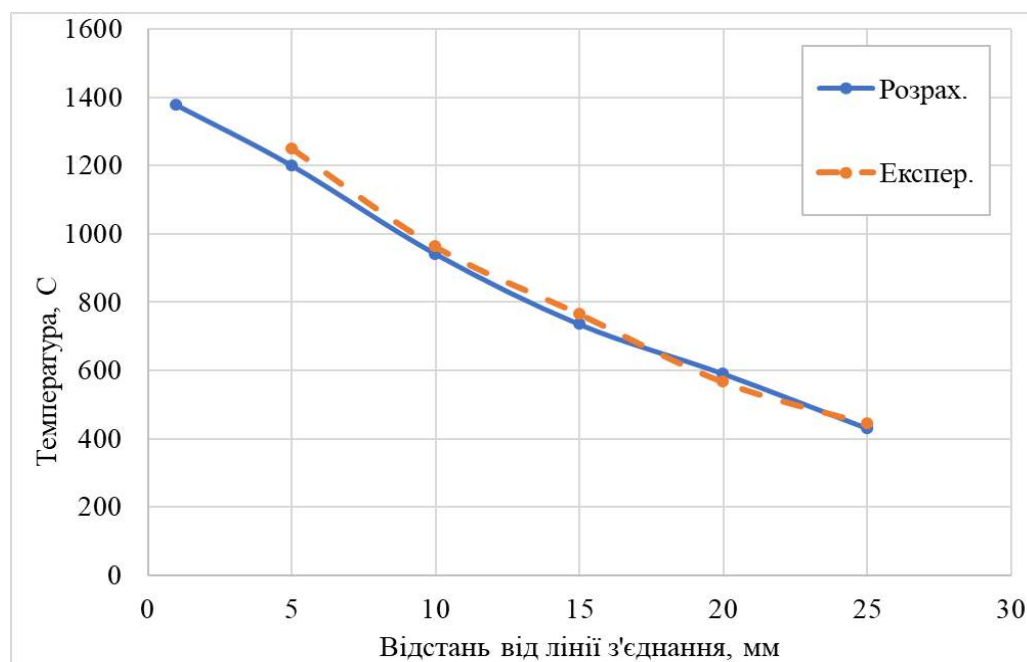


Рисунок 3.12 – Розрахунковий і експериментальний розподіл температури при КСЗ пульсуючим оплавленням рейок К76Ф

### 3.4. Дослідження впливу основних параметрів КСЗО на процеси нагрівання і охолодження зварних стиків рейок

Досліджували вплив на ефективність процесу нагрівання і розподіл температури в зоні зварного з'єднання рейок типу Р65 (60E1) марки К76Ф параметрів процесу КСЗО, а саме: первинної напруги  $U$  джерела живлення на різних етапах процесу оплавлення ( $U_1, U_2, U_3$ ), припуску  $\Delta_\phi$  стадії інтенсивного оплавлення (форсування), тривалості оплавлення  $t_{\text{опл}}$ , і величини енерговкладення  $Q$ ).

Напруга — один із основних параметрів, що впливають на нагрівання, проте на відміну від нагрівання опором цей вплив проявляється дуже складно. Як і при нагріванні опором, зі збільшенням напруги збільшується струм і тепловиділення в зоні контакту, але одночасно збільшуються втрати тепла, пов'язані з вибухоподібним руйнуванням контактів.

Для визначення впливу зварювальної напруги на розподіл температур досліджували розподіл температури в зварному з'єднанні при КСЗ оплавленням на постійній напрузі і при оплавленні із програмною зміною первинної напруги

При проведенні розрахунків використовували діапазони зміни основних технологічних параметрів КСЗО, які регламентовані технічними умовами [135], (див. табл. 2.4, 2.5). Зокрема, діапазони зміни напруги на різних етапах КСЗО в [100] рекомендовано наступні:  $U_1 = 355 \dots 440$  В (початковий етап),  $U_2 = 250 \dots 360$  В (другий етап),  $U_3 = 355 \dots 440$  В (форсування). При розрахунку термічного циклу змінювали значення напруги  $U_2$  на другому етапі процесу оплавлення. При зварюванні на постійній напрузі значення  $U_1 = U_2 = U_3 = 380$  В на всіх етапах зварювання. При цьому всі інші параметри зварювання залишалися однакові. Режими КСЗ пульсуючим оплавленням, що використовуються для моделювання, наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Режими КСЗ пульсуючим оплавленням при на постійній напрузі  $U$  джерела живлення і при оплавленні з програмною зміною  $U$

На постійній напрузі		З програмним зниженням напруги	
Параметр	Значення	Параметр	Значення
Первинна напруга $U_1$ , В	380	$U_1$	380
$U_2$ , В	380	$U_2$	300
$U_3$ , В	380	$U_3$	380
$\Delta$ , мм	13	$\Delta$ , мм	13

Встановлено (рис. 3.13), що при оплавленні із зниженням напруги на другому етапі збільшується теплопередача вглиб рейок, відповідно збільшуються максимальна товщина і час кристалізації рідкого шару на торцях рейок (рис. 3.14), що сприяє формуванню бездефектного зварного з'єднання.

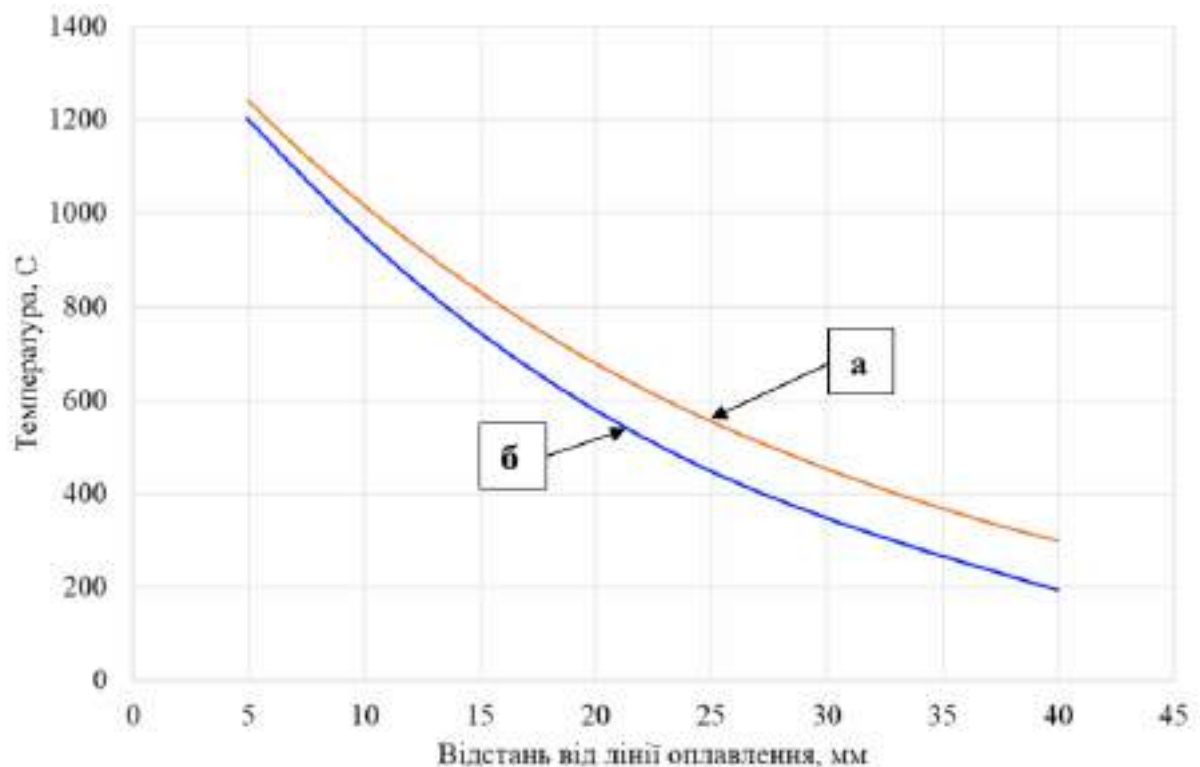


Рисунок 3.13 - Температурне поле, отримане розрахунковим методом при КСЗО: а - з програмною зміною напруги, б - на постійній напрузі

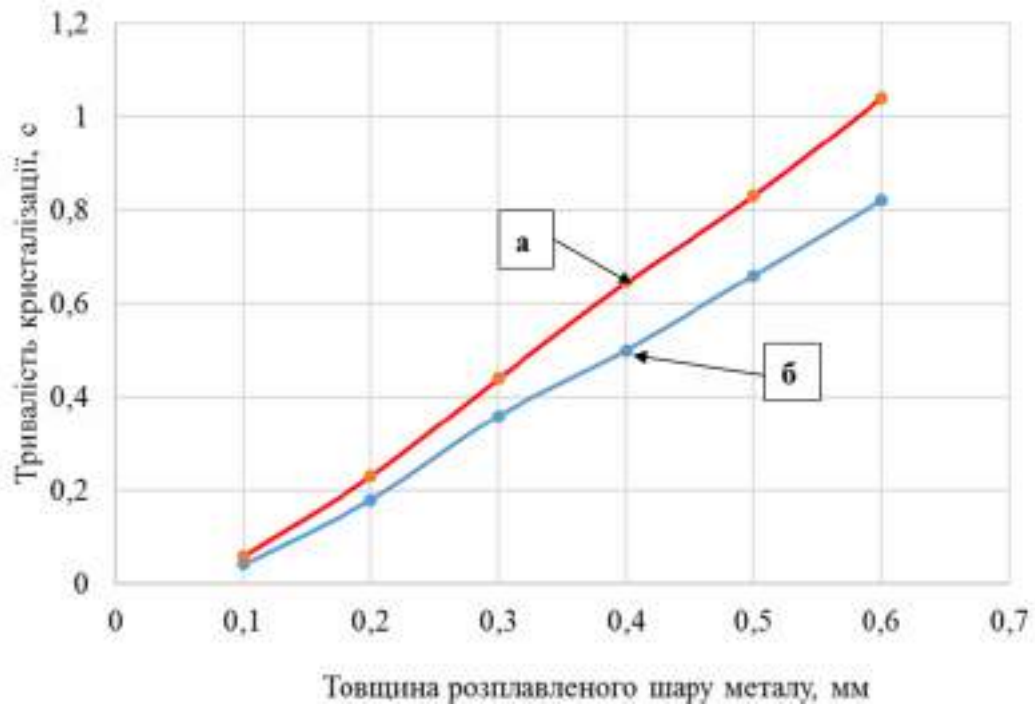


Рисунок 3.14 – Залежність тривалості кристалізації рідкого шару на торцях рейок від його товщини при КСЗО: а - з програмним зниженням напруги, б - на постійній напрузі  $U=380$  В

Результати досліджень показали, що ефективним є використання технології КСЗ пульсуючим оплавленням з програмною зміною  $U$ . Типова схема процесу КСЗО з програмним зниженням напруги наведена на рис. 3.15.

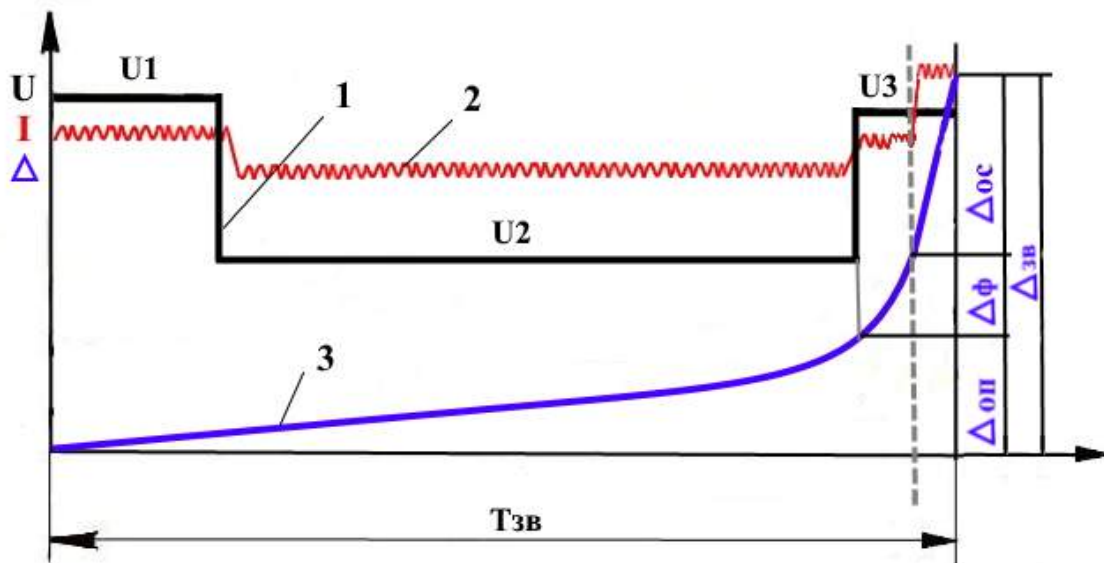


Рисунок 3.15 - Циклограма процесу КСЗО з програмною зміною первинної напруги, де: 1 – напруга, 2 – струм, 3 – припуск на зварювання

Оскільки діапазон зміни напруги  $U_2$  джерела живлення на другому етапі оплавлення, вказаний у [100] є занадто широким, то в його межах розрахунковим шляхом визначали найбільш ефективний діапазон зміни  $U_2$ , при якому мінімізується тривалість процесу оплавлення для створення заданого температурного поля для виконання стадії форсування і осадки. Досліджували вплив величини напруги  $U_2$  другого етапу процесу оплавлення (стадія квазістаціонарного нагрівання) на розподіл температур у зварній рейці. Значення напруги  $U_2$  встановлювали в діапазоні 200...400 В з кроком 50 В. Отриманий розподіл температур по осі зварного з'єднання рейок при КСЗ пульсуючим оплавленням з різною величиною напруги  $U_2$  представлено на рис. 3.16.

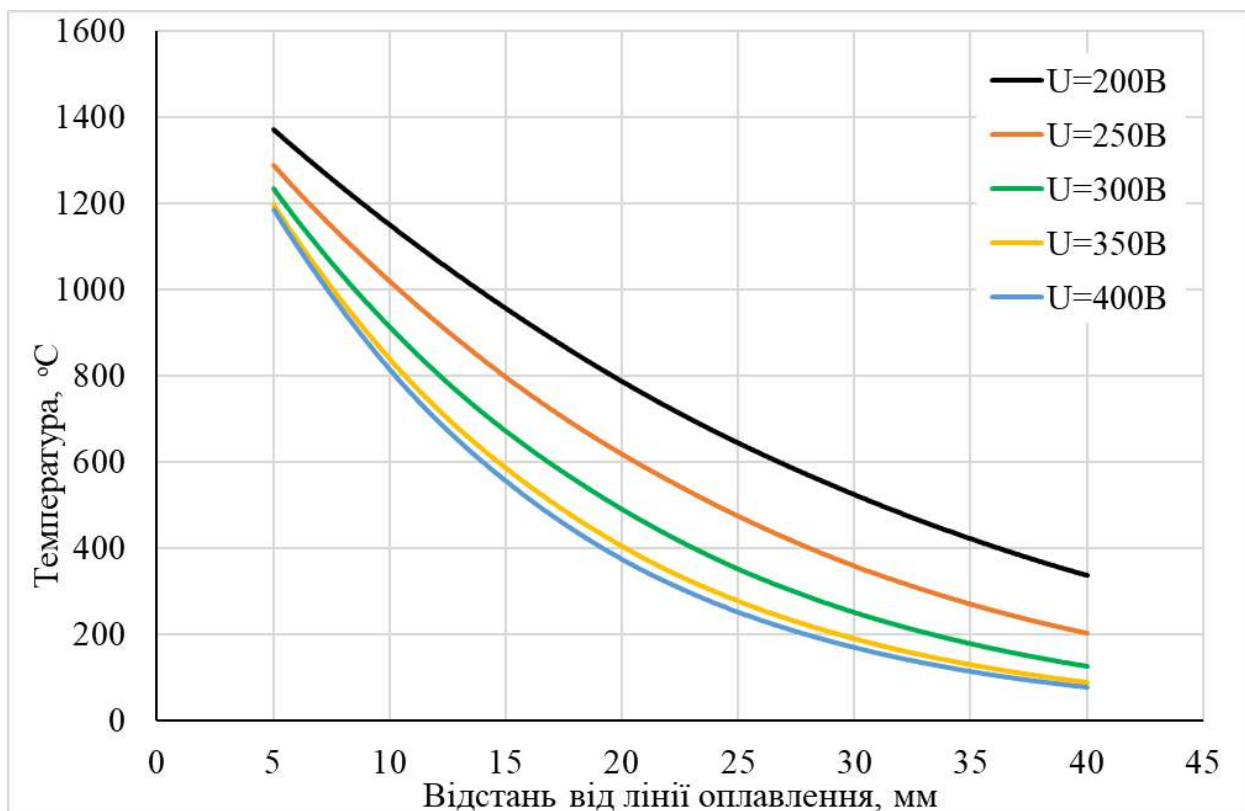


Рисунок 3.16 – Розподіл температур по осі зварного з'єднання рейок при КСЗ пульсуючим оплавленням з різною величиною напруги  $U$  на 2 етапі

Очевидно, що зниження напруги  $U_2$  можливе до певної величини, оскільки при дуже низьких значеннях  $U_2$  процес оплавлення переходить в процес нагрівання опором (розподіл температур при  $U=200$  В на рис. 3.16), який не забезпечує рівномірного розподілу температури по перерізу рейки, а при надто високих значеннях  $U_2$  – інтенсифікується процес вибухоподібного руйнування контактів при оплавленні, при цьому зменшується частина енергії, що передається в рейку, і збільшується частина, яка видаляється із зони з'єднання у вигляді часток розплавленого металу (розподіл температур при  $U_2=350$  В і  $U_2=400$  В на рис. 3.16). Отже за результатами досліджень уточнено рекомендований діапазон значень напруги на другому етапі оплавлення, наведений у [101], а саме:  $U_2 = 250...300$  В.

На основі отриманих результатів розрахунків обґрунтовано використання процесу КСЗО з програмною зміною в часі напруги джерела живлення, уточнено циклограму процесу КСЗ пульсуючим оплавленням, яка передбачає поетапну зміну значення  $U$  в діапазоні  $U_1=355...440$  В на першому етапі оплавлення, в діапазоні  $U_2= 250...300$  В на другому етапі (квазістаціонарного нагрівання), і в межах  $U_3= 355...440$  В на третьому етапі (інтенсивного оплавлення – форсування).

Використання процесу пульсуючого оплавлення з програмною зміною напруги у визначених діапазонах дозволяє зменшити тривалість нагрівання для створення заданого температурного поля в рейках для виконання процесу форсування. Етап форсування необхідний для зменшення іскрового зазору і захисту з'єднання від потрапляння в нього кисню. Інтенсивність оплавлення залежить від зміни взаємопов'язаних параметрів  $I_{\text{опл}}$  і  $V_{\text{опл}}$ . З їх зростанням, з одного боку, підвищується інтенсивність оплавлення і ступінь захисту торців від окислення, а з іншого, збільшуються втрати металу і енергії, яка видаляється із зони стику з високотемпературними парами і краплями металу.

Для визначення ефективного діапазону значень припуску  $\Delta_\phi$  при форсуванні досліджували розподіл температури в зварному з'єднанні при КСЗ оплавленням при різних значеннях припуску  $\Delta_\phi$  на етапі форсування. Значення

кінцевої швидкості форсування з рекомендованого [100] діапазону встановлювали рівним  $V_{\phi}=1,5$  мм/с. Критеріями вибору ефективного діапазону значень  $\Delta_{\phi}$  було збереження розподілу температури по осі оплавлених рейок, при яких забезпечуються умови для виконання осадки на задану величину припуску на осадку  $\Delta_{oc}=12$  мм (ширина ЗТВ з температурою нагрівання до  $1000^{\circ}\text{C}$  – не менше  $\Delta_{oc}=12$  мм). Розрахунковий розподіл температур по осі зварного з'єднання рейок при КСЗ пульсуючим опаленням з величиною припуску  $\Delta_{\phi} = 0$  мм (без форсування),  $\Delta_{\phi} = 4$  мм, і  $\Delta_{\phi} = 8$  мм наведено на рис. 3.17. Аналіз отриманих результатів показує, що значення припуску  $\Delta_{\phi}$  на етапі форсування в межах  $\Delta_{\phi} = 4 \dots 8$  мм задовольняє поставленим вимогам.

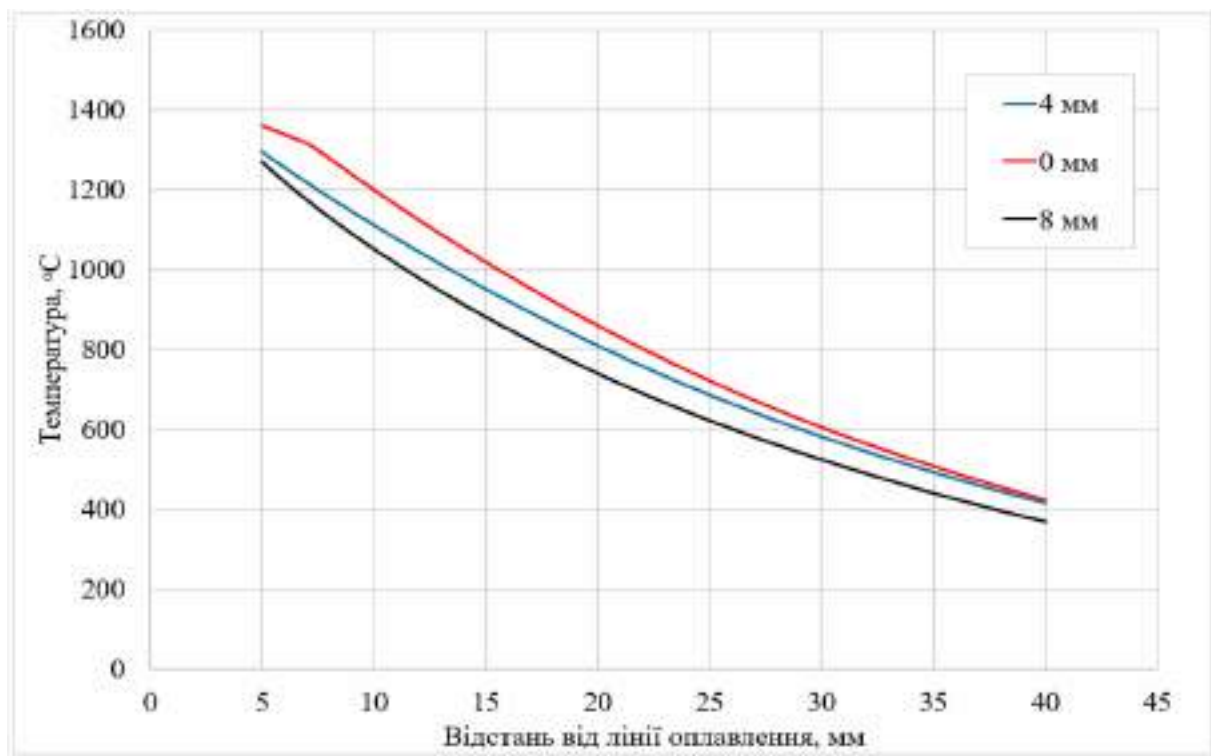


Рисунок 3.17 - Розподіл температури по осі зварного з'єднання рейок при КСЗ пульсуючим опаленням з різною величиною припуску на форсування

Виконували розрахункове визначення впливу тривалості процесу опалення на  $t_{опл}$  на величину енерговкладення  $Q$ . Встановлено, що при збільшенні  $t_{опл}$  в діапазоні від 50 до 140 с величина енерговкладення  $Q$  збільшується від 9 до 18 МДж.



Визначали розподіл температури по осі зварного з'єднання рейок при КСЗ пульсуючим оплавленням з різною величиною тривалості процесу оплавлення  $t_{\text{опл}}$ . Результати розрахунків для значень  $t_{\text{опл}} = 90$  с і  $t_{\text{опл}} = 120$  с наведено на рис. 3.18. Як видно з отриманих даних, для діапазону  $t_{\text{опл}} = 90 \dots 120$  с забезпечується виконання вищенаведеної умови, а саме: забезпечуються умови для виконання осадки (ширина ЗТВ з температурою нагрівання до  $1000^{\circ}\text{C}$  – не менше величини припуску на осадку  $\Delta_{\text{ос}}=12$  мм).

Згідно до вимог національного стандарту *ДСТУ EN 14587-2:2015 (EN 14587-2:2009, IDT)*, гармонізованого з відповідним європейським нормативним документом, визначали мінімальне  $H_{\text{ЗТВmin}}$  та максимальне  $H_{\text{ЗТВmax}}$  значення ширини зони термічного впливу зварного з'єднання. Розрахунковим шляхом визначали залежність значень  $H_{\text{ЗТВmin}}$  і  $H_{\text{ЗТВmax}}$  від тривалості процесу оплавлення  $t_{\text{опл}}$  і величини енерговкладення  $Q$ . Встановлено, що при КСЗ пульсуючим оплавленням залізничних рейок типу Р65 (60E1) при збільшенні  $t_{\text{опл}}$  в діапазоні від 50 до 140 с і величини енерговкладення  $Q$  від 9 до 18 МДж, значення  $H_{\text{ЗТВmin}}$  зростає від 16 до 22 мм, а значення  $H_{\text{ЗТВmax}}$  – від 36 до 54 мм.

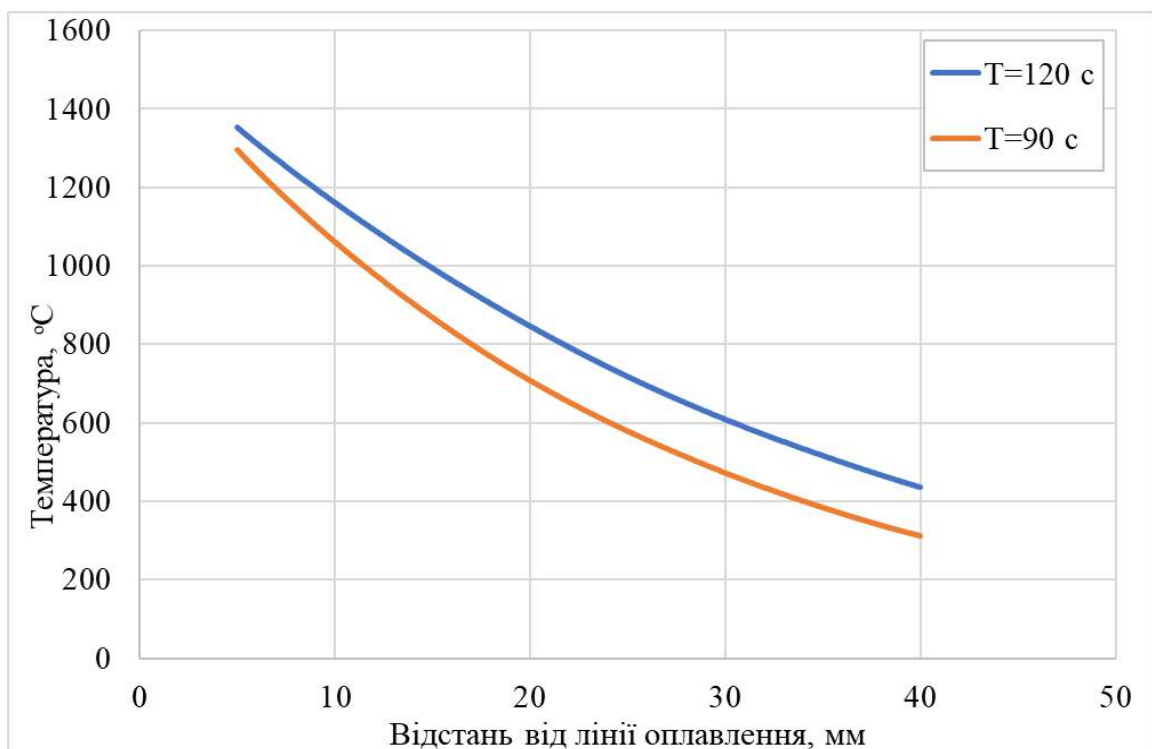


Рисунок 3.18 - Розподіл температури по осі зварного з'єднання рейок при КСЗ пульсуючим оплавленням з різною величиною тривалості оплавлення

### Висновки до розділу 3

1. Розрахунки зміни теплового коефіцієнта корисної дії (ККД) при безперервному і пульсуючому оплавленні рейок встановлено, що при безперервному оплавленні значення ККД зменшується з 0,7 (у початковий період) до 0,45 при  $t_{\text{опл}} = 180$  с, а при пульсуючому оплавленні – ККД зменшується з 0,9 у початковий період оплавлення до 0,7 при  $t_{\text{опл}} = 80$  с.

2. Проводили розрахунково-експериментальні дослідження термічних циклів КСЗО і розподілу температур в зоні з'єднань рейок типу Р65 (60Е1). Використовували математичну модель нагрівання рейок при оплавленні та відповідні засоби комп'ютерної симуляції кінетики температурних полів при КСЗО залізничних рейок. Використано чисельне розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності поряд із комплексом лабораторних вимірювань температурних циклів в рейках, що зварюються. Порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних показує, що математична модель має похибку розрахунку близько 8%.

3. З використанням розробленої математичної моделі досліджували вплив на ефективність процесу нагрівання і розподіл температури в зоні зварного з'єднання рейок типу Р65 (60Е1) марки К76Ф параметрів процесу КСЗО, а саме: первинної напруги  $U$  джерела живлення на різних етапах процесу оплавлення ( $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ), припуску  $\Delta_{\text{ф}}$  стадії інтенсивного оплавлення (форсування), тривалості оплавлення  $t_{\text{опл}}$ , і величини енерговкладення  $Q$ ). На основі отриманих результатів:

3.1. Обґрунтовано використання процесу КСЗО з програмною зміною в часі напруги джерела живлення, уточнено циклограму процесу КСЗ пульсуючим оплавленням, яка передбачає поетапну зміну значення  $U$  в діапазоні  $U_1=355\dots440$  В на першому етапі оплавлення, в діапазоні  $U_2=250\dots300$  В на другому етапі (квазістационарного нагрівання), і в межах  $U_3=355\dots440$  В на третьому етапі (інтенсивного оплавлення – форсування).

3.2. Обґрунтовано діапазон значень припуску  $\Delta_{\phi}$  на етапі форсування, при яких забезпечується формування рівномірного шару розплавленого металу на торцях рейок, і зберігається розподіл температури по осі оплавлених рейок для виконання осадки на задану величину, а саме:  $\Delta_{\phi} = 4 \dots 8$  мм.

4. Згідно до вимог національного стандарту *ДСТУ EN 14587-2:2015 (EN 14587-2:2009, IDT)*, гармонізованого з відповідним європейським нормативним документом, визначали мінімальне  $H_{зТВmin}$  та максимальне  $H_{зТВmax}$  значення ширини зони термічного впливу зварного з'єднання. Розрахунковим шляхом визначали залежність значень  $H_{зТВmin}$  і  $H_{зТВmax}$  від тривалості процесу оплавлення  $t_{опл}$  і величини енерговкладення  $Q$ . Встановлено, що при КСЗ пульсуючим оплавленням залізничних рейок типу Р65 (60E1) при збільшенні  $t_{опл}$  в діапазоні від 50 до 140 с і величини енерговкладення  $Q$  від 9 до 18 МДж, значення  $H_{зТВmin}$  зростає від 16 до 22 мм, а значення  $H_{зТВmax}$  – від 36 до 54 мм.

## РОЗДІЛ 4

### ТЕХНОЛОГІЯ КОНТАКТНОГО СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ОПЛАВЛЕННЯМ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК КОНВЕРТОРНОГО ВИРОБНИЦТВА

#### 4.1. Дослідження основного металу (ОМ) рейок конверторного виробництва марок К76Ф і R350НТ

Досліджували особливості мікроструктури основного металу (ОМ) рейок марок К76Ф та R350НТ різних виробників (див. табл. 2.1 і табл. 2.2). Оскільки чинними нормативними документами [100-103] передбачені вимоги до мікроструктури зварних з'єднань і розподілу твердості в термічнозміцненому шарі головки рейок на відстані до 5 мм від поверхні кочення, то мікроструктуру ОМ рейок досліджували в зоні від 3 до 5 мм від поверхні кочення рейок.

Дослідження мікроструктури ОМ проводили після хімічного травлення шліфів у 4%-му спиртовому розчині азотної кислоти.

Металографічний аналіз рейкової сталі К76Ф показав високий ступінь однорідності макроструктури рейкової сталі, відсутність плямистої ліквіації і шлакових забруднень. Мікроструктура основного металу рейок представляє собою сорбіт та тростит, що відповідає вимогам ДСТУ 4344: 2004.

Мікроструктуру ОМ рейок К76Ф при різних збільшеннях наведено на рис. 4.1.

Міжпластинчаста відстань знаходиться в межах від 0,1 до 0,3 мкм (рис. 4.2, а). Дисперсію перліту визначали за ГОСТ 8233-56 (шкала 1) при збільшенні  $\times 5\ 000$  і  $\times 20\ 000$ .

В структурі переважає сорбіт загартування при наявності незначної кількості перліту і трооститу. Твердість ОМ в головці рейки знаходиться в діапазоні 350-390 НV30.

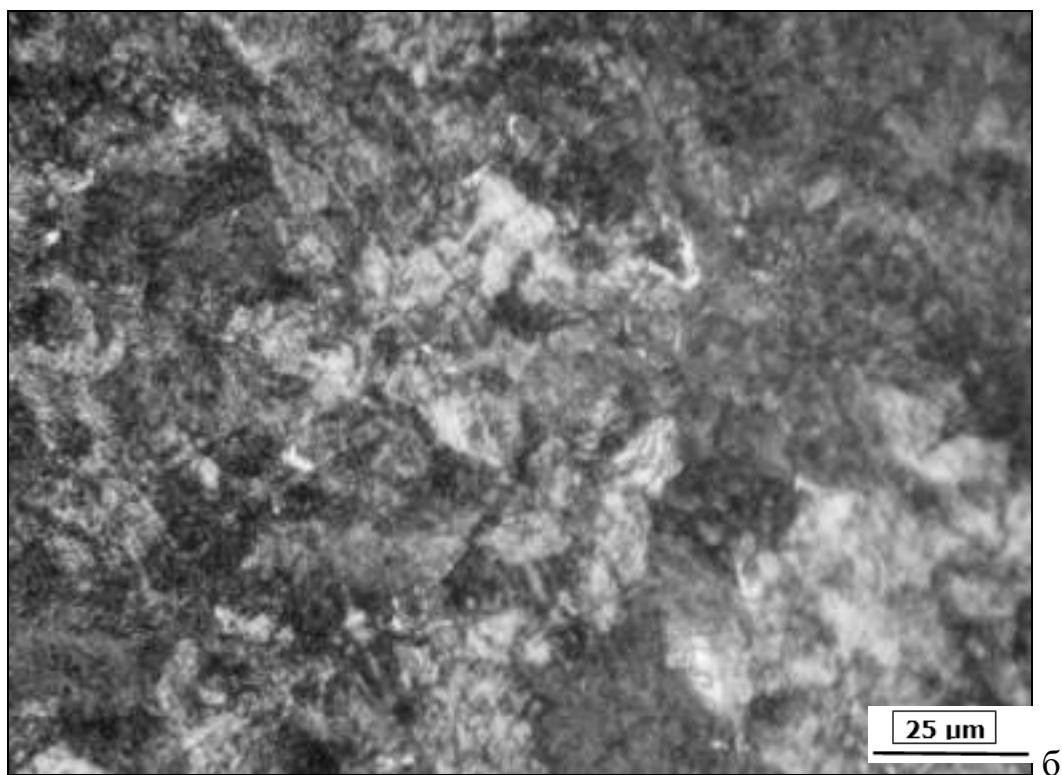
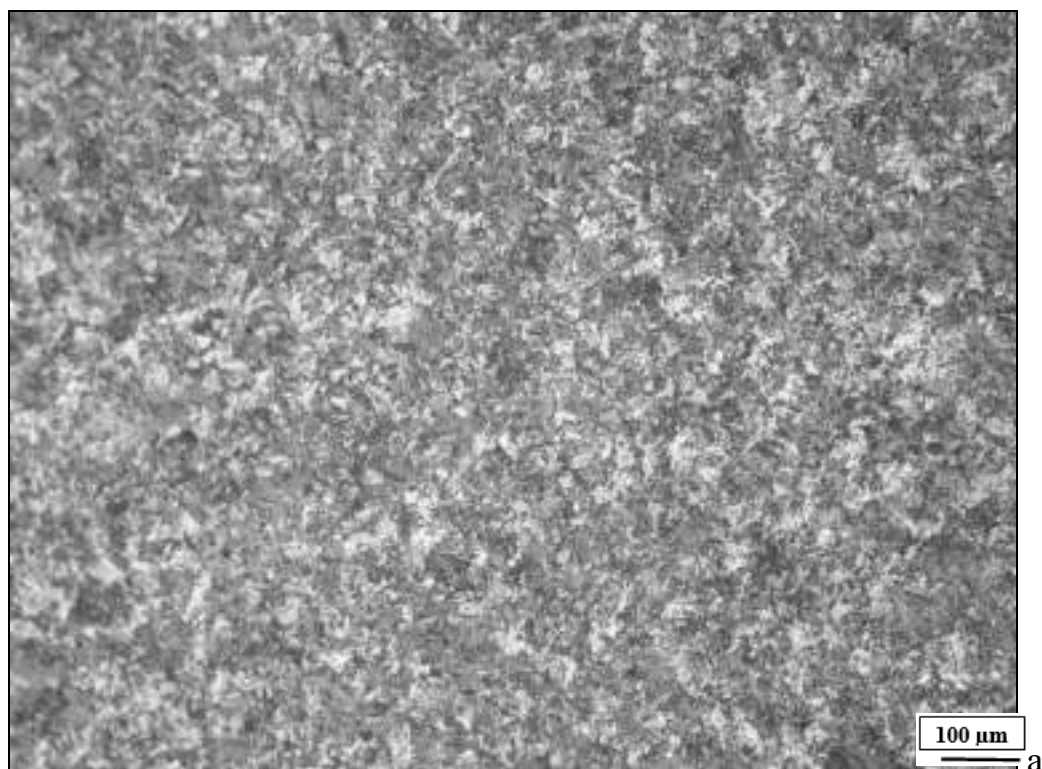
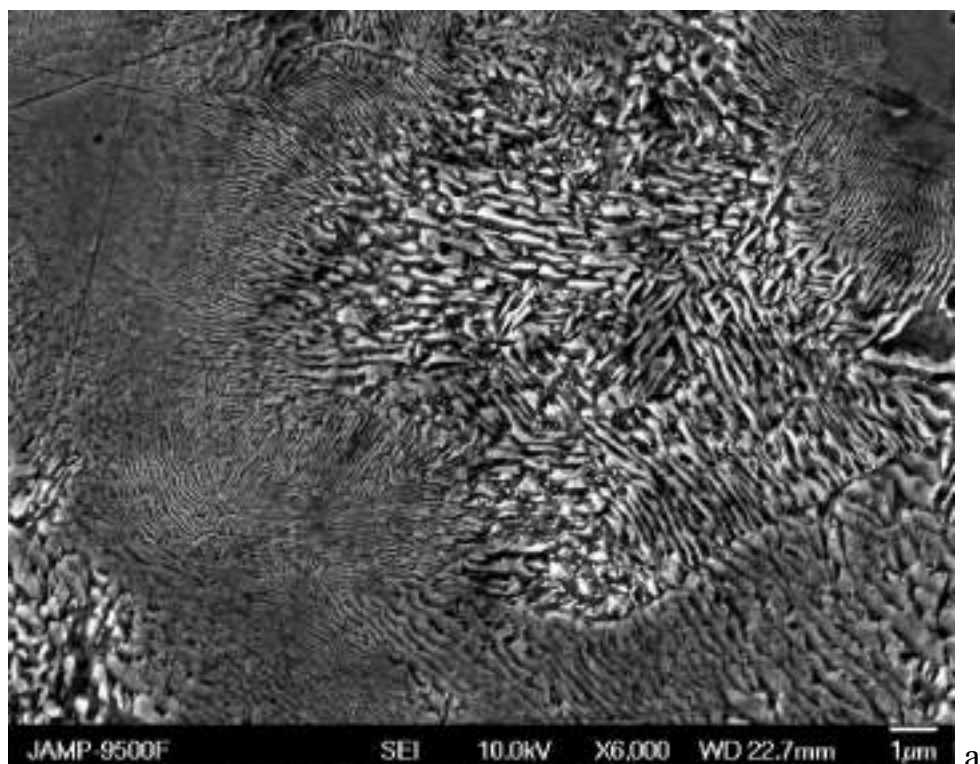


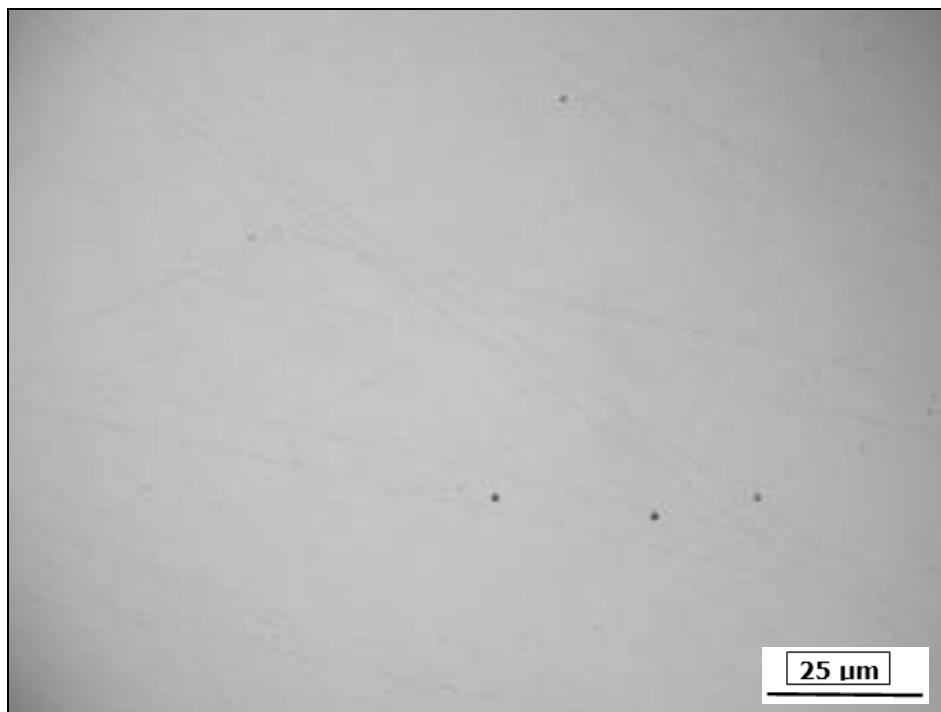
Рисунок 4.1 – Мікроструктура ОМ рейки марки К76Ф,  $\times 100$  (а),  $\times 1000$  (б)

Аналіз зображень на рис. 4.2,а. показує, що мікроструктури ОМ рейок К76Ф – пластинчастий перліт різної дисперсності.

При аналізі мікроструктури ОМ на нетравлених шліфах виявляються неметалічні включення у вигляді карбонітридів ванадію (рис. 4.2, б).



а



б

Рисунок 4.2 – СЕМ-зображення мікроструктури ОМ рейок К76Ф: ×6000 (а), карбонітриди ванадію в ОМ рейок К76Ф, ×1000 (б)

Зустрічаються також відокремлені, безладно розкидані силікати та сульфіди заліза (рис. 4.3).

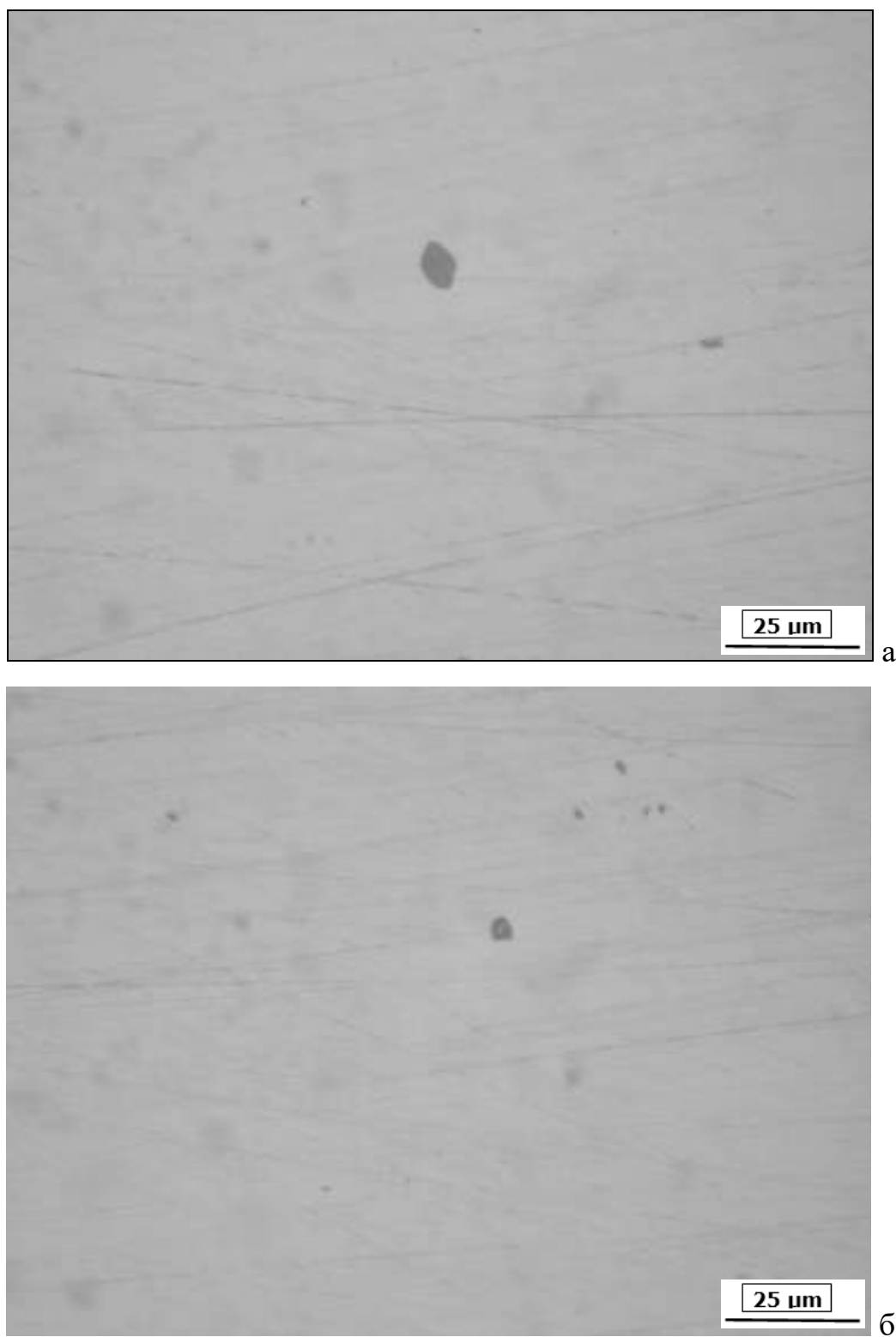
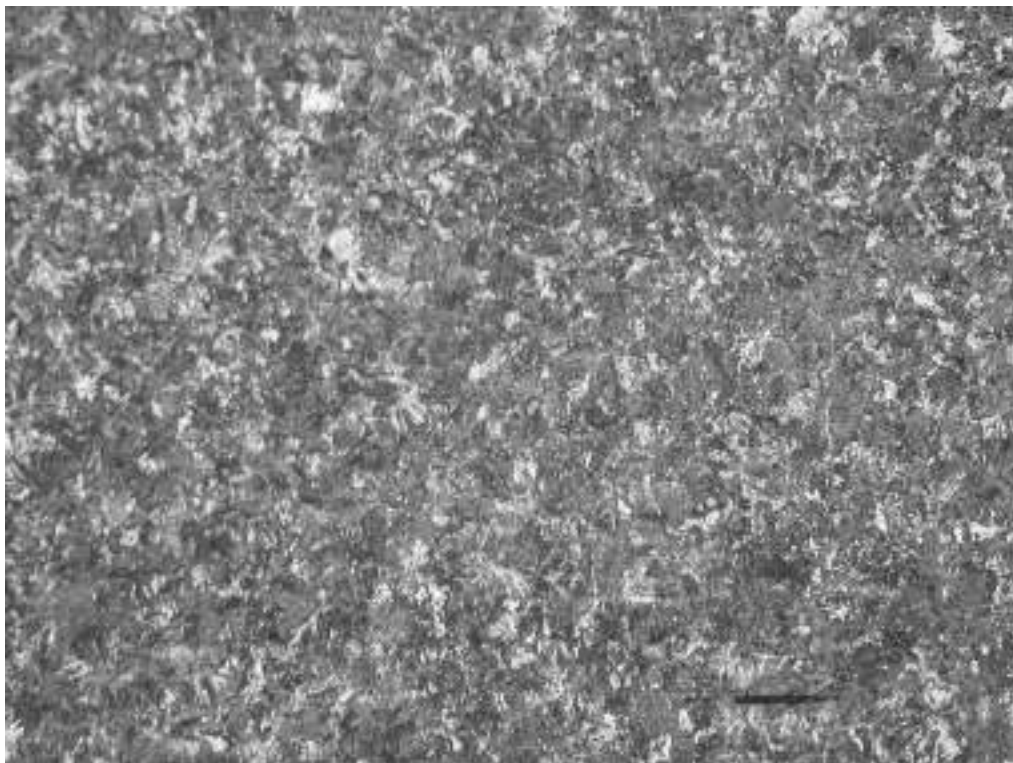
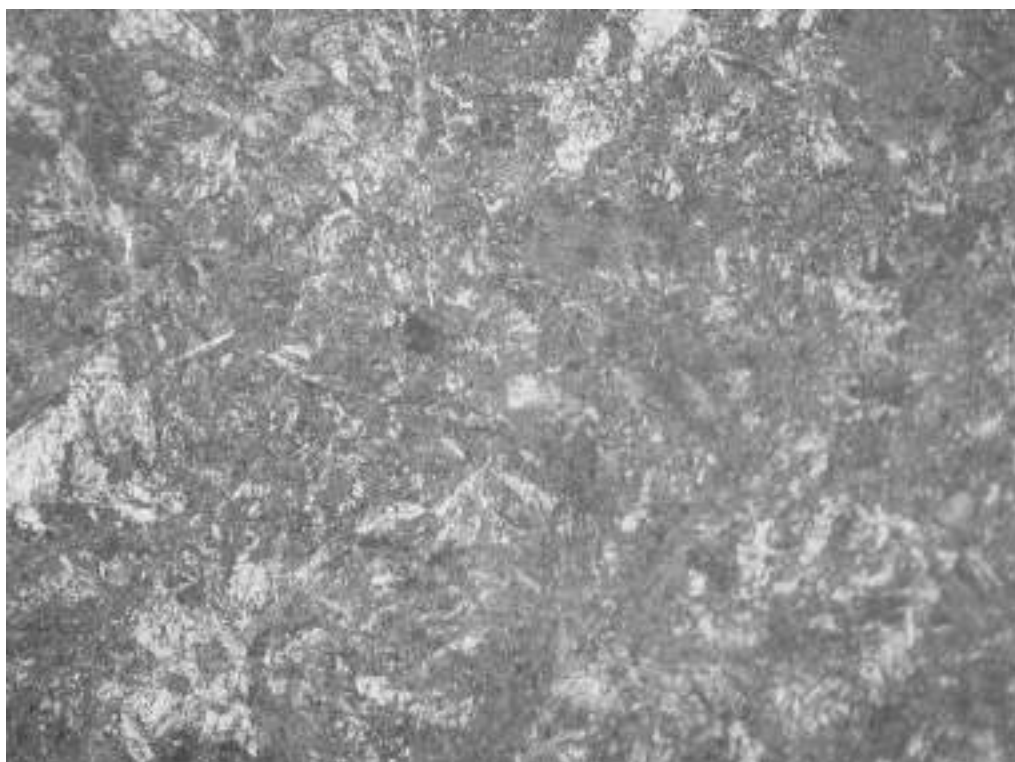


Рисунок 4.3 – Сульфіди заліза (а), силікати (б) в ОМ рейки К76Ф,  $\times 1000$

Мікроструктура ОМ рейок R350HT (рис. 4.4) – перліт з міжпластинчастою відстанню в межах від 0,1 до 0,35 мкм.



а



б

Рисунок 4.4 – Мікроструктура ОМ рейок R350HT:  $\times 100$  (а),  $\times 400$  (б)



Дисперсію перліту визначали за ГОСТ 8233-56 (шкала 1) при збільшенні  $\times 5\,000$  і  $\times 20\,000$ . Отже, структурні складові ОМ рейок R350HT - троостит, сорбіт, перліт (рис. 4.5).

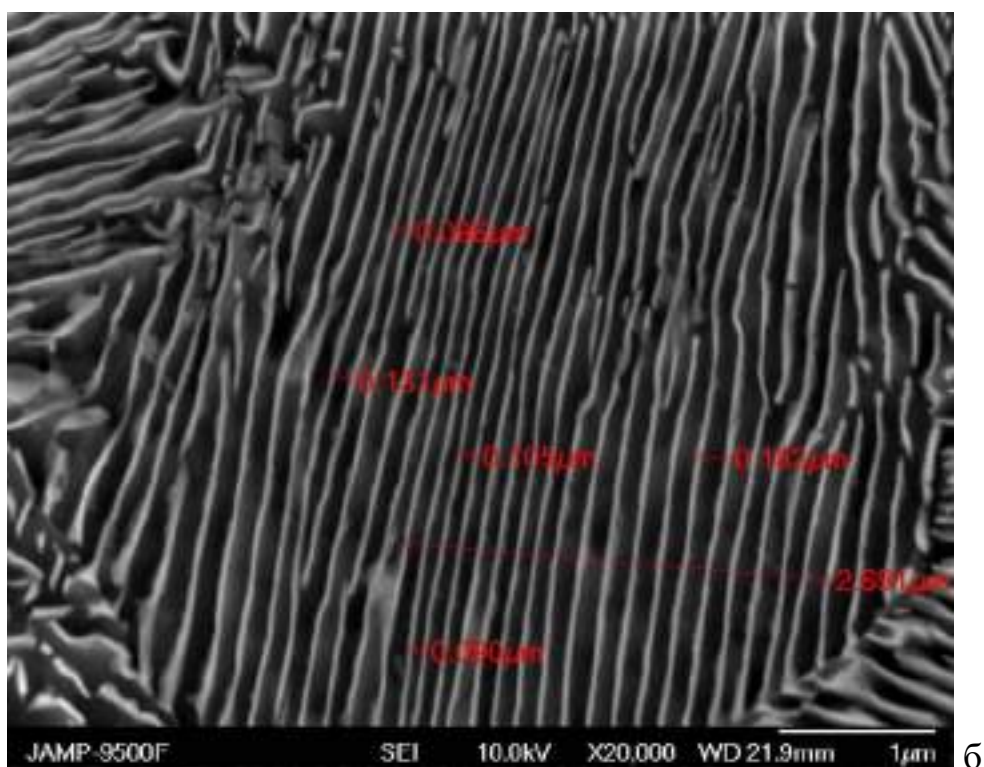
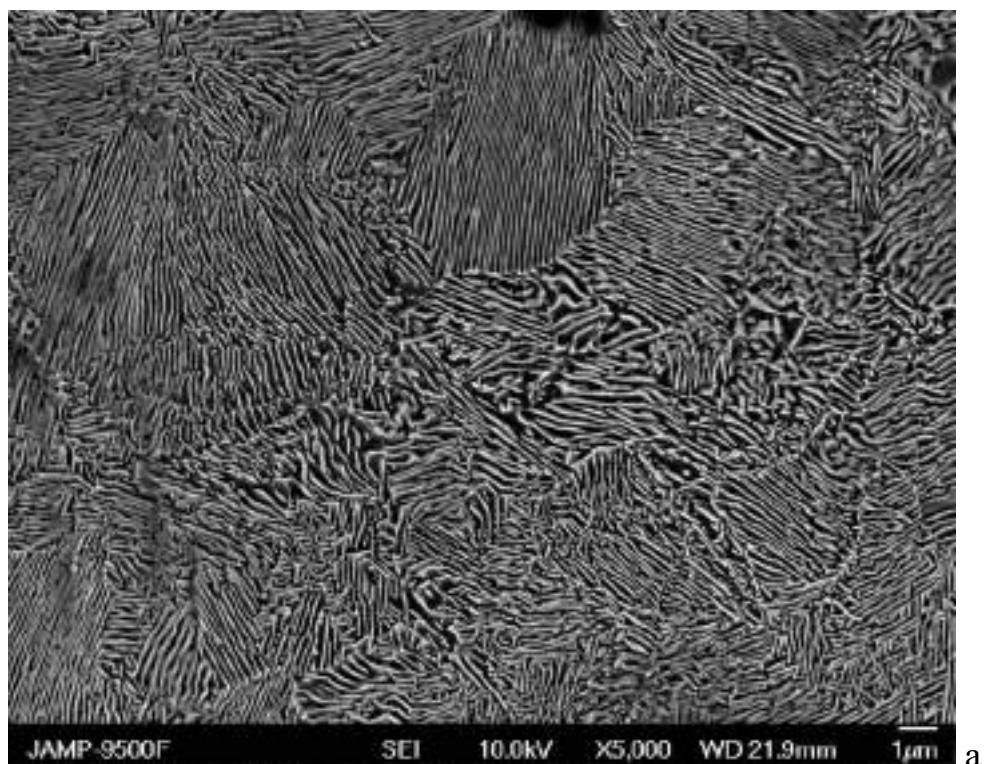


Рисунок 4.5 – СЕМ-зображення мікроструктури ОМ рейок R350HT:  
 $\times 5000$  (а),  $\times 20000$  (б)

При аналізі мікроструктури ОМ рейок R350HT на нетравлених шліфах виявляються неметалічні включення типу сульфідів заліза і марганцю (рис. 4.6, а), які на деяких ділянках утворюють скупчення (рис. 4.6, б).

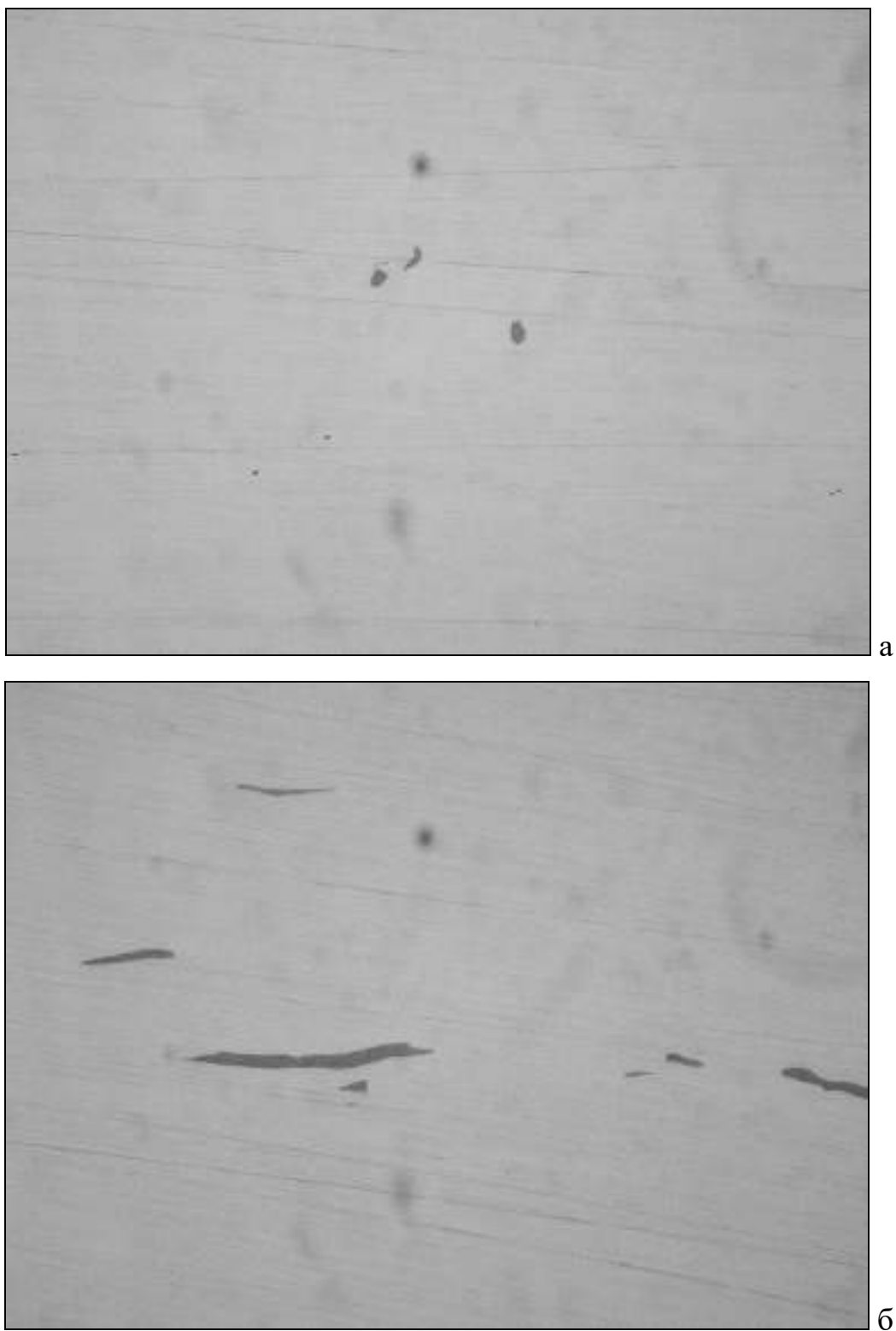


Рисунок 4.6 – Сульфіди заліза і марганцю в ОМ рейок R350HT,  $\times 500$

Ступінь забрудненості ОМ рейок сульфідами не перевищує бали 2 по ГОСТу 1779-70. Забрудненість оксидами і силікатами ОМ рейок не перевищує бала 1 по ГОСТ 1778-70. Дефекти прокату, термічної обробки не виявлені.

Твердість ОМ знаходиться в діапазоні 351-358 HV30. Має місце багатозернистість – від бала №6, до бала № 7-8. Оцінку балу зерна проводили відповідно до ГОСТ 5639-82 шляхом візуального порівняння зі стандартами шкалами.

Дослідження мікроструктури ОМ рейок R350HT на ділянках, розташованих в безпосередній близькості від поверхні кочення представлено на рис. 4.7 – 4.8

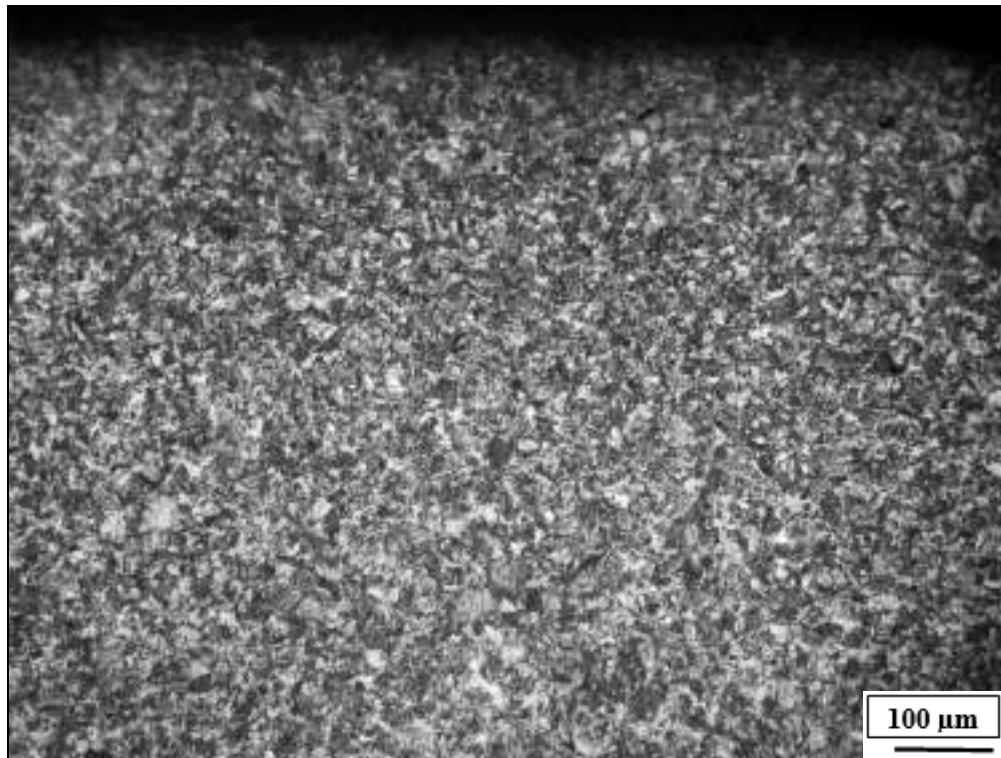


Рисунок 4.7 – Знеуглецьований шар біля поверхні кочення рейки, x100

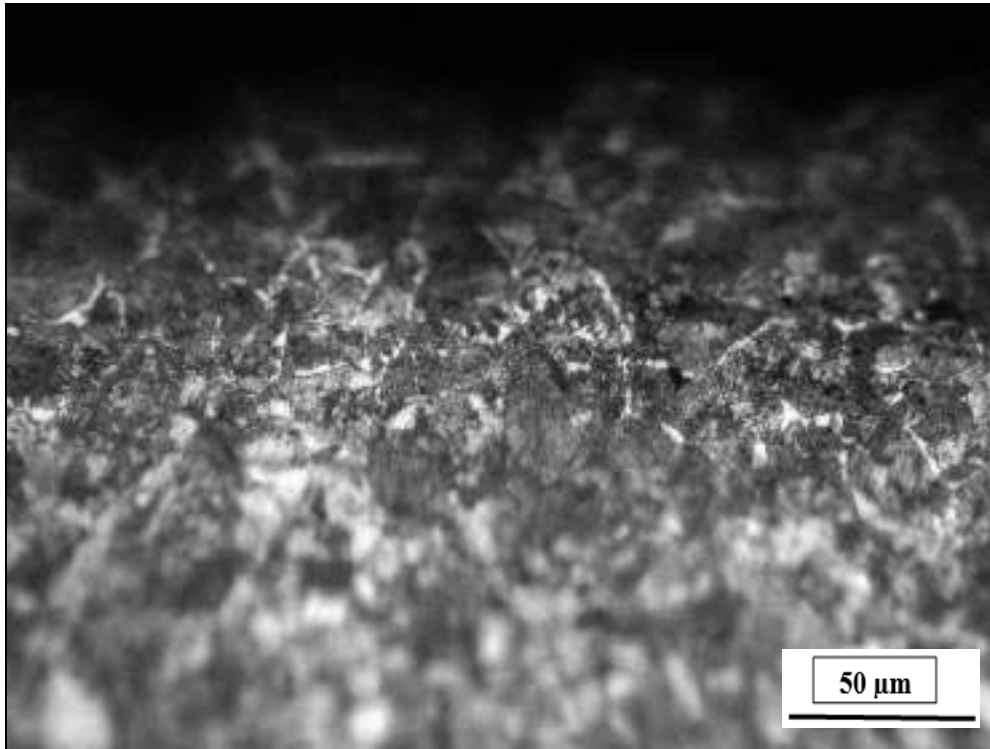


Рисунок 4.8 – Знеуглецьований шар біля поверхні кочення рейки x500

Дослідження показали наявність знеуглецьованого шару, який містить безперервну феритну сітку по границям перлітних колоній в ОМ головки рейок. Товщина знеуглецьованого шару непостійна, змінюється в залежності від розташування досліджуваної ділянки. Товщина знеуглецьованого шару змінюється від 100 мкм до 200 мкм, що не перевищує допустиму величину 280 мкм для рейок марки R350HT.

Визначали хімічний склад ОМ рейок K76Ф і R350HT в різних ділянках поперечного перерізу. Номери досліджених ділянок наведені на рис. 4.9.

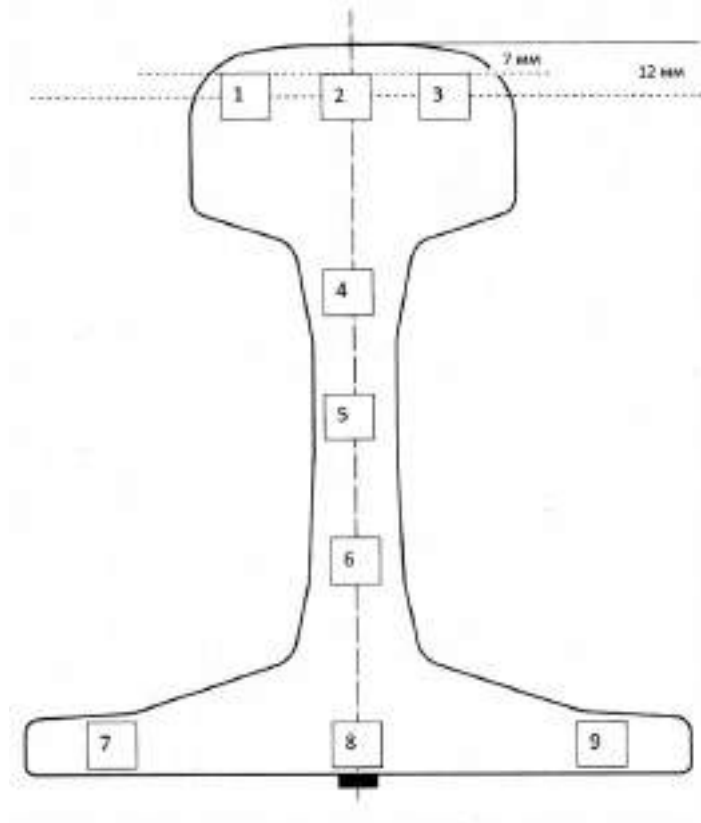


Рисунок 4.9 - Ділянки визначення хімічного складу рейки

Результати аналізу основних елементів в рейковій сталі К76Ф наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Вміст основних елементів в ОМ рейок К76Ф.

Ділянка №	Вміст основних елементів, вес. %								
	C	Si	Mn	Cr	Al	V	S	P	Fe
Макс.	0.82	0.45	1.30	-	<0.015	0.070	<0.040	<0.035	ост
Мін.	0.71	0.25	0.80	-	-	0.030	-	-	ост
2	0.76	0.40	1.127	0.032	0.005	0.057	0.018	0.017	ост.
3	0.77	0.33	1.115	0.038	0.005	0.061	0.021	0.021	ост.
5	0.76	0.37	1.095	0.040	0.005	0.059	0.017	0.023	ост.
6	0.79	0.31	1.114	0.041	0.005	0.050	0.022	0.019	ост
8	0.79	0.32	1.119	0.036	0.005	0.062	0.020	0.016	ост

Результати аналізу основних елементів в рейковій сталі R350HT наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Вміст основних елементів в в ОМ рейок R350HT

Ділянка №	Вміст основних елементів, вес.%								
	C	Si	Mn	Cr	Al	V	S	P	Fe
Макс.	0.82	0.58	1.20	-	<0.004	<0.030	<0.025	<0.020	ост
Мін.	0.70	0.15	0.70	0.15	-	-	-	-	ост
1	0.74	0.410	1.085	0.016	0.001	0.003	0.017	0.016	ост.
2	0.75	0.454	1.117	0.013	0.001	0.003	0.018	0.018	ост.
3	0.76	0.426	1.105	0.012	0.001	0.003	0.019	0.018	ост.
4	0.74	0.452	1.117	0.012	0.001	0.003	0.016	0.019	ост.
5	0.76	0.420	1.060	0.012	0.001	0.003	0.017	0.018	ост.
6	0.80	0.448	1.107	0.013	0.001	0.003	0.018	0.019	ост
7	0.74	0.458	1.108	0.012	0.002	0.003	0.016	0.019	ост.
8	0.79	0.444	1.114	0.012	0.001	0.003	0.018	0.018	ост
9	0.77	0.465	1.111	0.012	0.001	0.003	0.016	0.018	ост

Результати аналізу залишкових елементів в рейковій сталі R350HT наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Максимальний вміст залишкових елементів в ОМ рейок R350HT

Ділянка №	Вміст залишкових елементів, не більше, мас.%								
	Mo	Ni	Cu	Sn	Sb	Ti	Nb	Cu+10Sn	Cr+Mo+ Ni+Cu+V
Вимоги	<0.2	<0.1	<0.15	<0.03	<0.02	<0.025	<0.04	<0.35	<0.25
1	0.001	0.016	0.035	0.002	0.003	0.005	0.002	0.055	0.071
2	0.001	0.011	0.008	0.001	0.001	0.001	0.002	0.018	0.036
3	0.001	0.011	0.008	0.002	0.003	0.007	0.002	0.028	0.035
4	0.001	0.011	0.008	0.002	0.003	0.008	0.002	0.028	0.035
5	0.001	0.011	0.009	0.001	0.002	0.006	0.002	0.019	0.036
6	0.001	0.011	0.009	0.002	0.003	0.007	0.002	0.029	0.037
7	0.001	0.010	0.008	0.002	0.002	0.008	0.002	0.028	0.034
8	0.001	0.011	0.019	0.001	0.003	0.006	0.002	0.029	0.046
9	0.001	0.010	0.008	0.002	0.002	0.007	0.002	0.028	0.034

#### 4.2. Дослідження швидкості охолодження зварних з'єднань рейок в інтервалі температур 800-500°C від енергетичних параметрів КСЗО

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

Розрахунковим шляхом досліджували залежність швидкості охолодження  $W_{8/5}$  зварних з'єднань залізничних рейок типу Р65 (60E1) марок К76Ф і R350НТ в інтервалі температур 800-500°C від тривалості процесу оплавлення  $t_{\text{опл}}$  і величини енерговкладення  $Q$  при КСЗО. Розрахунками на основі розробленої математичної моделі процесу нагрівання при КСЗ пульсуючим оплавленням встановлено залежність потужності виділення енергії від значення технологічних параметрів процесу КСЗО. Проведений аналіз температурних полів при зміні  $t_{\text{опл}}$  в діапазоні  $t_{\text{опл}} = 50...140$  с показав, що значення енерговкладення  $Q$  змінюється в діапазоні  $Q = 9...18$  МДж.

При розрахунках швидкості охолодження  $W_{8/5}$  металу в ЗТВ з'єднання значення  $t_{\text{опл}}$  і  $Q$  змінювали у вищенаведених межах, а саме:  $t_{\text{опл}} = 50...140$  с і  $Q = 9...18$  МДж. Для оцінки структурного стану металу в ЗТВ з'єднань рейок Р65 марки К76Ф і 60E1 марки R350НТ використовували діаграму трансформації при безперевному охолодженні (ССТ діаграма) рейкової сталі К76Ф [136] з максимальним вмістом вуглецю в межах нормативних вимог [46]. Ціллю досліджень було визначення діапазону зміни величини енерговкладення  $Q$ , при якому в з'єднанні відсутні бейніт та мартенсит, забезпечується перлітна структура та досягаються показники твердості згідно до вимог чинних стандартів [100 -103].

При розрахунках значення струму, припуску та тривалості оплавлення, припуску на осадку та енерговкладення встановлювали для трьох різних режимів КСЗО, вказаних у табл. 4.4. Розрахунковий розподіл температури в ЗТВ з'єднань при КСЗО рейок Р65 (60E1) наведено на рис. 4.10.



Таблиця 4.4 – Режими КСЗО рейок Р65 (60Е1) марки К76Ф

Параметр	Режим КСЗО		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Тривалість оплавлення $t_{\text{опл.}}$ , с	50-60	70-90	110-140
Струм при оплавленні $I$ , А	370-390	370-390	370-390
Припуск на оплавлення $\Delta_{\text{опл.}}$ , мм	7-8	9-12	14-15
Припуск на осадку $\Delta_{\text{ос.}}$ , мм	12-13	12-13	12-13
Величина енерговкладення, $Q$ , МДж	9-10,8	11,5-14,0	14,4-18

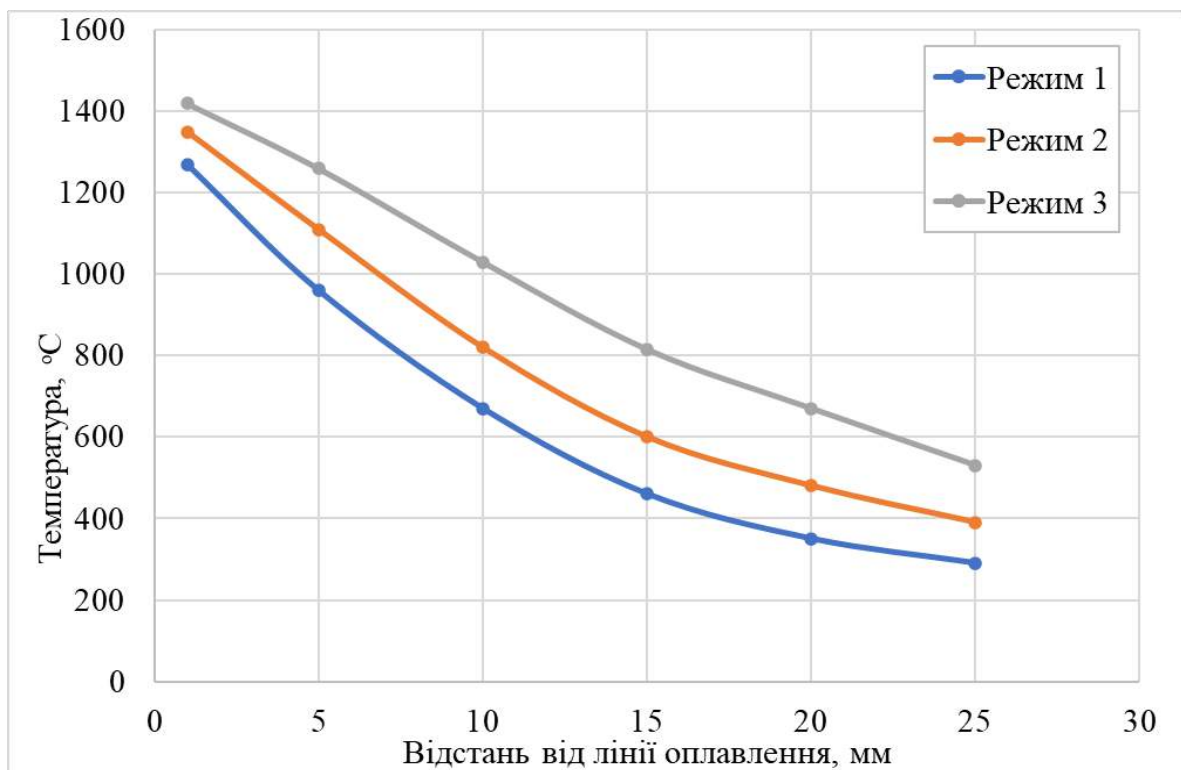


Рисунок 4.10 – Розподіл температури в ЗТВ перед осадкою при зварюванні рейок Р65 (60Е1) на режимах:  $t_{\text{опл.}} = 50 \dots 60$  с,  $Q = 9,0..10,8$  МДж (Режим 1);  $t_{\text{опл.}} = 70 \dots 90$  с,  $Q = 11,5..14,0$  МДж (Режим 2); ( $t_{\text{опл.}} = 110 \dots 140$  с),  $Q = 14,4..18,0$  МДж (Режим 3)

Для визначення діапазону зміни величини енерговкладення  $Q$ , при якому у зоні з'єднання відсутні бейніт та мартенсит, розрахункові криві охолодження (логарифмічна шкала часу) для різних режимів КСЗО накладали на діаграму трансформації при безперервному охолодженні (рис. 4.11). Встановлено, що

максимальне значення швидкості охолодження у зварному з'єднанні та ЗТВ досягається по лінії з'єднання, де температура нагрівання у процесі КСЗО була максимальна.

Аналіз даних рис. 4.11. показує, що для  $Q=9$  МДж (режим 1) максимальна швидкість охолодження по лінії з'єднання складає  $W_{8/5}=8,7$  °C/с, крива охолодження частково міститься в межах бейнітної області, значення твердості досягає 395HV30. Наявність бейніту в структурі металу зварного стика рейок не допускається чинними стандартами, тому режим 1 при значенні  $Q=9$  МДж є недопустимим за критерієм структурного стану металу в зоні з'єднання при дослідженні мікроструктури (див. табл. 1.7).

Для  $Q=12,6$  МДж (в межах режиму 2) швидкість охолодження складає  $W_{8/5}=3,75$  °C/с, крива охолодження міститься в межах області перлітного перетворення, значення твердості досягає 380HV30, що відповідає вимогам чинних нормативних документів. Для  $Q=16,2$  МДж (в межах режиму 3) швидкість охолодження складає  $W_{8/5}=2,75$  °C/с, крива охолодження повністю лежить в межах області перлітного перетворення, значення твердості досягає 368HV30. Отже, при КСЗО на режимах 2 і 3 зварні стики відповідають нормативним вимогам (див. табл. 1.7) за критерієм структурного стану металу в зоні з'єднання.

Встановлено, що при КСЗО з тривалістю оплавлення  $t_{\text{опл}}=55$  с і величиною енерговкладення  $Q=9,72$  МДж (в межах режиму 1) швидкість охолодження по лінії з'єднання складає  $W_{8/5}=7,0$  °C/с, крива охолодження проходить поза межами бейнітної області і міститься в межах області перлітного перетворення, тобто  $Q=9,72$  МДж відповідає мінімальному значенню  $W_{8/5}$ , при якому у з'єднанні рейок не утворюються гартівні структури.

Отже, розрахунковим шляхом визначено мінімальні значення тривалості процесу оплавлення  $t_{\text{опл.min}}=55$  с і енерговкладення  $Q_{\text{min}}=9,72$  МДж при КСЗО термічнозміцнених рейок з максимальним вмістом вуглецю в межах нормативних вимог, при яких забезпечується відсутність у зоні з'єднання бейніту та мартенситу.

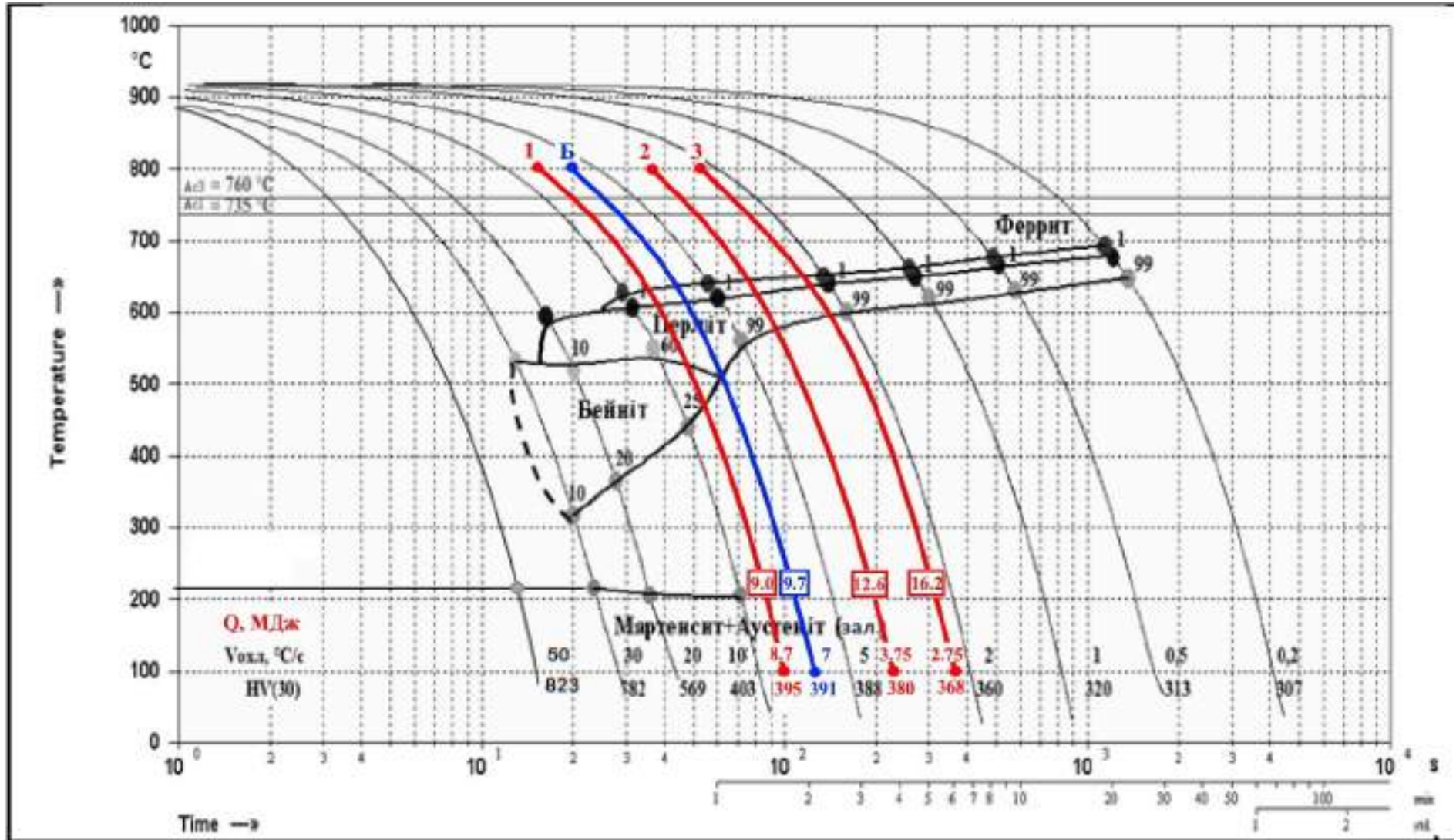


Рисунок 4.11 – CCT-діаграма сталі K76Ф [136] та розрахункові криві охолодження рейок, виконаних КСЗО

### 4.3. Визначення рекомендованих значень параметрів КСЗО залізничних рейок марки К76Ф і R350НТ за результатами механічних випробувань та металографічних досліджень

#### 4.3.1. Зварні з'єднання рейок марки К76Ф

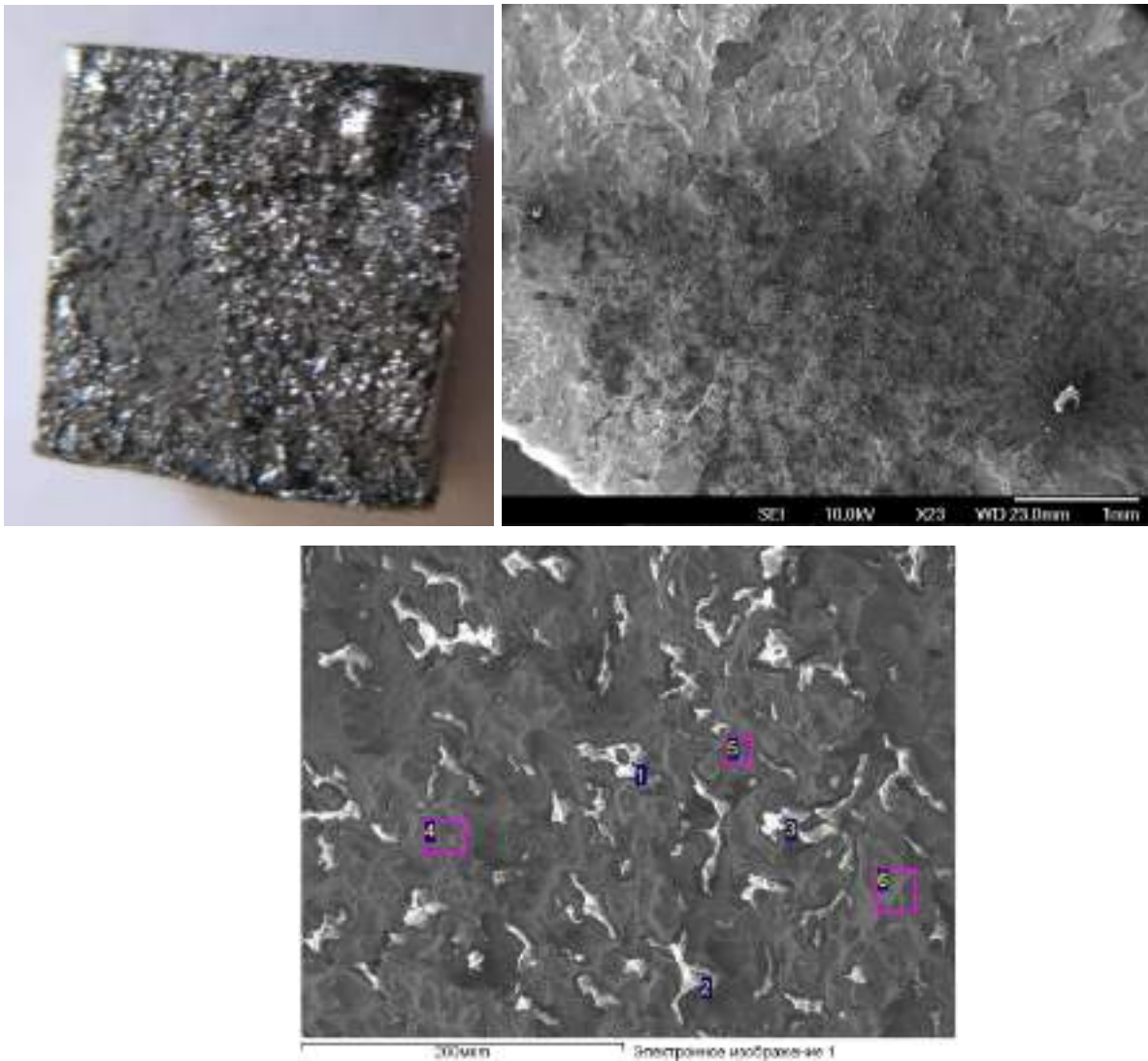
Виконували експериментальні дослідження КСЗО рейок Р65 марки К76Ф на режимах 1...3 (див. табл. 4.4) і проводили механічні випробування зварних стиків на статичний поперечний згин згідно до вимог [100–103]. Результати випробувань наведено в табл. 4.2. Як видно, режимами 1 і 3 – не відповідають нормативним вимогам по величині стріли прогину, а режим 2 – повністю відповідає цим вимогам.

Таблиця 4.5 - Результати випробувань зварних стиків рейок Р65 марки К76Ф на статичний поперечний згин

Номер режиму	Руйнівне навантаження, kN	Стріла прогину, мм
Вимоги згідно до [102]	$\geq 1650$	$\geq 30$
Режим 1	$\frac{1950-2250}{1950}$	$\frac{27-32}{28}$
Режим 2	$\frac{2000-2300}{2150}$	$\frac{35-45}{38}$
Режим 3	$\frac{1800-2000}{1900}$	$\frac{25-34}{29}$

Після випробувань на статичний згин зварних стиків, виконаних КСЗО на режимі 1, проводили аналіз структури зламів з'єднань. У зламах спостерігаються дефекти, які визначаються як «матові плями» (МП) – «flat spots» [114, 117] загальною площею більше 15 мм<sup>2</sup>, що не відповідає нормативним вимогам. МП виділяються на поверхні зламу нерозвиненим рельєфом і відрізняються сірим кольором. В структурі МП на тлі переважно ямкового зламу матриці (зустрічаються поодинокі фасетки відколу) присутні численні оплавленого виду включення (рис. 4.12).

За результатами локального мікрорентгеноспектрального аналізу, основу включень складають частки комплексних оксидів розміром декілька мікрон, до складу яких входять марганець, кремній, алюміній.



	C	O	F	Al	Si	Mn	Fe
1	3.27	66.66	3.49	1.11	16.48	8.12	0.86
2	1.63	61.08	2.73	2.15	16.70	14.73	0.99
3	2.41	68.91	3.16	1.32	16.39	6.90	0.90
4	4.43	1.57	0.00	0.11	0.00	0.80	93.09
5	5.51	0.86	1.88	0.00	0.18	0.81	90.76
6	4.70	1.50	0.00	0.00	0.15	1.11	92.54

Рисунок 4.12 – Матові плями у зламі з'єднань рейок К76Ф при КСЗО, режим 1.

Значне збільшення тривалості оплавлення та енерговкладення при КСЗО (Режим 3) призводить до зниження показників механічних властивостей при випробуваннях зварних стиків рейок. Це обумовлено, перш за все, збільшенням розміру зерна по лінії з'єднання і розвитком процесу виділення доєвтектоїдного фериту по границях первинних аустенітних зерен [137]. Отже, режим 3 ( $t_{\text{опл}}=110\dots140$  с,  $Q = 14,4\dots18$  МДж) не відповідає вимогам [100], хоча є допустимим за критерієм структурного стану металу в зоні з'єднання при дослідженні мікроструктури (див. табл. 1.7).

Аналіз отриманих результатів показує, що тільки при КСЗО на режимі 2 забезпечуються нормативні вимоги до зварних стиків рейок за критерієм показників механічних властивостей при випробуваннях на статичний згин.

Проводили металографічні дослідження зварного з'єднання рейок марки К76Ф, отриманого при КСЗО на режимі 2.



Мікроструктура металу по лінії з'єднання складається в основному з сорбіту, невеликих ділянок перліту, переважно балу зерна №2 (ГОСТ 8233-56). Уздовж границь зерен виділяється доевтектоїдний ферит у вигляді несучільних волокон (рис. 4.13). Ширина цієї ділянки становить приблизно 500 мкм.

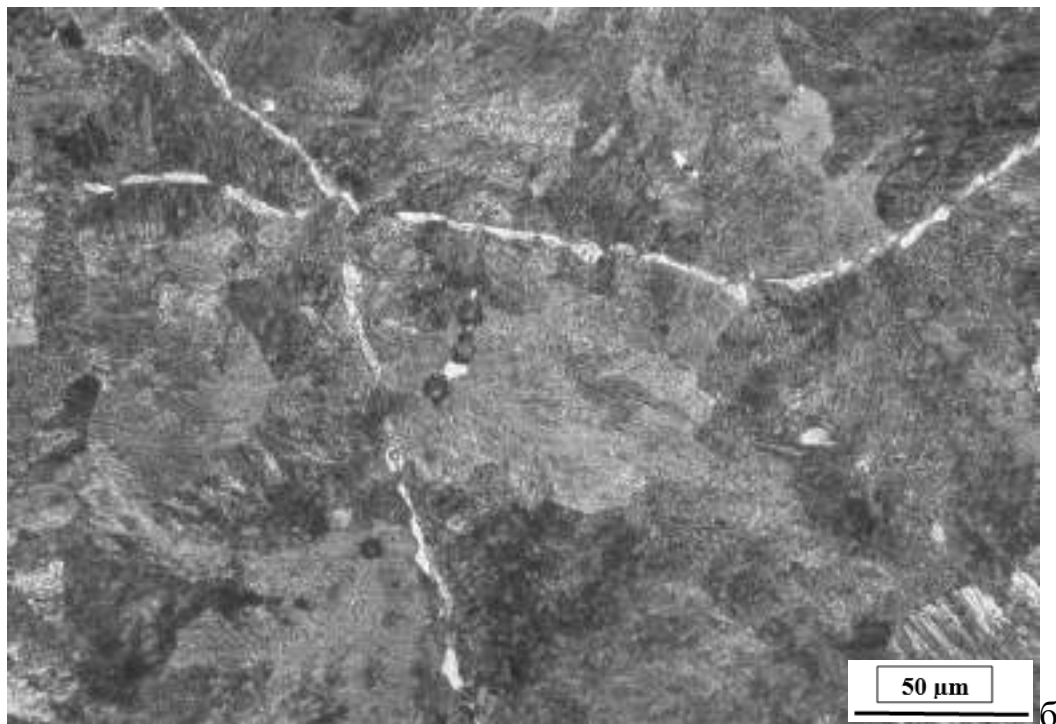
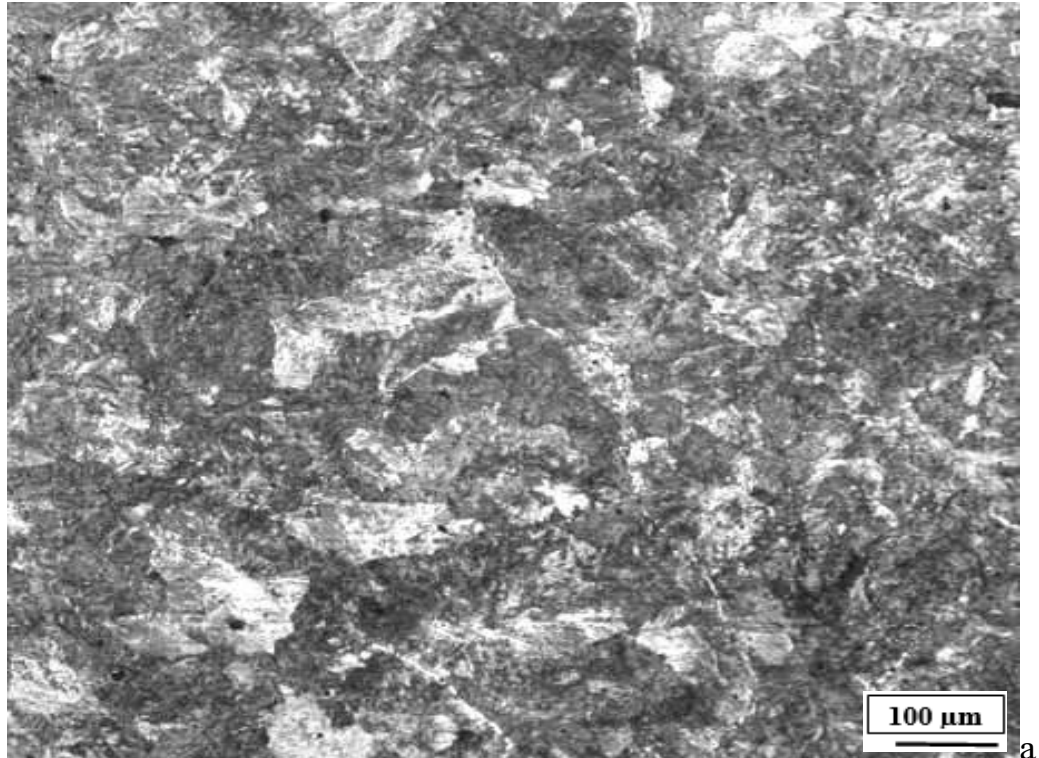


Рисунок 4.13 - Мікроструктура лінії зварного з'єднання рейок марки сталі К76Ф: а-х100, б-х400

У зоні перегріву (крупного зерна) структура характеризується наявністю сорбіту, троститу і перліту (рис. 4.14). Бал зерна поступово знижується від №2 до №3 і до №4 на відстані близько 8 мм від шва (біля ділянки нормалізації).

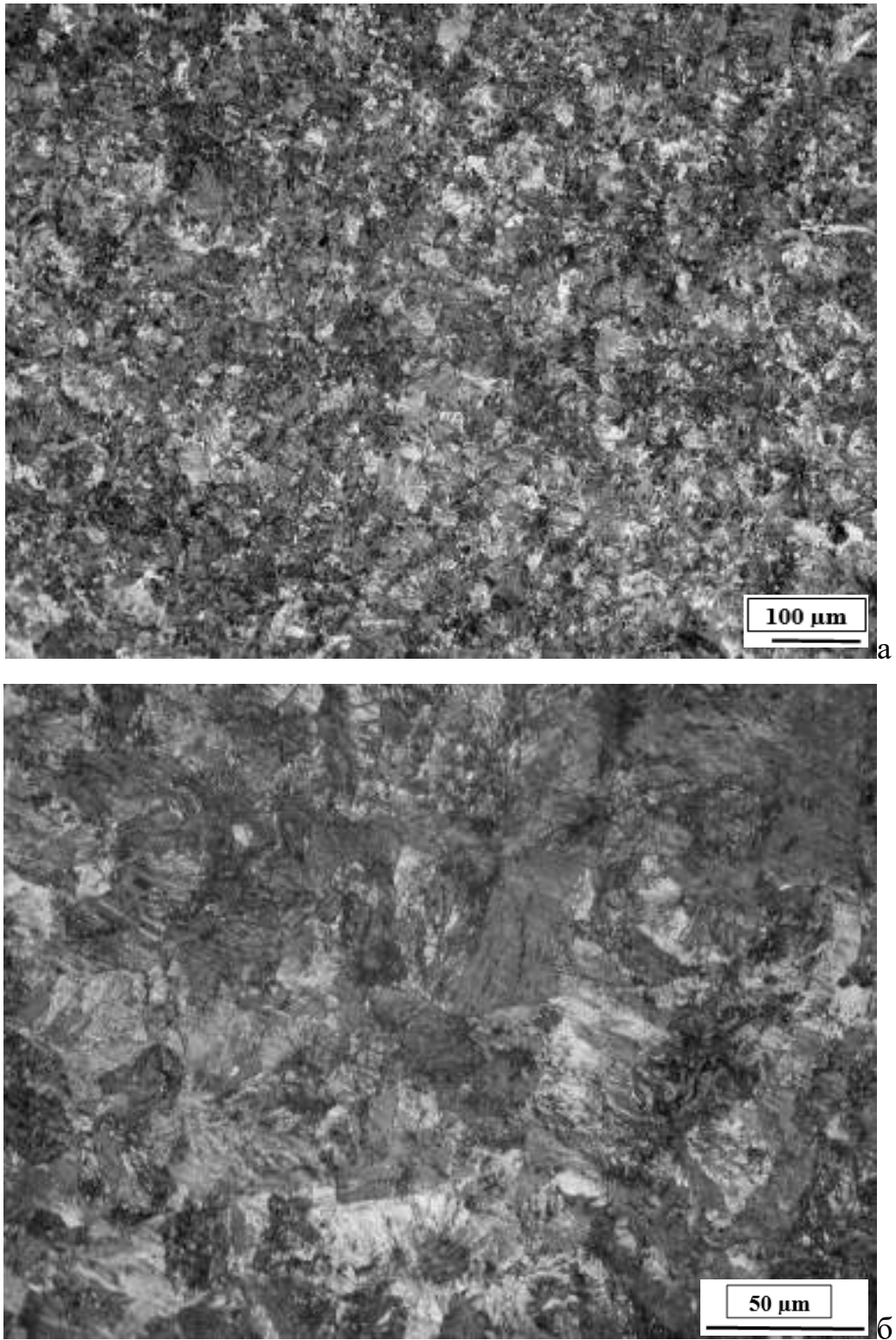


Рисунок 4.14 – Зона перегріву (крупного зерна) зварного з'єднання рейок марки сталі К76Ф: а-х100, б-х400



У зоні нормалізації (рис. 4.15) спостерігається подрібнення мікроструктури. Основним компонентом є сорбіт з рівномірно розташованими ділянками перліту (в невеликій кількості). Бал зерна на цій ділянці № 6.

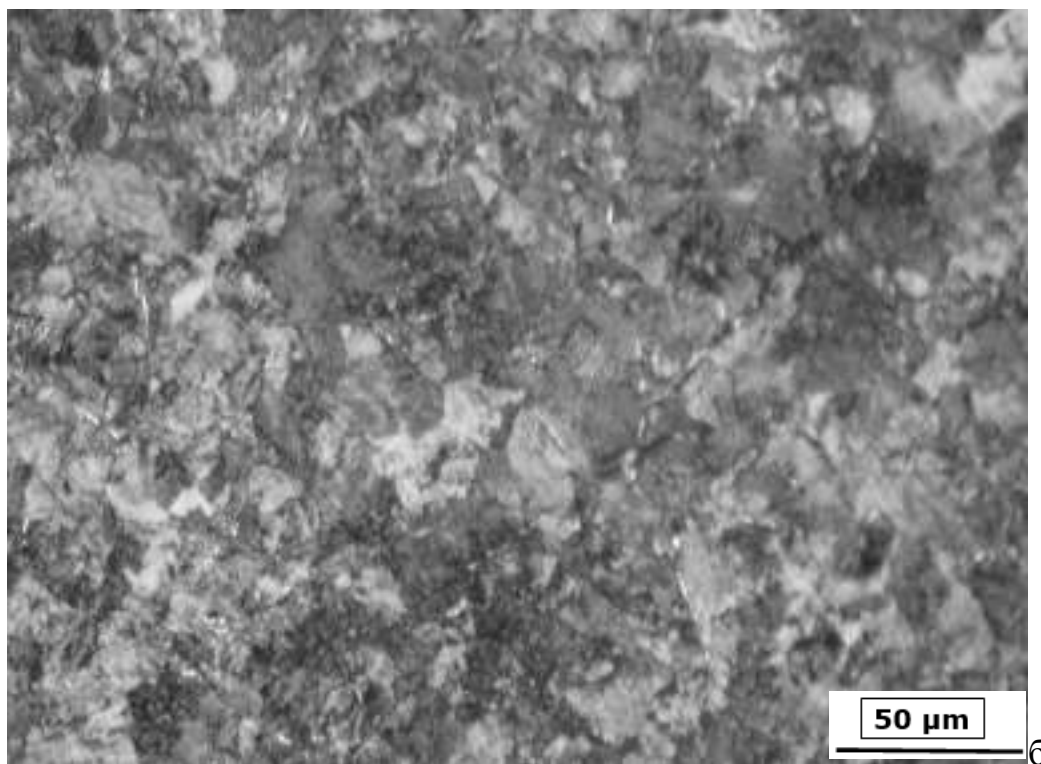
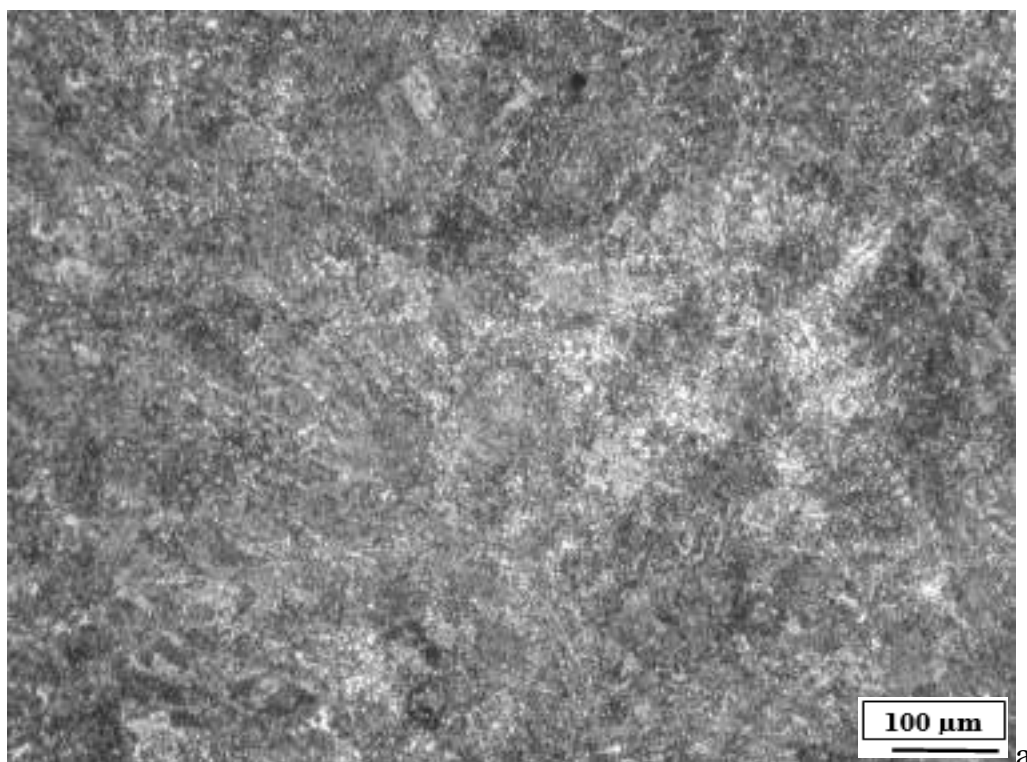


Рисунок 4.15 – Ділянка зони нормалізації з'єднання рейок марки К76Ф: а-  
х100, б-х400

Мікроструктура металу в місцях неповної перекристалізації дисперсна. Переважає сорбітна структура (рис. 4.16). Бал зерна не візуалізується через дисперсію конструкції. Ширина ділянки становить 3,0-3,5 мм.

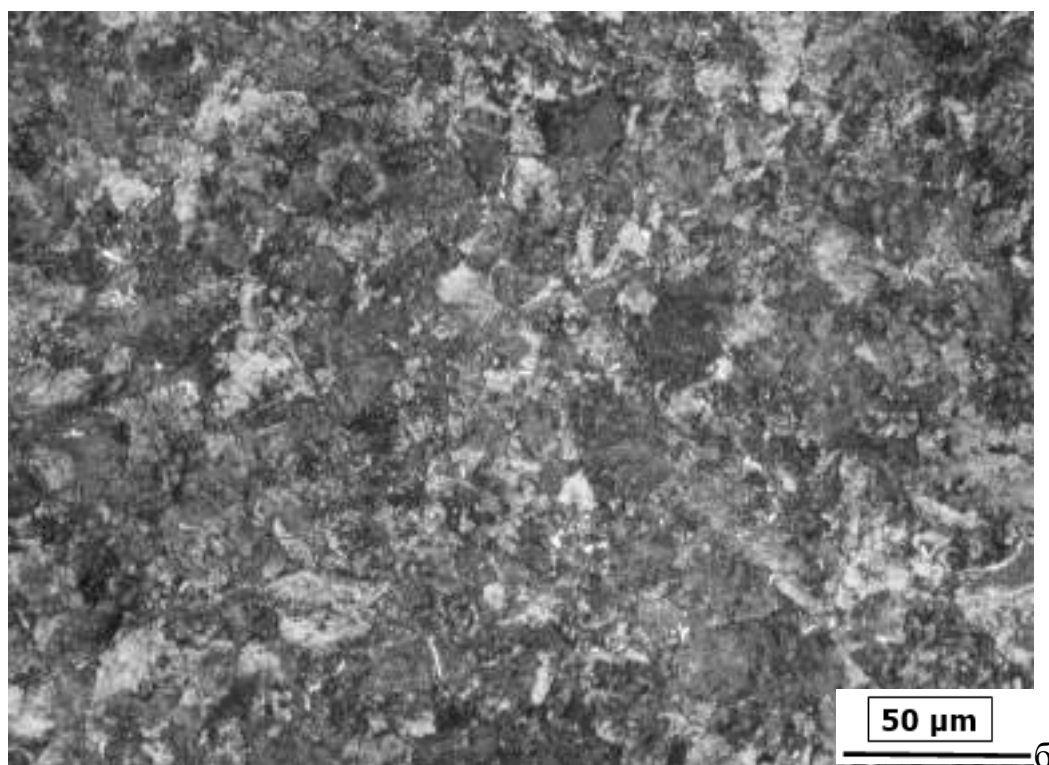
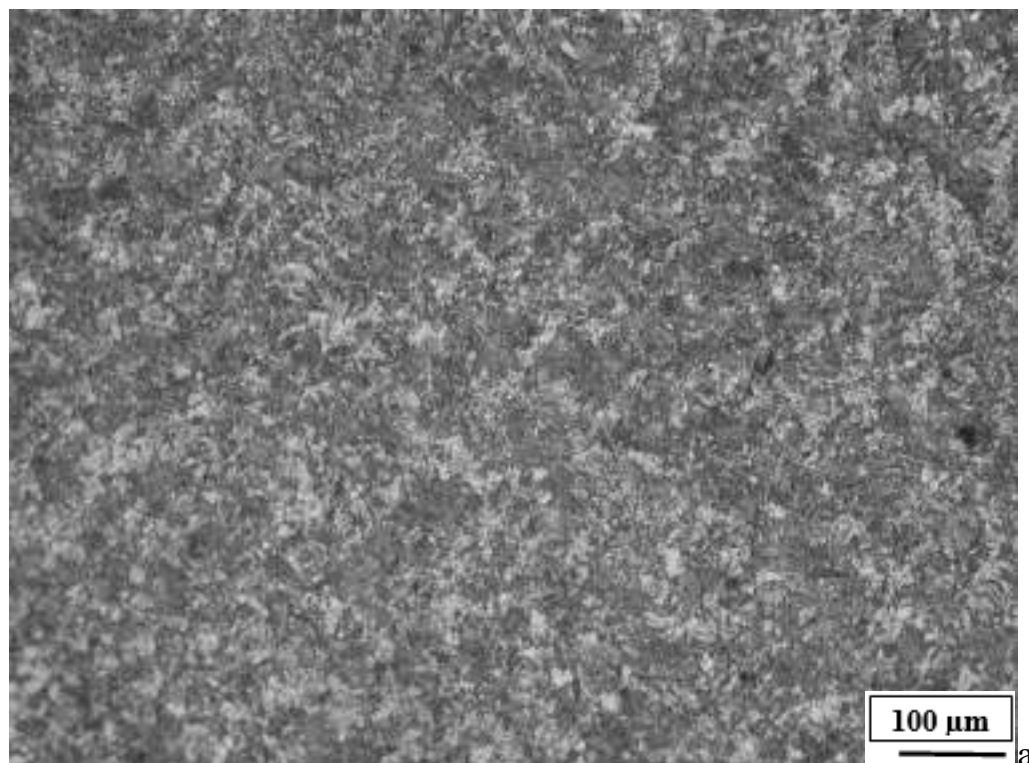


Рисунок 4.16 – Ділянка зони неповної перекристалізації з'єднання рейок марки К76Ф: а-х100, б-х400

Мікроструктура ОМ рейок К76Ф (див. рис. 4.1) і складається в основному з сорбіту і дуже невеликої кількості перліту. Твердість основного металу знаходиться на рівні 360-365HV30. Має місце різнозернистість - від бала №6, до бала № 7.

Макрошліф зварного з'єднання, виконаного КСЗО на режимі 2, приведено на рисунку 4.17, розподіл твердості – на рис. 4.16. У зварних стиках рейок К76Ф (рис. 4.18) у межах ЗТВ спостерігається зниження твердості до 290HV30. Ширина ЗТВ знаходиться в межах від 23 до 28 м, що відповідає нормативним вимогам.

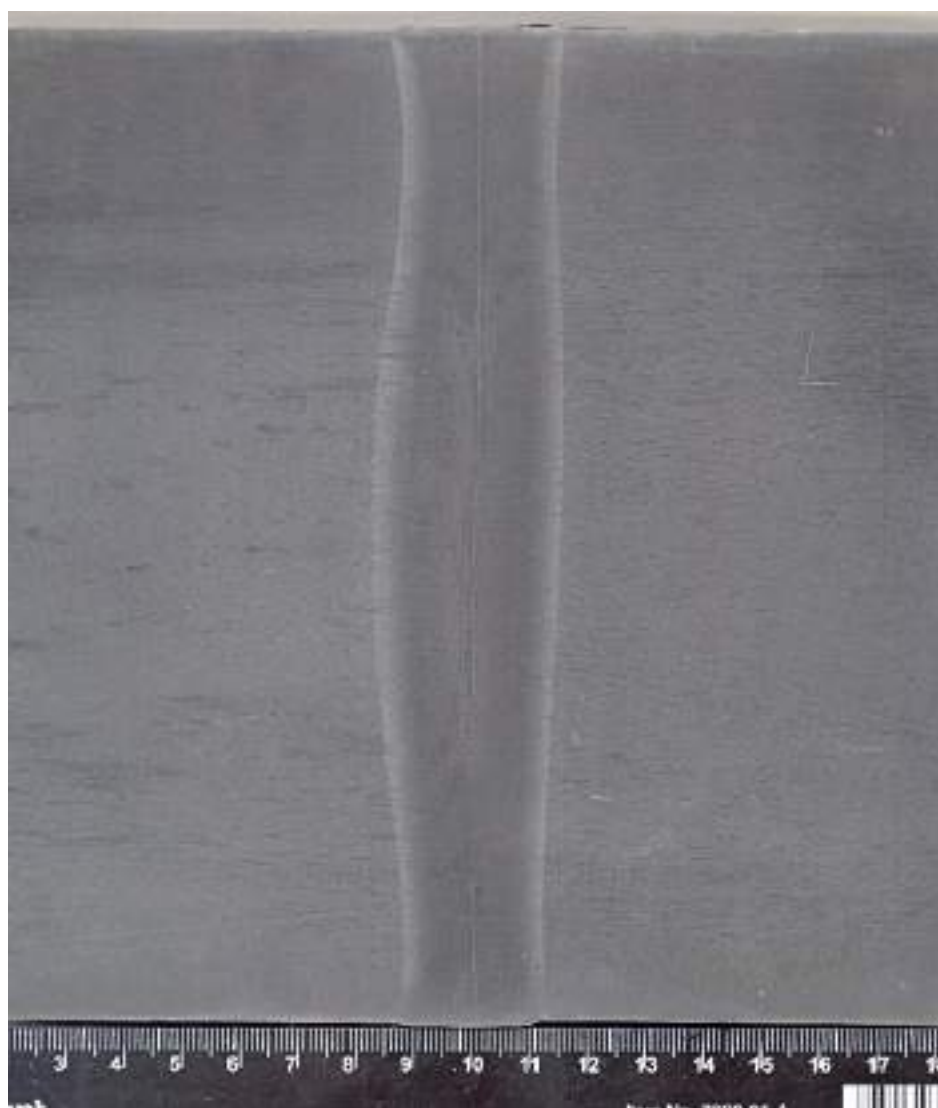


Рисунок 4.17 – Макрошліф з'єднання рейки К76Ф при КСЗО, режим 2

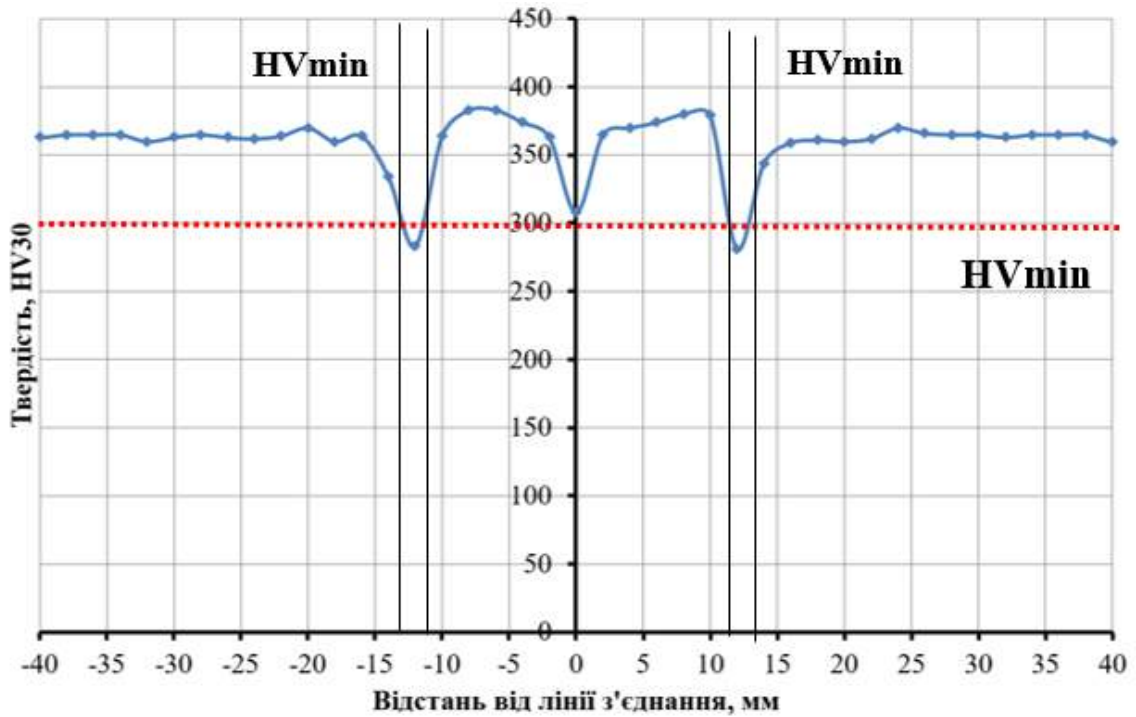


Рисунок 4.18 - Розподіл твердості в з'єднанні рейок К76Ф

На основі результатів розрахунків та даних експериментальних досліджень визначено рекомендовані значення параметрів КСЗО залізничних рейок марки К76Ф, при яких забезпечуються нормативні вимоги чинних стандартів [100 - 103] по всім розглянутим критеріям (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 – Рекомендовані значення параметрів КСЗО залізничних рейок К76Ф

Параметр	Значення
Тривалість оплавлення $t_{\text{опл.}}$ , с	70-90
Струм при оплавленні I, А	370-390
Припуск на оплавлення $\Delta_{\text{опл.}}$ , мм	11
Припуск на осадку $\Delta_{\text{ос.}}$ , мм	12
Величина енерговкладення, Q, МДж	11,5-14,0

### 4.3.2. Зварні з'єднання рейок 60E1 марки R350HT

Виконували експериментальні дослідження КСЗО термічнозміцнених рейок 60E1 марки R350HT на режимах 1 і 2 (табл. 4.7) і проводили механічні випробування зварних стиків на статичний поперечний згин згідно до вимог [100–103]. Результати випробувань наведено в табл. 4.8. Як видно, режим 1 – не відповідає нормативним вимогам по величині стріли прогину, а режим 2 – повністю відповідає цим вимогам.

Таблиця 4.7 – Режими КСЗО рейок 60E1 марки R350HT

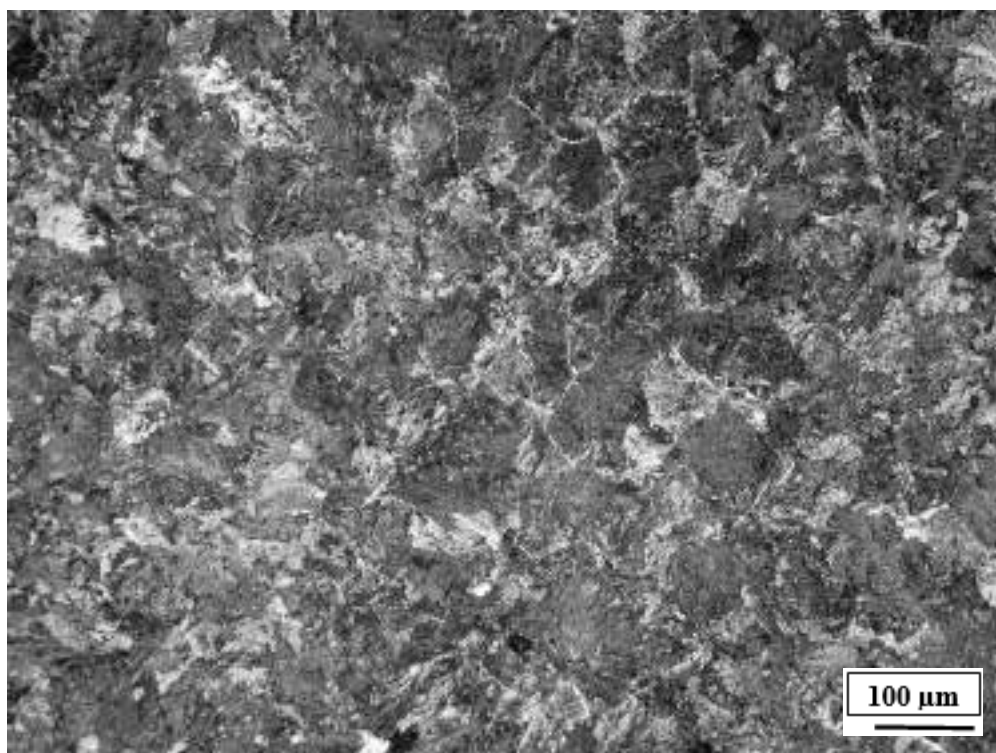
Параметр	Режим КСЗО	
	Режим 1	Режим 2
Тривалість оплавлення $t_{\text{опл.}}$ , с	110-140	70-90
Струм при оплавленні $I$ , А	370-390	370-390
Припуск на оплавлення $\Delta_{\text{опл.}}$ , мм	15	11
Припуск на осадку $\Delta_{\text{ос.}}$ , мм	12	12
Величина енерговкладення, $Q$ , МДж	14,4-18	11,5-14,0

Таблиця 4.8 – Результати випробувань зварних стиків рейок марки R350HT на статичний поперечний згин

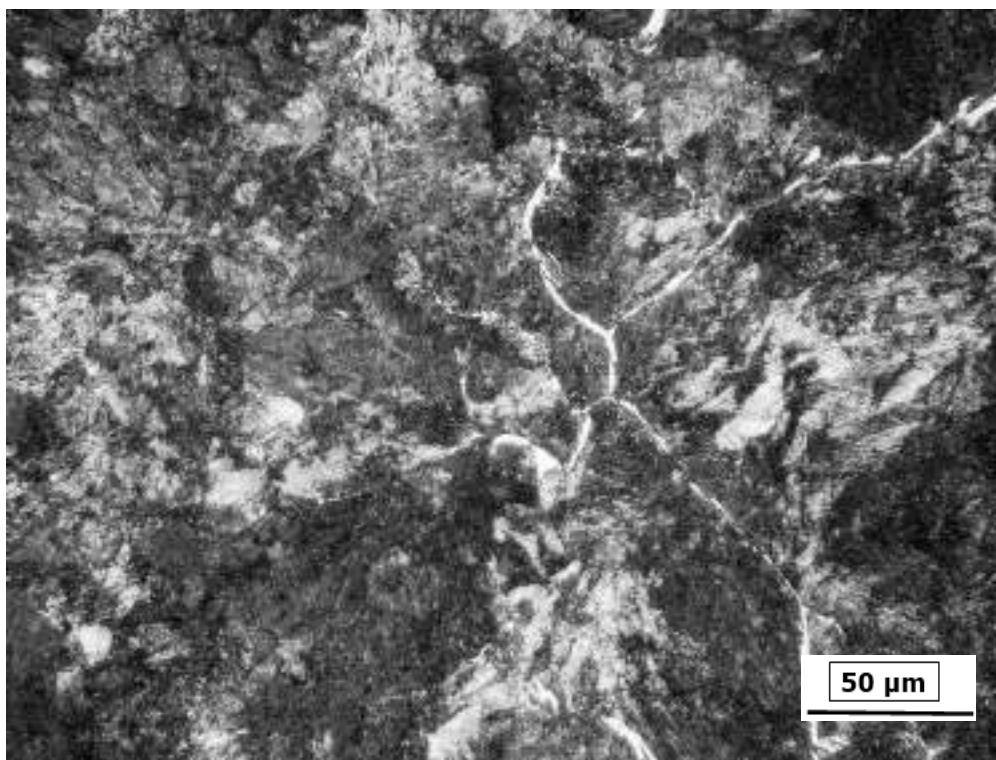
Режим КСЗО	Руйнівне навантаження, кN	Стріла прогину, мм
Режим 1	<u>1900-2100</u>	<u>27 – 31</u>
	1900	29
Режим 2	<u>2100-2350</u>	<u>34 – 41</u>
	2200	37

Металографічні дослідження зварного стика при КСЗО на режимі 2 (рис. 4.19) показали, що Уздовж границь зерен виділяється ферит у вигляді несучільних волокон шириною 2-4 мкм. Спостерігається бал зерна № 3. Ширина цієї ділянки становить приблизно 500...600 мкм.

Мікроструктура металу по лінії з'єднання складається в основному з сорбіту, невеликих ділянок перліту, переважно бал зерна №1 (рис.4.19).



а



б

Рисунок 4.19 – Мікроструктура лінії зварного з'єднання рейок марки R350HT:

а-х100, б-х400



У зоні перегріву (крупного зерна) структура характеризується наявністю сорбіту, троститу і перліту (рис. 4.20). Бал зерна поступово знижується від №2 до №3 і до №4 на відстані близько 8,3 мм від ЛЗ (біля зони нормалізації).

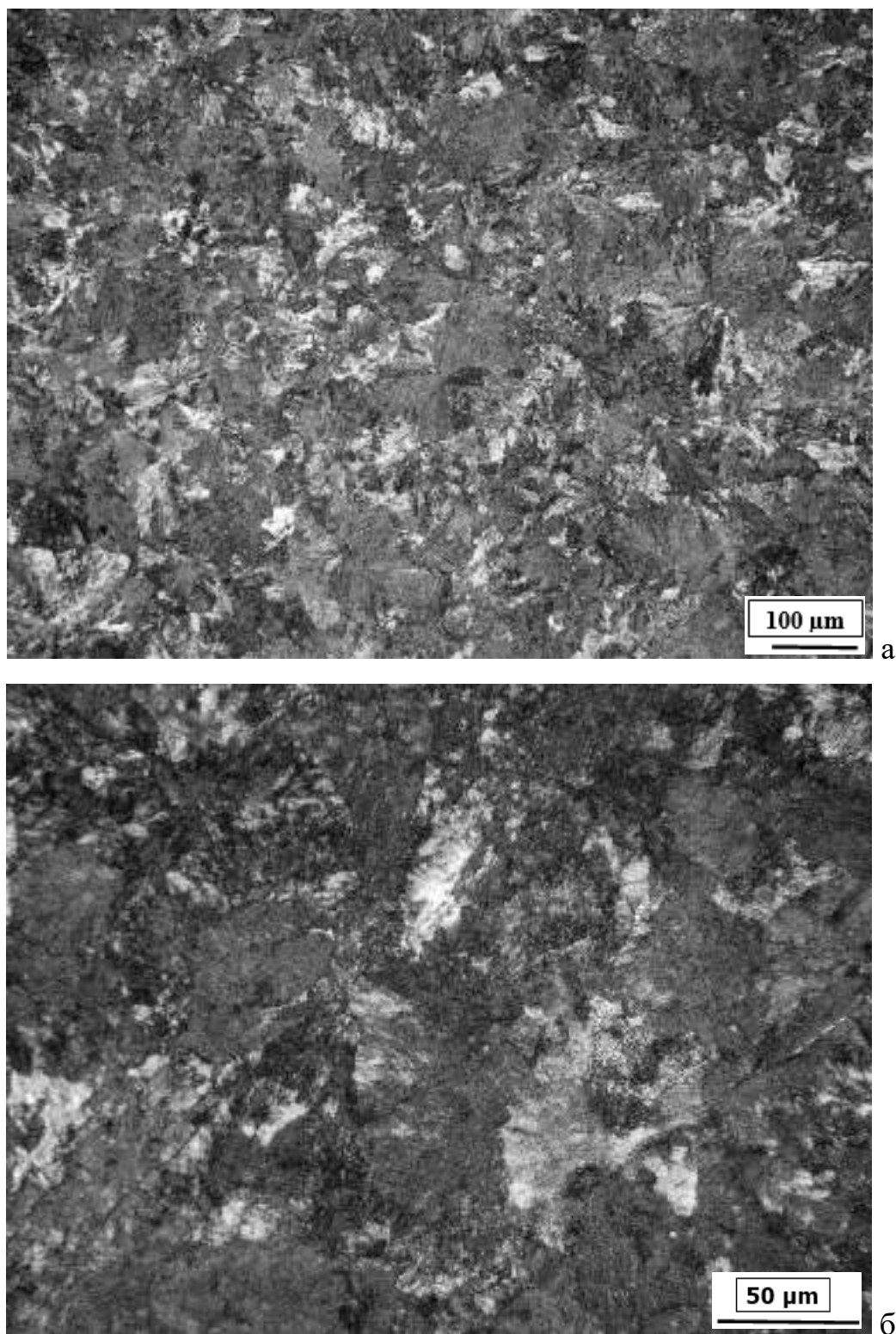


Рисунок 4.20 – Зона крупного зерна зварного з'єднання рейок марки сталі R350HT: а-х100, б-х400

У зоні нормалізації (рис. 4.21) основним компонентом є сорбіт з рівномірно розташованими ділянками перліту. Бал зерна на цій ділянці № 7.

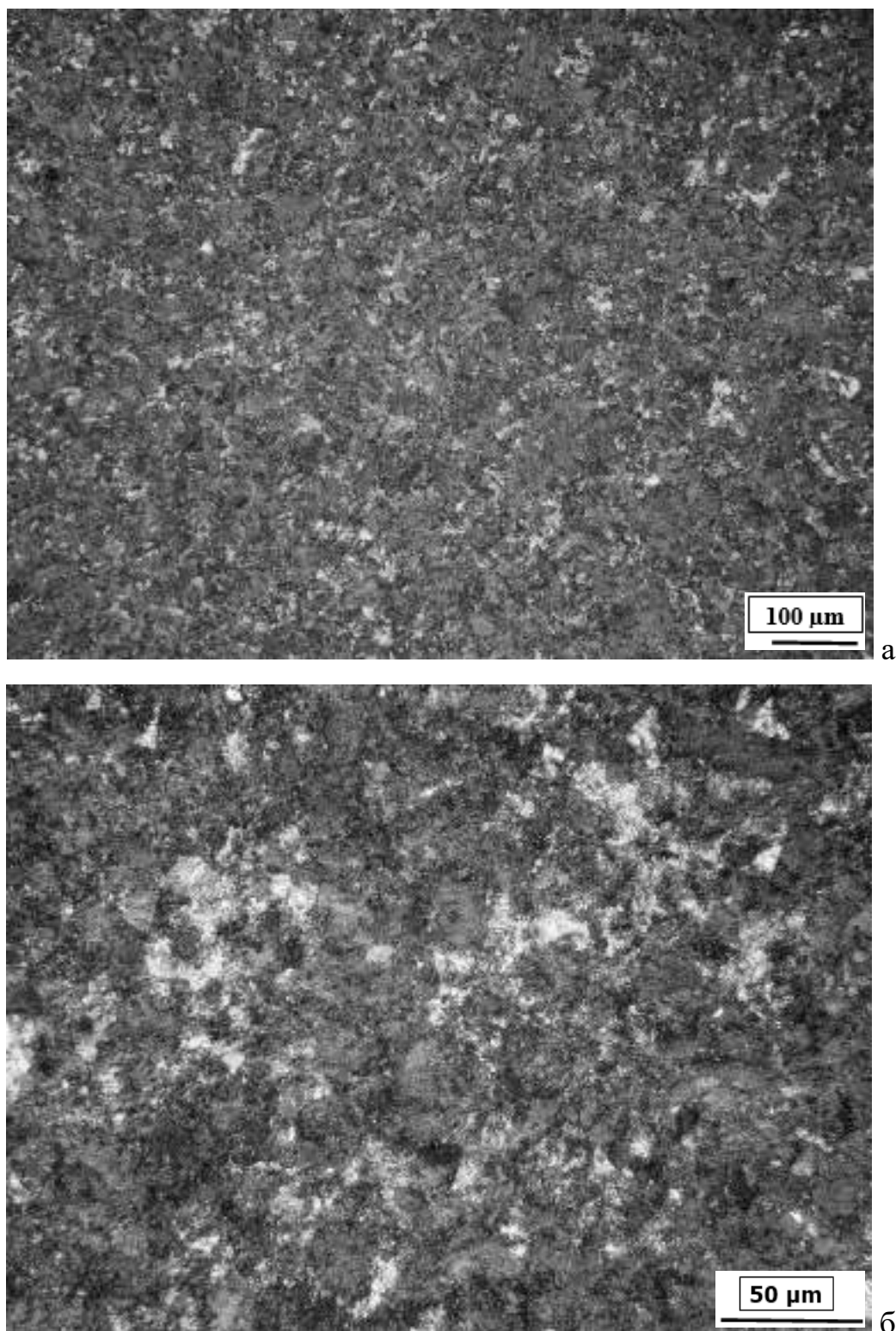


Рисунок 4.21 – Ділянка зони нормалізації зварного з'єднання рейок марки сталі R350HT: а-х100, б-х400



Мікроструктура металу в зоні неповної перекристалізації – дрібнозерниста. Переважає сорбітна структура (рис. 4.22). Ширина зони становить 3,2-3,6 мм.

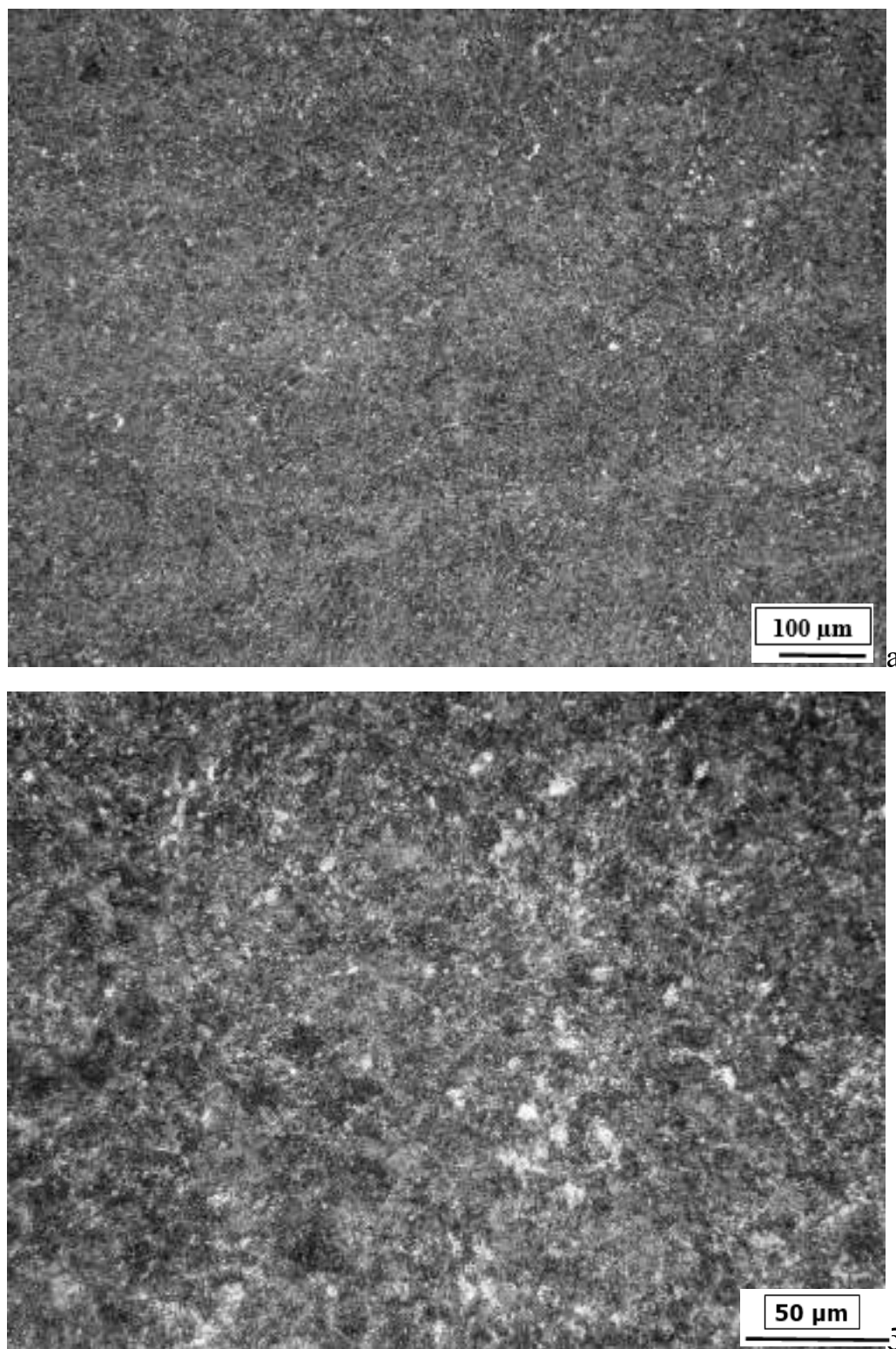


Рисунок 4.22 – Ділянка зони неповної перекристалізації зварного з'єднання рейок марки сталі R350HT: а-х100, б-х400

Мікроструктура основного металу (див. рис. 4.4) і складається в основному з сорбіту і дуже невеликої кількості перліту. Твердість основного металу знаходиться на рівні 360-365HV30. Має місце різнозернистість - від бала №6, до бала № 7.



Рисунок 4.23 – Макрошліф з'єднання рейок R350HT при КСЗО, режим 2

Макрошліф зварного з'єднання рейок R350HT при КСЗО на режимі 2 приведено на рисунку 4.23, розподіл твердості – на рис. 4.24.

Ширина ЗТВ знаходиться в межах від 24 до 29 м, що відповідає нормативним вимогам.

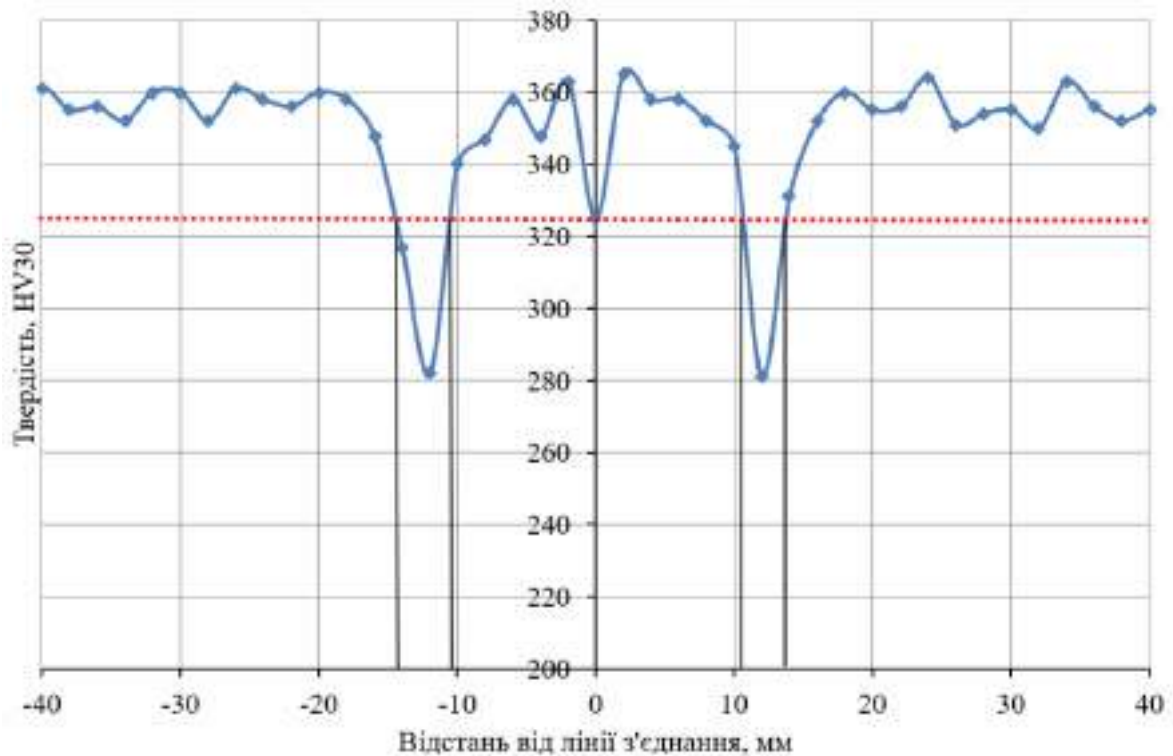


Рисунок 4.24 - Розподіл твердості в з'єднанні рейок R350HT, режим 2

У зварних з'єднаннях рейок марки R350HT (рис. 4.32) у межах ЗТВ спостерігається зниження твердості до 280 HV30. Протяжність таких ділянок не перевищує 4 мм, тому їх наявність не має негативного впливу на показники зносостійкості зварних стиків рейок. Ширина ЗТВ з'єднання становить близько 24-29 мм (рис. 4.23). В результаті проведених досліджень визначено діапазон зміни основних параметрів зварювання та енерговкладення  $Q$ , при яких забезпечується регламентовані вимоги чинних стандартів до зварних стиків рейок R350HT. Рекомендовані параметри КСЗО залізничних рейок R350HT приведені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Рекомендовані параметри зварювання залізничних рейок марки сталі R350HT

Параметр КСЗО	Значення
Тривалість зварювання, с	80-90
Зварювальний струм, кА	360-380
Припуск на оплавлення, мм	10-13
Величина осадки, мм	12-14
Величина енерговкладення, МДж	11,88-14,4

#### 4.4. Технологія КСЗО термічнозміцнених залізничних рейок K76Ф і R350HT конверторного виробництва

Порівняльний аналіз результатів механічних випробувань дозволив визначити діапазони зміни основних технологічних параметрів та величини енерговкладення  $Q$ , при яких забезпечується регламентовані вимоги чинних стандартів до зварних стиків рейок марки K76Ф і рейок R350HT. Визначено спільні діапазони, в яких регламентовані вимоги забезпечуються для обох марок рейок (табл. 4.10). Зокрема, спільний діапазон зміни величини енерговкладення  $Q$ , в якому забезпечуються вимоги стандартів [100-103] для рейок марок K76Ф і R350HT, становить  $Q=11,88-14,0$  МДж. Результати досліджень показують (табл. 4.11), що величина  $Q$  може бути використана у якості комплексного параметра, який враховує вплив інших енергетичних параметрів процесу КСЗО на розподіл температур, формування макро- та мікроструктури з'єднань, розподіл твердості та показники механічних властивостей зварних стиків рейок [138].

Таблиця 4.10 - Основні параметри КСЗО рейок К76Ф і R350НТ

Значення параметру КСЗО	Марка рейок		
	К76Ф	R350НТ	Для обох марок рейок
Час зварювання, с	70-90	80-90	80-90
Зварювальний струм	370-390	360-380	370-380
Припуск на оплавлення, мм	9-12	10-13	10-12
Величина осадки, мм	12-13	12-14	12-13
Величина енерговкладення, МДж	11,5-14,0	11,88-14,4	<b>11,88-14,0</b>

Таблиця 4.11 - Результати досліджень регламентованих показників зварних з'єднань рейок

Марка сталі	Випробування на згин		Ширина ЗТВ, мм	Розподіл твердості в ЗТВ, НV	
	Руйнівне навантаження, кН	Стріла прогину, мм		min	max
К76Ф	<u>2000-2300</u> 2150	<u>35 – 45</u> 38	23...28	305	385
R350НТ	<u>2100-2350</u> 2200	<u>34 – 41</u> 37	24...29	320	380

Розроблена технологія успішно впроваджена на рейкозварювальному підприємстві АТ «Укрзалізниця» при КСЗО рейок К76Ф на мобільних машинах К900М і К922, що засвідчено актами технологічних випробувань (Додаток А).

## Висновки до розділу 4

1. Розрахунковим шляхом встановлено залежність швидкості охолодження  $W_{8/5}$  зварного з'єднання рейок типу Р65 (60Е1) в інтервалі температур 800-500°C від тривалості процесу оплавлення  $t_{\text{опл}}$  і величини енерговкладення  $Q$  при КСЗО. Максимальне значення швидкості охолодження у зварному з'єднанні досягається по лінії з'єднання і змінюється від  $W_{8/5}=8,7$  до  $W_{8/5}=2,4$  °C/c при збільшенні  $t_{\text{опл}}$  і  $Q$  в межах  $t_{\text{опл}} = 50 \dots 140$  с і  $Q=9 \dots 18$  МДж.

2. Визначено мінімальне значення тривалості процесу оплавлення  $t_{\text{оплmin}}=55$  с і енерговкладення  $Q_{\text{min}}=9,72$  МДж при КСЗО рейок типу Р65 (60Е1) марок К76Ф і R350НТ, при якому швидкість охолодження з'єднання в інтервалі температур 800-500°C не перевищує  $W_{8/5}=7,0$  °C/c, забезпечується відсутність у зоні з'єднання бейніту, мартенситу і формується перлітна структура різної дисперсності (перліт, сорбіт, троостит).

3. На основі результатів механічних випробувань, металографічних досліджень та вимірювання твердості визначено спільний діапазон зміни величини енерговкладення  $Q$ , в якому забезпечуються вимоги чинних нормативних документів для зварних стиків рейок марок К76Ф і R350НТ, який становить  $Q=11,88-14,0$  МДж.

## РОЗДІЛ 5

### ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ КСЗО ПРИ ЗВАРЮВАННІ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

#### 5.1. Система керування та контролю процесом КСЗО рейок

У процесі досліджень і накопиченого досвіду виробничого використання розроблених технологій було встановлено, що при КСЗ методом пульсуючого оплавлення, необхідно більш жорстке обмеження допустимих відхилень встановлених параметрів зварювання, особливо впливають на величину енерговкладення. Замість використання жорстких програм зміни основних параметрів, прийнятих під час зварювання стандартних рейок, розроблена самоналагоджувальна система регулювання параметрами КСЗО. Система дозволяє у виробничих умовах підтримувати оптимальний режим стійкого оплавлення і нагріву, в значній мірі незалежно від зміни умов експлуатації.

Стабільне відтворення процесу зварювання вимагає точного контролю енерговкладення, що забезпечується системою автоматичного управління процесом оплавлення, а контроль здійснюється з використанням операційної системи контролю параметрів зварювального процесу.

Була розроблена комп'ютеризована система керування КСУ КС 02 процесом КСЗО залізничних рейок, блок-хема якої наведена на рис. 5.1. Система керування складається з пульта оператора, блоку керування, гідроприводу Bosch, промислового комп'ютера, контролера Siemens та блоку комп'ютерної системи керування контактним зварювання (КСК КЗ) (рис. 5.1).

Контролер КСУ КС 02 (рис. 5.2) здійснює вимірювання зварювального струму з періодом 10 мс та передачу цих даних у контролер «Сіменс», а також стабілізацію напруги на первинному ланцюзі зварювального трансформатора шляхом регулювання кута включення тиристорного контактора відповідно до коду, отриманого від контролера «Сіменс».

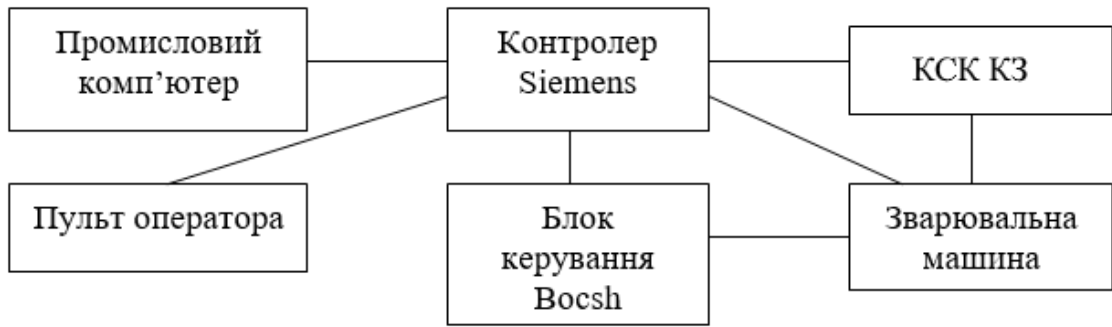


Рисунок 5.1 - Схема системи керування процесом КСЗО

Зв'язок між ПК та контролером «Сіменс» здійснюється послідовним каналом типу RS232, між КСУ СО і контролером «Siemens» по послідовному каналу типу RS485.

Сигнали з частотою 100Гц від КСК КЗ є одночасно синхронізуючими для контролера «Сіменс».



Рисунок 5.2 - Контролер КСУ КС 02

При зварюванні залізничних рейок на стаціонарних і підвісних контактних машинах здійснюється контроль технологічних параметрів режиму з фіксацією їх комп'ютерною системою для кожного звареного стику. Одночасно здійснюється УЗ контроль цих стиків. Періодично проводяться механічні випробування зварених рейок і видається висновок про відповідність заданого технологічного режиму необхідній якості зварювання. Контроль



процесу здійснюється за рахунок перевірки наявності параметрів режиму в допусках, установлених технічними умовами (ТУ).

На сьогодні комп'ютерними системами контролю оснащені стаціонарні й пересувні рейкозварювальні машини нового покоління типу K1000, K920, K922. Схеми керування машин побудовані на основі промислових контролерів SIEMENS. Сучасна елементна база дозволила відтворювати з високою точністю значення параметрів режиму, регламентовані ТУ на зварювання залізничних рейок. Однак навіть у цьому випадку не можна виключити можливість появи дефектів у зварених з'єднаннях, якщо під дією випадкових зовнішніх факторів змінилася зона розігріву, пластична деформація або стабільність оплавлення. У виробничих умовах виникають різні технологічні й електричні збурення, які приводять до порушення стабільності процесу й, відповідно, до погіршення якості зварювання.

Саме тому необхідний пошук нових параметрів і алгоритмів керування, що підвищують вірогідність прогнозування якості зварених з'єднань.

Метою роботи стала розробка алгоритмів для системи керування процесом зварювання оплавленням у стаціонарних і польових умовах, які забезпечують контроль якості стиків по параметрах процесу й контроль технічного стану зварювального встаткування. Ці алгоритми втілюються в дворівневу систему контролю та управління. Така система, крім прямого цифрового керування зварювальним процесом і контролю параметрів процесу по допускам виконує наступні функції:

- прогнозування якості зварного стику за параметрами процесу та підвищення достовірності його за рахунок застосування більш досконалих алгоритмів і залучення до прогнозування кваліфікованих фахівців;

- контроль технічного стану зварювального обладнання, систематизація видів зносу вузлів зварювального обладнання, поділ їх на загальні для всіх машин даного типу та приватні для конкретних машин, вироблення рекомендацій та планування технічного обслуговування зварювального устаткування;

- виявлення і розпізнавання аварійних ситуацій (неприпустимих відхилень параметрів процесу зварювання, технічного стану обладнання, виконання допоміжних технологічних операцій, даних механічних випробувань, неприпустимого відхилення напруги мережі, охолодження тощо) для негайного втручання в технологічний процес;

- систематизація відхилень параметрів процесу зварювання, які можуть призводити до погіршення показників якості зварних з'єднань, поділ цих збурень на загальні для всіх рейкозварювальних підприємств та особливі, характерні лише для окремих зварювальних машин, розробка рекомендацій щодо коригування параметрів режиму зварювання;

- непрямий контроль по ходу процесу зварювання відхилень у виконанні допоміжних технологічних операції (підготовки торців до зварювання), в стані допоміжних об'єктів (трансформаторної підстанції, обладнання підготовки торців) з метою їх усунення або протидії на зазначених конкретних об'єктах і вироблення рекомендацій щодо коригування технологічного процесу і технологічних операцій.

Для усунення вад традиційного алгоритму (де не враховується значимість впливу кожного з параметрів на показник якості, «розмитість» межі допусків параметрів процесу, можливе посилення впливу на вихідну функцію певної комбінації відхилень) було використано нечіткий алгоритм операційного контролю, у якому достовірність якісного зварювання кожного параметра має імовірнісний характер завдяки так званим функціям приналежності, а об'єднання параметрів у алгоритму контролю виконується відповідним логічним функціям, які враховують якісні залежності параметрів між собою та показником якості [139, 140].

Процес КСЗО можна розбити на наступні етапи:

- зняття косини поверхонь, що зварюються, з метою підготовки торців деталей до стабільного процесу оплавлення;

- оплавлення, що створює необхідне температурне поле (ТП) в приконттактних шарах металу (Me), що примикають до поверхні оплавлення:

градієнта температури ( $T_e$ ), зони термічного впливу (ЗТВ) і появи на торцях тонкого шару розплавленого Ме;

- етап інтенсивного оплавлення перед осадкою (форсування), який має мету створення умов формування шару розплавленого металу на торцях і захисного газового середовища в іскровому проміжку з парів металу і легуючих елементів сталі;
- формування з'єднання в твердій фаз (осадка).

## 5.2. Особливості процесу КСЗО у логічних залежностях

Під час аналізу впливу основних параметрів зварювання на стабільність процесу КСЗО та якість зварних з'єднань вдалося визначити основні залежності між параметрами. Для цього процес контактного стикового зварювання розіб'ємо на наступні етапи:

1. **Зняття косини поверхонь**, що зварюються, з метою підготовки торців деталей до стабільного процесу оплавлення.

Для порушення оплавлення зі швидкістю  $V_l$  задається відповідна напруга  $U_l$ , струм  $I_{on}$ , швидкість оплавлення  $V_{on}$ . Тривалість етапу  $T_1$ , термічний к.к.д.  $\eta_m$  (відношення енергії збільшення теплового накопичення  $\Delta Q_T$  до активної енергії  $\Delta Q_a = P_{оп} * \Delta T_2$  в іскровому зазорі за час  $\Delta T_2$ ) залежать від форми торців і дуже нестабільні. Збільшена косина і висока напруга  $U_1$ , зниження  $Z_{кз}$  призводять до прискорення етапу оплавлення косини. В кінці  $T_1$  нагрів торців і температурне поле (ТП) відповідно теж нестабільні. ТП<sub>1</sub> треба враховувати на етапі 2.

2. **Оплавлення** створює необхідне ТП в приконтактних шарах металу (металу), що примикають до поверхні оплавлення: градієнта температури ( $T_e$ ), зони термічного впливу (ЗТВ) і появи на торцях тонкого шару розплавленого металу.

Заданому (оптимальному)  $V_0$  відповідає припуск  $S_0$ , якому відповідає квазістаціонарне ТП зі своїм градієнтом температури, ЗТВ або глибиною

прогріву і товщиною рідкого металу (ТРМ) на торцях до . Оптимальне значення  $V_o$  має екстремум, яке залежить від того з якою швидкістю метал на торцях може бути розплавлений і частково нагрітий до  $T_e$  кипіння. Мале і велике значення  $V_o$  негативно для якості. Чим вище  $\eta_t$  і більше вкорочення, тим більший нагрів торців і ЗТВ.

Швидкості  $V_o$  відповідає струм оплавлення  $I_o$ , активна потужність  $P_o = U_o * I_o * \cos\phi$  і при тривалості оплавлення  $T_o = S_o/V_o$  активна енергія  $Q_o = U_o * I_o * \cos\phi * S_o/V_o$ .

При збільшенні  $V_o$  звужується ЗТВ, збільшується  $T_e$  градієнт, має місце більш рівномірний нагрів торців, майже не змінюється (трішки підвищується)  $S_o$ , зменшується час для досягнення квазістаціонарного поля, зменшується теплова енергія  $Q_t$  (теплове накопичення) в металі, збільшується активна потужність в зазорі  $P_o$ , підвищується імовірність КЗ. При зменшенні  $V_o$  все навпаки і підвищується імовірність холостого ходу (ХХ).

Термічний к.к.д.  $\eta_t$  зростає зі зменшенням  $V_o$  і температури металу. При досягненні квазістаціонарного поля  $\eta_t = 0$ .

Чим менше  $U_o$ , тим вище  $T_e$  оплавлених деталей і їх торців. Чим вище активний опір КЗ, тим нижче  $T_e$  близько торців. Чим нижче опір  $Z_{кз}$ , тим вище саморегулювання, вище стійкість оплавлення, більше тривалість контактів перемичок, нижче співвідношення тривалості КЗ та викиду металу до повного часу зварювання, менше інтенсивність їх руйнування, рівніше оплавлення торців, вище  $\eta_t$ , більше можливе зниження напруги  $U_o = I_{кз} * Z_{кз}$ , тому що  $I_{кз}$  більше і перемички руйнуються при менших розмірах

Найважливішим фактором стабільності нагріву стає стабільність

$\eta_t = Q_t / Q_o$  за весь час оплавлення і воно відображає головну умову отримання якісного з'єднання. Його сталість при зміні  $U$ ,  $I$ ,  $Z_{кз}$ ,  $T_2$ ,  $V_o$  гарантує якість зварювання.

При зменшенні ЗТВ підвищуються показники даних механічних іспитів зварених рейок – стріли прогину та руйнівного навантаження. При надто малій ЗТВ є небезпека появи різних дефектів у площині з'єднання типу оксидних

плівок, у тому числі матових плям, які знижують показники механічних випробувань.

**3. Етап інтенсивного оплавлення перед осадкою (форсування)** має на меті створення умов формування шару розплавленого металу на торцях і захисного газового середовища в іскровому проміжку з парів металу і легуючих елементів сталі. Залежність захисного середовища в іскровому зазорі від  $V_{\phi}$  має екстремальний характер. Збільшення  $V_{\phi}$  вище оптимального не впливає на якість, але створює небезпеку коротких замикань, зниження  $V_{\phi}$  - поява матових плям, оксидних плівок. Час форсування  $T_3$  визначається зміною швидкості від оплавлення до критичної. Чим  $T_3$  більше, тим більше втрати тепла, накопиченого на етапі оплавлення. Чим менше тривалість  $T_3$ , тим менше зміна ТП в деталях і на торцях перед осадкою. При оптимальній програмі  $V_{\phi}$  величина струму плавно зростає до максимальної величини. При неправильно обраній програмі наростання  $V_{\phi}$  або при зниженні  $U_{\phi}$ , зростанні  $Z_{кз}$  струм може досягти критичних величин  $I_{кз}$ . Наявність КЗ на етапі форсування визначає неякісне з'єднання. Форсування проводиться на припуску довжиною більшої 2 глибин кратерів.

**4. Формування з'єднання в твердій фаз (осадка).** Залежність умов формування в твердій фазі від припуску на осадку  $S_{oc}$  має екстремальний характер. Величина укорочення при осадці має бути достатньою для закриття зазору, витиснення окисленого і розплавленого металу і забезпечення достатньої пластичної деформації.

Пластична деформація поширюється в кожену сторону від стику на величину 1.5-2.5 сумарного укорочення при осадці. У цій зоні -пластичної деформації- мінімальна  $T_e$  повинна бути 800-900° для аустенітної сталі. Чим вона нижча, тим треба більше зусилля осадки  $P_{oc}$ .

Припуск на осадку  $S_{oc}$  тим менше, чим рівніше оплавлені торці. Час закриття іскрового зазору  $T_4$  треба мінімізувати шляхом збільшення  $V_{oc}$  осадки і зменшення градієнта  $T_e$  через більш рівномірний прогрів у глибину. Навіть велика  $V_{oc}$  може погіршити якість через ускладнену пластичну деформацію.

Зусилля осадки  $P_{oc}$  тим вище, чим менше рівномірність нагріву по довжині (вище градієнт  $T_e$ ). Чим вище точність  $S_{oc}$  при високому  $V_{oc}$  і  $P_{oc}$ , тим видалення окислів і формування з'єднання в твердій фазі краще. Високій  $V_{oc}$  відповідає більш високий тиск  $P_{oc}$ .

Градієнт ТП впливає на імовірність передчасного затвердіння металу в кратерах і наявність в стику окислів, ТП в кінці оплавлення визначає умови пластичної деформації при осадці, термічний цикл створення ТП впливає на властивості з'єднання. При широкій ЗТВ величина осадки зростає.

Якість стику визначається ТП у виробі та на його торцях перед форсуванням, умовами захисту середовища в іскровому зазорі при форсуванні та умовами формування з'єднання в твердій фазі при осадці.

У алгоритмі нечіткої логіки ці етапи описуються функціями з близько 15 входними параметрами. Така кількість входів – так зване прокляття розмірності – значно ускладнює алгоритм налаштування контролю при зміні умов зварювання, наприклад, типу зварюваних рейок, машини і режиму [141].

З іншої сторони в останні роки у зв'язку з необхідністю розробки технологій КСЗО сучасних рейок конверторного виробництва і зростанням вимог до якості зварних з'єднань, в міжнародному стандарті, який регламентує вимоги до зварних з'єднань таких рейок, введені додаткові вимоги, що обмежують допустимі зміни твердості в зоні термічного впливу (ЗТВ) зварного з'єднання і її ширина, контроль яких складно виконати в виробничих умовах і здійснюється тільки в процесі випробувань контрольних партій рейок.

З метою підвищення точності і надійності контролю в реальному часі процесу КСЗО рейок необхідно було розробити алгоритм прогнозування ширини ЗТВ.

Відомі методи чисельного розрахунку теплових полів при нагріванні методом кінцевих різниць, які можна було б використовувати для розрахунку теплового поля при зварюванні рейок, для застосування в реальному часі вимагають недоступною в даний час обчислювальної продуктивності системи управління. Статистичні регресійні залежності різних видів, в тому числі і

нейронні мережи, значно простіше для реалізації. Однак для їх побудови потрібні експериментальні дані, які задовольняють умові репрезентативності [142, 143], зокрема, рівномірного покриття всієї можливої області існування процесу, в тому числі, і по результату зварювання, тобто число точок з позитивним і негативним результатом має бути збалансовано. Ці умови на практиці дуже складно виконати, тому що вартість експериментів досить висока, а виробничі дані зі зварювання зразків зазвичай концентрується у вузькому діапазоні і даних з позитивним результатом значно більше, ніж з негативним. Для отримання масиву репрезентативних даних була використана математична модель кінетики температурного поля при пульсуючому оплавленні з урахуванням багатofакторного впливу на інтенсивність нагріву швидко плинних процесів утворення і руйнування одиничних контактів, що формуються при технологічному циклі контактного зварювання залізничних рейок. Модель була налаштована, перевірена і уточнена за експериментальними даними при нагріванні методом оплавлення зразків рейок марок K76Ф та R350НТ на пересувному мобільному рейкозварювальній комплексі КСМ-005. Температуру нагрівання в експериментах контролювали за допомогою термопар, які були встановлені на різній відстані від зварювальної кромки уздовж рейки. У розрахованих масивах було збалансовано кількість оцінок для процесу, який відповідає і не відповідає ТУ. Розрахунки виконані для різних типів сталей, в тому числі, конверторної термічно зміцненої рейкової сталі K76Ф. З огляду на те, що допустимий діапазон ширини ЗТВ при зварюванні рейок відповідно до стандарту ЄС становить 20 ... 45мм і припуск на осадку зазвичай в межах 12-13 мм розрахунки були проведені для ширини ЗТВ до 60 мм. На даному етапі під шириною ЗТВ розуміли відстань межі нагрітого металу до температури (ізотерми) 550 - 600 °С від кромки уздовж рейки. При цьому в розрахунках струм і напругу на вході зварювального трансформатора змінювали відповідно в діапазоні від 200 до 700 А і від 300 до 420 В. Контрольними параметрами були величина припуску на оплавлення  $S_0$  і швидкість  $V_0$  укорочення деталей при оплавленні, електрична енергія за час оплавлення  $Q_0$  і параметри для оцінки

температурного поля (ширини ЗТВ без урахування величини осадки) - відстань точки нагріву 550 °С від кромки [144, 145].

При моделюванні напруга і зварювальний струм в розробленій моделі самостійно не впливали на температуру нагрівання і враховувалося в розрахунковому значенні енергії  $Q_0$ .

Оцінка коефіцієнтів кореляції (табл. 5.1) підтвердила, що далі при моделюванні величину струму можна виключити, тому що вона має високий коефіцієнт кореляції з енергією при оплавленні  $Q_0$ . Разом з тим в експериментальних дослідженнях ефективне значення струму за півперіоду в процесі зварювання досить сильно змінюється і використовувати його в якості контрольованого параметра складно.

Таблиця 5.1 - Коефіцієнти взаємної кореляції

$S_0$	$I_{оп}$	$V_0$	$Q_0$	L500	
1.000	0.000	0.095	0.397	0.069	$S_0$
	1.000	0.953	-0.903	-0.972	$I_{оп}$
		1.000	-0.798	-0.876	$V_0$
			1.000	0.938	$Q_0$
				1.000	L500

Для моделювання адаптивними нечіткими нейронними мережами були використані алгоритми з субтрактивною (Subtractive - SBT) і нечіткою середньою (fuzzy c-mean - FCM) кластеризацією.



Архітектура і функції приналежності для цих алгоритмів практично однакові (табл.5.2) і відрізняються способом виділення кластерів.

Таблиця 5.2 - Рекомендації з побудови нечітких нейронних мереж

Тип кластеризації	Тип Fuzzy системи	Вхідні функції приналежності	Нечіткі (Fuzzy) правила	Вихідні функції приналежності
GridPartitioning	Sugeno	Кожна вхідна змінна має рівномірно розподілену функцію членування вхідних даних. Кожна вхідна змінна має одну функцію входу до системи «gaussmf» для кожного нечіткого кластера	Одне правило для кожної комбінації вхідних функцій приналежності. Наслідок кожного правила відповідає іншим функціям приналежності	Одна функція приналежності для кожного нечіткого правила.
Subtractive Clustering	Sugeno	Кожна вхідна змінна має одну функцію входу до системи «gaussmf» для кожного нечіткого кластера.	Одне правило для кожного нечіткого кластера	Кожна вихідна змінна має один «linear» вихідну функцію приналежності для кожного нечіткого кластера.
FCM Clustering	Mamdani or Sugeno	Кожна вхідна змінна має одну функцію входу до системи «gaussmf» для кожного нечіткого кластера.	Одне правило для кожного нечіткого кластера	Кожна вихідна змінна має одну функцію приналежності для кожного нечіткого кластера. Тип функції приналежності є «gaussmf» для Mamdani систем або «linear» для Sugeno систем.

Найкращі результати по точності апроксимації показала адаптивна нечітка нейронна мережа з SBT кластеризацією, яка має три кластера з функцією приналежності Гауса на вході і лінійною функцією "sugeno" на виході (рис.5.3) [145].

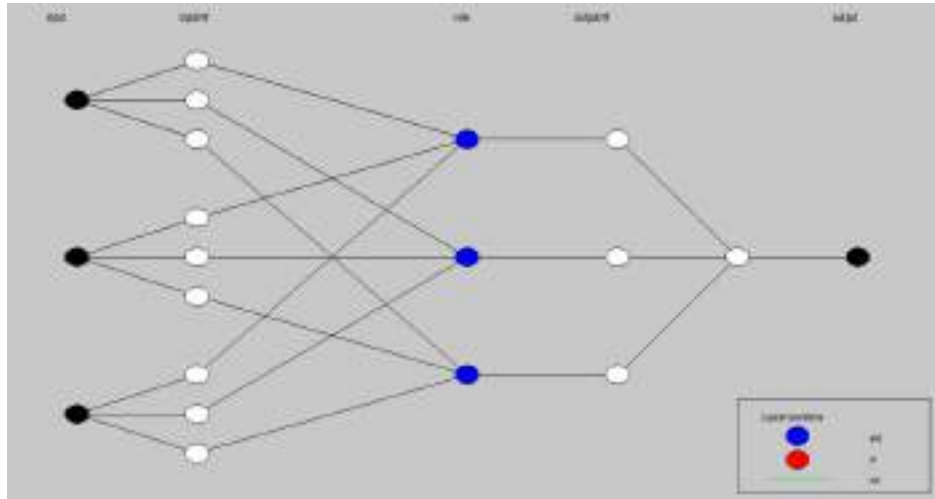


Рисунок 5.3 - Структура нечіткої моделі на основі алгоритму нейронної кластеризації

Результати розрахунку регресійних моделей для показника ширини ЗТВ від параметрів  $S_0$ ,  $V_0$ ,  $Q_0$  у вигляді поліномів 1 та 2 порядків, нейронних мереж типу MLP і RBF і нечітких моделей типу sugeno з використанням алгоритмів SBT і FCM кластеризації наведені в табл. 5.3

За отриманими даними найбільшу точність мають нечіткі моделі з SBT кластеризацією, далі нечіткі моделі з FCM кластеризацією і далі MLP нейронні мережі та регресійні залежності. У розрахунках вибирали найпростіші можливі алгоритми (архітектуру) цих моделей і їх ускладнення можна домогтися кращих результатів. Але, таке ускладнення може бути ефективним тільки для конкретного набору даних. Остаточний вибір способу контролю можна зробити за експериментальними даними, в яких завжди присутня деяка похибка відтворення досвіду. Дуже важливим є умова фільтрації або малої чутливості до цієї похибки. Крім того, якщо оцінювати складність алгоритму за кількістю розрахункових параметрів, то кращими є статистичні рівняння регресії і MLP нейронні мережі [146].

Регресійна модель у вигляді полінома другого порядку була перевірена для контролю якості звареного з'єднання по даним діагностичного центру, налаштування режиму зварювання на машинах та машині K922. Згідно експериментальним дослідженням можна зробити висновок, що допуск на ЗТВ для рейок із сталі K76Ф доцільно зменшити до 27 (30) мм. (рис.5.4).

Таблиця 5.3 - Результати моделювання ЗТВ за даними розрахунків по аналітичній залежності

Рівняння регресії	N пер	С.К.О. мм	Е,%
$Z=10.86-1.266S_o+7.659V_o+18.819Q_o$	4	1.74	4.72
Z= повний поліном 2 порядку від $S_o$ , $V_o$ , $Q_o$	10	0.51	1.16
$Z=12.96+15.243Q-0.504SQ-13.355VQ+0.0257S^2+1.545Q^2$	6	0.56	1.23
Z=MLP 3-1-1 (логістична і тотожна функції перетворення)	6	1.51	4.28
Z=MLP 3-2-1 (логістична і тотожна функції перетворення)	11	0.55	1.16
Z= RBF 3-10-1	51	1.12	3.77
Z= нечітка модель з SBT кластеризацією (4 кластери)	40	0.50	0.98
Z= нечітка модель з FCM кластеризацією (4 кластери)	40	1.74	4.72

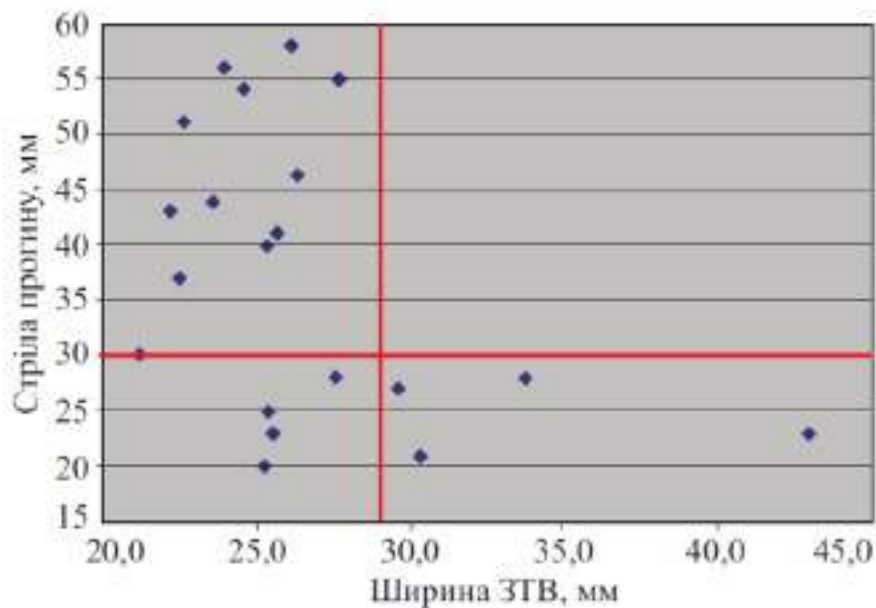


Рисунок 5.4 - Залежність  $L_{пр}$  (мм) (ордината) від ЗТВ (мм) (абсциса) для рейок K76Ф [148]

### 5.3. Алгоритм контролю на етапі прискореного оплавлення підвищенням швидкості укорочення перед осадкою (форсування)

Мета інтенсифікації оплавлення (форсування) - створити умови формування шару розплавленого металу на торцях і захисного газового середовища в іскровому проміжку з парів металу і легуючих елементів сталі. В залежності від співвідношення між швидкістю наближення кромки рейок  $V_{нк}$  та швидкістю фактичного укорочення ( $V_{оп}$ ) маємо наступні ефекти при стиковому зварюванні:

- власно оплавлення при  $V_{нк} \approx V_{оп}$ ,
- вибух перемичок і переривання оплавлення (холостий хід х.х.) при  $V_{нк} \ll V_{оп}$ ,
- коротке замикання (к.з.) при  $V_{нк} \gg V_{оп}$ .

Тривалість к.з. більше 1-2с неприпустимі на всіх стадіях нагріву зразків, а в кінцевий період оплавлення навіть нетривале замикання (понад 0.03 с) можуть привести до утворення дефектів.

Щоб не було кристалізації металу до включення осадки швидкість при переході від етапу форсування до осадки (далі  $V_{ф}$ ) на 2-3 с повинна бути вище певної критичної величини. Збільшення  $V_{ф}$  вище оптимальної не впливає на якість, зниження - поява матових плям. При оптимальній програмі зміни  $V_{ф}$  величина струму плавно зростає до максимальної величини.

Було встановлено, що чим інтенсивніше і стабільніше процес оплавлення, тим самозахист ефективніше і більше утворюється парів і газів, що захищають зварне з'єднання від проникання кисню, кількість дефектів менше. При відсутності окисних плівок на початку осадки утворюється об'єднаний прошарок розплавленого металу, який вже є гарантією якісного з'єднання. Такий ж прошарок утворюється і після витіснення рідких і твердих оксидів зварного стика. Товсті окисні плівки перешкоджають утворенню пластичного з'єднання.

При операційному контролі згідно допускам якість зварювання на етапі перевіряли за швидкістю  $V_f$  перед включенням осадки та часом (тривалістю) к.з. на етапі, якщо воно виникало. З урахуванням існуючого досвіду контролю, технологічних особливостей та обчислювальної можливості системи управління був обраний нечіткий алгоритм контролю умов якісного зварення на етапі у форматі МАТЛАБ виглядає як звичайний перетин (функція AND) умов знаходження у допуску швидкості  $V_f$ , часу к.з. і кривої струму  $I$  [147].

Як висновок, можна сказати, що для підвищення надійності контролю якості зварювання на етапі переходу від оплавлення до осадку на відміну від існуючого алгоритму :

- у випадку виникнення короткого замикання крім його тривалості також враховується час його виникнення по відношенню до моменту включення осадки,
- контроль зварювального струму протягом переходу від оплавлення до осадки та достовірність його відхилення від кривої струму, яка була записана при налаштуванні режиму для якісного зварювання.

#### **5.4. Алгоритм контролю КСЗО на базі розроблених моделей**

Згідно наведених досліджень для контролю процесу КСЗ можна використовувати такі алгоритми і моделі (табл.5.4):

- допусковий контроль параметрів режиму,
- допусковий нечіткий контроль параметрів,
- контроль показників якості зварного шва –ЗТВ- по регресійній залежності у вигляді полінома 1 або 2 порядку або MLP нейронній мережі,
- контроль ЗТВ по нечіткій нейронній моделі з кластеризацією.

Зрозуміло, що складність алгоритму вимагає відповідну алгоритмічну потужність обчислювача (комп'ютера) системи управління [148].

Нечіткий допусковий операційний контроль жорсткіший в порівнянні з допусковим операційним контролем згідно ТУ і його виконання гарантує виконання існуючого допускового контролю.

Регресійна поліномна модель (1 або 2 порядку) побудована методом найменших квадратів і по точності практично еквівалентна MLP з одним прихованим шаром.

Нечітка нейронна мережа з SBT кластеризацією має найвищу точність і може застосовуватися в режимі онлайн на реальних процесорах систем управління. Параметри заданого режиму зварювання може бути обрані в якості основного кластера, а інші - в зонах неякісної зварювання.

З урахуванням можливостей моделювання процесу по експериментальним даним можна запропонувати наступну ієрархічну модель контролю (рис.5.5).

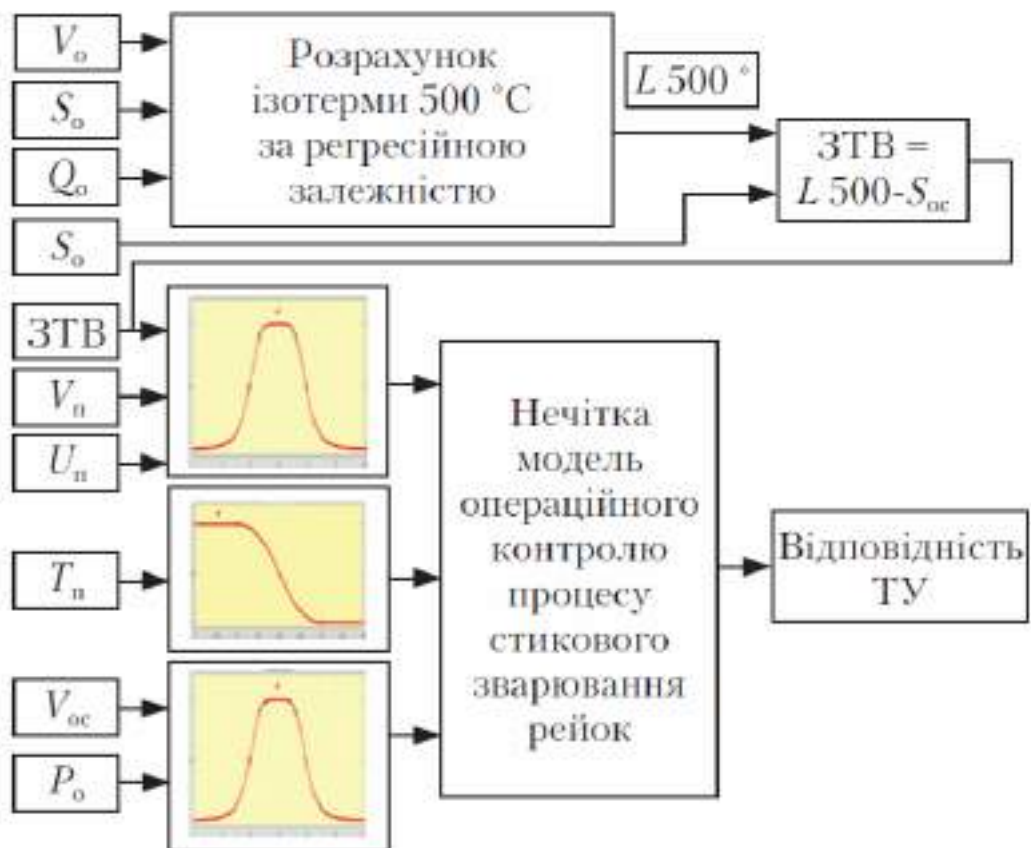


Рисунок 5.5 - Схема ієрархічного алгоритму контролю якості КСЗО

Таблиця 5.4 - Властивості алгоритмів контролю процесу КСЗО

Алгоритм або модель	Властивості алгоритму							
	Урахування ступеню впливу параметра	Урахування размитості меж	Урахування функцій зв'язку	Складність розробки	Достовір- ність оцінки	Точність чисельної оцінки	Складність реалізації	Автоматизація налаштування
Допустовий операційний контроль згідно ТУ	1	1	1	1	1	1	1	1
Нечіткий допусковий операційний контроль	2	3	2	2	2	2	2	2
Регресія поліномом	3	3	3	3	3	3	3	3
Регресія MLP	3	3	3	4	3	4	4	3
Нечітка нейронна мережа	4	3	4	5	4	4	5	4

Базовою структурою є нечіткий допускний операційний контроль [149]. Опис процесу оплавлення та розрахунок ЗТВ в цій моделі може бути виконаний регресійним поліномом другого порядку, як простішим засобом алгоритмізації. Таким чином вдається частково подолати «прокляття розмірності» - знизити кількість вхідних параметрів на різних етапах моделювання – та врахувати складні залежності між параметрами процесу при оплавленні і нагріві металу. В якості базової точки розрахунку для налаштування регресійної залежності при зміні режиму зварювання можна вибрати параметри  $S_0$ ,  $V_0$ ,  $Q_0$  та відповідну їм ЗТВ нового режиму. В процесі контролю має бути оцінка відхилення від них. Далі за схемою нечіткої логіки обчислюється імовірність відповідності процесу.

Крім  $V_0$ ,  $S_0$ ,  $Q_0$ , вхідними параметрами алгоритму також є напруга  $U_p$ , швидкість укорочення  $V_p$  і тривалість струму короткого замикання  $T_{kz}$  та час до включення осадки  $T_{до}$  на етапі підвищення швидкості укорочення перед осадкою, а також швидкість  $V_{ос}$  і тиск  $P_{ос}$  осадки [150]. В алгоритмі використовуються обидва основні методи ідентифікації - класифікація (віднесення об'єкта, заданого набором параметрів, до одного з наперед визначених класів - в нашому випадку згідно з технічними умовами чи ні) і регресія (результат розрахунків є не кінцеве множина класів, а множина дійсних чисел - значення ширини ЗТВ).

Запропоновану систему проектували як нечіткий класифікатор у вигляді системи Сугено, в якій для вихідного показника «Відповідність ТУ» приписували значення «1» при відповідності ТУ за даними механічних дослідів і «0» при невідповідності. На виході блоку розрахунку ширини ЗТВ отримуємо чисельне значення в натуральних одиницях, яку можна порівнювати з вимірною величиною при випробуваннях і ці дані використовувати для уточнення регресійної залежності. Оцінка відповідності ТУ за описаним алгоритмом за архівними даними процесу КСЗО рейок Р65 марки К76Ф успішно реалізована на на рейкозварювальних підприємствах АТ «Українська залізниця», про що свідчить відповідний Акт (Додаток А).



## Висновки до розділу 5

1. Для стабільного відтворення процесу зварювання рейок та точного контролю величини енерговкладення, розроблена система керування і контролю процесом КСЗО. Система дозволяє в реальних виробничих умовах підтримувати оптимальний режим стійкого оплавлення і нагріву, в значній мірі незалежно від зміни умов експлуатації.

2. Для розрахунку ширини зони термічного впливу (ЗТВ) в реальному часі з необхідною для практичного застосування точністю можна використовувати регресійну залежність у вигляді полінома другого порядку або MLP нейронної мережі зі структурою 3 вхідних нейрона 2 в прихованому шарі і один на виході.

3. Прогнозування ширини ЗТВ при операційному контролі розширює можливості його застосування для контактного стикового зварювання сучасних рейок конверторного виробництва.

4. Розроблений алгоритм нечіткої логіки з розрахунком ширини ЗТВ по регресійній залежності дозволив збільшити точність і надійність операційного контролю процесу КСЗО в реальному часі.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз вимог чинних стандартів до зварних стиків рейок показує необхідність врахування енергетичних параметрів процесу КСЗО, які визначають термічний цикл і розподіл температури вздовж осі рейок, обумовлюють час перебування металу ЗТВ в аустенітній області та швидкість охолодження в інтервалі температур перетворення аустеніту, визначають розподіл показників твердості в зоні з'єднання рейок.

2. Розрахунки зміни теплового коефіцієнта корисної дії (ККД) при безперервному і пульсуючому оплавленні рейок встановлено, що при безперервному оплавленні значення ККД зменшується з 0,7 (у початковий період) до 0,45 при  $t_{\text{опл}} = 180$  с, а при пульсуючому оплавленні – ККД зменшується з 0,9 у початковий період оплавлення до 0,7 при  $t_{\text{опл}} = 80$  с.

3. Розрахунково-експериментальні дослідження термічних циклів КСЗО і розподілу температур в зоні з'єднань рейок типу Р65 (60E1) проводили з використанням розробленої математичної моделі нагрівання рейок при оплавленні та відповідних засобів комп'ютерної симуляції кінетики температурних полів при КСЗО залізничних рейок. Використано чисельне розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності поряд із комплексом лабораторних вимірювань температурних циклів в рейках, що зварюються.

4. Встановлено вплив на ефективність процесу нагрівання і розподіл температури в зоні з'єднання рейок типу Р65 (60E1) параметрів процесу КСЗО, а саме: первинної напруги  $U$  джерела живлення на різних етапах процесу оплавлення ( $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ), припуску  $\Delta_{\text{ф}}$  стадії інтенсивного оплавлення (форсування), тривалості оплавлення  $t_{\text{опл}}$ , і величини енерговкладення  $Q$ . Обґрунтовано використання процесу КСЗО з програмною зміною в часі напруги джерела живлення, уточнено циклограму процесу КСЗ пульсуючим оплавленням, яка передбачає поетапну зміну значення  $U$  в діапазоні  $U_1=355\dots440$  В на першому етапі оплавлення, в діапазоні  $U_2=250\dots300$  В на

другому етапі (квазістаціонарного нагрівання), і в межах  $U_3 = 355 \dots 440$  В на третьому етапі (інтенсивного оплавлення – форсування).

5. Обґрунтовано діапазон значень припуску  $\Delta_\phi$  на етапі форсування, в якому забезпечується формування рівномірного шару розплавленого металу на торцях рейок, і зберігається розподіл температури по осі оплавлених рейок для виконання осадки на задану величину, а саме:  $\Delta_\phi = 4 \dots 8$  мм.

6. Розрахунковим шляхом визначено залежність мінімального  $H_{ЗТВmin}$  та максимального  $H_{ЗТВmax}$  значень ширини ЗТВ зварного з'єднання від тривалості процесу оплавлення  $t_{опл}$  і величини енерговкладення  $Q$  при КСЗО. Встановлено, що для КСЗ пульсуючим оплавленням залізничних рейок типу Р65 (60Е1) при збільшенні значення  $t_{опл}$  в діапазоні від 50 до 140 с і величини енерговкладення  $Q$  від 9 до 18 МДж, значення  $H_{ЗТВmin}$  зростає від 16 до 22 мм, а значення  $H_{ЗТВmax}$  – від 36 до 54 мм.

7. Розрахунковим шляхом встановлено залежність швидкості охолодження  $W_{8/5}$  зварного з'єднання рейок типу Р65 (60Е1) в інтервалі температур 800-500°C від тривалості процесу оплавлення  $t_{опл}$  і величини енерговкладення  $Q$  при КСЗО. Максимальне значення швидкості охолодження у зварному з'єднанні досягається по лінії з'єднання і змінюється від  $W_{8/5} = 8,7$  до  $W_{8/5} = 2,4$  °C/с при збільшенні  $t_{опл}$  і  $Q$  в межах  $t_{опл} = 50 \dots 140$  с і  $Q = 9 \dots 18$  МДж.

8. Визначено мінімальне значення тривалості процесу оплавлення  $t_{оплmin} = 55$  с і енерговкладення  $Q_{min} = 9,72$  МДж при КСЗО рейок типу Р65 (60Е1) марок К76Ф і R350НТ, при якому швидкість охолодження з'єднання в інтервалі температур 800-500°C не перевищує  $W_{8/5} = 7,0$  °C/с, забезпечується відсутність у зоні з'єднання бейніту, мартенситу і формується перлітна структура різної дисперсності (перліт, сорбіт, троостит).

9. На основі результатів механічних випробувань, металографічних досліджень, вимірювання твердості визначено діапазон зміни величини енерговкладення  $Q$ , в якому забезпечуються вимоги чинних стандартів для зварних стиків рейок К76Ф і R350НТ, а саме:  $Q = 11,88 - 14,0$  МДж. Показано, що величина  $Q$  може бути використана у якості комплексного параметра, який

враховує вплив інших енергетичних параметрів процесу КСЗО на розподіл температур, формування макро- та мікроструктури з'єднань, розподіл твердості та показники механічних властивостей зварних стиків рейок.

10. Розроблено технологію КСЗО термічнозміцнених залізничних рейок рейок конверторного виробництва, яку успішно впроваджено на рейкозварювальному підприємстві АТ «Українська залізниця» при КСЗО рейок К76Ф на мобільних машинах К900М і К922.

10. Для стабільного відтворення процесу зварювання рейок та точного контролю величини енерговкладення, розроблено систему керування і контролю процесу КСЗО, яка дозволяє в реальних виробничих умовах підтримувати оптимальний режим стійкого оплавлення і нагріву незалежно від зміни умов експлуатації.

11. Прогнозування ширини ЗТВ зварних з'єднань при операційному контролі розширює можливості його застосування для КСЗО сучасних рейок конверторного виробництва. Розроблений алгоритм нечіткої логіки з розрахунком ширини ЗТВ по регресійній залежності дозволив збільшити точність і надійність операційного контролю контактного стикового зварювання в реальному часі.

12. Для стабільного відтворення процесу КСЗО рейок та точного контролю величини енерговкладення, розроблені алгоритми та програми статистичної обробки даних. Оцінка відповідності зварних стиків рейок нормативним вимогам за архівними даними процесу КСЗО рейок успішно реалізована на рейкозварювальних підприємствах АТ «Українська залізниця».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Патон, Б., Костюк, М., Кучук-Яценко, С., (2010). Инновационный кластер «Бархатный путь» и научно-технический прорыв Украины на мировой рынок строительства скоростных железных дорог. *Наука та інновації*. 6(2), 69–86
2. Кучук-Яценко, С., Яковлев, В., Дідковський, О., Зяхор, І., (2016). Розвиток технологій та устаткування для зварювання рейок – ключ до розширення мережі суцільнозварних безстикових колій в Україні. *Українська залізниця*. (1), 56–59.
3. Косенко, С., (2007). Совершенствование системы ведения рельсового хозяйства на магистральных железных дорогах Республики Казахстан: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. *Алматы, КазАТК*. 288.
4. Штайгер, М., (2011). Проблемы качества компонентов путевого комплекса. *Путь и путевое хозяйство*. (12), 6–9.
5. Engineering Track Maintenance Field Manual/Union Pacific Railroad. 1999.220 с.
6. Profillidis V., (2006), *Railway Management and Engineering*, Ashgate, 3rd ed.
7. Подольский, Р., Дейнеко, Л., (2019). Определение путей повышения эксплуатационной стойкости железнодорожной колеи. Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених «Молода академія-2019». *Дніпро: НМетАУ*, 82.
8. Лемпицкий, В., Казарновский, Д., Левченко, Н., (1980). Разработка промышленной технологии производства и исследование качества железнодорожных рельсов из кислородно-конверторной стали. *Сталь*. (2), 142-145.
9. Cantos, P., Pastor, J. та Serrano, L., (1999). Productivity, efficiency and technical change in the European railways: A non-parametric

approach. *Transportation*. (26), 337–357. doi:  
<https://doi.org/10.1023/A:1005127513206>

10. Павлов, В., Дементьев, В., Могильный, В., (2003). Качество железнодорожных рельсов из непрерывнолитой заготовки электросталеплавильного способа производства. *Сталь*. (12), 62-64.

11. Азаркевич, А., Коваленко, Л., Лебедев, А., (2004). Повышение качества поверхностно-закаленных рельсов. *Фунд. и прикл. пробл. черн. металлур.* (7), 244-249.

12. Левченко, Н., Шнаперман, Л., Скворцов, О., и др. (1984). Экономическая эффективность повышения качества рельсовой стали. Технология производства стали для железнодорожных рельсов и колес. *Харьков: УкрНИИМет*. С. 55-59.

13. Черняк, С., (2007). Проблемы повышения эксплуатационной стойкости стали. *Иркутск: Изд-во ИрГУПС*. 345.

14. Bramfitt, B., Fletcher, F., (2013). A Perspective on the Manufacture of Modern-Day High-Strength Steel Rail. *AREMA 2013 Annual Conference and Exposition*.

15. Tatsumi, K., Mineyasu, T., Minoru, H., (2011). Development of SP3 rail with high wear resistance and rolling contact fatigue resistance for heavy haul railways. *JFE Technical Report*. (16).

16. Krauss, G., (2015) *Steels: Processing, Structure, and Performance*. (ASM International, Almere).

17. BS EN 13674-1:2011+A1:2017. Railway applications — Track — Rail. Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.

18. Смирнов, А., Глазков А., Пилюшенко, В., (1999). Разработка технологии производства железнодорожных рельсов из непрерывно литых заготовок, отлитых на МНЛЗ конвертерного цеха Днепровского металлургического комбината им. Ф.Э. Дзержинского. *Металл и литье Украины*. (3-4), 23-25.

19. Ackert, R., Nott, M., (1988). “Accelerated Water Cooling of Railway Rails In-Line with the Hot Rolling Mill,” *Proceedings of the International Symposium on Accelerated Cooling of Rolled Steel*, Pergamon Press, United Kingdom. 359–372.
20. Bhadeshia, H., (2005). “High Performance Bainitic Steels,” *Mater. Sci. Forum*, (500–501), 63–74.
21. Куклев, А., Федоров, Л., Тиняков В., (2003). Совершенствование технологии непрерывной разливки рельсовой стали. *Сталь*. (10), 54-56.
22. Xiao-Fei, L. I., Langenberg, P., Münstermann, S., Bleck, W., (2005). Recent Developments of Modern Rail Steels. *HSLA Steels*. 2.
23. Смирнов, А., Глазков, А., Пилюшенко, В., (2000). Теория и практика непрерывного литья заготовки. *Донецк: ДонГТУ, ООО «Лебедь»*. 320-332.
24. Федоров, Л., Шеховцов, Е., Минаева, Л., (2003). Совершенствование системы вторичного охлаждения заготовок рельсовой стали. *Сталь*. (6), 21-22.
25. Бабаченко, О., Кононенко, Г., Подольський, Р., (2020). Імітаційне моделювання зміни теплового поля залізничної рейки під час диференційної термічної обробки. VI Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем», (6), 17–18. doi: 10.32434/CMOCS-2020
26. Генкин, И., (2003). Сварные рельсы и стрелочные переводы. *Интекст*. 93 с.
27. Медовар, Л., Стовпченко, Г., Полішко, Г., Сибір, А., Коломієць, Д., Костецьки Ю., (2019). Іноваційні рішення проблеми організації виробництва рейок найвищого гатунку в Україні. *Наука innov*.15(6). 37—48 doi: <https://doi.org/10.15407/scin15.06.037>
28. Olivares, R., Garcia, C., DeArdo, A. et al. (2011). Advanced metallurgical alloy design and thermo mechanical processing for rails steels for North American heavy use. *Wear*. (271), 364 – 373.

29. Счастливец, В., Мирзаев, Д., Яковлева, И., (2006). Перлит в углеродистых сталях. *Екатеринбург: УрО РАН*. 312.
30. Sahay, S., Mohapatra, G., Totten, G., (2009). Overview of Pearlitic Rail Steel: accelerated cooling, quenching, microstructure, and mechanical properties. *J ASTM Int.* (7):1-26.
31. Шипицын С., Бабаскин Ю., Кирчу И., (2004). Применение сталей с карбонитридным упрочнением – это коренное повышение надежности и долговечности железнодорожных путей и подвижного состава. *Металл и литье Украины.* (1-2). – С.39-43.
32. Elwazri, A., Wanjara P, Yue S., (2005). The effect of microstructural characteristics of pearlite on the mechanical properties of hypereutectoid steel. *Mater. Sci. Eng.* (404), 1–8.
33. Хлыст, С., Кузьмиченко, В., Резанов, В., Борц, А., Шур, Е., (2013) Перспективная технология производства рельсов для высокоскоростного и тяжеловесного движения. *Вестник ВНИИЖТ.* (6),14–19.
34. Morant, S., (2015). Next-generation super-premium rail steels hit the tracks. *International Railway Journal* . doi: <http://www.railjournal.com/index.php/track/next-generation-super-premium-rail-steels-hitthe-tracks.html?channel=531>
35. Большаков, В., Долженков, И., Долженков, В., (2001). Технология термической и комбинированной обработки металлопродукции., Днепропетровск: Gaudeamus, 261.
36. Bhadeshia, НКДН., Honeycombe, R., (2017). Steels: microstructure and properties. *4th ed. Oxford: Elsevier*.
37. Подольский, Р., Дейнеко, Л., (2019). Определение путей повышения эксплуатационной стойкости железнодорожной колеи. Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених «Молода академія-2019». Дніпро: НМетАУ, 82.
38. Pointner, P., (2008). High strength rail steels – The importance of material properties in contact mechanics problems. *Wear.* **265**(9-10), 1373–1379.



39. Markus, Lexhaller, Gregor, Schmid and Gerhard Sendlhofer., (2020) Automated rail welding as a model for the future in track construction. 236-241.
40. Mutton, P., Cookson, J., Qiu, C., Welsby, D., (2016). Microstructural characterisation of rolling contact fatigue damage in flashbutt welds. *Wear*.1–10.
41. Guangwen, X., Xiao, X., Guo, J., Wen, Z., (2010). Track dynamic behavior at rail welds at high speed. *Acta Mechanica Sinica*. 26(3). 449-465. doi: <https://doi.org/10.1007/s10409-009-0332-9>.
42. Micheletto, A., Cookson, J., Pang, Y., Chen, B., Mutton, P., (2020). The structural integrity of flash-butt welded premium rail steel – Evaluation of strength, microstructure and defects. *Journal of Rail and Rapid Transit (IF 1.87 )*. doi: <https://doi:10.1177/0954409720973138>
43. Bhadeshia, H., Buschow, K., Cahn, R., Flemings, M., Iischer, C., Kramer, E., Mahajan, M., (2002). “Novel Steels for Rails,” *Encyclopedia of Materials Science: Science and Technology*, 1–7.
44. Зяхор, І., Антіпін, Є., Дідковський, О., Кавуніченко, О., Левчук, А., Шило, Ю., Труска Яна., (2023). Сучасні технології зварювання залізничних рейок (огляд). *Автоматичне зварювання*. (5), 5–17. doi: <https://doi.org/10.37434/as2023.04.01>.
45. Kuziak, R., Zygmunt, T., (2013). A new method of rail head hardening of standard-gauge rails for improved wear and damage resistance. *Steel Res. Int.* 84(1), 13–19. doi: <https://doi:10.1002/srin.201200140>
46. Український науково-дослідний інститут металів «УкрНДІМет», (2004). *Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні вимоги ДСТУ 4344:2004*. Київ: Держспоживстандарт України.
47. *Railway applications – Track – Rail. Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above*. EN 13674-1:2011+A1:2017. European Committee for Standardization.
48. Rudyuk, O., Pykhtin, Ya., Ivanysenko, L., Bezpoyasova, A., (2013) Analysis of requirements of standards for main-line railway rails. *Standartyzatsiya, Sertyfikatsiya, Yakist*, 5, 3–8 [in Ukrainian].

49. Sladojević, B., et al. (2011) New requirements for the quality of steel rails. *Metalurgija-MJoM*, 17(4), 213–219.
50. Медовар, Л., Стовпченко, Г., Полішко, Г., Коломієць, Д., Падченко, Є., Зайцев, В., (2018). Сучасні рейкові сталі і можливості ешп (огляд). Повідомлення 2. Вимоги стандартів до хімічного складу сталі для залізничних рейок магістральних колій. *СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ*. 2 (131), 28-36. doi: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.02.03>.
51. Saita, K., Karimine, K., Ueda M. (2013). Trends in Rail Welding Technologies and Our Future Approach. *Nippon steel and Sumitomo metal technical report*. (105), 84–92.
52. Meade, B., (1997). Railroad welding demands specialized processes / Meade B. *Welding journal*. (76), 47–52.
53. Irving, B., (1997). Long Island Rail Road orders an all-welded fleet. *Welding journal*. (22), 33–37.
54. Induction rail welding plant. [www.mirageservices.co.uk/](http://www.mirageservices.co.uk/). [Дата звернення 14 квітня 2023]. doi: <http://www.mirageservices.co.uk>
55. Railway rail induction-welding device : patent US2019330805 : E01B29/46, B23K13/01, B23K37/04, E01B29/04, E01B29/44. Published on 06.12.2022.
56. Maalekian, M., (2007). *Friction Welding of Rails*. PhD Th., Graz University of Technology.
57. Gould, J., Johnson, W. *Translational friction weld rail repair – Phase I final report*, EWI Project No. 52765GTH, FRA Contract No. DTFR53-11-C-00004.
58. Shira, S. *The use of translational friction welding for constructing and repairing rail for high speed and intercity passenger rail – Phase II design report* EWI Project 54368GTH Task 1 – 3, FRA Contract No. DTFR53-13-C-00041.
59. Zhang, H., Li, C. та Zhu, Z., (2022). Influence of CDFW Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of U75V Rail Steel Welded Joint. *Metals*. 12(5), 711. doi: <https://doi.org/10.3390/met12050711>

60. Turpin B., Danks D., (2003). Electrosag field welding of railroad rail—Final report for high-speed rail IDEA Project 37., available on-line at [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/studies/idea/finalreports/highspeedrail/hsr-37final\\_report.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/studies/idea/finalreports/highspeedrail/hsr-37final_report.pdf)
61. Danks, D., Turpin, B., (2005). Recent advances in field electrosag rail welding. *Y: Proceedings of the AREMA 2005 Annual Conferences*. [www.arena.org/files/library/2005\\_Conference\\_Proceedings/00049.pdf](http://www.arena.org/files/library/2005_Conference_Proceedings/00049.pdf)
62. Tachikawa, H., Uneta, T., Nishimoto, H., (2000). Steel welding technologies for civil construction applications. *Nippon Steel Techn. Rept.* **82**(7), 35–
63. Dahl, B., Mogard, B., Grefott, B., Ulander, B., (1995). Repair of rails on-site by welding. *Svetsaren*. 50 (2), 10–14.
64. Okumura, M., et al. (1995). Development of field fusion welding technology for rail-roadrails. *Nippon Steel Techn. Rept.* 65(4), 41–49.
65. Fujii, M., Nakanowatari, H., Nariai, K., (2015). Rail flash-butt welding technology. *JFE Steel Corp.* (1).
66. Maalekian, M., (2007). *Friction Welding of Rails*. PhD Th., Graz University of Technology.
67. Yamamoto, R., Komizu, Y., Fukada, Y., (2014). Experimental examination for understanding of transition behavior of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding. *Welding International*. (7), 510–520. doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.753237>
68. Yamamoto, R., (2007). Advances in Gas Pressure Welding Technology for Rails. *Railway. Technology Avalanche*. (17), 99–105.
69. Гайворонский, А., (2013). Влияние диффузионного водорода на сопротивляемость замедленному разрушению сварных соединений высокоуглеродистой стали. *Автоматическая сварка*. (5), 15–21.
70. Poznyakov, V., Kiriakov, V., Gajvoronsky, A., Klapatyuk, A., Shishkevich, O., (2010). Properties of welded joints of rail steel in electric arc welding. *The Paton Welding J.* (8), 16–20.

71. Altemühl, B., (2002). Welding tramway rails in Bucharest. *Svetsaren*. 52 (2), 32–35.
72. Takimoto, T., (1984). Latest welding technology for long rail and its reliability. *Tetsu-to-Hagane*. 70 (10), 40–45.
73. Okumura, M., Karimine, K., Uchino, K., Yurioka, N., (1995). Development of field fusion welding technology for railroad rails. *Nippon Steel Techn. Rept.* 65 (4), 41–49.
74. Bajic, D., Kuzmenko, G., Samardzic, I., (2013). Welding of rails with new technology of arc welding. *Metalurgija*. (3), 399–402. ISSN 0543-5846.
75. Tachikawa, H., Uneta, T., Nishimoto, H., (2000). Steel welding technologies for civil construction applications. *Nippon Steel Techn. Rept.* 82 (7). 35–41.
76. Kuzmenko, G., Kuzmenko, V., Galinich, V., Taganovsky, V., (2012). New technology of electric arc bath welding of rails on tram and crane tracks. *The Paton Welding J.* (5), 33–36.
77. Lonsdale, C., (1999). Thermite rail welding: History, process developments, current practices and outlook for the 21st century, Conrail Technical Services Laboratory Altoona, PA 16601, *Tech. Rep.*
78. Altintas, B., (2013), *The Analysis of Aluminothermic Welding for Rail Steels*, MSc dissertation, University of Manchester, School of Materials.
79. Chen, Y., Lawrence, F., Barkan, C., Dantzig, J., (2006). *Heat transfer modelling of rail thermite welding*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 220(4), 207-217.
80. Fry, G., Lawrence F., Robinson A., (1996). *A model for fatigue defect nucleation in thermite rail welds*, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 19(6), 655-668.
81. Mohassel, A., Kokabi, A. H., Davami, P., Ranjbarnodeh, E., Movahedi M., (2012). *Heat Transfer Modelling in Wide Gap Rail Thermite Welding*, 1(2):29-37.

82. Meriç, C., Atık, E., Şahin, S., (2002). Mechanical and metallurgical properties of welding zone in rail welded via thermite process, *Science and Technology of Welding & Joining*, 7(3):172-176.
83. Wang, Y., Zhou, H., Shil, Y.-j. та Feng, B.-r., (2012). Mechanical properties and fracture toughness of rail steels and thermit welds at low temperature. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* . 19(5), 409. doi: <https://doi.org/10.1007/s12613-012-0572-8>
84. Liveleak (2013), *Railway thermite welding reaction railroad Siberia*, [http://www.liveleak.com/view?i=ee0\\_1379794699](http://www.liveleak.com/view?i=ee0_1379794699).
85. Chen, Y., Lawrence, F., Barkan, C., and Dantzig, J., (2006). Weld defect formation in rail thermite welds. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 220(4), 373-384.
86. Ilić, N., Jovanović, M., Todorović, M., Trtanj, M., and Šaponjić, P., (1999). Microstructural and mechanical characterization of postweld heat-treated thermite weld in rails. *Materials Characterization*, 43(4), 243-250.
87. Yuanqing Wang, Hui Zhou, Yong-jiu Shi1, and Baorui Feng. (2012). Mechanical properties and fracture toughness of rail steels and thermite welds at low temperature. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 19(5), 409. doi: <https://doi.org/10.1007/s12613-012-0572-8>
88. Myers, J., Geiger, G., Poirier, D., (1982). Structure and properties of thermite welds in rails. *Welding Journal*. (258), 8–19.
89. Кучук-Яценко, С., (1964). Сварка рельсов непрерывным оплавлением. *Автоматическая сварка*. (4), 55–62.
90. Кучук-Яценко, С., Дидковский, А., Кривенко, В., Гудков, А., (2004). Контактная стыковая сварка рельсов. Опыт применения и перспективы совершенствования. *Путь и путевое хозяйство*. (9), 5–8.
91. Кучук-Яценко, С., Швец, Ю., Думчев, Е., Швец, В., Микитин, Я., Тараненко, С., Никитина, Н., (2005). Контактная стыковая сварка железнодорожных крестовин с рельсовыми окончаниями через промежуточную вставку. *Автоматическая сварка*. (1), 6–9.

92. Резанов, В., (2011). Методика исследования изменения температуры на различном расстоянии от стыков при сварке рельсов. *Вестник ВНИИЖТ*. (4), 40–43.
93. Кучук-Яценко, С. (2019). 60 лет первой в мире мобильной машине для контактной сварки рельсов в полевых условиях. *Автоматическая сварка*. (3), 5-8.
94. Kuchuk-Yatsenko, S., (2018). Technologies and equipment for flash-butt welding of rails: 60 years of continuous innovations. *The Paton Welding Journal* . (11-12), 25–40. doi: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.03>
95. Stone, D., Iwand, H., Kristan, J., Lehnhoff G., (2015). Flash butt rail weld vertical fractures. *J. Fail. Anal. Prev.* (15), 33–38.
96. Schlatter Group / Rail welding systems, (2016). [www.schlatter.ch](http://www.schlatter.ch): [www.schlatter.ch/en/welding-machines](http://www.schlatter.ch/en/welding-machines)
97. Кучук-Яценко, С., Дидковский, А., Швец, В., Руденко, П., Антипин, Е., (2016). Контактная стыковая сварка высокопрочных рельсов современного производства. *Автоматическая сварка*. (5-6), 7–16.
98. Nizar Ramadan, Kazim Tur, Erkan Konca. Process Design Optimization for Welding of the Head Hardened R350 Ht Rails and Their Fatigue: A Literature Review. *International Journal of Engineering Research and Development/ e-ISSN: 2278-067X, p-ISSN: 2278-800X*. 13(1),49-55. [www.ijerd.com](http://www.ijerd.com)
99. D4.6.1. *The influence of the working procedures on the formation and shape of the HAZ of flash butt and aluminothermic welds in rails*. (2008). INNOTRACK Project TIP5-CT-2006-031415. [Дата звернення 14 квітня 2023]. <http://www.innotrack.eu>
100. Дніпропетровське НКТЬ КГ філії «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця», (2016). *Рейки нові зварені для залізниць ТУ У 27.1-40075815-002:2016*.
101. *Railway applications – Track – Flash butt welding of rails – Part 2: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails by mobile welding machines at sites other than a fixed plant*, (2009). EN 14587-2:2009.

102. *Railway applications - Infrastructure - Flash butt welding of new rails - Part 1: R220, R260, R260Mn, R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT and R400HT grade rails in a fixed plant.*, (2018). EN 14587-1:2018.

103. *Залізничний транспорт. Колія. Стикове зварювання рейок. Частина 2. Нові класи рейок R220, R260, R260Mn та R350HT із рухомих зварювальним механізмом порівняно зі стаціонарним механізмом*, (2015). ДСТУ EN 14587-2:2015 (EN 14587-2:2009, IDT).

104. Кучук-Яценко, С., Антіпін, Є., Дідковський, О., Швець, В., Кавуніченко, О., (2020). Оцінка якості зварних з'єднань високоміцних залізничних рейок сучасного виробництва з урахуванням вимог українського та європейського стандартів. *Автоматическая сварка*. (7), 3–11.

105. Abdul Sameea Jasim Abdul Zehra Jilabi. *Welding of Rail Steels. A thesis submitted to the University of Manchester for the degree of PhD in the Faculty of Engineering and Physical Sciences*. 2015. P57.

106. Zhang, A., Gao, F., Niu, X., and Luo, H., (2016). Prediction of gray-spot area in rail flash butt welded joint based on BP neural network. *Trans. China Weld. Inst.* (37), 11–14.

107. Титова, Т., Малиночка, Я., Зигало, И., (1984). Некоторые пути улучшения качества рельсов из конвертерной стали. *Металлургия и коксохимия*. – Киев. 41-44.

108. Стовпченко, А., Титова, Т., Павленко, Ю., (2000). О механизме образования скоплений неметаллических включений в донной части стальных слитков. *Теория и практика металлургии*. 1 (15), 28-30.

109. Малиночка, Я., Титова, Т., Зигало, И., (1987). Природа и распределение неметаллических включений в слитках рельсовой стали с добавками РЗМ. *Сталь*. 29-33.

110. Кучук-Яценко, С., Швець, В., Дидковський, А., Антипин Е., (2016). Влияние неметаллических включений рельсовой стали на формирование сварного соединения. *Автоматическая сварка*. (5-6), 28–32.

111. Кучук-Яценко, С., Швец, В., Дидковский, А., (2008). Технология и оборудование для контактной сварки высокопрочных рельсов. *Автоматическая сварка*. (11), 129-138.
112. Антипин, Е., Дидковский, А., Кавуниченко, А., Гуцин, К. Проблемы свариваемости высокопрочных рельсов производства комбината «Азовсталь» марки К76Ф. У: *Матеріали 8-ї Між-нар. конф. молодих учених та спеціалістів, 20 травня 2015, Київ, Україна*. с. 22.
113. Micheletto, A., Cookson, J., Pang, Y., Chen, B., Mutton, P., (2020). The structural integrity of flash-butt welded premium rail steel – Evaluation of strength, microstructure and defects Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: *Journal of Rail and Rapid Transit (IF 1.87)*, doi: <https://doi.org/10.1177/0954409720973138>.
114. Кучук-Яценко, С., Швец, В., Дидковский, А., Антипин Е., Капитанчук, Л., (2013). Дефекты соединений высокопрочных рельсов, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением. *Автоматическая сварка*. (9), 3–9.
115. Cannon, DF., Edel, KO., Grassie, SL., Sawley, K., (2003). Rail defects: an overview. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. (10),865-86.
116. ДСТУ EN 14587-2:2015. Залізничний транспорт. Колія. Стикове зварювання рейок. Частина 2. Нові класи рейок R220, R260, R350НТ із рухомим зварювальним механізмом порівняно зі стаціонарним механізмом. На заміну EN 14587-2:2009. На заміну EN 14587-2:2009 ; чинний від 2016-01-01. Вид. офіц. 2016.
117. Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів та рейок залізниць України. — Дніпропетровськ: Арт-Прес, 2000. — 148 с.
118. Räsänen, A-N., Martikainen, J., (2011). Experimental review of metallurgical flash weld defects in welded joints: Essence of flat spots, penetrators and oxide inclusions. *Sci. Technol. Weld. Joining* (16), 471–476.



119. Годик, Л., Козырев, Н., Поляков, В., (2009), Оптимизация содержания кислорода в рельсовой стали. *Сталь*. (3), 29–32.

120. Mousavizade, M. та Farhangi, H., (2009). Characterization of surface defects associated with flash butt-welded pearlitic rails and their contribution to overload and fatigue failures. *Advanced Materials Research*. **83-86**, 1262–1269.

121. Kusko, C., DuPont, J., Marder, A., (2004). The Influence of Microstructure on Fatigue Crack Propagation Behavior of Stainless Steel Welds. *Welding Journal*, 83(3), 6-14.

122. Кучук-Яценко, С., (1976). Контактная стыковая сварка оплавлением. - Киев: Наук. Думка. 40.

123. Антипин, Е., Кавуниченко, А., Гушин, К., Наконечный, А. Особенности контактной стыковой сварки высокопрочных рельсов современного производства. У: *Матеріали VII науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів "Зварювання та споріднені технології"*, 22 травня 2013, Київ, Україна. с. 36.

124. Кучук-Яценко, С., Дидковский, А., Швец, В., (2008). Технология и оборудование для контактной сварки высокопрочных рельсов. *Автоматическая сварка*. (11), 129-138.

125. Kuchuk-Yatsenko, S., Didkovsky, A., Shvets, V., Antipin, Y., (2016). Flash-butt welding of high-strength rails. *Mining, Informatics, Automation and Electrical Engineering*. (528), 4.

126. Кучук-Яценко, С., Руденко, П., Гавриш, В., Дидковский, А., Антипин, Е., (2019). Система управления процессом контактной сварки оплавлением рельсов в стационарных и полевых условиях для повышения ресурса и надежности железнодорожных путей. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль* (2), 41-50.

127. Кучук-Яценко, С., Руденко, П., Дідковський, О., Левчук, А. Математичне моделювання процесу нагріву металу при контактному стиковому зварюванні безперервним оплавленням. У: *Матеріали міжнародної*

конференції «Сучасні технології з'єднання матеріалів», 31 травня 2021, Київ, Україна. с. 33.

128. Кучук-Яценко, С., Миленин, А., Великоиваненко, Е., Дидковский, А., Антипин, Е., (2018). Математическое моделирование процесса нагрева металла при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением. *Автоматическая сварка*. (10), 3–10.

129. Кучук-Яценко С., (1992). Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. *Киев: Наук. Думка*. 56-78.

130. Weingrill, L., Krutzler, J. та Enzinger, N., (2016). Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails. *Materials Science Forum* . **879**, 2088–2093. doi: <https://doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088>.

131. Alves, L., Lagares, M., Filho, R., Tepedino, T., Goldenstein, H. (2019). Predictive mathematical modeling of the flash-butt welding process to optimize the properties of welds of premium and super premium rails. *International heavy haul STS Conference*. 440–7.

132. Zhili Feng. (2005). Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion. *Sawston: Woodhead Publishing*. 364.

133. Yan Guo Li, Fu Cheng Zang. (2010). Numerical simulation of flash-butt welding of high manganese steel crossing with carbon steel rail. *Advanced materials research*. (123-125), 571-574.

134. Kuchuk-Yatsenko, S., Bogorsky, M., Goronkov, N., (1995). Flash-butt welding of high-strength rails. *Railway technology international*. 151 - 160.

135. Руденко, П., Гавриш, В., Кучук-Яценко, С., Дидковский, А., Антипин, Е., (2017). Влияние параметров процесса стыковой контактной сварки оплавлением на прочностные характеристики стыков железнодорожных рельсов. *Автоматическая сварка*. (5-6), 87–90.

136. Бабаченко О., Кононенко Г., Хулін А., (2018). Дослідження кінетики розпаду аустеніту при безперервному охолодженні сталі К76Ф для рейок звичайних для залізниць широкої колії. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», Сборник научных трудов ИЧМ*. (32), 317-327.

137. Porcaro, R., Faria, G., Godefroid, L., Apolonio, G., Candido, L., Pinto, E., (2019). Microstructure and mechanical properties of a flash butt welded pearlitic rail. *J. Mater. Process. Tech.* (270), 20–27.
138. Антіпін, Є., Зяхор.ю І., Дідковський, О., Кавуніченко, О., Левчук, А., Шило, Ю. (2023). Технологія контактного стикового зварювання оплавленням термічнозміцнених рейок. *У. Матеріали XIII міжнародної науково-практичної конференції. 25 - 26 травня 2023 р., Чернігів. Україна*, с 91.
139. Руденко, П., Зяхор, І., Дідковський, О., Антіпін, Є., Шило, Ю. Міжнародні стандарти у програмі статистичного контролю процесу контактного стикового зварювання оплавленням (КЗСО) залізничних рейок. *У: Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика: Матеріали 22-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 5 жовтня 2022, Київ, Україна.* с. 51–55.
140. Антіпін, Є., Кавуніченко, О. Розробка алгоритму контролю якості зварних з'єднань при контактному стиковому зварюванні оплавленням сучасних високоміцних сталей. *У. Всеукраїнська конференція з міжнародною участю «Проблеми зварювання та споріднених технологій», 17 вересня 2019, Коблево, Україна.* с. 15.
141. Штовба, С. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. *Раздел Fuzzy Logic Toolbox.* URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/> (дата звернення 01.03.2019).
142. Kuchuk-Yatsenko, S., Didkovsky, A., Antipin, E. (2017). 48. Real-time operational control information management system for flash-butt welding of rails. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering.* (529), 4. doi: <http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.35>
143. Антіпін, Є., Руденко, П., Дідковський, О. Контроль і регулювання електричних параметрів контактного стикового зварювання оплавленням (КЗСО) в системі управління процесом. *У: Матеріали міжнародної конференції «Сучасні технології з'єднання матеріалів», 31 травня 2021, Київ, Україна.* с. 34.

144. Кучук-Яценко, С., Руденко, П., Дідковський, О., Антіпін, Є., (2021). Операційний контроль процесу контактного стикового зварювання залізничних рейок методом пульсуючого оплавлення. *Автоматическая сварка*. (5), 8–14.
145. Электронный учебник СТАТИСТИКА StatSoft. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/> (дата звернення 01.03.2019).
146. Kuchuk-Yatsenko, S., Rudenko, P., Gavrish, V., Didkovsky A., Antipin Y., Ziakhor, I., (2020). Operational Control as a Means of the Evaluation of Quality of Welded Connections for Flash-Butt Welding of Modern High-Strength Steels // *Science and Innovation*. (16), 72-78.
147. Штовба. С., Классификация объектов на основе нечеткого логического вывода. URL: <https://www.researchgate.net/publication/280064772> (дата звернення 01.03.2019).
148. Кучук-Яценко, С., Руденко, П., Гавриш, В., Дидковский, А., Антипин, Е., (2016). Статистическое управление процессом контактной стыковой сварки рельсов. Двухуровневая система управления. *Автоматическая сварка*. (5-6), 17–20.
149. Кучук-Яценко, С., Руденко, П., Гавриш, В., Дидковский, А., Антипин Е., (2019). Система управления процессом контактной сварки оплавлением рельсов в стационарных и полевых условиях для повышения ресурса и надежности железнодорожных путей. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль* (2), 41-50.
150. Руденко, П., Зяхор, І., Дідковський, О., Антіпін, Є., (2022). Програма статистичного контролю процесу контактного стикового зварювання оплавленням залізничних рейок. *Автоматичне зварювання*. (11), 28–35. doi: <https://doi:10.37434/as2022.11.04>

## ДОДАТКИ

### Додаток А

#### Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

##### Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Кучук-Яценко, С., Швець, В., Дидковский, А., Антипин Е., Капитанчук, Л., (2013). Дефекты соединений высокопрочных рельсов, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением. *Автоматическая сварка*. (9), 3–9. (Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК).
2. Кучук-Яценко, С., Швець, В., Дидковский, А., Антипин Е., (2016). Влияние неметаллических включений рельсовой стали на формирование сварного соединения. *Автоматическая сварка*. (5-6), 28–32 (Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК).
3. Кучук-Яценко, С., Дидковский, А., Швець, В., Руденко, П., Антипин, Е., (2016). Контактная стыковая сварка высокопрочных рельсов современного производства. *Автоматическая сварка*. (5-6), 7–16 (Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК).
4. Кучук-Яценко, С., Руденко, П., Гавриш, В., Дидковский, А., Антипин, Е., (2016). Статистическое управление процессом контактной стыковой сварки рельсов. Двухуровневая система управления. *Автоматическая сварка*. (5-6), 17–20 (Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК)..
5. Kuchuk-Yatsenko, S., Shvets, V., Didkovsky, A., Rudenko, P., Antipin, E., (2016). Flash-butt welding of high-strength rails. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*. (528), 40–47.
6. Руденко, П., Гавриш, В., Кучук-Яценко, С., Дидковский, А., Антипин, Е., (2017). Влияние параметров процесса стыковой контактной сварки оплавлением на прочностные характеристики стыков железнодорожных

рельсов. *Автоматическая сварка*. (5-6), 87–90 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*).

7. Kuchuk-Yatsenko, S., Didkovsky, A., Antipin, E., Shvets, V., Wojtas, P., Kozłowski, A., (2017). Real-time operational control in information management system for flash-butt welding of rails. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*. (529), 35–42.

8. Кучук-Яценко, С., Миленин, А., Великоиваненко, Е., Дидковский, А., Антипин, Е., (2018). Математическое моделирование процесса нагрева металла при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением. *Автоматическая сварка*. (10), 3–10 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*).

9. Кучук-Яценко, С., Антипін, Є., Дідковський, О., Швець, В., Кавуніченко, О., (2020). Оцінка якості зварних з'єднань високоміцних залізничних рейок сучасного виробництва з урахуванням вимог українського та європейського стандартів. *Автоматическая сварка*. (7), 3–11 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*).

10. Kuchuk-Yatsenko, S., Rudenko, P., Gavrish, V., Didkovsky, A., Antipin, Y. та Ziakhor, I., (2020). Operational control as a means of the evaluation of quality of welded connections for flash-butt welding of modern high-strength steels. *Science and Innovation*. **16**, 72–78 (*Журнал входит до міжнародної науковометричної бази даних SCOPUS, Q3*).

11. Кучук-Яценко, С., Руденко, П., Дідковський, О., Антипін, Є., (2021). Операційний контроль процесу контактного стыкового зварювання залізничних рейок методом пульсуючого оплавлення. *Автоматическая сварка*. (5), 8–14 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*).

12. Руденко, П., Зяхор, І., Дідковський, О., Антипін, Є., (2022). Програма статистичного контролю процесу контактного стыкового зварювання оплавленням залізничних рейок. *Автоматичне зварювання*. (11), 28–35 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*). Режим доступу: doi: 10.37434/as2022.11.04

13. Швець, В., Зяхор, І., Дідковський, О. та Антіпін, Є., (2023). Дослідження структури з'єднань рейок марки R260MN при контактностиковому зварюванні. *Автоматичне зварювання*. (1), 3–10 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*). Режим доступу: doi:10.37434/as2023.01.01.

14. Швець, В., Дідковський, О., Антіпін, Є., Зяхор, І., Капітанчук, Л., Qichen, W., (2022). Особливості мікроструктури з'єднань заєвтектоїдної рейкової сталі марки AREAL-136HE-X при контактностиковому зварюванні. *Автоматичне зварювання*. (3), 26-33 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*). doi: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.03.04>

15. Зяхор, І., Антіпін, Є., Дідковський, О., Кавуніченко, О., Левчук, А., Шило, Ю., Truska Yan., (2023). Сучасні технології зварювання залізничних рейок (огляд). *Автоматичне зварювання*. (5), 5–17 (*Журнал включено до переліку наукових фахових видань ВАК*). Режим доступу: doi: <https://doi.org/10.37434/as2023.04.01>

16. Машина для контактного стикового зварювання рейок, (2022). Винахідники: І. Зяхор, М. Коваль, Є. Дідковський, А., Левчук, Ю. Шило, О., Антіпін, А., та ін. Патент на корисну модель, Україна №151797 Опубл. 14.09.2022.

#### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

17. Антипин, Е., Дидковский, А., Кавуниченко, А., Гушин, К. Проблемы свариваемости высокопрочных рельсов производства комбината «Азовсталь» марки К76Ф. У: *Матеріали 8-ї Між-нар. конф. молодих учених та спеціалістів, 20 травня 2015, Київ, Україна*. с. 22.

18. Антіпін, Є., Кавуніченко, О. Розробка алгоритму контролю якості зварних з'єднань при контактному стиковому зварюванні оплавленням сучасних високоміцних сталей. У. *Всеукраїнська конференція з міжнародною участю «Проблеми зварювання та споріднених технологій», 17 вересня 2019, Коблево, Україна*. с. 15.

19. Антіпін, Є., Дідковський, О., Зяхор, І., Кавуніченко, О. Технологія контактного стикового зварювання оплавленням залізничних рейок високої та надвисокої зносостійкості. У: *Матеріали 11 міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості і технологічних процесів та систем»*, 26 травня 2021, Чернігів, Україна. с. 72.

20. Кучук-Яценко, С., Руденко, П., Дідковський, О., Антіпін, Є. Операційний контроль процесу контактного стикового зварювання залізничних рейок методом пульсуючого оплавлення. У: *Матеріали міжнародної конференції «Сучасні технології з'єднання матеріалів»*, 31 травня 2021, Київ, Україна. с. 27.

21. Кучук-Яценко, С., Руденко, П., Дідковський, О., Левчук, А. Математичне моделювання процесу нагріву металу при контактному стиковому зварюванні безперервним оплавленням. У: *Матеріали міжнародної конференції «Сучасні технології з'єднання матеріалів»*, 31 травня 2021, Київ, Україна. с. 33.

22. Руденко, П., Антіпін, Є., Дідковський, О., Зяхор, І., Кавуніченко, О., та ін. Система контролю і управління процесом контактного стикового зварювання оплавленням залізничних рейок на основі штучного інтелекту У. *Матеріали 21-ї міжнародної науково-практичної конференції «Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика» 06-10 вересня 2021 р., м. Одеса. 76-79*

23. Антіпін, Є., Руденко, П., Дідковський, О. Контроль і регулювання електричних параметрів контактного стикового зварювання оплавленням (КЗСО) в системі управління процесом. У: *Матеріали міжнародної конференції «Сучасні технології з'єднання матеріалів»*, 31 травня 2021, Київ, Україна. с. 34.

24. Руденко, П., Антіпін, Є., Дідковський, О., Зяхор, І., Кавуніченко, О. Контроль відповідності якості зварних з'єднань залізничних рейок вимогам діючих стандартів. У: *Матеріали 21-ї міжнародної науково-практичної*



конференції «Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика», 6 вересня 2021, Одеса, Україна. с. 72–76.

25. Руденко, П., Зяхор, І., Дідковський, О., Антіпін, Є., Шило, Ю. Міжнародні стандарти у програмі статистичного контролю процесу контактного стикового зварювання оплавленням (КСЗО) залізничних рейок. У: *Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика: Матеріали 22-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 5 жовтня 2022, Київ, Україна.* с. 51–55.

26. Antipin, E., Ziakhor, I., Didkovsky, O., Kavunichenko, O. Technologies of flash-butt welding of modern rails based on pulsating flashing process. У: *Матеріали 22-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інженерія поверхні та реновація виробів», 15 червня 2022, Київ, Україна.* с. 3–7.

27. Антіпін, Є., Зяхор, І., Дідковський, О., Кавуніченко, О., Левчук, А., Шило, Ю., (2023). Технологія контактного стикового зварювання оплавленням термічнозміцнених рейок. У. *Матеріали XIII міжнародної науково-практичної конференції. 25 - 26 травня 2023 р., Чернігів. Україна,* с. 91-92. Режим доступу: doi: <http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/28253>

28. Антіпін, Є., Зяхор, І., Міленін, О., (2023). Розрахунково-експериментальне дослідження термічних циклів контактного стикового зварювання оплавленням залізничних рейок. У. *Матеріали 23-ї міжнародної науково-технічної конференції. 20–22 червня 2023 р. м. Київ.* с. 92-94.

## Додаток Б

### Акт впровадження

Затверджую:  
Головний інженер  
Департаменту  
Колійного господарства  
В.О.Яковлев



« » 2019р

Погоджено:  
Заст. директора ІЕЗ ім.Є.О.Патона  
академік НАНУ С.І.Кучук-Яценко



« » 2019р

Акт

01.11.2019р.

м.Київ

Представник УКРЗАЛІЗНИЦІ в особі головного інженера Департаменту колійного господарства Яковлева В.О. та представника Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України в особі заступника директора інституту Кучук-Яценка С.І. склали цей акт в тому, що з 10.01.2012р. по 30.08.2019р. інститутом разом з «ЦП» УКРЗАЛІЗНИЦІ були виконані наступні роботи:

- дослідження процесу контактного стикового зварювання рейок із термічно зміцненої сталі, на основі яких розроблені режими зварювання і технічні умови (ТУ) на процес нових марок рейок;

- проведено збір даних (протоколів) про зварювання рейок з шістьох рейкозварювальних підприємств (РЗП) УКРЗАЛІЗНИЦІ №№ 5, 6, 11, 13, 16 та 39, на яких використовували 11 стаціонарних машин типу К-1000 та 19 підвісних машин типу К-922 з 60 зварниками, загальна кількість зварених стиків була 42361;

- для обчислення цих даних були розроблені алгоритми та програми статистичної обробки згідно рекомендацій державного стандарту;

- протоколи про зварювання рейок РЗП були оброблені статистичними програмами для виявлення таких збурень на процес, як взаємний вплив на якість зварення параметрів процесу з урахуванням різних можливих несприятливих їх комбінацій, незадовільне виконання допоміжних операцій по підготовці рейок перед зварюванням (косина торців і зачищення поверхні під губки), відхилення фізико-хімічних властивостей металу рейок, незадовільне дотримання технологічних операцій зварником (оплавлення торців рейок перед зварюванням, охолодження деталей перед зварюванням), незадовільні умови виробництва (неприпустимі зміни температури навколишнього середовища, напруги мережі), а також відхилень технічного стану зварювального обладнання від норми.

## Додаток В

### Акт технологічних випробувань

**«Затверджую»**  
 Заст. директора Інституту  
 електрозварювання ім. С.О.Патона  
 чл.-кор. НАН України  
 Віктор Шаповалов  
 «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.



**«Затверджую»**  
 Начальник КРЗП  
 Філії «Центр будівництва  
 та ремонту колії» АТ «Укрзалізниця»  
 Ігор РУСІН  
 «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.



#### АКТ

#### технологічних випробувань.

Ми, що нижче підписалися, від «КРЗП» ДТГО «ПЗЗ» головний інженер Бабчук С. Ю., від ІЕЗ ім. С.О. Патона н.с. Дідковський О.В, м.н.с. Антіпін С.В., склали цей акт в тому, що в період з 23.09.2021 по 27.09.2021 було проведено зварювання рейок типу Р65 зі сталі марки К76Ф партії з 5 шт. на мобільному пересувному комплексі ПРЗМ №38 що оснащений зварювальною машиною типу К-900М.

Розроблена технологія КСЗО забезпечує необхідний рівномірний розігрів рейки в зоні зварного з'єднання при зниженому енерговкладенні, при цьому основні параметри процесу зварювання знаходяться в межах, що регламентовані в ТУ У 27.1-40081293-002:2016.



Зварні з'єднання залізничних рейок були випробовуванні на статичний механічний згин. Отримані механічні властивості зварних з'єднань після термічної обробки показали наступні результати.

№ п/п	Навантаження, т.	Прогин, мм	Результат статичного згину	Розтягнення
1	210	38	Зламався	П
2	205	35	Зламався	Г
3	210	41	Зламався	П
4	215	40	Зламався	Г
5	210	38	Зламався	П

Отримані результати відповідають вимогам діючого Українського стандарту ТУ У 27.1-40081293-002:2016.

#### «ВИКОНАВЕЦЬ»

від ІЕЗ ім. С.О. Патона

 АНТІПІН Свєтл  
 ДІДКОВСЬКИЙ Олександр

#### «ЗАМОВНИК»

гол. інженер КРЗП

 БАБЧУК Сергій



## Додаток Д

### Акт технологічних випробувань

<p>«Затверджую»</p> <p>Заст. директора Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона чл.-кор. НАН України</p> <p> Віктор Шаповалов</p> <p>«___» _____ 2021 р.</p> 	<p>«Затверджую»</p> <p>Начальник КРЗП</p> <p>Філії «Центр будівництва та ремонту колій» АТ «Укрзалізниця»</p> <p> Ігор РУСІН</p> <p>«___» _____ 2021 р.</p> 
---	--

#### АКТ

#### технологічних випробувань.

Ми, що нижче підписалися, від «КРЗП» ДТГО «ПЗЗ» головний інженер Бабчук С. Ю., від ІЕЗ ім. Є.О. Патона н.с. Дідковський О.В, м.н.с. Антіпін Є.В., склали цей акт в тому, що в період з 20.08.2021 по 24.08.2021 було проведено зварювання рейок типу Р65 зі сталі марки К76Ф партії з 5 шт. на мобільному пересувному комплексі КСМ-005 № 15 що оснащений зварювальною машиною типу К-922.

Розроблена технологія КСЗО забезпечує необхідний рівномірний розігрів рейки в зоні зварного з'єднання при зниженому енерговкладенні, при цьому основні параметри процесу зварювання знаходяться в межах, що регламентовані в ТУ У 27.1-40081293-002:2016.


Зварні з'єднання залізничних рейок були випробовуванні на статичний механічний згин. Отримані механічні властивості зварних з'єднань після термічної обробки показали наступні результати.

№ п/п	Навантаження, т.	Прогин, мм	Результат статичного згину	Розтягнення
1	215	43	Зламався	П
2	210	37	Зламався	П
3	220	45	Не зламався	П
4	215	40	Зламався	Г
5	210	36	Зламався	П

Отримані результати відповідають вимогам діючого Українського стандарту ТУ У 27.1-40081293-002:2016.

#### «ВИКОНАВЕЦЬ»

від ІЕЗ ім. Є.О. Патона

 АНТІПІН Євген

 ДІДКОВСЬКИЙ Олександр

#### «ЗАМОВНИК»

гол. інженер КРЗП

 БАБЧУК Сергій