

12 24 01 23

## **ВІДГУК**

офіційного опонента д-ра техн. наук **В.В. Перемітька**  
на дисертаційну роботу **ГУБАТЮКА Руслана Сергійовича**  
«Технологія і обладнання для індукційної термічної обробки зварних з'єднань  
термозміцнених залізничних рейок з високовуглецевих сталей»,  
що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел із 189 найменувань, трьох додатків, 117 рисунків, 25 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 282 сторінок, з них основний текст складає 156 сторінок, 89 – окремі сторінки рисунків, 15 – окремі сторінки таблиць

### **Актуальність обраної теми дисертації**

Якість та експлуатаційна стійкість рейок та їх безстикових зварних з'єднань визначають надійність роботи залізничного транспорту. Підвищення зазначених характеристик потребує впровадження нових технологій підвищення надійності безстикового залізничного шляху. Враховуючи збільшення інтенсивності та швидкості руху поїздів та підвищення питомого навантаження на осі колісних пар, проблема підвищення експлуатаційних властивостей рейок набуває стратегічної актуальності. Передусім постає необхідність покращення таких показників, як твердість матеріалу рейок, його контактнo-втомна міцність, опір контактнo-втомним дефектам і крихкому руйнуванню.

Беручи до уваги те, що зона зварного з'єднання рейок неоднорідна за кристалічною структурою та, в порівнянні з основним металом, характеризується меншою пластичністю і підвищеною крихкістю, тут можливе утворення тріщин, сколів та викришування поверхневого шару металу. Для зменшення наслідків від термічного циклу контактнo-стикового зварювання високовуглецевих рейкових сталей широко застосовується термічна обробка. Проте існуючі її технології не дозволяють усувати дефекти у зварних стиках у необхідній мірі.

Виходячи з викладеного, проведення подальших досліджень і вивчення особливостей кінетики фазових перетворень у зварному з'єднанні рейки при проведенні індукційної ТО залишається актуальною задачею, розв'язання якої здатне підвищити надійність зварних стиків в процесі їх експлуатації.

Актуальність теми підтверджується також виконанням в ІЕЗ ім. Є.О. Патона чотирьох науково-дослідних робіт в рамках державних науково-технічних програм в період з 2013 по 2021 рік, в яких автор дисертації був співвиконавцем.

### **Ступінь обґрунтованості й достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Для обґрунтування встановлених закономірностей автором виконані численні теоретичні та експериментальні дослідження (математичне моделювання методом скінчених елементів для визначення розподілу електромагнітних і теплових полів в індукційній системі, фізичне моделювання індукційної термічної обробки на модельних зразках контактних стикових зварних з'єднань для визначення впливу технологічних параметрів на структуроутворення методом імітації темодеформаційного циклу індукційної термічної обробки). Наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі Р.Губатюка, достатньо обґрунтовані, виконані із застосуванням сучасного експериментального обладнання, розроблених методик та методів досліджень. Отримані автором закономірності не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями та накопиченим досвідом інших дослідників, добре узгоджуються з існуючими концепціями.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується результатами теоретичних досліджень та їх зіставленням з отриманими експериментальним шляхом, зокрема за допомогою методів світлової та електронної мікроскопії (для визначення структури та морфології зразків матеріалів), спектрального аналізу. Механічні випробування проводили на атестованому обладнанні із застосуванням стандартизованих методик.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в роботі, підтверджується порівняльним аналізом результатів розрахункових та експериментальних досліджень з відомостями з літературних джерел.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

У якості нових наукових результатів можна визначити наступне:

- запропонований комплексний підхід визначення найсприятливіших режимів індукційної термічної обробки зварних з'єднань залізничних рейок, який ґрунтується на математичному і фізичному моделюванні електромагнітних, теплових і структурно-фазових процесів з використанням зварних модельних зразків малих геометричних форм із забезпеченням необхідного комплексу покращення властивостей зварних з'єднань;
- теоретично обґрунтований та експериментально визначений факт того, що за рахунок керування технологічними параметрами термічної обробки (нагрівання з витримкою температури при 880...900 °С, прискорене охолодження стисненим повітрям до 430...370 °С) забезпечується підвищення структурної однорідності металу зони термічного впливу без утворення гартівних структур та більш рівномірний розподіл твердості металу зварних з'єднань;
- встановлену кінетику фазових перетворень при безперервному охолодженні під час термічної обробки контактної стикового зварного з'єднання високовуглецевої рейкової сталі К76Ф та побудовану термокінетичну діаграму перетворення;
- експериментально встановлений факт того, що в процесі індукційної термічної обробки контактної стикового зварного з'єднання рейкової сталі К76Ф критичні швидкості охолодження металу шву, при якій в інтервалі температур 800...500 °С формується мартенситна структура, складають за усередненим значенням 16 °С/с при охолодженні за експонентним законом та 10 °С/с при охолодженні за лінійним законом.

## **Практичне значення одержаних результатів та впровадження результатів**

За результатами виконаних дисертантом досліджень:

– розроблено методику дослідження впливу індукційної ТО на формування кінцевої структури та механічні властивості рейкової сталі К76Ф;

– складені рекомендації щодо технологічних параметрів режиму індукційної термообробки контактних стикових зварних з'єднань термічно зміцнених рейок, при яких досягається підвищення зональної однорідності металу зварного стику;

– розроблено конструкцію індуктору, яка забезпечує вузьку зону нагріву з рівномірним глибинним нагріванням складових елементів залізничної рейки Р65 та зумовлює зменшений рівень генерації реактивної потужності;

На основі отриманих дисертантом результатів теоретичних та експериментальних досліджень розроблені технологічні рекомендації з проведення індукційної термічної обробки зварних з'єднань термозміцнених залізничних рейок із високовуглецевих сталей запропоновані до використання при будівництві та ремонті вітчизняних залізничних магістральних шляхів для підприємств ПАТ «Укрзалізниця».

## **Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях.**

Основні наукові положення, висновки і рекомендації дисертації знайшли достатнє відображення в 13 наукових працях, з яких 2 внесені до реєстру міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 5 статей у фахових виданнях України, 3 є патентами України, та 3 – тезами доповідей на міжнародних і всеукраїнських конференціях.

Обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Зміст автореферату є ідентичним до змісту дисертації і достатньо повно відображає основні положення дослідження.

#### **Аналіз змісту дисертації.**

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, її зв'язок з науковими програмами та планами, розглянуто стан наукової задачі, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну, практичне значення результатів роботи, особистий внесок здобувача в друкованих працях, відомості про апробацію отриманих результатів і публікації.

У **першому розділі** дисертант аналізує хімічний, структурний склад та механічні властивості сучасних рейкових сталей, способи термічного зміцнення в умовах промислового виробництва сучасних рейок різних виробників. Показано, що перехід на сучасні рейкові сталі при будівництві залізничних магістралей не ліквідувало проблему отримання якісного та надійного зварного з'єднання залізничних рейок.

У дисертації зазначено, що при будівництві безстикового рейкового шляху найкращі показники міцності мають з'єднання, виконані контактним стиковим зварюванням тиском. Проаналізовано особливості формування структури металу і властивості зварного з'єднання залізничних рейок та вплив на появу дефектів процесі експлуатації залізничної колії. Слабким місцем зварних стиків є не тільки вади, пов'язані з непроварами в зоні зварювання або пропалюванням в місцях незадовільного контакту підшви рейок з струмопідвідними контактними губками, дефекти металургійного характеру та механічної обробки швів після зварювання, а й місцеві зниження твердості за рахунок високого відпуску в місцях сполучення зони термічного впливу та основного металу після зварювання та локальної ТО. Зазначене в процесі експлуатації призводить до пошкодження або зламу залізничних рейок.

У розділі наведено способи покращення структури та механічних властивостей зварних з'єднань залізничних рейок. Найбільшого поширення набув спосіб термічної обробки з повторним перекристалізаційним нагрівом

струмами підвищеної частоти зварних з'єднань залізничних рейок з наступним загартуванням стислим повітрям.

Значено також, що для дослідження впливу режимів ТО недостатньо проаналізований вплив циклу гартування, на структуру зварного з'єднання рейкової сталі, а також вплив утвореної структури на експлуатаційну стійкість. Існуючі технології індукційної ТО зварних з'єднань висококомірних рейок потребують подальшого дослідження та удосконалення в плані управління режимами термічного циклу в діапазоні температур фазових перетворень та впливу на структурно фазовий склад металу у зварному з'єднанні. Підкреслено, що незалежно від способу зварювання та режимів ТО, для високовуглецевих рейкових сталей зі структурою перліту можливо отримати з'єднання без утворення в металі шву та ЗТВ тріщин та гартівних структур, але уникнути появи областей зі зниженою твердістю практично неможливо.

Зважаючи на складну геометрію поперечного перерізу рейки, одним із ефективних підходів для вирішення цієї проблеми є застосування методів фізичного і математичного моделювання для визначення необхідних температурних умов протікання процесу, фазових перетворень та енергетичних параметрів індукційної системи.

**Другий розділ** присвячено обґрунтуванню запропонованої комплексної методики досліджень процесу індукційної ТО зварних з'єднань залізничних рейок типу Р65, яка базується на фізичному математичному та структурно-фазовому моделюванні на модельних зразках зі зварним з'єднанням з урахуванням теорії подібності та наступним переходом до натурального зварного стику залізничної рейки.

Для виконання роботи був використаний повнопрофільний фрагмент зварного з'єднання високосилісної залізничної рейки типу Р65 із конверторної сталі К76Ф у відповідності з ДСТУ 4344, звареного методом пульсуючого оплавлення, виконаного на стаціонарній машині К1000 у відповідності з ТУ У 27.1-40081293-002:2016.

У розділі описані матеріали дослідження, методи дослідження мікроструктури, визначення хімічного складу, дослідження кінетики розпаду аустеніту при безперервному охолодженні зварного з'єднання та основного металу рейки зі сталі К76Ф. Представлені методи дослідження механічних властивостей зварного з'єднання рейки.

Також наведено інформацію про розроблене лабораторне устаткування для фізичного моделювання процесу високочастотної індукційної термічної обробки на модельних зразках із зварним з'єднанням та комплекс технологічного обладнання для індукційної ТО зварних стиків залізничних рейок Р65. Представлена методика дослідження розповсюдження температурних полів у зварному з'єднанні в процесі індукційної ТО та наведені типові термічні цикли процесу.

**Третій розділ** присвячено розробці методики математичного моделювання процесу індукційної ТО на модельних зразках зі зварним з'єднанням для дослідження впливу геометричних та технологічних параметрів системи на характер розповсюдження теплових полів та формування кінцевої структури у металі шву.

Для математичного моделювання індукційної ТО використовували чисельний розрахунок метод скінченних елементів. На основі параметрів фізичного моделювання, розрахованих за критеріями подібності, задавалися геометричні, електричні та фізичні параметри індукційної системи, проводився розрахунок електромагнітних полів і обчислювалася потужність тепловиділення в системі «індуктор – виріб». За знайденою потужністю тепловиділення вирішувалася газодинамічна задача природної та вимушеної конвекції. Використовуючи потужність тепловиділення і граничні умови теплообміну, розв'язувалася теплова задача та визначалися температурні поля. Після цього відбувався перерахунок електромагнітної задачі з урахуванням зміни електрофізичних властивостей від температури і передача потужності тепловиділення в теплову задачу. Розрахунок зупинявся при досягненні заданого часу або температури нагріву. Отримане температурне поле

порівнювалося з необхідним для здійснення процесу ТО зразку. У разі невідповідності полів корегувалися параметри індуктора та проводився повторний розрахунок. Після підбору параметрів індуктора, що забезпечують необхідне температурне поле в певній зоні, проводився розрахунок структурних перетворень та технологічних параметрів процесу. При розробці методики моделювання для коректного розрахунку параметрів індукційної системи приймалася до уваги виражена нелінійна залежність фізичних властивостей матеріалів системи, особливо досліджуваного модельного зразку (зважаючи на ступінь його нагріву) від температури та напруженості магнітного поля.

За результатами досліджень визначено розподілені характеристики (електромагнітні, температурні та інші фізичні поля) та зосереджені активні і реактивні потужності, вхідний опір індуктору, коефіцієнт потужності, ККД індукційної системи. Проведено моделювання структурних перетворень в високовуглецевій рейковій сталі при індукційній ТО зварного з'єднання. Аналіз отриманих результатів моделі індукційної системи дозволив визначити найбільш сприятливі енергетичні, геометричні та ключові технологічні параметри процесу індукційної ТО.

У **четвертому розділі** наведено результати фізичного, структурно-фазового моделювання індукційної ТО на модельних зразках. На основі проведених дилатометричних випробувань для металу зварного з'єднання сталі К76Ф побудовано термкінетичну діаграму розпаду переохолодженого аустеніту металу шва.

Виявлено, що зменшений вміст вуглецю у контактному стиковому зварному з'єднанні рейкової сталі К76Ф на стадії її нагрівання зміщує в бік більш високих температур початок та закінчення структурного перетворення  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$  відповідно з 735 і 760 °С до 739 і 790 °С, а початок та закінчення перлітного перетворення  $A_{r3}$  і  $A_{r1}$  на стадії її охолодження відповідно з 620 і 550 °С до 650 і 600 °С. За допомогою оптичної мікроскопії встановлено основні відмінності в структурі модельних зразків при різних термічних циклах. Встановлено, що при



низьких швидкостях охолодження формується перлітна структура різного ступеню дисперсності, подрібнюється бал зерна та збільшується твердість в зоні зварного з'єднання. При збільшенні швидкості охолодження вище  $16\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  одночасно зі структурою перліту з'являються вкраплення мартенситної структурної складової, що значно підвищує твердість металу. Наведено результати дослідження впливу характеру охолодження на формування кінцевої структури. Встановлено, що охолодження за експоненціальним закон дозволяє збільшити критичну швидкість охолодження та підвищити твердість металу у порівнянні з охолодженням за лінійним законом, при якому небажана мартенситна структура з'являється вже при  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

За результатами фізичного моделювання індукційної ТО на лабораторному обладнанні досліджено розповсюдження температурного поля при несиметричному охолодженні. За допомогою методів електронної мікроскопії встановлено, що збільшення швидкості охолодження спричиняє стоншення як феритних так і цементитних пластин перліту. При низьких швидкостях охолодження виявляється характерна зерниста структура перліту, а при збільшенні швидкості охолодження, поряд з глобулярною, з'являється і пластинчата структура перліту.

Отримані мікроструктури дозволили встановити закономірності зміни розмірів зерна за площею, об'ємну долю карбідів та їх розподіл за розміром в області знеміцнення металу. Так, з підвищенням швидкості охолодження зварного з'єднання модельного зразку відбуваються трансформації карбідної фази і зміни об'ємної долі їх у феритній складовій перліту. При швидкості охолодження  $8,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  доля карбідів складає  $24,2\%$  з середнім розміром карбідів  $0,19\text{ }\mu\text{м}$ , а з підвищенням швидкості охолодження до  $14,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  вона досягає значення  $29,8\%$  із середнім розміром карбідів  $0,17\text{ }\mu\text{м}$  і зменшується об'ємна доля феритної матриці.

Проведені механічні дослідження модельних зразків зі зварним з'єднанням після індукційної ТО показали, що застосування термообробки не дозволяє повністю ліквідувати зони зі зниженою твердістю, але її застосування

зменшує відхилення твердості металу зварного з'єднання від рівня твердості основного металу рейок. Зі збільшенням швидкості охолодження змінюється рівень твердості металу по лінії з'єднання – вона збільшується. Аналіз результатів металографії та дослідження механічних властивостей зварного з'єднання виявили як найсприятливіший діапазон швидкостей охолодження на рівні 8...12 °C/c. У цьому разі спостерігається відсутність гартівних структур типу бейніту чи мартенситу та забезпечується мінімально можливий для зварного з'єднання розкид рівня твердості, які відповідають вітчизняним технічним стандартам.

У **п'ятому розділі** представлені результати аналітичних розрахунків, математичного тривимірного моделювання запропонованої конструкції розщепленого індуктору для індукційної ТО зварних з'єднань рейки Р65. Проведені лабораторні випробування розщепленого індуктору показали, що запропонована конструкція забезпечує рівномірне температурне поле у поперечному перерізі зварного стику і відповідає попередньо отриманим результатам при моделюванні розподілення температурного поля у зварному з'єднанні залізничної рейки Р65. Дослідження мікроструктури та механічних властивостей виявили, що у металі зварних з'єднань, зміцнених після індукційної ТО за рекомендованими режимами, відсутні гартівні структури мартенситу, підвищується бал зерна, відхилення твердості у зонах знеміцнення знаходиться в допустимих межах, міцність зварних з'єднань відповідає вимогам ТУ У 27.1-40081293-002:2016. Рекомендовано технологічні параметри процесу індукційної термічної обробки зварних з'єднань рейок типу Р65, які дозволяють підвищити структурну однорідність та твердість в зоні загартування головки до рівня основного металу рейок.

Висновки розділів та загальні висновки роботи відповідають поставленій меті та характеризують науково-практичні результати дисертації.

Дисертація містить три додатки з матеріалами, що доповнюють основну частину роботи.

В додатку А виконано порівняння способів нагріву при ТО зварних з'єднань термічно зміцнених залізничних рейок. Додаток Б, В містять акти апробації та технологічних випробувань результатів дисертаційної роботи.

#### **Зауваження та коментарі до дисертації:**

1. Твердження про те, що зносостійкість напряду залежить від твердості матеріалу виробу (наприклад, с.29,194) не є у повній мірі вірним.
2. В інформації до мікроструктур на рис.1.10 відсутнє значення кратності збільшення.
3. До наведеного на рис.2.10 характеру зміни твердості металу в досліджуваному зварному з'єднанні бракує пояснень у тексті зафіксованій несиметричності значень твердості по обидва боки від зони сплавлення.
4. Наведені у розділі 3 загальні положення щодо математичного моделювання індукційної системи (стор.111-116) доцільно було б викласти у розділі 1. Викладення суті методу скінчених елементів досить детальне і виглядає затягнутим.
5. Роботою, на жаль, не передбачалися механічні випробування з визначення ударної в'язкості та втомної міцності металу ЗТВ контактної стикового зварного з'єднання до та після індукційної термічної обробки. Згадані показники були б доречними як для порівняння службових характеристик зварних з'єднань, так і для прогнозування терміну їх експлуатації.
6. У рукопису представлено результати спектрального аналізу металу зварного з'єднання (розділ 4), але не вказано в якій саме характерній зоні вони визначалися. Доцільним було провести рентгеноструктурні та рентгеноспектральні дослідження щодо розподілу вуглецю, марганцю, ванадію та алюмінію у всіх зонах контактної стикового зварного з'єднання для порівняння з основним металом залізничної рейки.
7. Застосування програмного забезпечення для автоматичного аналізу зображень при оцінці розмірів зерен (п.4.3) може мати деяку похибку, тому що залежить від якості виявлення границь зерен, яке, в свою чергу,

залежить від якості металографічних шліфів. Для підтвердження результатів доцільно було б провести і стандартні оптичні дослідження з визначення середнього розміру зерна.

8. У роботі не досліджено дефекти у зварних з'єднаннях рейок, бажаними були б фрактографічні дослідження зруйнованих зразків рейок до та після індукційної термічної обробки зварних стиків рейок.
9. Із наведеного в розділі 4 залишилося невідомим, як змінюється після індукційної термічної обробки розмір та мікроструктура загартованого шару в характерних зонах контактної стикового зварного з'єднання головки залізничної рейки.
10. Автором не передбачалися натурні випробування термічно оброблених зварних стиків залізничних рейок Р65. Як наслідок, не зрозуміло, наскільки підвищиться ресурс роботи зварного стику рейки та знизиться його пошкоджуваність у результаті індукційної термічної обробки за запропонованими автором режимами.
11. Під час підготовки рукопису автору, не жаль, не вдалося уникнути дрібних помилок (стор.13, 26, 29, 35, 80, 84, 91, 139, 144,184): використання застарілих одиниць виміру фізичних величин (навантаження від коліс 30...35 те, стор.21) та неусталених понять (*прокалювання* замість прожарювання; *перетин*, а не переріз; *мілке* зерно замість дрібне; *токопідведення*, а не струмопідведення тощо).

Наведені зауваження, проте, не знижують загального високого рівня роботи та цінності отриманих результатів.

Дисертація відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України. Назва та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології.

#### **Загальний висновок.**

Розглянуті вище результати дають підстави вважати, що дисертація Руслана Сергійовича Губатюка є завершеною науково-дослідною роботою, яка

узагальнює теоретичні й експериментальні дослідження та вирішує важливу комплексну задачу підвищення надійності зварних з'єднань в процесі експлуатації безстикового рейкового шляху залізничного транспорту шляхом визначення впливу технологічних параметрів процесу індукційної термообробки на особливості формування кінцевої структури та механічні властивості контактної стикового зварного з'єднання термозміцненої рейки типу Р65. Особистий внесок здобувача визначено як в дисертації, так і в авторефераті для робіт, опублікованих у співавторстві.

Оформлення дисертації і автореферату в цілому, з урахуванням зазначених вище зауважень, відповідає чинним нормативним документам.

За обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем, представлена дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567 та рекомендується до захисту. Її автор – Губатюк Руслан Сергійович – заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології.

Декан металургійного факультету  
Дніпровського державного  
технічного університету,  
доктор технічних наук (05.03.06),  
професор

Валерій ПЕРЕМІТЬКО

Підпис В.Перемітька засвідчую:  
Учений секретар  
Дніпровського державного  
технічного університету,  
канд.соціолог.наук, доцент



Людмила СОРОКІНА