



НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ІННОВАЦІЙНІ ПРОЄКТИ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

<https://doi.org/10.15407/scin16.02.072>

С.І. КУЧУК-ЯЦЕНКО, П.М. РУДЕНКО, В.С. ГАВРИШ,
О.В. ДІДКОВСЬКИЙ, Є.В. АНТІПІН, І.В. ЗЯХОР
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03150, Україна,
+380 44 205 2370; +380 44 568 0486, office@paton.kiev.ua

ОПЕРАЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ ЯК ЗАСІБ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПРИ КОНТАКТНОМУ СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ СУЧАСНИХ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ОПЛАВЛЕННЯ

Вступ. Контактне стикове зварювання оплавленням (КСЗО) рейок в реальному часі контролюється за допущеннями на основні параметри процесу згідно з даними, закладеними в технічні умови (ТУ). Використований алгоритм операційного контролю дозволяє своєчасно виявляти неякісні з'єднання і неприпустимі тенденції в процесі.

Проблематика. Для контролю відповідності ТУ зварювання рейок з нових високоміцних сталей, додатково до діючої методики, необхідно враховувати ширину зони термічного впливу (ЗТВ) при їхньому нагріванні. Наявні чисельні методи розрахунку ЗТВ в реальному часі не можуть бути реалізовані через недостатні обчислювальні можливості сучасних систем управління.

Мета. Розробити відповідний технічним умовам алгоритм контролю в реальному часі КСЗО з прогнозуванням ширини ЗТВ.

Матеріали й методи. Чисельний метод розрахунку теплових полів при стиковому зварюванні; регресійний аналіз для прогнозування ЗТВ. Розрахунок ширини ЗТВ виконано за даними параметрів процесу на етапі оплавлення і за величиною осадки.

Результати. Розроблено алгоритм контролю КСЗО в реальному часі для сучасних високоміцних сталей з прогнозування ширини ЗТВ, в основу якого покладено математичне моделювання процесу формування з'єднань при контактному зварюванні. Алгоритм контролю відповідності КСЗО ТУ подано у вигляді «нечіткого» класифікатора Сугено, входними величинами якого є розрахункова ширина ЗТВ, параметри процесу при підвищенні швидкості укорочення рейок перед осадкою та під час неї.

Висновки. Для розрахунку ширини ЗТВ в реальному часі з необхідною для практичного застосування точністю можна використовувати регресійну залежність у вигляді полінома другого порядку або MLP нейронної мережі зі структурою: три входних нейрона, два в прихованому шарі і один на виході. Прогно-

Цитування: Кучук-Яценко С.І., Руденко П.М., Гавриш В.С., Дідковський О.В., Антіпін Є.В., Зяхор І.В. Операційний контроль як засіб оцінки якості зварних з'єднань при контактному стиковому зварюванні сучасних високоміцних сталей методом оплавлення. *Nauka innov.* 2020. Т. 16, № 2. С. 72–78. <https://doi.org/10.15407/scin16.02.072>

зування ширини ЗТВ при операційному контролі розширює можливості його застосування для контактного стикового зварювання високоміцних рейок. Розроблений алгоритм дозволив збільшити точність і надійність операційного контролю КСЗО в реальному часі.

Ключові слова: контактне стикове зварювання, високоміцні рейки, зона термічного впливу, регресійна модель, нечітка логіка, класифікатор Сугено.

У різних галузях промисловості при масовому виготовленні зварних конструкцій успішно використовується технологія контактного стикового зварювання оплавленням, яку розроблено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона. В її основу покладено програмну зміну основних параметрів з одночасним використанням зворотних зв'язків для регулювання (стабілізації) їх миттєвих значень.

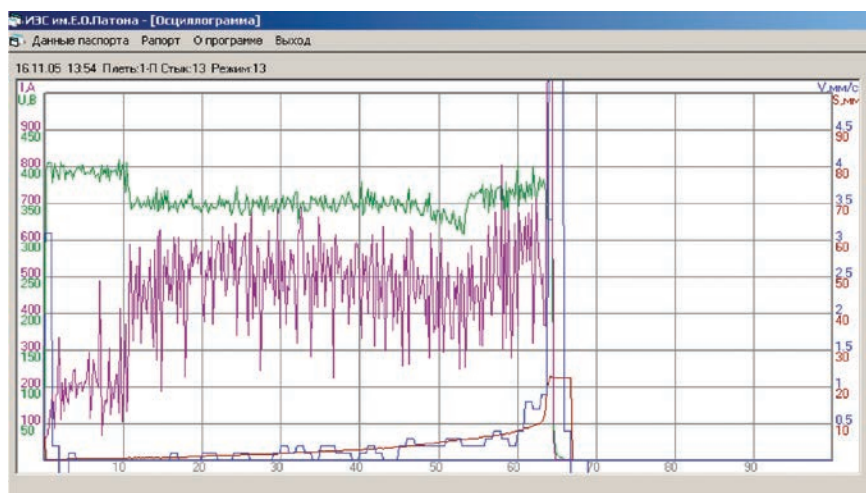
На рис. 1 наведено типовий запис основних параметрів: напруги U і струму I на вході зварювального трансформатора, швидкості V і величини S укорочення зварювальних рейок на підприємствах Укрзалізниці з використанням контактних машин розробки ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

В результаті багатофакторного управління параметрами система автоматичного керування забезпечує виконання вимог для отримання показників якості зварного з'єднання згідно з технічними умовами (ТУ) [1]. Зазначені ТУ було отримано при дослідженнях зварних з'єднань, зокрема при численних випробуваннях на статичний механічний згин. Задані та виміряні значення параметрів реєструються у вигляді електронного протоколу, який видається для інформації оператору в процесі зварювання й передається в діагностичний центр Укрзалізниці для статистичної обробки [1, 2]. При неприпустимих відхиленнях основних параметрів від заданих програмою значень система видає вказівку на припинення роботи та надає рекомендації щодо усунення відхилень.

Основні недоліки наявного операційного контролю (без урахування розподілу вимірних значень параметрів всередині допуску, «розмитості» меж допусків, значимості впливу окремих параметрів і їх комбінації на показник якості зварного стику) в деякій мірі можуть бути усунені в алгоритмі контролю на основі «нечіткої» логіки [1–3].

В останні роки, зважаючи на необхідність розробки технологій КСЗО сучасних високоміцних рейок, заевтектійних рейок і зростанням вимог до якості зварних з'єднань в міжнародному стандарті, який регламентує вимоги до зварних з'єднань таких рейок, [4–7] введено додаткові вимоги, що обмежують допустимі зміни твердості в зоні термічного впливу (ЗТВ) зварного

Рис. 1. Осцилограма параметрів процесу контактного стикового зварювання оплавленням: напруга U і струм I на вході зварювального трансформатора, швидкості V і величини S укорочення деталей, що зварюються



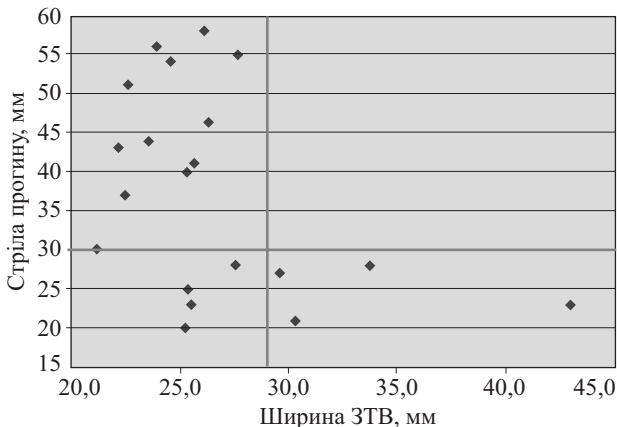


Рис. 2. Залежність стріли прогину при статичних випробуваннях на згин $L_{\text{пр}}$ (мм) (ордината) від ширини ЗТВ, розрахованої за даними параметрів зварювання з врахуванням величини припуску на осадку, (абсциса) для рейок зі сталі К76Ф (мм). Червону горизонтальну лінію проведено на рівні мінімального допустимого згину (30 мм), вертикальну — на рівні максимальної допустимої ширини ЗТВ (27 мм)

з'єднання і її ширина, контроль яких складно виконати у виробничих умовах і він здійснюється тільки в процесі випробувань контрольних партій рейок.

Мета роботи — розробка алгоритму контролю в реальному часі відповідності ТУ КСЗО з прогнозуванням ширини ЗТВ і підвищення точності і надійності контролю в реальному часі процесу стикового зварювання рейок. Відомі методи чисельного розрахунку теплового поля при нагріванні методом кінцевих різниць, які можна було б використовувати для розрахунку теплового поля при зварюванні рейок, для застосування в реальному часі вимагають недоступної на сьогодні обчислювальної продуктивності системи управління. Статистичні регресійні залежності різних видів, зокрема й нейронні мережі, значно простіші для реалізації. Однак для їх побудови потрібні експериментальні дані, які задовольняють умові репрезентативності [5], зокрема, рівномірного покриття всієї можливої області існування процесу, враховуючи й результати зварювання, тобто число точок з позитивним і негативним результатом має бути збалансованим. Ці умови на

практиці дуже складно виконати, тому що вартість експериментів досить висока, а виробничі дані зі зварювання зразків зазвичай концентруються у вузькому діапазоні і позитивних показників значно більше, ніж негативних.

Для отримання масиву репрезентативних даних було використано математичну модель кінетики температурного поля при пульсуючому оплавленні з урахуванням багатofакторного впливу на інтенсивність нагріву швидкоплинних процесів утворення й руйнування одиничних контактів, що формуються при технологічному циклі контактного зварювання залізничних рейок [6]. Модель було налаштовано, перевірено й уточнено за експериментальними даними при нагріванні методом оплавлення зразків рейок типу Р65 марок М76 і К76Ф на пересувному мобільному рейкозварювальному комплексі. Температуру нагрівання в експериментах контролювали за допомогою термомпар, які було встановлено на різній відстані від зварювальної кромки вздовж рейки. У розрахованих масивах було збалансовано кількість оцінок для процесу, який відповідає і не відповідає ТУ. Розрахунки виконано для різних типів сталей, зокрема й для конверторної термічнозмцненої рейкової сталі К76Ф. З огляду на те, що допустимий діапазон ширини ЗТВ при зварюванні рейок, відповідно до стандарту ЄС [4], становить 20–45 мм і припуск на осадку зазвичай до 12 мм, розрахунки було проведено для ширини ЗТВ до 60 мм. На даному етапі під шириною ЗТВ розуміли відстань від нагрітого до температури (ізотерми) 500 °С металу до кромки уздовж рейки. При цьому в розрахунках струм і напругу на вході зварювального трансформатора змінювали в діапазоні 200–700 А і 300–420 В відповідно. Контрольними параметрами були величина S_0 і швидкість V_0 укорочення деталей при оплавленні, електрична енергія за час оплавлення Q_0 і параметри для оцінювання температурного поля (ширина ЗТВ без урахування величини осадки) — відстань точки нагріву до 500 °С від кромки.

При моделюванні напруга і зварювальний струм в розробленій моделі самостійно не впливали на температуру нагрівання і враховувалися у значенні енергії Q_o . Тому надалі ці параметри, як вхідні, не враховували.

Було проведено розрахунки регресійних моделей для ширини ЗТВ від параметрів S_o , V_o , Q_o у вигляді полінома першого й другого порядку, найпростіших нейронних мереж типу багат шарового перцептрона (*multilayer perceptron* – *MLP* зі структурою 3-2-1, тобто, три вхідних нейрона, два – в прихованому шарі, один – вихідний), радіальних базових функцій (*radial basic functions* – *RBF* зі структурою 3-10-1) і адаптивних нечітких нейронних мереж з кластеризацією (*Subtractive* – *SBT* і *fuzzy c-mean* – *FCM*). В останніх двох алгоритмах архітектура й функції приналежності були практично однаковими й відрізнялися способом виділення кластерів (три кластера в кожному алгоритмі) [3, 5]. У всіх випадках як функція помилок використовувалася сума квадратів помилок.

За отриманими даними найбільшу точність розрахунку мали нечіткі моделі з субтрактивною кластеризацією (середнє квадратичне від-

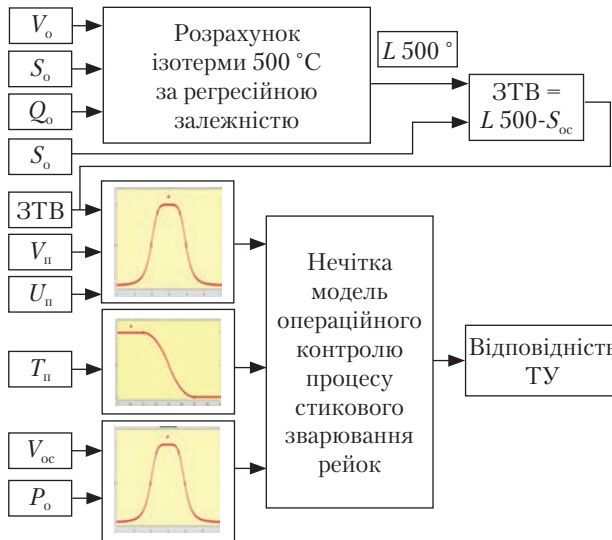


Рис. 3. Схема алгоритму контролю в реальному часі відповідності ТУ процесу контактного стикового зварювання рейок

хилення $S = 0,50$ мм, середня відносна помилка $\epsilon_{cp} = 1,01$ %). Далі йдуть MLP нейронні мережі ($S = 0,55$ мм, $\epsilon_{cp} = 1,16$ %) і регресивні залежності у вигляді неповного полінома другого порядку ($S = 0,56$ мм, $\epsilon_{cp} = 1,23$ %). У розрахунках вибирали найпростіші можливі алгоритми (архітектуру) цих моделей. Їх усклад-

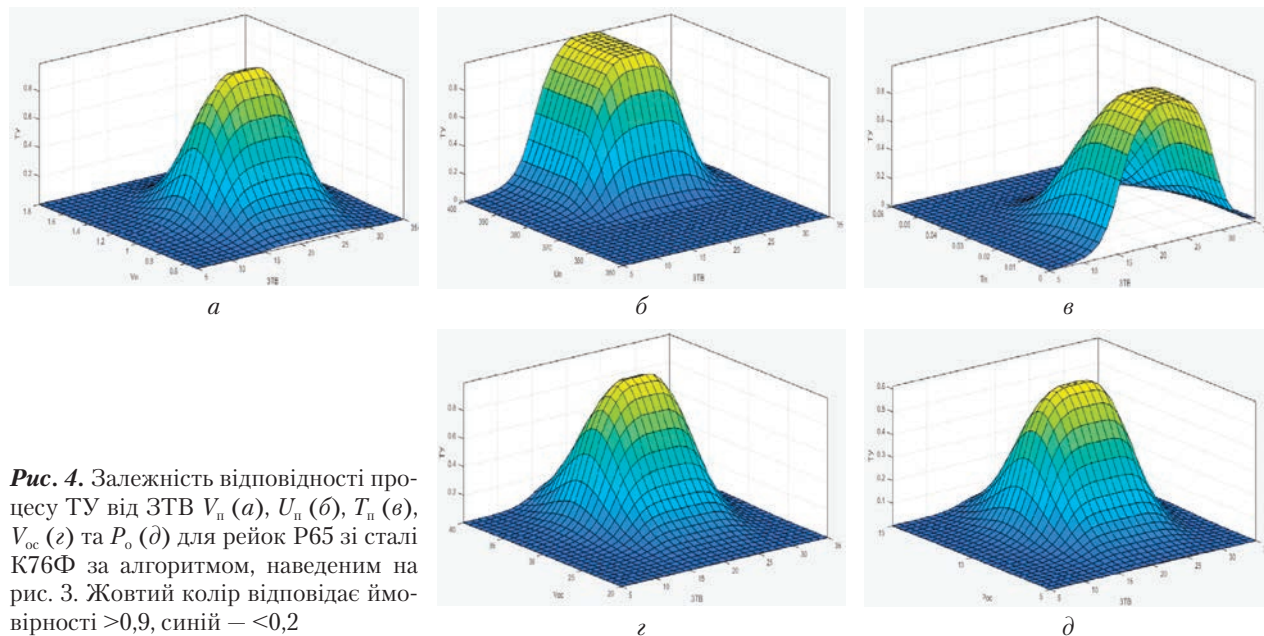


Рис. 4. Залежність відповідності процесу ТУ від ЗТВ $V_{п}$ (а), $U_{п}$ (б), $T_{п}$ (в), V_{oc} (г) та P_o (д) для рейок Р65 зі сталі К76Ф за алгоритмом, наведеним на рис. 3. Жовтий колір відповідає ймовірності $>0,9$, синій – $<0,2$

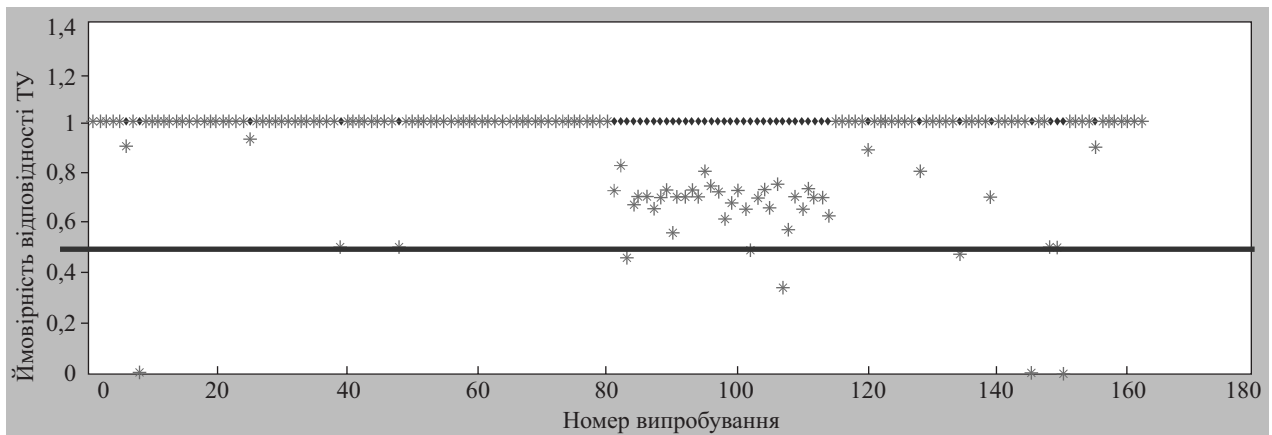


Рис. 5. Оцінка ймовірності відповідності ТУ процесу контактного стикового зварювання рейок (вісь ординат) за архівними даними для 162 зварних з'єднань (номер випробування позначено на осі абсцис): * — дані експерименту, * — дані розрахунку

ненням можна домогтися кращих результатів. Але таке ускладнення може бути ефективним тільки для конкретного набору даних. Моделі з більш простою структурою менш чутливі до похибки відтворення дослідів, яка завжди присутня в експериментах. Умова фільтрації або малої чутливості до цієї похибки дуже важлива для практичного використання моделей. Якщо оцінювати складність алгоритму за кількістю розрахункових параметрів, то кращими з них є рівняння регресії у вигляді неповного полінома другого порядку і MLP нейронні мережі.

Зіставлення значень ЗТВ, розрахованих за даними параметрів зварювання (з вирахуванням величини припуску на осадку), зразків рейок зі сталі К76Ф з величиною стріли прогину при їх механічних випробуваннях показало, що допуск по ширині ЗТВ для цих рейок повинен бути зменшений до 27 мм на відміну від даних стандарту [4] (рис. 2).

З урахуванням розробленої моделі розрахунку ширини ЗТВ, на основі відомого алгоритму операційного контролю нечіткої логіки [1, 2] було обрано наступний алгоритм (рис. 3, 4).

Крім S_0 , V_0 , Q_0 , входними параметрами алгоритму також є напруга U_{II} швидкість укорочення V_{II} і тривалість струму короткого зами-

кання T_{II} на етапі підвищення швидкості укорочення перед осадкою, а також швидкість V_{oc} і тиск P_0 осадки.

В алгоритмі використано обидва основні методи ідентифікації — класифікація (належність об'єкта, заданого набором параметрів, до одного з наперед визначених класів — в нашому випадку згідно з технічними умовами чи ні) і регресія (результат розрахунків є некінцева множина класів, а множина дійсних чисел — значення ширини ЗТВ).

Запропоновану систему проектували як нечіткий класифікатор у вигляді системи Сугено, в якій вихідному показнику «Відповідність ТУ» приписували значення «1» при відповідності ТУ за даними механічних дослідів і «0» — при невідповідності [7]. Очевидно, що розроблений алгоритм можна підлаштовувати за даними періодичних механічних випробувань зразків, зварювання яких є обов'язковим у виробництві з періодом не менше половини зміни по кожній машині. На виході блоку розрахунку ширини ЗТВ формується чисельне значення ширини ЗТВ в натуральних одиницях, яке можна порівнювати з вимірюваною величиною при випробуваннях і ці дані використовувати для уточнення регресійної залежності.

Описаний алгоритм було перевірено за архівними даними процесу стикового зварювання рейок Р65 з сталі М76 і К76Ф виробництва ПАО МК «Азовсталь» (Україна) на рейкозварювальних підприємствах України. Оцінка відповідності ТУ показала розбіжність даних контролю тільки в п'яти випадках з 162. У шести випадках результат був неоднозначним, тому що розрахунок показав ймовірність відповідності ТУ близько 0,5 (рис. 5). В цілому отриманий результат можна вважати задовільним.

Таким чином, для розрахунку ширини ЗТВ в реальному часі з необхідною для практич-

ного застосування точністю можна використовувати регресійну залежність у вигляді полінома другого порядку або MLP нейронної мережі зі структурою — три вхідних нейрона, два — в прихованому шарі і один — на виході.

Прогнозування ширини ЗТВ при операційному контролі розширює можливості його застосування для контактного стикового зварювання високоміцних рейок.

Розроблений алгоритм дозволив збільшити точність і надійність операційного контролю контактного стикового зварювання в реальному часі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучук-Яценко С.І., Руденко П.М., Гавриш В.С., Дідковський О.В., Антипін Є.В., Горонков М.Д. Створення системи керування процесом контактного зварювання оплавленням рейок у стаціонарних і польових умовах, що забезпечує підвищення експлуатаційного ресурсу та надійності залізничних колій. *Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин»*. Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2013–2015 рр. Київ, 2015. С. 615–628.
2. Kuchuk-Yatsenko S.I., Rudenko P.M., Gavrish V.S., Didkovsky O.V., Shvets V.S., Antipin E.V., Wojtas P., Kozlowski A. Real-time operational control in information management system for flash-butt welding of rails. *Mining informatics automation and electrical engineering*. 2017. V. 1, no. 529. P. 35–42.
3. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzy-logic/book1/> (дата звернення: 01.03.2019).
4. DIN EN 14587-2. Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 2: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails by mobile welding machines at sites other than a fixed plant URL: <https://www.en-standard.eu/din-en-14587-2-railway-applications-track-flash-butt-welding-of-rails-part-2-new-r220-r260-r260mn-and-r350ht-grade-rails-by-mobile-welding-machines-at-sites-other-than-a-fixed-plant/> (дата звернення: 27.12.2019).
5. Электронный учебник СТАТИСТИКА StatSoft. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/> (дата звернення: 01.03.2019).
6. Кучук-Яценко С.И., Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Антипин Е.В., Дидковский А.В. Математическое моделирование процесса нагрева металла при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением. *Автоматическая сварка*. 2018, № 10. С. 3–10.
7. Штовба С. Классификация объектов на основе нечеткого логического вывода. URL: <https://www.researchgate.net/publication/280064772> (дата звернення: 01.03.2019).

Стаття надійшла до редакції / Received 13.06.19

Статтю прорецензовано / Revised 24.06.19

Статтю підписано до друку / Accepted 24.06.19

*Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Gavrish, V.S.,
Didkovsky, O.V., Antipin, Y.V., and Ziakhor, I.V.*
Paton Electric Welding Institute, NAS of Ukraine,
11, Kazimir Malevich St., Kiev, 03150, Ukraine,
+380 44 205 2370, +380 44 568 0486, office@paton.kiev.ua

OPERATIONAL CONTROL AS A MEANS OF THE EVALUATION OF QUALITY OF WELDED CONNECTIONS FOR FLASH-BUTT WELDING OF MODERN HIGH-STRENGTH STEELS

Introduction. Flash-butt welding (FBW) of rails is controlled in real time based on the tolerances of the main process parameters according to the data of specifications. The operational control algorithm enables real-time detection of low quality weld and inadmissible trends in the process.

Problem Statement. In addition to the existing method, in order to control the compliance of welding of new high-strength steel rails with the specifications, it is necessary to take into account the width of the heat-affected zone (HAZ). The known numerical methods for calculating the HAZ in real time cannot be implemented because of insufficient computational capabilities of modern control systems.

Purpose. To develop an algorithm for real-time monitoring of FBW with predicting the width of the HAZ, in compliance with technical specifications.

Materials and Methods. A numerical method for calculating thermal fields during flash-butt welding, a regression analysis for HAZ prediction. The HAZ width is calculated based on the process parameters at the burning-off stage and on the upsetting.

Results. A real-time algorithm has been developed for controlling FBW of modern high-strength steels with prediction of the HAZ width. The algorithm is based on mathematical modeling of joints formation during flash-butt welding.

Conclusions. The regression equation in the form of a second-order polynomial or MLP neural network with a structure of 3 neurons in the input layer – 2 neurons in the hidden layer – 1 neuron in the output layer can be used for calculating the HAZ width in real time with the required accuracy for practical use. Prediction of the HAZ width during operational control expands the possibilities of its use for resistance butt-welding of high-strength rails. The developed algorithm has increased the accuracy and reliability of operational control of FBW in real time.

Keywords: flash-butt welding, high-strength rails, heat-affected zone, regression model, fuzzy logic, and Sugeno classifier.