

РОЗРОБКА ІНДУКТОРІВ ДЛЯ ОБ'ЄМНОЇ ТА ПОВЕРХНЕВОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

О.С. Прокоф'єв, Р.С. Губатюк, О.С. Письменний, С.В. Римар, Є.О. Пантелеймонов

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

Наведено концепцію проведення об'ємної і поверхневої термічної обробки зварного стику залізничної рейки двома і більше індукторами з метою отримання сприятливих фазових перетворень металу і нормалізації його структури в зоні зварного шва. На основі проведених розрахунків та експериментів розроблено роз'ємні індуктори без магнітопроводів для можливості проведення об'ємної і поверхневої індукційної термічної обробки. Проведені експерименти з виконання нагріву зварного стику рейки розробленим роз'ємним індуктором без магнітопроводів показали прийнятні для об'ємної термічної обробки рейок показники рівномірності нагріву, граничні температури і швидкості нагріву основних робочих ділянок рейки як на поверхні, так і в глибині у вузькій зоні нагріву. Бібліогр.19, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: індуктор, індукційний нагрів, об'ємна термічна обробка, поверхнева термічна обробка, зварний стик залізничних рейок, нормалізація металу зони зварного шву

У зв'язку з розвитком в Україні швидкісного залізничного транспорту залишається актуальною задача виготовлення високоякісних безстиківих залізничних рейок збільшеної довжини і підвищеної міцності із заєвтектоїдних сталей. В Україні і ряді країн світу рейки з'єднують між собою контактно-стиківим зварюванням оплавленням як на стаціонарних рейкозварювальних підприємствах, так і в шляхових умовах, за технологією і з використанням обладнання, розробленим в ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Для покращення структури металу в зварному шві та навколошовній зоні і підвищення надійності зварних швів в світовій практиці все частіше застосовують їх термічну обробку [1].

На металургійних підприємствах рейки піддаються термічній обробці в процесі виготовлення. Відомі технічні рішення для виконання індукційної термічної обробки (ТО) всієї поверхні рейки [2], або поверхні її головки [2, 3]. Деякі конструкції індукторів дозволяють виконати ТО у відповідності до технічних вимог, які діяли у час їхньої розробки, але зараз потребують модернізації в зв'язку зі змінною хімічного складу сталей рейок, які наближені до легованих, способом їх виготовлення, та змінами у геометрії перерізу у сторону підсилення. Для цих цілей в ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблена конструкція індуктора, яка забезпечує більш ефективний нагрів поверхні головки рейки [4].

Одночасно зростають вимоги до зварного стику рейок. Зварні стики рейок типу Р65 із низьколегованої сталі (Cr–Si–V) марки К76Ф, що виробляють в Україні, при збільшенні швидкості потягів та зростання навантаження у системі колесо – рейка, також потребують ТО [3] з метою

унікнення небажаних структур та отримання нормалізованої структури металу, із наближенням її до основного металу рейки як за видом, так і за механічними показниками, а також зменшенням небажаних залишкових напружень.

Виконання ТО обумовлено також виправленням технологічного наслідування показників якості (властивостей) металу в зоні зварного шву, яке починається із металургійної переробки і проходить скрізь увесь процес виготовлення рейок. Так, до технологічного наслідування якості металу відносяться флуктуації розподілу хімічних елементів, механічних показників і місцевого напружено-деформаційного стану, які мають випадкову природу і суттєво впливають на життєвий цикл конструкції [5], якщо вони потрапляють в зону зварного шву.

Для проведення ТО зварних стиків залізничних рейок найбільш ефективно застосовувати індукційний нагрів [1], здійснення якого регламентується технічними нормативними настановами [6] та використанням обладнання, яким він здійснюється. Робочими інструментами індукційних установок є індуктори, які можуть бути з магнітопроводами та без них.

Роботи по розробці технології щодо виконання індукційної ТО зварних стиків залізничних рейок та розробки відповідного до неї обладнання, проводяться багатьма країнами світу [1]. В РФ на ООО НПК «Магнит М» створено комплекси ТО рейок [7, 8], які включають багатовиткові індуктори без магнітопроводів. Такі комплекси працюють в заводських і шляхових умовах з частотою робочого струму відповідно 6,0...8,0 та 2,4...8,0 кГц. Для побудови залізничних шляхів в КНР розроблено роз'ємні одновиткові високочастотні ін-

О.С. Прокоф'єв – <https://orsid.org/0000-0003-4643-6611>, Р.С. Губатюк – <https://orsid.org/0000-0002-0851-743x>, С.В. Римар <https://orcid.org/0000-0003-0490-4608>

© О.С. Прокоф'єв, Р.С. Губатюк, О.С. Письменний, С.В. Римар, Є.О. Пантелеймонов, 2020

дуктори з паралельними провідниками без магнітопроводів [9, 10].

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона були проведені роботи по розробці і створенню технології і переносного устаткування для забезпечення рівномірного нагріву шву рейки із зменшеною зоною нагріву [11, 12] для робочої частоти струму 2,4 кГц. Устаткування розраховано на відповідність нормативних вимог [6] Європейському стандарту EN 14587-21 2005. В якості робочого інструмента використовується роз'ємний індуктор із концентраторами магнітних потоків у виді магнітопроводів [13, 14], який забезпечує необхідний за достатньо короткий час (180 с) об'ємний рівномірний нагрів до заданої температури всіх ділянок рейки.

Метою статті є описання розробки в ІЕЗ ім. Є.О. Патона дослідного зразка роз'ємного індуктора складної форми без магнітопроводів з вузькою зоною об'ємного нагріву зварного стику рейки типу Р65, при робочій частоті струму 2,4 кГц.

В основу розробки дослідного зразка роз'ємного індуктора складної форми без магнітопроводів було покладено концепцію проведення об'ємної і поверхневої ТО зварного стику залізничної рейки двома і більше індукторами.

Головний напрямок розробки спрямовано на виконання об'ємної ТО зварного стику як основної.

Дослідний зразок роз'ємного індуктора складної форми без магнітопроводів та його основні характеристики і геометричні параметри було визначено за попередньо проведеними розрахунками моделі індукційної системи «індуктор – виріб» із урахуванням зазначених вимог ТО зварних стиків. Також враховувались попередні напрацювання із розробки індукторів для ТО як зварного стику рейок, так і самих рейок.

Із-за складної форми поперечного перерізу залізничних рейок, різного об'єму металу у її складових – головці, шийці та підшві, а також відмінності геометрії рейок різних типів, виконати рівномірний індукційний об'ємний нагрів основних робочих елементів рейки досить складно. А саме виконання цієї умови забезпечує якість ТО зварного стику. Але і при цьому по обидва боки від країв індуктора по повздовжній вісі рейки утворюються непротяжні зони зі зниженою твердістю. Це обумовлено перебуванням сталі під дією температурного поля в районі 700...350 °С, достатнім за часом для утворення зони неповної перекристалізації. При експлуатації рейки у цих місцях можлива поява поверхневих деформацій від прокатування колесами.

Для уникнення даного явища була запропонована концепція проведення об'ємної і поверхневої

ТО зварного стику залізничної рейки двома і більше індукторами з метою отримання сприятливих фазових перетворень металу і нормалізації його структури в зоні зварного шва. Для цього пропонується здійснення в зонах неповної перекристалізації додаткової поверхневої ТО парою індукторів з метою отримання поверхневого загартування металу в цих зонах. Поверхнева ТО може проводитись одночасно із об'ємною ТО, або після виконання об'ємної ТО основним індуктором. Електричні і геометричні параметри додаткової пари індукторів і термічний цикл нагріву можуть різнитися від параметрів і циклу основного індуктора.

Виконання поверхневої ТО бажано проводити на підвищеній частоті струму (більше за 2,4 кГц) для зменшення проникнення індукованих струмів і теплових потоків у глибину металу рейки. При цьому у середині рейки метал не піддається інтенсивному тепловому впливу. Теплові поля, які поширюються від додаткової пари індукторів по поверхні рейки сприяють подрібненню зерен металу, отриманню однорідних структур на зазначених ділянках рейки зі зниженою твердістю, та сприяють підвищенню його твердості і зменшенню протяжності зазначених зон знеміцнення металу на поверхні рейки. Поверхнева ТО може здійснюватись по усьому периметру поперечного перетину рейки, або по поверхні головки.

Оскільки об'єм металу зварного стику рейки, який піддається поверхневій ТО менший ніж об'єм металу, який піддається об'ємній ТО, потрібна відповідно і зменшена потужність для її виконання, і ще менша при поверхневій ТО лише головки рейки.

При розробці і створенні конструкції роз'ємного індуктора без магнітопроводів для об'ємної ТО зварних стиків залізничних рейок слід враховувати наступні чинники:

– можливість здійснення ТО у стаціонарних умовах на рейкозварювальних підприємствах, у шляхових умовах, у тому числі і в обмеженому просторі та на вже зібраному залізничному полотні при його ремонті;

– складність конструкції індуктора, що обумовлено зведенням – розведенням його гілок відносно рейки;

– можлива наявність електричного контакту при замиканні гілок індуктора із забезпеченням його надійного з'єднання і безперешкодного проходження по ньому високочастотного струму, особливо при довгому використанні, що визначає надійну роботу всього роз'ємного індуктора.

При розробці конструкцій роз'ємних індукторів без магнітопроводів для виконання об'ємної ТО зварних стиків залізничних рейок за основу був взятий експериментальний зразок нероз'ємного індук-

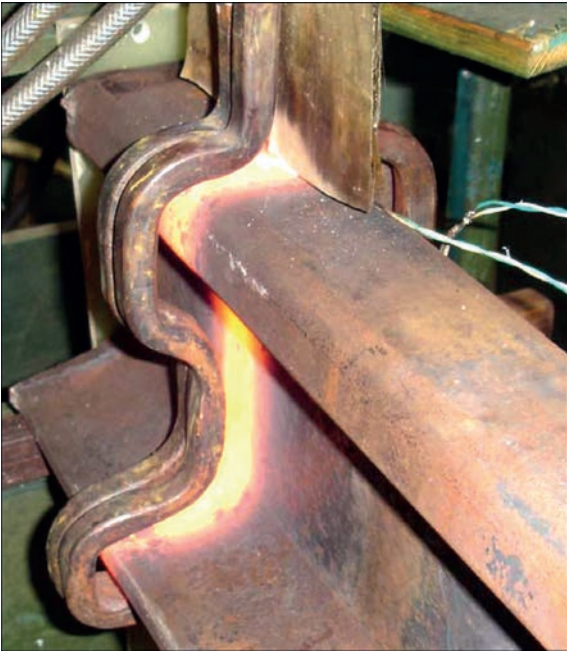


Рис. 1. Здійснення об'ємної ТО зварного стику залізничної рейки типу Р65 нероз'ємним індуктором без магнітопроводів

тора без магнітопроводів (рис. 1) для рейкозварювальних підприємств і матеріали робіт [2, 15–17].

Була розроблена конструкція роз'ємного індуктора без магнітопроводів із електричним контактом для з'єднання двох гілок індуктора (рис. 2), в якому, у порівнянні із індуктором на рис. 1, були зменшені і вирівняні відстані між бічними поверхнями рейки і індуктора. Такий індуктор призначений для проведення поверхневої ТО рейок, оскільки він здатен швидко і рівномірно нагріти вузьку зону по всьому периметру рейки на однакову невелику глибину струмами підвищеної частоти (більше 6 кГц). Індуктор призначений для проведення ТО на рейкозварювальних підприємствах і в шляхових умовах.

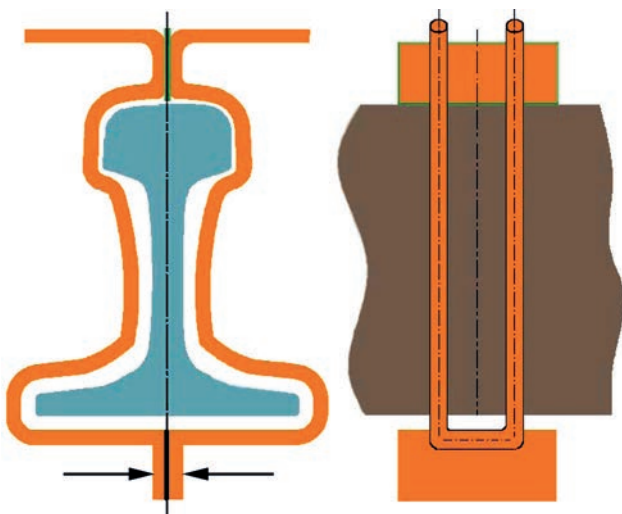


Рис. 2. Конструкція роз'ємного індуктора без магнітопроводів із електричним контактом для замикання гілок індуктора, призначений для проведення поверхневої ТО вузьких поверхонь рейок

Розроблена конструкція роз'ємного індуктора без магнітопроводів та без електричного контакту між двома частинами індуктора (рис. 3), в якому, у порівнянні із індуктором на рис. 2, були скореговані відстані між бічними поверхнями рейки і індуктора для забезпечення рівномірного об'ємного нагріву всіх частин рейки. Індуктор призначений для проведення об'ємної ТО на рейкозварювальних підприємствах і в шляхових умовах.

Дана конструкції індуктора значно спрощує його виготовлення і використання і підвищує надійність його роботи, оскільки відсутній електричний контакт між його гілками. Але, за рахунок великих відстаней між бічними поверхнями рейки і індуктора і підвищеної довжини індуктуючих проводів, збільшується індуктивний і активний опір індуктора, що призводить до зростання електричних втрат і необхідності збільшення електричної ємності, що компенсує індуктивність системи, а це призводить до її здороження у виробництві і експлуатації.

Запропонована конструкція роз'ємного індуктора без магнітопроводів, в якій задача рівномірного об'ємного нагріву всіх основних частин рейки вирішена комплексно. Конструкція має різні відстані між бічними поверхнями рейки і індуктора, але значно менші ніж в конструкції рис. 3. На відміну від попередніх розглянутих конструкцій індуктор має різну конфігурацію в повздовжньому напрямку рейки (рис. 4). Конструкція містить електричний контакт підвищеної надійності зі збільшеною площею поверхонь, що з'єднуються, який винесено за межі робочої зони індуктора. Індуктор призначений для проведення об'ємної ТО на рейкозварювальних підприємствах і в шляхових умовах. Дана конструкція індуктора для об'ємного рівномірного нагріву частин рейки визначена пріоритетною до виконання.

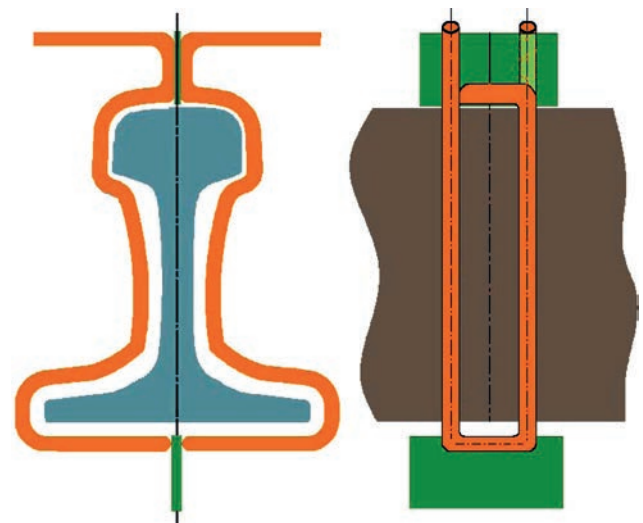


Рис. 3. Конструкція роз'ємного індуктора без магнітопроводів і без електричного контакту між половинами індуктора, призначений для проведення об'ємної ТО залізничних рейок

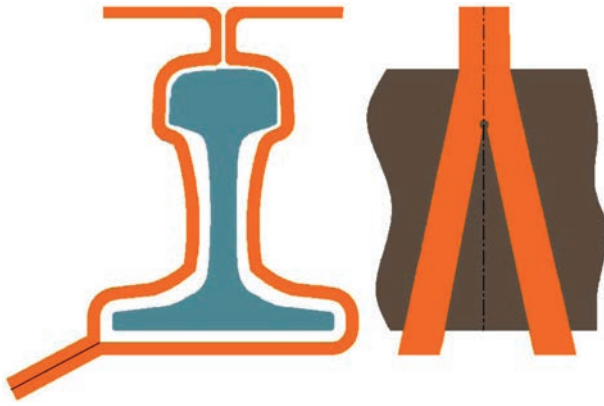


Рис. 4. Конструкція роз'ємного індуктора без магнітопроводів із винесеним за межі робочої зони електричним контактом підвищеної надійності для замикання гілок індуктора і призначений для проведення об'ємної ТО залізничних рейок

Для оцінного розрахунку параметрів роз'ємного індуктора без магнітопроводів (рис. 4) була використана методика роботи [18] і дані раніше проведених експериментів із виконання об'ємної ТО індуктором рис. 1, який також розраховувався за цією ж методикою.

В якості базових були взяті показники: f – частота індукційного струму; S – площа поперечного перетину елементів рейки і їх процентне значення $S_{\%}$ від загальної площі поперечного перетину; l – протяжність по периметру ділянок рейки.

Керуючись залежностями між електромагнітними показниками [18] і геометричними параметрами залізничної рейки типу Р65, яка підлягає ТО, було здійснено розрахунок електромагнітних і геометричних параметрів системи «індуктор – рейка» з використанням залежності питомої поверхневої потужності p від напруженості магнітного поля H при частоті $f = 2,5$ кГц [18], що близька до частоти наявного джерела живлення ТПЧТ-160/2,4 і подібність розподілу напруженості магнітного поля [19], яке утворюється на відстані δ між поверхнею об'єкту нагрівання та індуктуючим провідником.

Визначено і розраховано основні параметри системи: S_n , M – площа поверхонь елементів рейки, що нагріваються, і їх маса; H , p – напруженості магнітного поля і питомі потужності на поверхнях

нагріву елементів рейки; Δ – глибини проникнення магнітного потоку у елементи рейки; δ – відстань (немагнітний зазор) між поверхнями нагріву елементів рейки та індуктором; P – вкладені потужності при нагріві в елементи рейки.

Перелічені параметри на початку нагріву, коли метал рейки має магнітні властивості, занесено у табл. 1.

Виходячи із конфігурації рейки найвищу напруженість магнітного поля необхідно створювати на найбільш масивній ділянці поверхні – головці рейки. На менших масивах і тонших ділянках напруженість магнітного поля слід знижувати.

Виготовлено дослідний лабораторний зразок даного індуктора (рис. 5) із листової міді із підсиленням трубками з водяним охолодженням, який дозволяє проводити об'ємну ТО зварного стикового з'єднання рейок.

Індуктор більш сконцентровано розподіляє магнітні поля в головці рейки, за рахунок суцільного провідника над її поверхнею і невеликому проміжку (зазору) між провідником і рейкою. Над шийкою і підшовою рейки провідники індуктора виконані у вигляді двох паралельних гілок, площа яких зменшується до підшови, зменшуючи площу нагріву під ними. В районі підшови провідники ще й віддалені один від одного, що дає можливість здійснювати нагрів в області самих тонких, кінцевих місць підшови – пір'їв. Конструктивно, зазор між провідниками індуктора і рейкою виконано у сторону збільшення від головки до шийки і підшови. Така конструкція індуктора дозволила забезпечити рівномірний нагрів.

Проведення експериментів із виконання індукційної об'ємної ТО зварного стику залізничної рейки засвідчило отримання майже одночасного і рівномірного нагріву різних за масою і площею частин – головки і підшови та достатньо близький до них нагрів центра шийки, без її перегріву. Слід зазначити, що температура на кінцях пір'їв рейки після проходження точки фазового перетворення A_{c3} (точки Кюрі) стабілізувалась і далі практично не підвищувалась із-за повного зникнення магнітних властивостей металу щодо проникнен-

Таблиця 1. Параметри індукційної системи при нагріві рейки Р65

Параметри	Головка	Шийка	Підшова	Рейка
Площа поперечного перетину S , см ²	28,19	23,57	30,89	82,65 [6]
Площа поперечного перетину $S_{\%}$, %	34,1	28,5	37,4	100,0
Площа нагріву під індуктором S_n , см ²	79,1	124,7	129,0	332,8
Протяжність по периметру l , см	18,5	29,0	30,0	77,5
Маса елементів рейки M , кг	8,375	5,940	8,066	22,381
Відстань між індуктором та поверхнею δ , см	0,8...1,0	2,4...2,8	2,6...3,2	–
Напруженість магнітного поля H , А/см	1200,0	765,5	740,0	–
Питома поверхнева потужність p , Вт/см ²	290	145	130	–
Глибина проникнення Δ , см	0,120	0,095	0,090	–
Вкладена потужність P , кВт	22,944	18,081	16,770	57,775



Рис. 5. Дослідний лабораторний зразок роз'ємного індуктора без магнітопроводів

ням магнітного поля в зоні об'єму кінців пір'їв, що призвело до зменшення густини вихрових струмів, які нагрівають метал кінців пір'їв, що не є критичним, оскільки кінці пір'їв не є найбільш навантаженими елементами рейки.

Експериментально підтверджено, що вкладе-на потужність при виконанні індукційної об'ємної ТО у кожен частину рейки близька до потужності, яка була визначена розрахунками.

Об'ємна ТО зварного стикового з'єднання рейок роз'ємним індуктором без магнітопроводів виконувалась у вузькій зоні (40 мм) по обидва боки від поперечного шву. Нагрівання рейки відбувалося на лабораторному обладнанні, яке включало: джерело живлення – тиристорний перетворювач частоти потужністю 160 кВт і частотою струму 2,4 кГц (ТПЧТ-160/2,4); узгоджувальний одно-фазний високочастотний трансформатор ТЗ-800

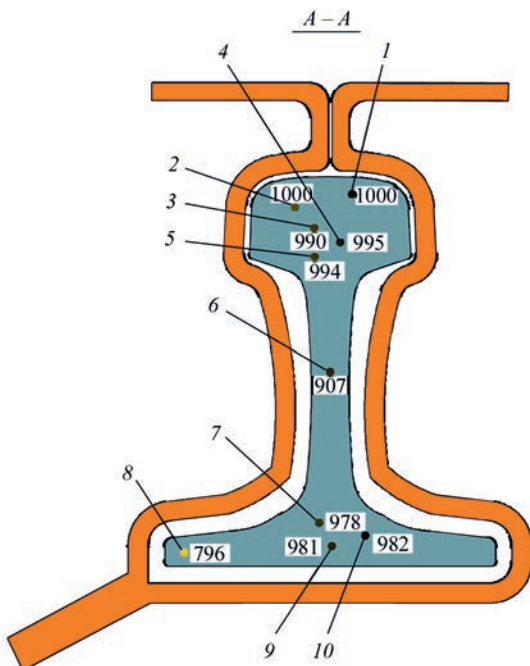


Рис. 6. Схема розташування 10 термопар в умовному поперечному перетині рейки

(трансформатор для загартування); батареї косинусних конденсаторів для компенсації реактивної потужності; дослідний індуктор.

Контроль електричних параметрів установки здійснювався: цифровими мультиметрами UNI-T UT70B і Velleman DMV1090; фазометром Ф2-1; поясом Роговського.

Вимір розподілу температурного поля в зварному шві рейки виконувався за допомогою датчиків у вигляді хромель-алюмелевих термоелектричних перетворювачів (термопар) типу К, діаметром 0,75 мм. Термопари приварювалися до рейки за допомогою малопотужного конденсаторного зварювального джерела. Чотири термопари 1–4 розміщувалися в голівці рейки (рис. 6), відповідно на глибині 6, 12, 19 і 25 мм від поверхні катання; термопара 5 – в місці переходу головки в шийку; 6 – на глибині 9 мм в найвужчому місці шийці; 7 – на глибині 22 мм в місці переходу шийки в підшову; 8 – на глибині 10 мм в торці пера рейки; 9 та 10 – в підшові рейки відповідно на глибині 10 та 14 мм.

Перетворення сигналу термопар відбувалося за рахунок підключення 10-канального АЦП ISP-DAS M-7018 та блоку гальванічної розв'язки ISP-DAS i-7561U. Візуалізація результатів вимірів температур в часі відбувалася на моніторі комп'ютера за допомогою спеціальної програми обробки вимірюваних даних.

На рис. 7 показано нагрітий зварний стик рейки Р65 експериментальним роз'ємним індуктором без магнітопроводу.

Залежності температури T (°C) в точках 1...10 умовного поперечного перетину рейки від часу t (с) наведено на рис. 8, а в табл. 2 – числові температурні показники в цих точках.

Експериментальні дані показують здатність нагріву розробленим індуктором поверхневих шарів головки рейки до температури 1000 °C, навіть вищої за температуру нормалізації металу 825...875 °C, при відносно рівномірному розподілу температурного поля в основних робочих ділянках об'єму рейки.

Максимальна температура 1000 °C досягалась за час $t_1 = 135$ с, який був прийнятий за початок процесу витримки даної температури до $t_2 = 215$ с і продовжувався $\Delta t = t_2 - t_1 = 80$ с. Далі індуктор відключався і процес нагріву зупинявся. Охолодження рейки відбувалося за природних умов.

На кривих температур (рис. 6) від початку нагріву до часу t_1 можна спостерігати їх плавний перегин, коли температура на різних ділянках рейки різко підвищується зі швидкістю $v_{mg} = 7,3...20,1$ °C/c (середнє значення 10,5 °C/c) (табл. 2), а потім її підвищення уповільнюється і швидкість нагріву спадає до $v_{nmg-t1} = 0,8...4,1$ °C/c (середнє значення 3,1 °C/c). Різкий підйом температури спостерігається на по-

чатку нагріву, коли метал рейки перебуває в магнітному стані, і глибина проникнення магнітного поля в поверхневі шари мінімальна, а густина вихрових струмів, що нагрівають метал, максимальна. Після проходження температури через точку Кюрі (точку фазового переходу A_{c3} , для сталі приблизно $770\text{ }^{\circ}\text{C}$) шари металу по глибині поступово стають немагнітними, глибина проникнення магнітного поля в метал збільшується, а густина вихрових струмів в ньому плавно зменшується, що призводить до уповільнення процесу нагріву і необхідності, зазвичай, дода-

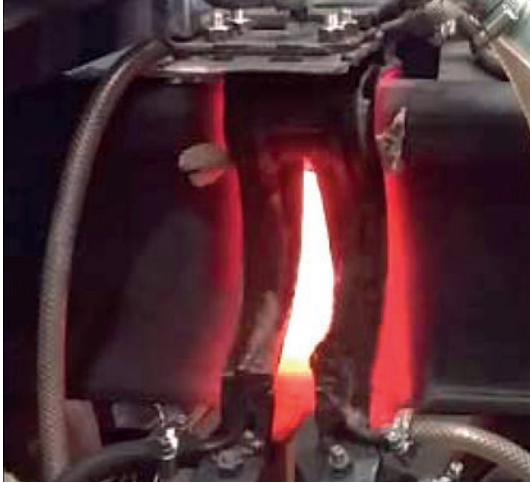


Рис. 7. Нагрів зварного стику рейки Р65 експериментальним роз'ємним індуктором без магнітопроводу

вання потужності із джерела живлення. Цей процес на різних ділянках і об'ємах рейки проходить по-різному, в залежності від стану магнітного і немагнітного металу, в процесі нагріву.

В масивних частинах рейки, таких як головка, підшва і місця переходу шийки в головку і підшву, процес нагріву відбувається плавно зі швидкостями $v_{mg} = 7,3 \dots 11,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ і $v_{nmg-tl} = 2,0 \dots 4,1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ (табл. 2), без суттєвих перегинів кривих температур, які на всьому протязі нагріву розташовані купчасто, що є наслідком правильно визначених геометричних параметрів індуктора. Швидкість зміни температури в процесі її витримки на всіх ділянках рейки дорівнює $v_{\Delta t} = 0,1 \dots 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ (середнє значення $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$).

Пір'я рейки мають невелику товщину і прогріваються спочатку найшвидше, але при повному їх прогріві вище точки Кюрі, зростання температури в них істотно уповільнюється, оскільки глибина проникнення магнітного поля збігається із товщиною пір'їв, густина струму зменшується, як і потужність, що йде на їх нагрів. Також уповільнення нагріву спостерігається і по центру шийки рейки, але менш суттєве. До того ж на ці ділянки в більший мірі, чим на інших, впливає процес охолодження за рахунок конвекції і випромінювання в зв'язку з більшою площею охолодження на одиницю маси металу.

Таблиця 2. Температурні показники в точках 1...10 умовного поперечного перетину рейки

Номери термопар (рис. 6)										Середнє значення
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Температура T_1 , $^{\circ}\text{C}$ на початку процесу витримки, яка досягається за час нагрівання $t_1 = 135\text{ c}$										
1000	990	962	943	962	906	970	794	979	977	948
Температура T_2 , $^{\circ}\text{C}$ по закінченні процесу витримки, яка досягається за час нагрівання $t_2 = 215\text{ c}$										
985	985	984	981	985	882	955	772	950	951	943
Різниця температур $\Delta T = T_2 - T_1 $, $^{\circ}\text{C}$ на границях t_1 і t_2 інтервалу Δt часу витримки ($\Delta t = t_2 - t_1 = 80\text{ c}$)										
15	5	22	38	23	24	15	22	29	26	22
Максимальна температура T_{max} , $^{\circ}\text{C}$ на інтервалі часу витримки Δt										
1000	1000	990	995	994	907	978	796	981	982	962
Мінімальна температура T_{min} , $^{\circ}\text{C}$ на інтервалі часу витримки Δt										
985	985	962	943	962	882	955	772	950	951	935
Різниця між максимальною і мінімальною температурою $\Delta T_{max-min} = T_{max} - T_{min} $, $^{\circ}\text{C}$, на інтервалі часу витримки Δt										
8	8	28	45	27	23	23	21	30	27	24
Різниця температур $\Delta T_{1000C-max} = T_{1000C} - T_{max} $, $^{\circ}\text{C}$ на інтервалі часу витримки Δt										
0	0	10	5	6	93	22	204	19	18	38
Різниця температур $\Delta T_{1000C-min} = T_{1000C} - T_{min} $, $^{\circ}\text{C}$ на інтервалі часу витримки Δt										
15	15	38	57	38	118	45	228	50	49	65
Швидкість нагріву металу в магнітному стані v_{mg} , $^{\circ}\text{C}/\text{c}$										
10,8	9,5	8,5	7,3	8,5	11,5	9,0	20,1	9,9	9,7	10,5
Швидкість нагріву металу при впливі немагнітного стану до початку процесу витримки v_{nmg-tl} , $^{\circ}\text{C}/\text{c}$										
2,7	3,0	4,1	3,6	4,1	2,0	3,7	0,8	3,4	3,6	3,1
Швидкість зміни температури в процесі витримки $v_{\Delta t}$, $^{\circ}\text{C}/\text{c}$										
0,2	0,1	0,3	0,5	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3

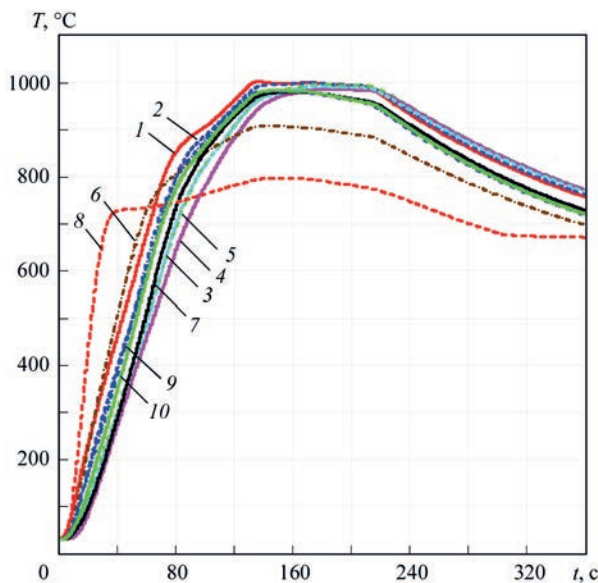


Рис. 8. Температурні залежності T від часу t в точках 1...10 (номери термопар) в умовному поперечному перетині рейки

За період витримки температури різниця між температурами на різних ділянках рейки невелика (табл. 2), так різниця між температурами на початку T_1 і в кінці T_2 інтервалу витримки $\Delta T = |T_2 - T_1| = 5...38$ °C (середнє значення 22 °C), між їх максимальними T_{\max} і мінімальними T_{\min} значеннями $\Delta T_{\max-\min} = |T_{\max} - T_{\min}| = 8...45$ °C (середнє значення 24 °C), а також між граничною температурою 1000 °C та максимальними і мінімальними значеннями температур $\Delta T_{1000\text{ }^\circ\text{C-max}} = |T_{1000\text{ }^\circ\text{C}} - T_{\max}| = 0...204$ °C (середнє значення 38 °C), $\Delta T_{1000\text{ }^\circ\text{C-min}} = |T_{1000\text{ }^\circ\text{C}} - T_{\min}| = 15...228$ °C (середнє значення 65 °C). Якщо не враховувати температуру в пір'ях рейки, то верхні граничні значення різниць температур будуть ще меншими.

Таким чином, розроблений роз'ємний індуктор без магнітопроводів забезпечує прийнятні для об'ємного нагріву зварних стиків рейки температури в її основних ділянках.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на виконання роз'ємного індуктора без магнітопроводів для поверхневої ТО зон неповної перекристалізації, що утворюються після проведення об'ємної ТО.

Висновки

1. Сучасний розвиток залізничного транспорту йде шляхом будівництва безстикowego шляху із застосуванням нових високоміцних рейок із легованих сталей підвищеної міцності та зносостійкості. Жорсткі вимоги ставляться і до зварних стиків рейок як невід'ємної частини безстикowego шляху. Отримання нормалізації металу, зменшення небажаних залишкових напружень в зоні зварного з'єднання за рахунок виконання ТО і підвищення її якості – є актуальною задачею.

2. Здійснення запропонованої концепції об'ємної і поверхневої індукційної термічної обробки зон

термічного впливу зварних стиків рейок дозволить отримати нормалізовані структури металу, які сприятимуть покращенню показників металу.

3. На основі проведених розрахунків і експериментів, аналізу особливостей геометричних форм і мас рейки на різних її ділянках розроблено роз'ємні індуктори без магнітопроводів для можливості проведення об'ємної і поверхневої індукційної термічної обробки.

4. Проведені експерименти з виконання нагріву зварного стику рейки типу Р65 дослідним зразком розробленого роз'ємного індуктора складної форми без магнітопроводів при частоті струму 2,4 кГц показали прийнятні для об'ємної термічної обробки рейок показники рівномірності нагріву, граничні температури і швидкості нагріву основних робочих ділянок рейки як на поверхні, так і в глибині у вузькій зоні нагріву 40 мм.

5. Розробка дослідного зразка роз'ємного індуктора складної форми без магнітопроводів за проведеними розрахунками та проведені експерименти з виконання нагріву зварного стику рейки типу Р65 підтвердили правильність розрахункової моделі індукційної системи «індуктор – виріб».

Автори висловлюють подяку Важкому М.І. та Цимбалісту О.С. за участь при підготовці статті.

Список літератури:

1. Губатюк Р.С. (2019) Термическая обработка сварных соединений высокопрочных железнодорожных рельсов. *Автоматическая сварка*, 2, 51–58.
2. Тарас П., Фиретеану В. (2010) Индукторы для непрерывного индукционного нагрева рельсов. *Индукционный нагрев*, 4 (14), 21–26.
3. Скобло Т.С., Сапожков В.Е., Александрова Н.М., Сидашенко А.И. (2014) *Качество термически упрочненных рельсов и подкладок. Исследования. Теория. Оборудование. Технология. Эксплуатация*. Скобло Т.С. (ред.). Харьков, ТОВ «Щедра садиба плюс».
4. Пантелеймонов Е.А., Письменный А.А. (2015) Индуктор для непрерывного нагрева при термоупрочнении головки железнодорожных рельсов. *Автоматическая сварка*, 3-4, 77–80.
5. Панов В.И. (2018) Оценка технологической наследственности металла массивных конструкций перед их ремонтной сваркой. *Сварщик*, 1, 9–11.
6. (2005) ДСТУ 4344:2004. *Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні умови*. Київ, Госпотребстандарт України.
7. (2013) <http://magnit-m.ru/catalog/ustanovki-induktsionnogo-nagreva-tvch/termoobrabotka-svarnykh-relsovykh-styk-ov/uin-001-100-rt-p>.
8. (2013) <http://magnit-m.ru/catalog/ustanovki-induktsionnogo-nagreva-tvch/termoobrabotka-svarnykh-relsovykh-styk-ov/uin-001-100-r-tsm>.
9. Zhan Xinwei, Wang Shuqing, Shao Yangdao, et al. (2015) *Non-contact type opening/closing split induction heating device for rail welded joints*. China Pat. CN 201510540567.
10. Ding Wei, Song Hongtu, Li Li, et al. (2012) *Heat treatment device of welding joint of steel rail*. China Pat. CN 201120285569.
11. Письменный О.С., Письменный О.О., Прокоф'єв О.С., Юхименко Р.В., Губатюк Р.С. (2012) *Індукційна установка для термічної обробки зварних стиків рейок*. Україна Пат. на кор. модель UA 75027.

12. Пантелеймонов С.О. (2017) *Комплекс для термічної обробки зварених стиків залізничних рейок у шляхових умовах*. Україна Пат. на кор. модель 114593.
13. Письменний О.С., Пантелеймонов С.О., Римар С.В., Губатюк Р.С. (2017) *Індукційний пристрій для термічної обробки зварених стиків залізничних рейок*. Україна Пат. на кор. модель 116086.
14. Пантелеймонов С.О., Губатюк Р.С. (2016) *Індукційний пристрій для термічної обробки зварених стиків залізничних рейок*. Україна Пат. на кор. модель 109123.
15. Zhan X., Wang S. (2005) Research on the improvement of rail head hardening. *Technology on railway. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, **5**, 263–271.
16. Слухоцкий А.Е., Рыскін С.Г. (1974) *Индукторы для индукционного нагрева*. Ленинград, Энергия.
17. Резанов, В.М. Федін, А.В. Башлыков и др. (2013) Дифференцированная закалка сварных стыков рельсов. *Вестник ВНИИЖТ*, **2**, 28–34.
18. Шамо́в А.Н., Бодажков В.А. (1963) *Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок*. Москва, Ленинград, Mashgiz.
19. Бар И.Г., Полевой С.В. (1989) *Ремонт воздушных линий электропередач под напряжением*. Москва, Энергоатомиздат.
6. (2005) DSTU 4344:2004: *Normal rails for full-gauge railway. General specifications*. Kyiv, Gospotrestandart Ukrainy [in Ukrainian].
7. (2013) <http://magnit-m.ru/catalog/ustanovki-induktsionno-go-nagreva-tvch/termoobrabotka-svarnykh-relsovykh-stykov/uin-001-100-rt-p>.
8. (2013) <http://magnit-m.ru/catalog/ustanovki-induktsionno-go-nagreva-tvch/termoobrabotka-svarnykh-relsovykh-stykov/uin-001-100-r-tsm>.
9. Zhan Xinwei, Wang Shuqing, Shao Yangdao, et al. (2015) *Non-contact type opening/closing split induction heating device for rail welded joints*. China Pat. CN 201510540567.
10. Ding Wei, Song Hongtu, Li Li, et al. (2012) *Heat treatment device of welding joint of steel rail*. China Pat. CN 201120285569.
11. Pysmennyi, O.S., Pysmennyi, P.O., Prokofiev, O.S., Yukhymenko, R.V., Gubatyuk, R.S. (2012) *Induction installation for heat treatment of rail welded joints*. Ukraine Pat. on utility model UA 75027 [in Ukrainian].
12. Panteleimonov, E.O. (2017) *Complex for heat treatment of railway rail welded joints in situ*. Ukraine Pat. on utility model 114593 [in Ukrainian].
13. Pysmennyi, O.S., Panteleimonov, E.O., Ryamar, S.V., Gubatyuk, R.S. (2017) *Induction device for heat treatment of railway rail welded joints*. Ukraine Pat. on utility model 116086 [in Ukrainian].
14. Panteleimonov, E.O., Gubatyuk, R.S. (2016) *Induction device for heat treatment of railway rail welded joints*. Ukraine Pat. on utility model 109123 [in Ukrainian].
15. Zhan, X., Wang, S. (2005) Research on the improvement of rail head hardening. *Technology on railway. Proc. of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, **5**, 263-271.
16. Slukhotsky, A.A., Ryskin, S.G. (1974) *Inductors for induction heating*. Leningrad, Energiya [in Russian].
17. Rezanov, V.M., Fedin, A.V., Bashlykov, A.V. ((2013) Differential hardening of rail welded joints. *Vestnik VNIIZhT*, **2**, 28-34 [in Russian].
18. Shamov, A.N., Bodazhkov, V.A. (1963) *Design and operation of high-frequency installations*. Moscow, Leningrad, Mashgiz [in Russian].
19. Bar, I.G., Polevoj, S.V. (1989) *Repair of live overhead power lines*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].

References

1. Gubatyuk, R.S. (2019) Heat treatment of welded joints of high-strength railway rails (Review). *The Paton Welding J.*, **2**, 41-48.
2. Taras, P., Fireteanu, V. (2010) Inductors for continuous induction heating of rails. *Induktsionnyj Nagrev*, **4** (14), 21-26 [in Russian].
3. Skoblo, T.S., Sapozhkov, V.E., Aleksandrova, N.M., Sidashenko, A.I. (2014) *Quality of thermally-hardened rails and rail bases. Investigations. Theory. Equipment. Technology. Operation*. Ed. by T.S. Skoblo. Kharkov, LLC Shchedra Sadyba Plus [in Russian].
4. Pantelejmonov, E.A., Pismenny, A.A. (2015) Inductor for continuous heating in hardening of railway rail head. *The Paton Welding J.*, **3** **4**, 74-76.
5. Panov, V.I. (2018) Evaluation of technological heredity of metal of solid structures before their repair welding. *Svarshchik*, **1**, 9-11 [in Russian].

DEVELOPMENT OF INDUCTORS FOR BULK AND SURFACE HEAT TREATMENT OF WELDED BUTT JOINTS OF RAILWAY RAILS

O.S. Prokof'ev, R.S. Gubatyuk, O.S. Pysmenii, S.V. Ryamar, Ye.O. Panteleimonov
 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 paper presents the concept of bulk and surface heat treatment of the welded butt joint of a railway rail by two or more inductors with the purpose of achieving favourable phase transformations of metal and normalizing its structure in the weld zone. Performed computations and experiments resulted in development of detachable inductors without magnetic circuits, which allow performance of bulk and surface induction heat treatment. Conducted experiments on heating a welded butt joint of a rail by the developed detachable inductor without the magnetic circuit demonstrated heating uniformity characteristics acceptable for bulk heat treatment of rails, limit temperatures and rates of heating of the main rail working areas both on the surface and in-depth in a narrow heating zone. 19 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

Keywords: inductor, induction heating, bulk heat treatment, surface heat treatment, welded butt joint of railway rails, normalizing of weld zone metal

Надійшла до редакції 22.03.2020

Інститут електродинаміки НАН України
 НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
 НТУ «Харківський політехнічний інститут»
 Криворізький національний університет
 Громадська організація «Пані Наука»



У міжнародна науково-технічна конференція
SMART-ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЦІ ТА ЕЛЕКТРОНІЦІ – 2020 / STEE-2020

16-21 серпня 2020
<http://smart-ee.kpi.ua>