

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ У ПРОЦЕСІ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ НА МАЛИХ ЗРАЗКАХ ІЗ НАЯВНІСТЮ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

Р.С. Губатюк, С.В. Римар, О.С. Прокоф'єв, В.А. Костін, О.В. Дідковський, О.Ф. Мужиченко

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

Підбір режиму нагріву, який забезпечує оптимальне поєднання технологічних параметрів для отримання необхідних структурно-фазових перетворень зварного стику високоміцних залізничних рейок, який піддається термічній обробці, є складним процесом, який вимагає проведення великої кількості експериментів із значними витратами часу, трудових, енергетичних та фінансових ресурсів. Для вирішення такого роду задачі доцільним застосовувати методи математичного та фізичного моделювання, які засновані на використанні математичних моделей, чисельних методів розрахунків і отриманих експериментальних даних фізичного моделювання при визначенні ключових параметрів процесу термічної обробки. Для цього на основі теорії подібності була запропонована математична модель процесу термічної обробки малих зразків з урахуванням взаємно-пов'язаних властивостей і фізичних явищ із оригіналом дослідження. Розглядається спрощена модель зразка, на якому відпрацьовуються оптимальні режими нагріву і досліджуються властивості металу шву, підданого термічній обробці, після чого здійснюється перехід до уточнення режимів термічної обробки реального зварного стику високоміцних залізничних рейок. Даний підхід дає можливість значно скорочувати ресурси при визначенні оптимальних режимів нагрівання виробів із високоміцних вуглецевих сталей, у тому числі стикових зварних швів залізничних рейок. Бібліогр. 13, рис. 5.

Ключові слова: індукційний нагрів, термічна обробка, зварний шов залізничних рейок, математичне моделювання, фізичне моделювання, малі зразки.

При укладанні безстикової залізничної колії застосовують високоміцні рейки із сталей нового покоління із підвищеним вмістом вуглецю. Основний метал і зварні з'єднання рейок [1, 2] повинні забезпечити високі механічні характеристики, які обумовлені підвищеним осьовим навантаженням і швидкістю рухомого складу.

Для зняття залишкових напружень і нормалізації металу зварного з'єднання рейок застосовується термічна обробка (ТО) [3].

Одним із найбільш ефективних способів нагріву у процесі ТО є спосіб індукційного нагріву струмом високої частоти (ВЧ), який має ряд переваг у порівнянні з іншими способами. Це безконтактне нагрівання, висока щільність енергії у конкретній зоні об'єкта, який піддається нагріванню, досягнення високих температур, можливість здійснювати керування температурним полем об'єкта, можливість виконання нагріву об'єкта у різних середовищах, екологічна безпека процесу ТО [4]. У зв'язку із наведеним, актуальним є подальші дослідження та вивчення особливостей фазових перетворень у зварних з'єднаннях рейок після виконання процесу ТО [5, 6]. Процесу виконання індукційної ТО тіл складної форми, до яких відносять рейки із високовуглецевої сталі, прита-

манна велика кількість залежних один від одного параметрів. Підбір режиму нагрівання, який забезпечує оптимальний збіг технологічних параметрів для отримання необхідних структурно-фазових перетворень зварного стику рейки, який піддається ТО, є складним процесом, який вимагає проведення великої кількості експериментів із значними витратами часових, трудових, енергетичних і фінансових ресурсів.

Для вирішення такого роду задачі доцільно застосувати методи математичного і фізичного моделювання, які засновані на використанні математичних моделей [6, 7], чисельних методів розрахунку і експериментальних даних фізичного моделювання при визначенні ключових параметрів процесу ТО. Для цього на основі теорії подоби було запропоновано математичну модель процесу ТО з урахуванням взаємопов'язаних властивостей і фізичних явищ із оригіналом – реальним об'єктом дослідження. Таким чином, спочатку розглядалась мала, спрощена модель зразка, на якій відпрацьовувались оптимальні режими нагріву і досліджуються властивості металу зварного шву, який був підданий ТО, після чого здійснюється перехід до уточнення режимів ТО реального зварного стику залізничних рейок.

Губатюк Р.С. – <https://orcid.org/0000-0002-0851-743X>, Римар С.В. – <https://orcid.org/0000-0003-0490-4608>, Прокоф'єв О.С. – <https://orcid.org/0000-0003-4643-6611>, Костін В.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>, Дідковський О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5268-5599>, Мужиченко О.Ф. – <https://orcid.org/0000-0002-4870-3659>
© Р.С. Губатюк, С.В. Римар, О.С. Прокоф'єв, В.А. Костін, О.В. Дідковський, О.Ф. Мужиченко, 2021

У даній роботі розглянуті принципи математичного моделювання електромагнітних і теплових полів у процесі індукційного нагріву малих зразків у вигляді суцільних круглих стрижнів при наявності поперечного зварного шву. Методи математичного і подальшого фізичного моделювання повинні бути тісно пов'язаними. Розрахункові параметри, які отримано на етапі математичного моделювання, повинні бути основою при фізичному моделюванні, де на малих зразках із зварним швом відбувається реальний процес ТО.

Після перерахунку за теорією подоби оптимальних параметрів, які отримано на етапі фізичного моделювання, відбувається перехід до дослідження ТО зварного шву реального зварного стику і підбору режимів його нагріву. Таким чином, спрощується пошук оптимальних режимів ТО зварного шву залізничних рейок.

Для визначення основних параметрів фізичної моделі системи «індуктор–виріб» виконано розробку математичної моделі, яка відображує процес ВЧ індукційного нагріву зразка з високовуглецевої рейкової сталі з імітацією зони зварного з'єднання. Це дозволяє виконати розрахунок основних електричних параметрів системи, а також отримати просторово-часовий розподіл температурного поля у процесі виконання ТО. Для вирішення такого роду задачі можливо застосувати програмні пакети, які базуються на основі методу кінцевих елементів. Основними елементами вісьосиметричної моделі (рис. 1) було визначено:

- суцільний стрижень циліндричної форми діаметром 8,5 мм і довжиною 110,0 мм із властивостями і чинниками, які притаманні високовуглецевій сталі та з імітацією зони зварного з'єднання у його центрі;
- тривитковий водоохолоджувальний індуктор із силою струму 200 А та частотою 130 кГц;
- повітряний простір, обмежений внутрішньою поверхнею сфери, яка оточує систему, яка піддається дослідженню.

Процес індукційного нагріву описується нелінійною взаємозв'язаною системою рівнянь Максвелла і Фур'є відповідно для електромагніт-

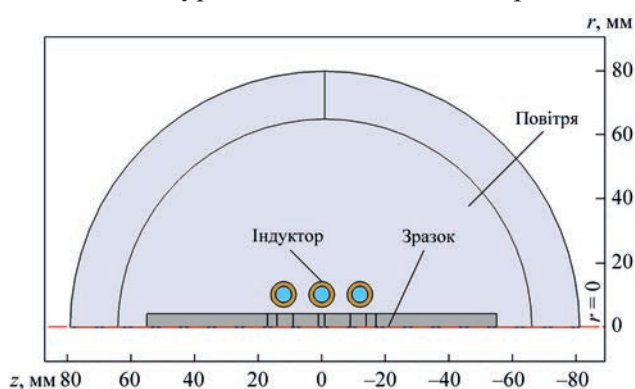


Рис. 1. Вісьосиметрична модель індукційної системи

ного і теплового поля з відповідними граничними умовами [8].

Для отримання рішення електромагнітної задачі систему рівнянь Максвелла представлено у диференціальній формі:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}; \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho;$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

де \mathbf{H} , \mathbf{E} – вектори напруженості магнітного та електричного полів; \mathbf{D} , \mathbf{B} – вектори електричної і магнітної індукції; \mathbf{J} – вектор щільності струму провідності; $\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E}$ – щільність струму провідності; ρ – щільність стороннього електричного заряду; σ – питома провідність речовини.

Дані рівняння доповнюються рівняннями зв'язку напруженості магнітного поля і магнітної індукції, електричного зміщення і напруженості електричного поля, які характеризують електричні і магнітні властивості середовища:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}; \mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}.$$

де μ_0 , μ_r – абсолютна і відносна магнітні проникнення середовища; ϵ_0 , ϵ_r – абсолютна і відносна діелектричні проникнення речовини.

Математична модель з огляду на вісьосиметричний стан, представлена у двовірній циліндричній системі координат rOz .

Оскільки у вісьосиметричній моделі струми мають напрямком нормальний до площини геометричної моделі, то векторний магнітний потенціал A_ϕ має одну складову $(0, \phi, 0)$, на відмінність від полів \mathbf{H} і \mathbf{B} , котрі мають у цій площині дві складові (r, z) .

Особливістю математичної моделі індукційної системи є наявність залежності електрофізичних властивостей матеріалів від температури.

Для врахування залежностей фізичних параметрів сталі від температури T у процесі нагріву зразка, таких як питомий електричний опір $\rho_{st}(T)$, теплоємність $C_{p, st}(T)$ і теплопровідність $\lambda_{st}(T)$, вони були задані у вигляді апроксимаційних функцій на основі даних щодо високовуглецевих сталей [9].

Приймалося до уваги і нелінійна залежність магнітної проникності сталі від температури і втрата магнітних властивостей у зразку, який досліджується, при перевищенні температури точки Кюрі, що змінює глибину проникнення магнітного поля у сталь.

При моделюванні процесу індукційного нагріву у якості граничних умов для електромагнітної частини моделі на вісі симетрії Oz приймалося відсутність тангенціальної складової напруженості магнітного поля і наявність магнітної ізоляції на межі сфери (див. рис. 1).

Математична модель нестационарної теплової задачі у часовій області включає диференціальне рівняння Фур'є, яке описує розподіл температур-

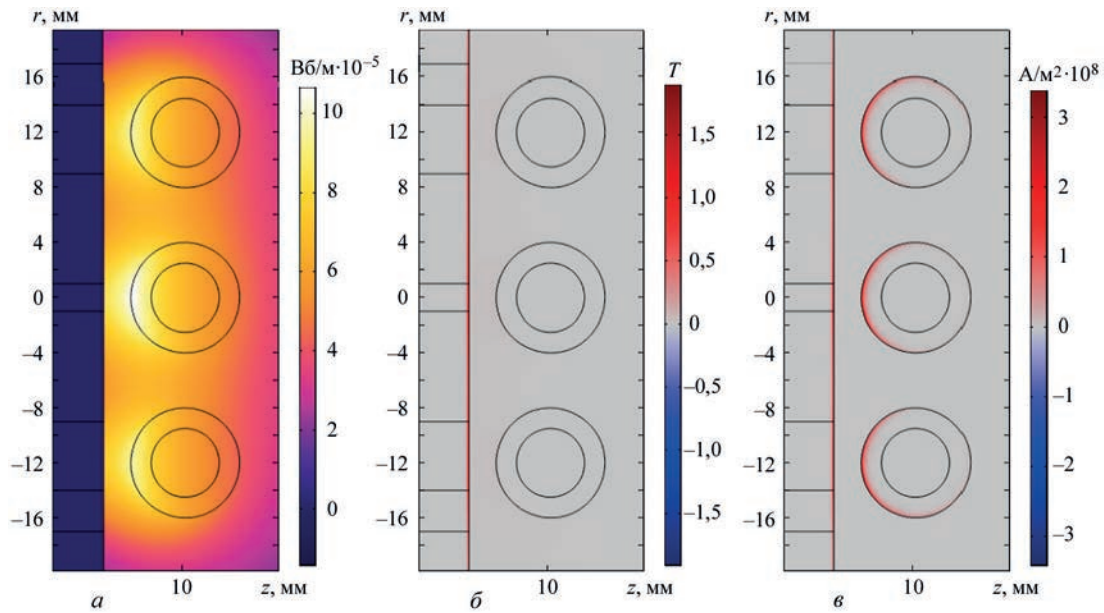


Рис. 2. Розподілення магнітного потенціалу A_ϕ (а); магнітної індукції B (б); щільності струму J (в)

ного поля у заготівці, яка піддається нагріванню, у просторі і часі:

$$P_{st} C_{pst} \frac{\partial T}{\partial r} - \nabla \lambda_{st} \nabla T = Q,$$

де Q – питома потужність джерела тепла.

Для врахування теплових втрат у математичній моделі було задано граничні умови третього роду у вигляді теплообміну із оточуючим середовищем шляхом конвекції і випромінювання із поверхні зразка, який було піддано нагріванню.

Приймалась умова постійної температури, яка дорівнювала 40 °С у витках індуктора з огляду на його охолодження. На вісі симетрії $0z$ приймалась гранична умова Неймана

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

У якості вихідних даних були взяті амплітудне значення струму в індукторі та його частота. Розрахунок здійснювався у наступній послідовності:

- електромагнітний – тепловий розрахунок, з урахуванням заданої щільності розрахункової сітки, властивостей матеріалів і граничних умов.

При моделюванні враховувались наступні фізичні процеси:

- проходження струму у індукторі з урахуванням скін-ефекту, кільцевого ефекту та ефекту близькості із зразком;
- проходження електромагнітного поля і наведення вихрових струмів у зразку з урахуванням скін-ефекту, ефекту близькості з індуктором;
- нагрів вихровими струмами металу зразка;
- втрати магнітних властивостей металом зразка після перевищення температурою точки Кюрі;
- процеси теплопровідності у об’ємі металу зразка;
- втрати тепла за рахунок випромінювання та конвекційного теплообміну.

В процесі вирішення задачі було отримано результати стосовно розподілу магнітного потенціалу A_ϕ (рис. 2, а), магнітної індукції B (рис. 3, б) та щільності струму J (рис. 3, в).

За підсумками електромагнітного розрахунку видно вплив скін-ефекту, кільцевого та поверхневого ефекту у провідниках індуктора. Струм розподілено нерівномірно по перерізу провідників, він концентрується на поверхні провідників індуктора, які наближені до зразка. Подібний розподіл спостерігається і з вихровим струмом, який проходить по зовнішній поверхні зразка під індуктором – по периметру зразка.

Метою теплового розрахунку є визначення режимів нагрівання, які забезпечують рівномірне розподілення теплового поля на поверхні зразка у часі в області, яка імітує зварне з’єднання, для отримання однорідної структури металу в місті нагрівання. При цьому температура повинна бути вище точки фазового перетворення A_{c3} і знаходитись у діапазоні 750...950 °С. Було отримано достатньо рівномірне розподілення температури по довжині зразка під індуктором (на відстані до 8 мм від центру нагрівання) у контрольних точках на поверхні зразка (рис. 3).

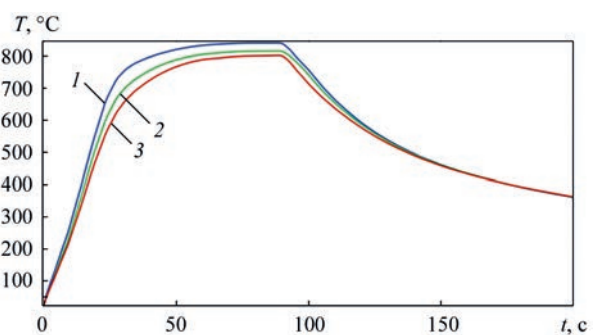


Рис. 3. Зміна температури у часі на поверхні зразка по його довжині у процесі виконання нагріву: 1 – центр зразка; 2 – 6 мм від центру; 3 – 11 мм від центру

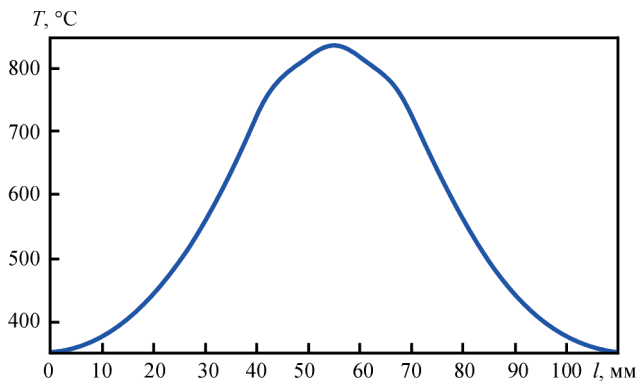


Рис. 4. Розподіл температури на поверхні зразка по його довжині у кінці процесу нагрівання.

Протягом 30 с від початку нагрівання відбувається інтенсивне зростання температури зразка. У цей період часу зразок має феромагнітні властивості, глибина скін-прошарку є малою, а щільність індукованого струму в ньому велика, що забезпечує великий рівень потужності нагрівання, яка виділяється у зразку. Після 30 с при тих самих значеннях струму швидкість нагрівання зменшується через поступове втрачання металом зразка магнітних властивостей і зменшенням у ньому щільності індукованого струму і відповідно зменшенням теплової потужності, яка виділяється у металі зразка. У підсумку інтенсивність нагрівання зменшується. Після 50 і до 90 с процесу нагрівання здійснюється примусова витримка температури для нормалізації металу шва та близькошовної зони (8...10 мм від центру шва) за рахунок регулювання струму в індукторі та питомої потужності, яка вкладається в метал зразка. Після 90 с нагрівання припиняється і зразок природним шляхом охолоджується. Математичне моделювання процесу індукційного нагріву дозволяє розрахувати

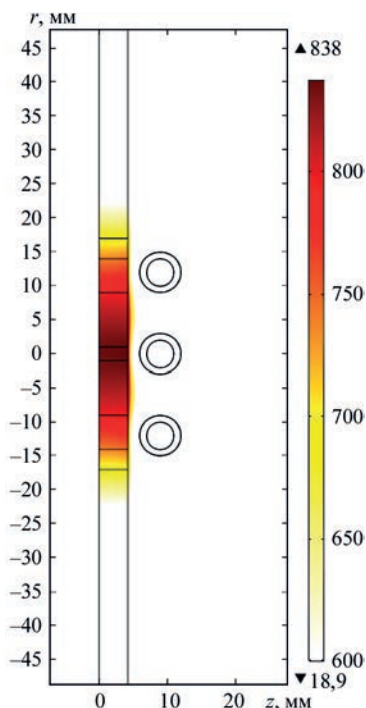


Рис. 5. Розподіл температурного поля у зразку

і визначити необхідні режими нагріву в залежності від конфігурації і геометричних розмірів зразка та індуктора при заданих теплофізичних параметрах металу зразка і енергетичних параметрах, які задаються для визначення розподілу електромагнітних і теплових полів у системі «індуктор–виріб». Після чисельного розрахунку режимів нагрівання здійснюється фізичне моделювання процесу термічної обробки зварного з'єднання малого зразка з дотриманням отриманих шляхом розрахунків режимів і з наступним їх уточненням. Далі досліджується твердість металу та аналізуються структурні перетворення, які утворилися в металі. Якщо характеристики металу зразка, який піддано термічній обробці, задовольняють необхідним вимогам, то виконавши перерахунок параметрів процесу термічної обробки за теорією подоби необхідно перейти до дослідження процесу індукційного нагрівання при виконанні термічної обробки металу шва та близькошовної зони реального виробу – зварного стику залізничних рейок, при цьому дотримуючись отриманих шляхом розрахунків режимів нагрівання та уточнюючи їх, а також корегуючи конфігурацію індуктора [10–13].

На рис. 4 наведено розподіл температури на поверхні зразка по його довжині у кінці процесу нагрівання (90-та секунда), а на рис. 5 – розподіл температурного поля у зразку (70-та секунда) процесу нагрівання.

Таким чином, малі зразки дозволяють визначити оптимальні режими індукційного нагріву, які є початковими при дослідженні і підборі оптимальних режимів індукційного нагріву для виконання ТО зварних стиків залізничних рейок із високоміцних сталей.

Такий підхід дозволяє значно скоротити часові, трудові, енергетичні і фінансові ресурси при визначенні оптимальних режимів нагріву виробів із високоміцних вуглецевих сталей, таких як стикові зварні шви залізничних рейок.

Перед виконанням фізичного нагріву зварного шва залізничних рейок за визначеними параметрами процесу термічної обробки доцільно також виконати математичне моделювання процесу нагріву зварного шва індуктором, який охоплює зварний шов і має складну форму, наближену відповідно до складного поперечного перерізу самої залізничної рейки. Виконання математичного моделювання системи «індуктор–вимір» можливо у трьохвимірній 3D моделі із застосуванням комп'ютера необхідної потужності, що є необхідним для розрахунку енергетичних параметрів індуктора і його геометричних розмірів. Виконання математичного моделювання системи «індуктор–вимір» щодо розрахунку енергетичних параметрів індуктора і його геометричних розмірів є останнім і важливим етапом моделювання, який базується на великому масиві даних і потребує додаткового дослідження.

Висновки

1. Вибір режиму нагрівання, який забезпечує оптимальне поєднання технологічних параметрів процесу термічної обробки для отримання необхідних структурно-фазових перетворень у стиковому зварному шві високоміцних залізничних рейок є складним процесом, який потребує проведення великої кількості експериментів, значних часових, енергетичних, трудових і фінансових витрат. Для вирішення такої задачі доцільніше застосовувати методи математичного і фізичного моделювання, які засновані на використанні математичних моделей, чисельних методів розрахунків і отриманих експериментальних даних фізичного моделювання при визначенні ключових параметрів процесу термічної обробки на малих зразках із наступним переходом за теорією подоби до визначення режимів термічної обробки реальних зварних стиків залізничних рейок.

2. Застосування малих зразків дозволяє підбрати і визначити оптимальні режими індукційного нагріву, які є основою при проведенні наступних досліджень і підборі оптимальних режимів індукційного нагріву при виконанні термічної обробки реальних зварних стиків залізничних рейок із високоміцних сталей. Також використання математичних моделей, чисельних методів розрахунків і отриманих експериментальних даних фізичного моделювання при визначенні ключових параметрів процесу термічної обробки на малих зразках дозволяє з наступним переходом за теорією подоби визначити енергетичні параметри індуктора і його геометричні розміри, а також потужність джерела живлення та інше індукційне обладнання.

Список літератури

1. Кучук-Яценко С.И., Кривенко В.Г., Дидковский А.В. и др. (2012) Технология и новое поколение оборудования для контактной стыковой сварки высокопрочных рельсов современного производства при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей. *Автоматическая сварка*, **6**, 32–37.
2. Кучук-Яценко С.И., Дидковский А.В., Швец В.И. и др. (2016) Контактная стыковая сварка высокопрочных рельсов современного производства. *Там же*, **5-6**, 7–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.06.01>
3. Gubatyuk, R.S. (2019) Heat treatment of welded joints of highstrength railway rails (Review). *The Paton Welding J.*, **2**, 41–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.02.07>
4. Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R., Black, M. (2003) *Handbook of Induction Heating*. Marcel Dekker Inc., New York, USA.
5. Пантелеймонов Е.А. (2018) К вопросу термической обработки сварных стыков железнодорожных рельсов. *Автоматическая сварка*, **3**, 43–47. DOI: <https://doi.org/as2018.03.08>
6. Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Попова М.А., Деревянов М.Ю. (2019) Оптимальное проектирование индуктора для поверхностной закалки цилиндрических заготовок на основе численной двумерной модели. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*, **1**, сс. 40–50.

7. Кучерявая И.Н. (2015) Применение мультифизического моделирования в решении задач электротехники. *Праці ІЕД НАНУ*, **42**, 112–122.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. (2006) *Теория поля. Теоретическая физика*. Том II. Москва, Физматлит.
9. Чиркин В.С. (1959) *Теплофизические свойства материалов*. Москва, Физматлит.
10. Prokofiev, O.S., Gubatyuk, R.S., Pismennyi, O.S. et al. (2020) Development of inductors for bulk and surface heat treatment of welded butt joints of railway rails. *The Paton Welding J.*, **5**, 41–48. doi: 10.37434/tpwj2020.05.07
11. Prokof'iev, O., Gubatyuk, R., Rymar, S. et al. (2020) Inductor for Uniform Bulk Heat Treatment of Welded Butt Joints of Railway Rails. *Solid State Phenomena*, **313**, 72–81.
12. Письменный О.С., Пантелеймонов Е.О., Рymar С.В., Губатюк Р.С. (2016) *Індукційний пристрій для термічної обробки зварних стиків залізничних рейок*. Пат. на кор. модель № UA 116086 U Україна, МПК (2006.01) C21D 1/10. (Україна (UA)); ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (UA). № u201611055; Заявл. 03.11.2016; Опубл. 10.05.2017.
13. Пантелеймонов Е.О., Губатюк Р.С. (2016) Пат. на кор. модель № UA 109123 U Україна, МПК C21D 1/10. *Індукційний пристрій для термічної обробки зварних стиків залізничних рейок*. Україна (UA); ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (UA). № u201601958; Заявл. 29.02.2016; Опубл. 10.08.2016.

References

1. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Krivenko, V.G., Didkovsky, A.V. et al. (2012) Technology and new generation of equipment for flash butt welding of advanced high-strength rails for construction and reconstruction of high-speed railway lines. *The Paton Welding J.*, **6**, 22-26.
2. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, A.V., Shvets, V.I. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails of nowadays production. *Ibid.*, **5-6**, 4-12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.01>
3. Gubatyuk, R.S. (2019) Heat treatment of welded joints of high-strength railway rails (Review). *Ibid.*, **2**, 41–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.02.07>
4. Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R., Black, M. (2003) *Handbook of Induction Heating*. Marcel Dekker Inc., New York, USA.
5. Panteleymonov, E.A. (2018) On the problem of heat treatment of welded joints of railway rails. *The Paton Welding J.*, **3**, 36-39. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.03.08>
6. Pleshivtseva, Yu.E., Popov, A.V., Popova, M.A., Derevyanov, M.Yu. (2019) Optimal design of inductor for surface hardening of cylindrical billets on the base of numerical 2D model. *Vestnik Astrakh. GTU. Seriya: Upravlenie, Vychislitel'naya Tekhnika i Informatika*, **1**, 40–50 [in Russian].
7. Kucheryavaya, I.N. (2015) Application of multiphysical modeling in solution of problems of electrical engineering. *Pratsi IED NANU*, **42**, 112–122 [in Russian].
8. Landau, L.D., Lifshits, E.M. (2006) *Field theory. Theoretical physics*. Vol. 2. Moscow, Fizmatlit [in Russian].
9. Chirkin, V.S. (1959) *Thermophysical properties of materials*. Moscow, Fizmatlit [in Russian].
10. Prokofiev, O.S., Gubatyuk, R.S., Pismennyi, O.S. et al. (2020) Development of inductors for bulk and surface heat treatment of welded butt joints of railway rails. *The Paton Welding J.*, **5**, 41–48. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.05.07>
11. Prokof'iev, O., Gubatyuk, R., Rymar, S. et al. (2020) Inductor for uniform bulk heat treatment of welded butt joints of railway rails. *Solid State Phenomena*, **313**, 72–81.
12. Pysmennyi, O.S., Panteleimonov, E.O., Rymar, S.V., Gubatyuk, R.S. (2016) *Induction device for heat treatment of welded joints of railway rails*. Pat. Ukraine on utility model UA 116086 U, Int. Cl. (2006.01) C21D 1/10. Fill. 03.11.2016; Publ. 10.05.2017 [in Ukrainian].
13. Panteleimonov, E.O., Gubatyuk, R.S. (2016) *Induction device for heat treatment of welded joints of railway rails*. Pat. Ukraine on utility model. UA 109123 U, Int. Cl. C21D 1/10. Fill. 29.02.2016; Publ. 10.08.2016 [in Ukrainian].

SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC AND THERMAL FIELDS IN THE PROCESS OF INDUCTION HEATING ON SMALL SPECIMENS WITH THE PRESENCE OF WELDED JOINT OF HIGH-STRENGTH RAILWAY RAILS

R.S. Hubatyuk, S.V. Rymar, O.S. Prokofiev, V.A. Kostin, O.V. Didkovsky, O.F. Muzhychenko

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

Selection of heating mode, which provides an optimal combination of technological parameters to obtain the necessary structural and phase transformations of welded butt of high-strength railway rails, which is subjected to heat treatment, is a complex process that requires carrying out a large number of experiments with a significant consumption of time, labor, power and financial resources. To solve this type of problem, it is rational to use methods of mathematical and physical modeling, which are based on the use of mathematical models, numerical calculation methods and experimental data of physical modeling in determining key parameters of heat treatment process. For this purpose, based on the theory of similarity, a mathematical model of the process of heat treatment of small specimens was proposed, taking into account the interrelated properties and physical phenomena with the original study. A simplified model of the specimen is considered, on which the optimal heating modes are tested and the properties of the weld metal subjected to heat treatment are investigated, after which the transition to specification of the heat treatment modes of the real welded butt of high-strength railway rails is carried out. This approach makes it possible to significantly reduce resources in determining the optimal heating modes of products made of high-strength carbon steels, including butt welded joints of railway rails. 13 Ref., 5 Fig.

Key words: induction heating, heat treatment, weld of railway rails, mathematical modeling, physical modeling, small specimens.

Надійшла до редакції 14.12.2020



МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ «ПАТОНСЕРТ»

Товариство з обмеженою відповідальністю «Міжнародний науково-технічний центр забезпечення якості та сертифікації «ПАТОНСЕРТ» (ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ») створено в 1994 р. спільним рішенням НТК «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України», Товариства зварників України, Асоціації зварників Грузії і Казахстану та Інституту зварювання та захисних покриттів (Білорусь) з метою підвищення якості та конкурентоспроможності продукції зварювальних виробництв на основі впровадження і сертифікації систем забезпечення якості.

Основні напрямки діяльності центру:

- розроблення правил і процедур проведення оцінки та сертифікації зварювальних виробництв;
- надання консультативних послуг підприємствам зварювального виробництва при впровадженні систем забезпечення якості зварювання;
- проведення спільних з міжнародними центрами сертифікаційних випробувань;
- сертифікація зварювальних виробництв відповідно до вимог національних та міжнародних стандартів;

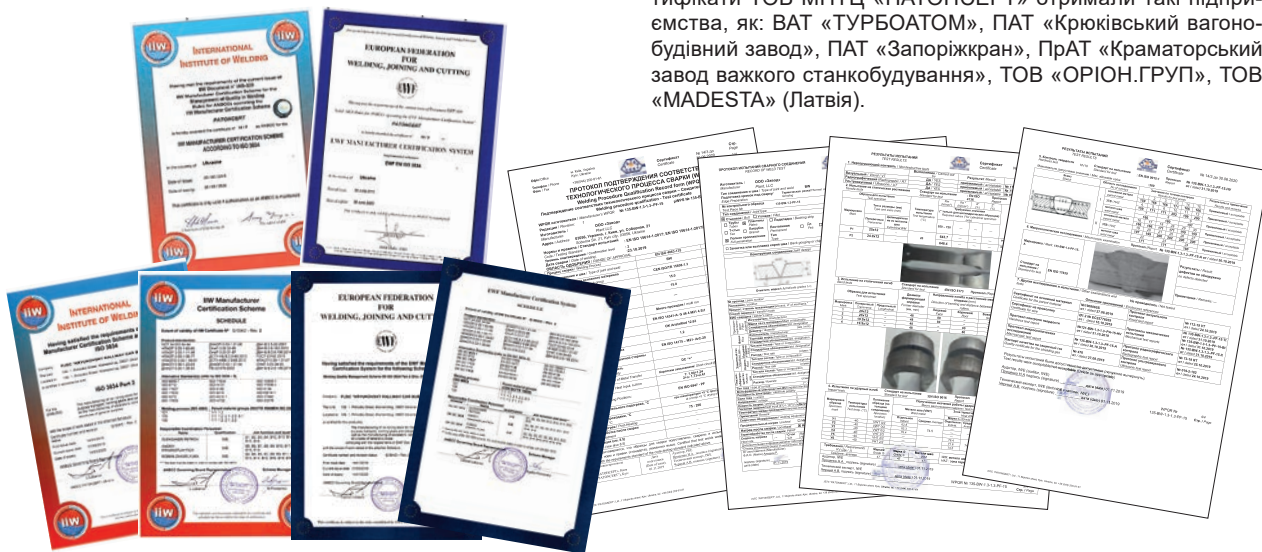
- надання послуг з розробки технологічних інструкцій зі зварювання (WPS);
- атестація технологій зварювання.

ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ» акредитовано з 2006 р. Міжнародним інститутом зварювання та Європейською зварювальною федерацією (міжнародна система сертифікації IIW/EFW) на проведення оцінки та сертифікацію зварювальних виробництв, атестацію технологій зварювання на відповідність європейських та міжнародних стандартів серії EN ISO 3834.

Сертифікація зварювального виробництва згідно EN ISO 3834 застосовується, коли потрібно підтвердження здатності виробника виготовляти зварні конструкції, якість яких цілком задовольняє регламентованим вимогам.

Визначальним фактором підтвердження відповідності регламентованим вимог є атестаційні випробування технологій зварювання відповідно з вимогами стандарту EN ISO 15614 та оформлення Протоколу підтвердження технології зварювання (WPQR).

Партнерами ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ» є більш як 30 підприємств України та європейських країн. Зокрема, сертифікати ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ» отримали такі підприємства, як: ВАТ «ТУРБОАТОМ», ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», ПАТ «Запоріжжран», ПрАТ «Краматорський завод важкого станкобудування», ТОВ «ОПІОН.ГРУП», ТОВ «MADESTA» (Латвія).



E-mail: patoncert@gmail.com