

ІНДУКТОРИ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ ТА ТРАМВАЙНИХ ЖОЛОБЧАСТИХ РЕЙОК

Є.О. Пантелеймонов

Мета роботи полягає в створенні індукторів для термічної обробки зварних стиків залізничних та трамвайних жолобчастих рейок. Для термічної обробки зварних стиків залізничних рейок запропоновані індуктори, що розташовані навпроти один одного з двох сторін рейки. Дослідження локального нагріву залізничних та трамвайних жолобчастих рейок струмами частотою 2,4 кГц показали, що індуктори забезпечують рівномірний нагрів елементів перерізу рейок, низький перепад температури між поверхневими та глибинними шарами металу в голівці рейок та зниження часу нагріву від цехової температури до температури нормалізації. Бібліогр. 8, рис. 3.

Ключові слова: рейки, зварні стики рейок, термічна обробка, індукційний нагрів, індуктори

Вступ. Надійність і експлуатаційні властивості рейкового шляху значною мірою залежать від якості зварних стиків рейок. В умовах високих навантажень та швидкості руху залізничного транспорту зварні стики пошкоджуються частіше, ніж основний метал рейок. Негативний вплив зварювання проявляється в появі по ширині зони термічного впливу місцевого зниження твердості, несприятливої епюри внутрішніх залишкових напружень, зміні однорідності мікроструктури, створенні умов для появи внутрішніх дефектів, що являються концентраторами напружень та послаблюючих відривки рейок із зварним стиком [1]. Найбільш ефективним шляхом поліпшення якості зварних стиків являється термічна обробка. Вона полягає в локальному нагріві зварних стиків та часток основного металу рейок, що до них примикає, до температури нормалізації 850...950 °С, охолодженні шийки та підосви на спокійному повітрі та загартуванні поверхні катання голівки стислим повітрям. Високу швидкість локального нагріву забезпечує індукційний спосіб нагріву металів струмами високої частоти [2, 3]. Нині, при виконанні термічної обробки зварних стиків залізничних рейок в шляхових та цехових умовах, локальний нагрів рейок виконується струмами частотою 8,0...16,0 кГц. В якості джерела живлення використовуються перетворювачі частоти на IGBT транзисторах. До складу нагрівальних пристроїв входять індуктори без магнітопроводів. Технологія та обладнання забезпечують нагрів зварних стиків залізничних рейок типу Р65 із різних марок до температури нормалізації за час до 240 с. Ширина зони термічного впливу в голівці рейок досягає 80...94 мм, в підосві рейок – 140...150 мм [4, 5].

Доцільність термічної обробки зварних стиків існує як для залізничних рейок, так і рейок інших видів рейкового транспорту – трамвайних, метрополітену, підкранових. Рейки різняться між

Пантелеймонов Є.О. – <https://orcid.org/0000-0002-5569-9141>
© Є.О. Пантелеймонов, 2022

собою формою поперечного перерізу, об'ємом металу окремих елементів та умовами тепловідводу в холодну масу металу. Залізничні рейки мають симетричну форму поперечного перерізу відносно вертикальної осі. Трамвайні жолобчасті рейки, на відміну від залізничних, оснащені жолобом та губою. Поверхня катання, жолоб та губа зміщені відносно вертикальної осі. В залежності від способу зварювання – контактного стикового, індукційного, алюмотермітного, електродугового, зварні стики рейок мають різну ширину зони термічного впливу. Наприклад, ширина зони термічного впливу зварних стиків залізничних рейок типу Р65, виконаних контактним стиковим зварюванням, становить 26...32 мм [6], трамвайних жолобчастих рейок типу РТ62, виконаних автоматичним дуговим зварюванням мундштуком, що плавиться, – 45...55 мм. Для послаблення внутрішніх напружень в металі рейок, що виникають внаслідок неоднорідності об'ємних змін в процесі нагріву, необхідно наприкінці термічної обробки зварних стиків забезпечити однакову температуру елементів перерізу рейок та низький перепад температури між поверхневими та глибинними шарами металу. Враховуючи специфічні особливості дії струмів високої частоти при нагріві виробів складної форми, виникають певні вимоги до конструкції індукторів нагрівальних пристроїв та частоти струму. Індуктори нагрівальних пристроїв повинні створити відповідний розподіл індуктованого струму на поверхні рейок та його щільність, що враховують умови тепловідводу в холодну масу металу та не викликають перегріву виступаючих елементів рейок – пір'я та верхньої кромки губи. Для досягнення низького перепаду температури між поверхневими та глибинними шарами рейок доцільно підвищити глибину проникнення струму в метал, тобто знизити частоту струму.

Мета роботи. Мета даної роботи полягає в створенні індукторів нагрівальних пристроїв для

термічної обробки зварних стиків залізничних та трамвайних жолобчастих рейок, що забезпечують рівномірний нагрів елементів перерізу рейок та низький перепад температури між поверхневими та глибинними шарами металу в голівці рейок.

Опис та особливості конструкції. На рис. 1, *a* приведена схема нагрівального пристрою для термічної обробки зварних стиків залізничних рейок. До складу нагрівального пристрою входять індуктори 1 та 2 однакової конструкції [7]. Індуктори розташовані навпроти один одного з двох сторін рейки 3. Форма індуктуючих дротів індукторів повторює форму вигину поверхні рейки над поверхнею катання голівки, бічними поверхнями голівки, шийкою та підшовою. Ширина індуктуючих дротів та повітряні проміжки до поверхні рейок залежать від ширини зони термічного впливу зварних стиків та об'єму елементів перерізу рейок. При малому проміжку індуктований струм концентрується, приблизно, по ширині індуктованого дроту, при великому проміжку – поширюється на значну ширину. Для посилення дії ефекту близькості, внаслідок чого збільшується густина індуктованого струму, індуктори виконані з найменшими повітряними проміжками над голівкою та підшовою рейок і дещо збільшеними проміжками над шийкою рейок. Значне збільшення повітряного проміжку над пір'ям рейки призводить до значного зниження густини індуктованого струму в цих елементах. Індуктуючі дроти індукторів складаються з двох паралельних дротів. Тим самим досягається перерозподіл магнітного поля по ширині індуктуючого дроту та наближення густини індуктованого струму до зовнішніх країв індуктуючого дроту. Загальна ширина дротів в індукторах для термічної обробки зварних стиків рейок типу Р65 дорівнює 60 мм. Це більше ши-

рини зони термічного впливу та частки основного металу рейок, що до неї примикає, після контактного стикового та автоматичного дугового зварювання мундштуком, що плавиться. Для концентрації нагріву на бокових поверхнях елементів перерізу рейок та загального підвищення коефіцієнту корисної дії системи індуктор – рейка використані магнітопроводи 4, що встановлені над поверхнею катання голівки, бічними поверхнями голівки, шийкою та частиною підшови рейки. Магнітопроводи складаються з набору пластин трансформаторної сталі.

Індуктори 1 та 2 нагрівальних пристроїв для термічної обробки зварних стиків трамвайних жолобчастих рейок [8] мають різну конструкцію (рис. 1, *б*). Індуктуючий дріт індуктора 1, що встановлений зі сторони голівки рейки 3, подовжено тільки до початку жолоба 5. Це запобігає перегріву губи, оскільки магнітний потік в западину жолоба послаблюється великим повітряним проміжком. Форма індуктуючого дроту повторює форму вигину поверхні рейки над поверхнею катання голівки, бічною поверхнею голівки, шийкою та частиною підшови. Повітряні проміжки збільшені над шийкою та значно збільшені над пір'ям рейки. Магнітопроводи 4 встановлені над поверхнею катання голівки, бічною поверхнею голівки, шийкою та частиною підшови. Індуктуючий дріт індуктора 2, що встановлений зі сторони губи 6, повторює форму вигину поверхні рейки над бічною поверхнею губи, шийкою та частиною підшови. Індуктуючий дріт подовжено тільки до верхньої кромки губи. Повітряні проміжки збільшені над бічною поверхнею губи, шийкою та значно збільшені над пір'ям рейки. Магнітопроводи 4 встановлені над бічною поверхнею губи, шийкою та частиною підшови рейки. Метал губи

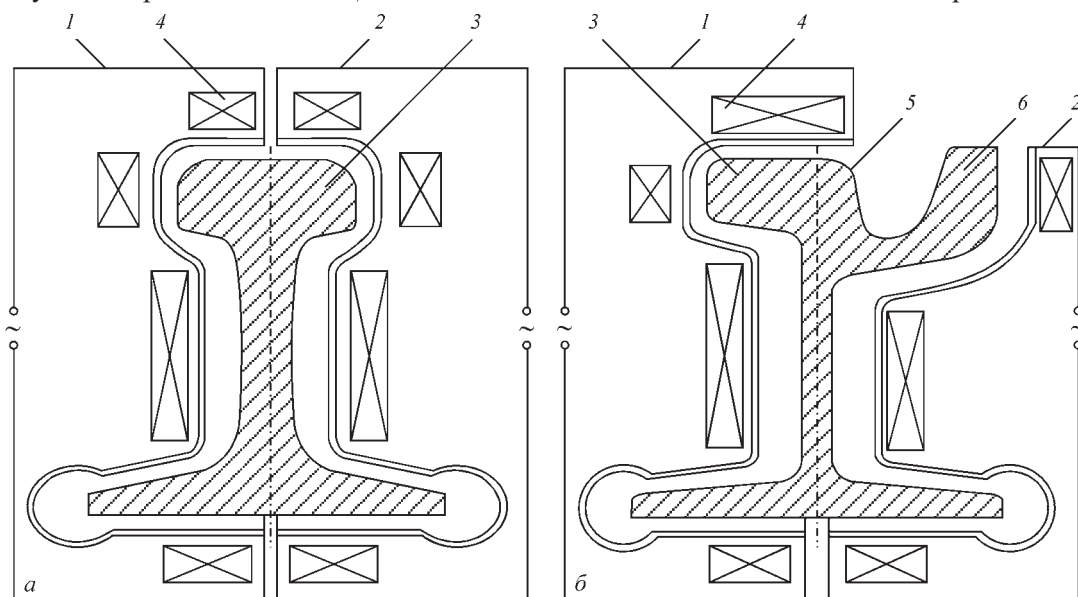


Рис. 1. Схема нагрівальних пристроїв для термічної обробки зварних стиків залізничних (*a*) та трамвайних жолобчастих (*б*) рейок (опис. 1–6 див. у тексті)

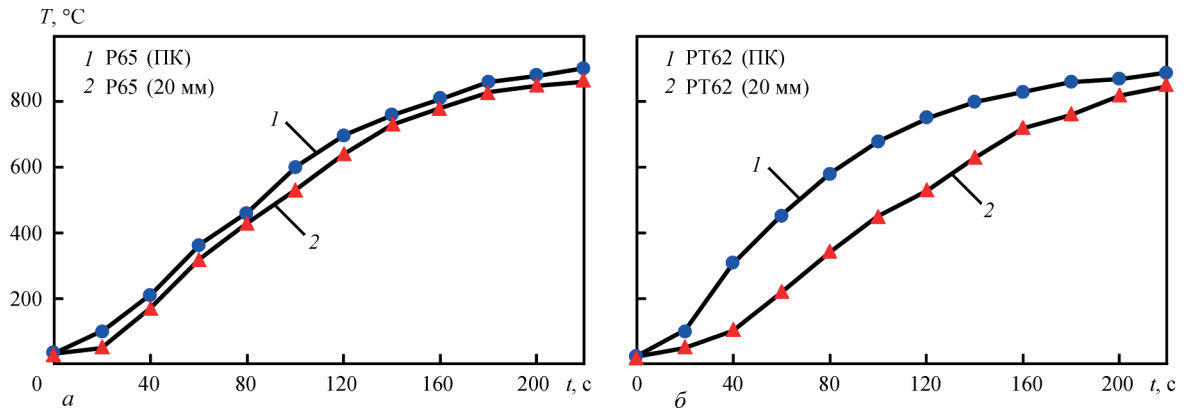


Рис. 2. Часові залежності температури на поверхні катання голівки (ПК) та на глибині 20...22 мм (20 мм) від поверхні катання залізничних рейок типу Р65 (а) та трамвайних жолобчастих рейок типу РТ62 (б)

гріється частково внаслідок теплопровідності від нагрітого металу голівки, частково від індуктованого струму на бічній поверхні губи. В обох індукторах індуктуючі дроти також складаються з двох паралельних дротів. Загальна ширина дротів перевищує ширину зони термічного впливу стиків після контактного стикового або дугового зварювання.

Результати дослідження та їх обговорення.

Ефективність індукторів досліджували при локальному нагріві залізничних рейок типу Р65 та трамвайних жолобчастих рейок типу РТ62 струмами частотою 2,4 кГц. Температуру нагріву вимірювали на поверхні катання голівки, на глибині 20...22 мм від поверхні катання, по центру шийки, на відстані 10 мм від країв пір'я, в місцях переходу голівки в шийку та шийки в підошву, на глибині 10 мм від верхньої кромки губи та в центрі губи. Для виміру температури застосовували хромель-алюмелеві термомпари. Початкова температура основного металу рейок становила 20 °С. В якості джерела живлення використовували тиристорний перетворювач частоти типу ТПЧТ-160/2,4. В процесі нагріву рейок до температури нормалізації підтримували постійну величину струму випрямляча ТПЧТ. Тим самим компенсували реакцію перетворювача частоти на зміну комплексного опору навантаження внаслідок зміни питомого електричного опору та магнітної проникності металу рейок. На рис. 2 приведені часові залежності температури нагріву голівки залізничних та трамвайних жолобчастих рейок. Встановлено, що при нагріві залізничних рейок протягом 220 с, температура на поверхні катання голівки досягла 900 °С. Потужність на виході випрямляча ТПЧТ змінювалася від 90 до 105 кВт. Тривалість етапу нагріву до температури магнітних перетворень, так званий холодний режим, становила близько 60 % від часу нагріву, середня швидкість нагріву на цьому етапі – 5,6 °С/с. Тривалість етапу нагріву вище температури магнітних перетворень, так званий гарячий

режим, дорівнювала 40 %. Швидкість нагріву на цьому етапі зменшилася до 1,7 °С/с. При нагріві трамвайних жолобчастих рейок впродовж 220 с температура на поверхні катання голівки досягла 890 °С. Потужність на виході випрямляча ТПЧТ змінювалася від 90 до 100 кВт. Тривалість етапу «холодного режиму» була більше, ніж при нагріві залізничних рейок. Вона становила близько 75 %. Середня швидкість нагріву дорівнювала 4,5 °С/с. Тривалість етапу «гарячого режиму» зменшилася до 25 %, швидкість нагріву на цьому етапі збільшилася до 2,6 °С/с. На рис. 3 приведені значення температури в елементах перерізу рейок по закінченню процесу локального нагріву. В залізничних рейках температура шийки дорівнювала температурі поверхні катання голівки. Перепад температури між поверхнею катання голівки та шару на глибині 20 мм був не більше 40 °С, між центром голівки та місцями переходу голівки в шийку та шийки в підошву не перевищив 20...40 °С. Температура пір'я рейок була на рівні 830...840 °С. Ширина зони термічного впливу на поверхні катання голівки, в центрі шийки та низу підошви, становила 54 мм. В місцях переходу голівки в шийку та

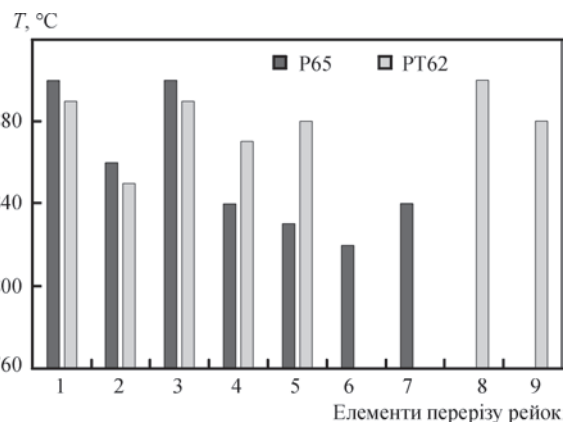


Рис. 3. Температура нагріву елементів перерізу залізничних рейок типу Р65 та трамвайних жолобчастих рейок типу РТ62: поверхні катання голівки (1); на глибині 20...22 мм від поверхні катання голівки (2); шийка (3); пір'я (4, 5); місце переходу голівки в шийку (6); місце переходу шийки в підошву (7); верхня кромка губи (8); центр губи (9)

шийки в підшву ширина зони термічного впливу була нижче на 4...6 мм. Це викликано послабленням дії ефекту близькості внаслідок труднощів розміщення магнітопроводів в таких місцях. В трамвайних жолобчастих рейках перепад температури між поверхнею катання голівки та шару на глибині 22 мм був не більше 40 °С. Температура шийки дорівнювала температурі на поверхні катання голівки, температура пір'я рейки була на 10...20 °С менше. Температура нагріву верхньої кромки та центра губи майже не відрізнялася від температури інших елементів перерізу рейки.

Висновки

Розроблені індуктори нагрівальних пристроїв для термічної обробки струмами високої частоти зварних стиків залізничних та трамвайних жолобчастих рейок, виконаних способами контактного стикового або дугового зварювання. Конструкції індукторів враховують форму поверхні рейок та об'єм елементів перерізу.

Перевірка ефективності індукторів при локальному нагріві залізничних рейок типу Р65 та трамвайних жолобчастих рейок типу РТ62 струмами частотою 2,4 кГц показала, що індуктори забезпечують зниження часу нагріву елементів перерізу рейок від цехової температури до температури нормалізації, рівномірний нагрів елементів перерізу рейок, низький перепад температури між поверхневими та глибинними шарами металу в голівці рейок та зменшення ширини зони термічного впливу після термічної обробки в порівнянні з існуючим обладнанням.

Список літератури

1. Шур Е.А., Федін В.М., Борц А.И. и др. (2019) Пути устранения повышенной повреждаемости рельсов в зоне сварных стыков. *Вестник ВНИИЖТ*, 78, 4, 210–217.
2. Головин Г.Ф., Зимин Н.В. (1979) *Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева*. Вып. 3. Ленинград, Машиностроение.

3. Фещуков А.Н. *Устройство термической обработки сварных стыков рельсов в полевых условиях*. Россия, Пат. RU168673, МПК E01B31/18
4. Резанов В.А., Федін В.М., Башлыков А.В. (2013) Дифференцированная закалка сварных стыков рельсов. *Вестник ВНИИЖТ*, 2, 28–33.
5. СТО РЖД 1.08.002-2009 (2009) *Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом*. Москва, ОАО «РЖД».
6. Кучук-Яценко С.І., Антіпін С.В., Дідковський О.В. та ін. (2020) Оцінка якості зварних з'єднань високоміцних залізничних рейок сучасного виробництва з урахуванням вимог Українського та Європейського стандартів. *Автоматичне зварювання*, 7, 3–11. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.07.01>
7. Pantelejmonov, E.A., Gubatyuk, R.S. (2016) Induction device for heat treatment of welded joints of railway rails. *The Paton Welding J.*, 10, 41–43. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.10.08>
8. Пантелеймонов Є.О., Дацюк І.І. (2006) *Індукційний пристрій для термічної обробки зварних стиків трамвайних рейок*. Україна, Пат. 149152, МПК C21D 1/10 (2006.01)

References

1. Shur, E.A., Borts, A.I. et al. (2019) Means of elimination of higher damage of rails in the welded joint zone. *Vestnik VNIIZhT*, 78(4), 210–217 [in Russian].
2. Golovin, G.F., Zimin, N.V. (1979) *Technology of heat treatment of metals using induction heating*. Issue 3. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
3. Feshchukov, A.N. *Device for heat treatment of rail welded joints in field conditions*. Russia, Pat. RU168673, Int. Cl. E01B31/18 [in Russian].
4. Rezanov, V.A., Fedin, V.M., Bashlykov, A.V. (2013) Differential hardening of rail joints. *Vestnik VNIIZhT*, 2, 28–33 [in Russian].
5. СТО RZhL 1.08.002-2009 (2009) *Railway rails welded by resistance welding*. Moscow, JSC RZhD [in Russian].
6. Kuchuk-Yatsenko S.I., Antipin E.V., Didkovskiy O.V., et al. Evaluation of quality of welded joints of high-strength railway rails of modern production taking into account the requirements of Ukrainian and European standards. *The Paton Welding J.*, 7, 2–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/trwj2020.07.01>.
7. Pantelejmonov, E.A., Gubatyuk, R.S. (2016) Induction device for heat treatment of welded joints of railway rails. *The Paton Welding J.*, 10, 41–43. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.10.08>.
8. Pantelejmonov, E.O., Datsuk, I.I. (2006) *Induction device for heat treatment of welded joints of tram rails*. Ukraine, Pat. 149152, Int. Cl. C21D 1/10 (2006.01) [in Ukrainian].

INDUCTORS FOR HEAT TREATMENT OF WELDED BUTT JOINTS OF RAILWAY AND TRAM GROOVED RAILS

E.O. Pantelejmonov

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The aim of the work is to create inductors for heat treatment of welded butt joints of railway and tram grooved rails. For thermal treatment of welded butt joints of railway rails, the inductors were proposed, located opposite each other on the two sides of a rail. Investigation of local heating of railway and tram grooved rails with a frequency of 2.4 kHz showed that inductors provide a uniform heating of cross-section elements of the rails, a low difference in temperature between the surface and deep layers of the metal in the head of the rails and a decrease in heating time from the workshop temperature to the normalization temperature. 8 Ref., 3 Fig.

Keywords: rails, welded butt joints of rails, heat treatment, induction heating, inductors

Надійшла до редакції 20.12.2021