

ОПЕРАЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕСУ КОНТАКТНОГО СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК МЕТОДОМ ПУЛЬСУЮЧОГО ОПЛАВЛЕННЯ

С.І. Кучук-Яценко, П.М. Руденко, О.В. Дідковський, Є.В. Антіпін

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

В статті наведено дослідження точності відтворення параметрів операційного контролю контактного стикового зварювання оплавленням залізничних рейок з метою підвищення надійності оцінки відповідності процесу ТУ та підвищення якості зварних стиків. Для статистичного аналізу протоколів зварювання рейок на рейкозварювальних підприємствах зроблено огляд існуючих показників точності і стабільності технологічних процесів. Для аналізу вибраний коефіцієнт варіації K_v , який не пов'язаний з допуском на відхилення параметру процесу. Оцінки коефіцієнтів K_v за протоколами зварювання більше 10 тис. стиків та більше 100 зразків технологічної проби для стаціонарної машини К1000 показали, що параметри режиму, які задаються безпосередньо системою управління, відтворюються з похибкою не більше 1,5 %. Коефіцієнти K_v різко зростають для швидкості оплавлення, переходу від оплавлення до осаджування та власне осаджування, які входять у ТУ на зварення рейок, та активної електричної енергії, що мала місце при оплавленні на вході зварювального трансформатора. Дослідження коефіцієнтів K_v з групуванням даних зварювання по півроку показали, що варіація параметрів процесу не мала трендів і процес з достатньою точністю був сталий у часі. Середні значення та середнє квадратичне відхилення параметрів процесу зварювання рейок і зразків технологічної проби відрізняються у межах статистичної похибки, що свідчить про можливість апроксимації результатів тестових досліджень на стики рейок. Оцінка впливу параметрів процесу швидкості, припуску та енергії оплавлення на зону термічного впливу (ЗТВ) з використанням лінійної регресійної залежності показала суттєву залежність ЗТВ від варіації електричної енергії при оплавленні. Для контролю активної енергії розроблений вимірювальний перетворювач середньої активної електричної потужності з імпульсним виходом, який адаптований до систем керування машинами К1000 та К922, з вхідними сигналами струму до 1000 А та напруги до 440 В, смугою частот цих сигналів до 1 кГц і наведеною похибкою вимірювання до 1 %. Рекомендовано включити у перелік параметрів контролю до ТУ активну електричну енергію, що відляється при оплавленні на вході зварювального трансформатора, та для підвищення якості стиків не тільки контролювати значення параметрів у межах допуску, а створити умови найменшої варіації параметрів від даних, які були отримані при налаштуванні режиму. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: контактне стикове зварювання, залізничні рейки, статистичний контроль, коефіцієнт варіації, параметри процесу, параметри якості, зона термічного впливу, активна електрична енергія при оплавленні, управління якістю

Технічні умови контактного стикового зварювання (КСЗО) залізничних рейок [1, 2] регламентують параметри режиму зварювання, допуски відхилень для них, показники якості зварного стику: ширину зони термічного впливу (ЗТВ), твердість металу по поверхні катання зварного з'єднання та показники періодичного контролю процесу за зразками технологічної проби на статичний механічний згин: мінімальну стрілу прогину L_p і руйнівне навантаження P_p .

Показники якості стику, як і результати механічних випробувань зразків залежать від відхилень більше десятка параметрів процесу від їх значень, для яких процес був налаштований.

Розсіювання значень як вхідних параметрів, так і відповідно вихідних показників якості внаслідок наявності систематичних та випадкових збурень звичайно характеризують математичним сподіванням або середньою величиною \bar{x} та дисперсією σ^2 або середнім квадратичним (с.к.в.) чи

стандартним відхиленням $S = \sqrt{\sigma^2}$ від середнього. Якщо враховувати, що вхідні параметри мають різні фізичні властивості або суттєво відрізняються за значеннями, для їх порівняння краще використовувати безрозмірні величини.

При статистичному контролі процесу звичайно використовуються показники точності й стабільності: коефіцієнти точності K_T , налаштованості K_H і стабільності K_C :

$$K_T = 6S/\delta, K_H = (\bar{x} - x_0)/\delta, K_C = S_{t1}/S_{t2}, \quad (1)$$

де $\delta = x_b - x_n$ – поле допуску на параметр; x_b і x_n – верхня та нижня межа допуску на параметр; $x_0 = (x_b + x_n)/2$ – середина поля допуску; S_{t1} – с.к.в. у фіксований момент часу t_1 ; S_{t2} – с.к.в. у порівнюваний фіксований момент часу t_2 .

Ці оцінки безрозмірні, відносні й для їхнього подальшого аналізу фізичне значення параметра можна не враховувати, а допуски на їхній контроль можуть бути задані загальні, що зручно для порівняння різних фізичних параметрів. Вважа-

ється, наприклад, що при $K_T \leq 0,75$ технологічний процес досить точний, при $K_T = 0,76 \dots 0,98$ технологічний процес вимагає уважного спостереження й при $K_T > 0,98$ точність незадовільна [3].

У багатьох японських підприємствах та автомобільній промисловості США для контролю використовуються подібні оцінки – індекси відтворюваності (process capability index):

потенціал процесу для двосторонніх меж допуску

$$C_p = (x_b - x_n) / 6S = \delta / 6S,$$

працездатність процесу щодо верхньої межі допуску

$$CPU = (x_b - \bar{x}) / 3S,$$

працездатність процесу щодо нижньої межі допуску

$$CPL = (\bar{x} - x_n) / 3S,$$

відхилення середнього значення процесу від середини поля допуску

$$k = 2|x_s - \bar{x}| / (x_b - x_n) = 2|x_s - \bar{x}| / \delta,$$

працездатність процесу для двосторонніх меж допуску

$$C_{pk} = \min \{CPU, CPL\} = C_p(1 - k),$$

які утворюють групу взаємодоповнюючих показників відтворюваності і подібні коефіцієнтам K_T , K_n та K_c , також визначають відповідність допускам процесу та проблеми налаштування. Вони можуть застосовуватися для односторонніх і двосторонніх меж допуску і можуть узагальнюватися для роботи з багатомірними номіналами (показниками якості) [4].

Перелічені показники посилаються на поле допуску δ , яке визначає імовірність якісного продукту при знаходженні контрольованого параметра в ньому. Контроль процесу КСЗО залізничних рейок на стаціонарних машинах К1000 та пересувних машинах К922 на існуючих системах управління машинами включає значно більше параметрів, ніж входять у ТУ (таблиця), та не для всіх із них існують допуски. Крім того, допуски можуть бути не досить «оптимальними».

Тому для порівняння розкиду параметрів у подальшому використовували коефіцієнт варіації K_B (англ. coefficient of variation, нім. Variationskoeffizient m) – відносна величина для характеристики розсіяння (мінливості) ознаки і застосовується тоді, коли необхідно порівняти

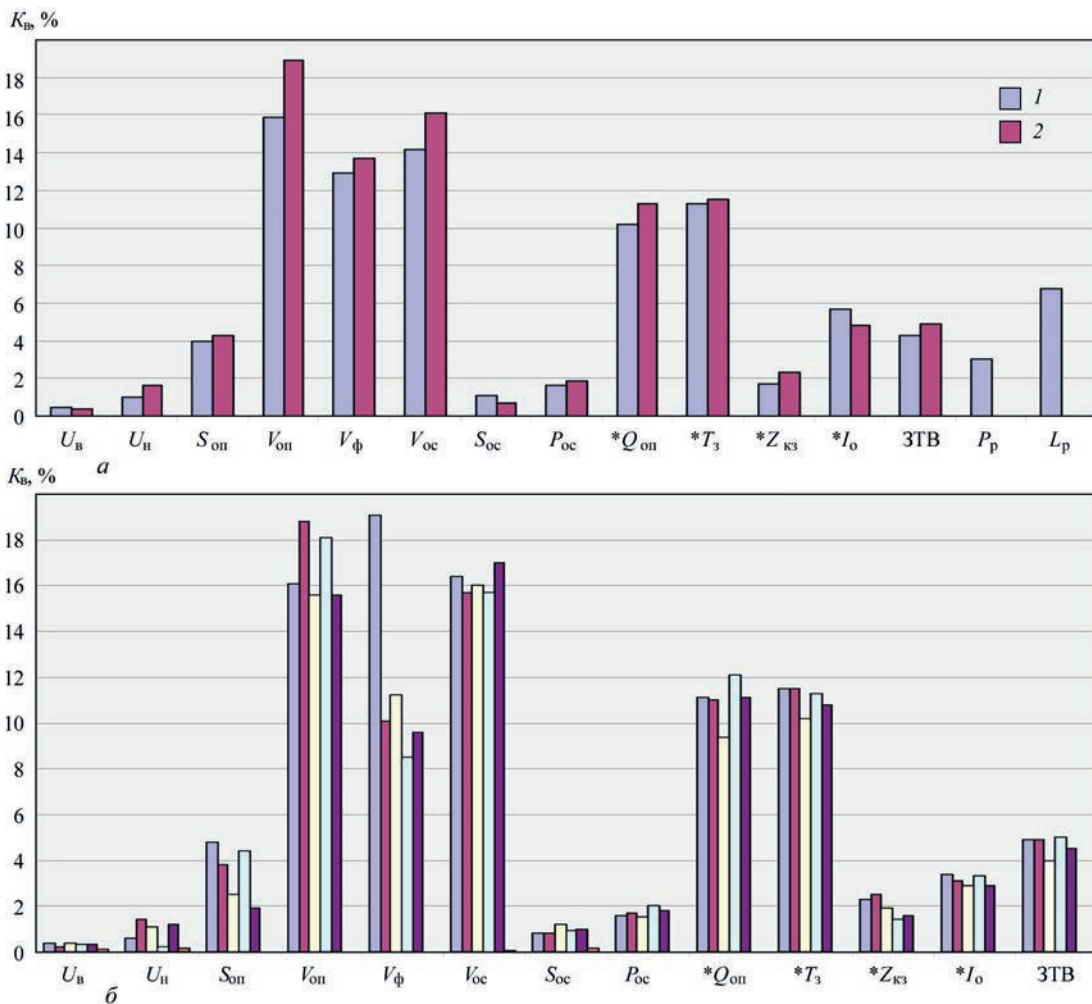


Рис. 1. Коефіцієнти варіації K_B при зварюванні рейок Р65 марки К76Ф на машині К1000 (а): 1 – дані зварювання зразків технологічної проби, 2 – дані зварювання стиків рейок (тут і далі ЗТВ прогнозували за регресійною залежністю від $V_{оп}$, $S_{оп}$, $Q_{оп}$, S_{oc} [6] та зміна коефіцієнтів варіації K_B у часі з періодом півроку при зварюванні рейок Р65 марки К76Ф на машині К1000. Однаковим кольором показані K_B для однакових інтервалів часу (б)

Допуски для параметрів контактного зварювання пульсуючим оплавленням рейок марок М76 типу Р65, К76Ф типу Р65, 60Е1 для машин К1000 та К922 (у дужках) згідно [1]

Параметр	Поле допуску		Інтервал досліджень	
	Нижнє	Верхнє	Нижній	Верхній
Час зварювання $*T_z$, с	60	100	40	275
Швидкість оплавлення $V_{оп}$, мм/с	0,07 (0,065)	0,2	0,03	0,4
Припуск оплавлення $S_{оп}$, мм	12(9)	18	5	30
Напруга при переході до осаджування U_b , В	355	440	300	500
Напруга на опавленні U_n , В	250	360	200	500
Швидкість перед осаджуванням $V_{ф}$, мм/с	0,7	2,5	0,1	4
Швидкість осаджування $V_{ос}$, мм/с	30(20)	80	10	145
Тиск осаджування $P_{ос}$, атм	12(9)	15(12)-20	5	40
Припуск осаджування $S_{ос}$, мм	11,5	17	5	35
Час осаджування з струмом $T_{осл}$, с	1-0,49 (0,8)	2 (1,8)	0,3	3
Струм оплавлення $*I_{оп}$, А	–	–	80	800
Імпеданс вторинного контуру при к.з. $*Z_{кз}$, мкОм	–	–	25	300
Енергія оплавлення $*Q_{оп}$, кВт·ч	–	–	1,0	5,00

Примітка. * – позначені параметри, що не входять у ТУ.

мінливість ознак об'єкта, які виражені в різних одиницях вимірювання (синонім: unitized risk – уніфікований ризик) [3].

В статті наведено дослідження точності відтворення параметрів операційного контролю КЗСО залізничних рейок з метою підвищення надійності оцінки відповідності процесу ТУ та підвищення якості зварних стиків.

K_b являє собою відношення середнього квадратичного відхилення до середнього арифметичного і виражається у відсотках: $K_b = S/\bar{x} \cdot 100 \%$. Мінливість вважається варіабельно слабкою, якщо $K_b < 10 \%$; середньою, якщо K_b від 11...25 % і значною за $K_b > 25 \%$.

Оцінку точності відтворювання параметрів процесу, або варіацію параметрів виконували за протоколами зварювання залізничних рейок протягом 2015–2020 рр. на рейкозварювальних підприємствах (РЗП) Укрзалізниці. Наприклад, за даними K_b стаціонарної машини К1000 Київського

РЗП, що були розраховані за протоколами зварювання більш ніж 10 тис. стиків, можна зробити наступні висновки (рис. 1).

Серед параметрів, які визначають відповідність режиму ТУ, напруга при опавленні U_n та при переході від оплавлення до осаджування U_b , припуск на оплавлення $S_{оп}$ та осаджування $S_{ос}$, час осаджування під струмом $T_{осл}$ задаються безпосередньо в системі керування, мають досить мале значення коефіцієнта варіації K_b . $P_{ос}$ визначається налаштуванням тиску в циліндрі осадки і також має невеликі K_b . Точність відтворення цих параметрів цілком залежить від технічного стану зварювальної машини, системи керування та належного витримування зовнішніх умов зварювання, а саме, силової електричної енергії, насосної станції, охолоджуючої рідини та інше.

Припуск на оплавлення $S_{оп}$ за основним алгоритмом керування КЗСО рейок задається у циклограмі режиму і за коректною роботою системи керування машини має наблизитися до точності

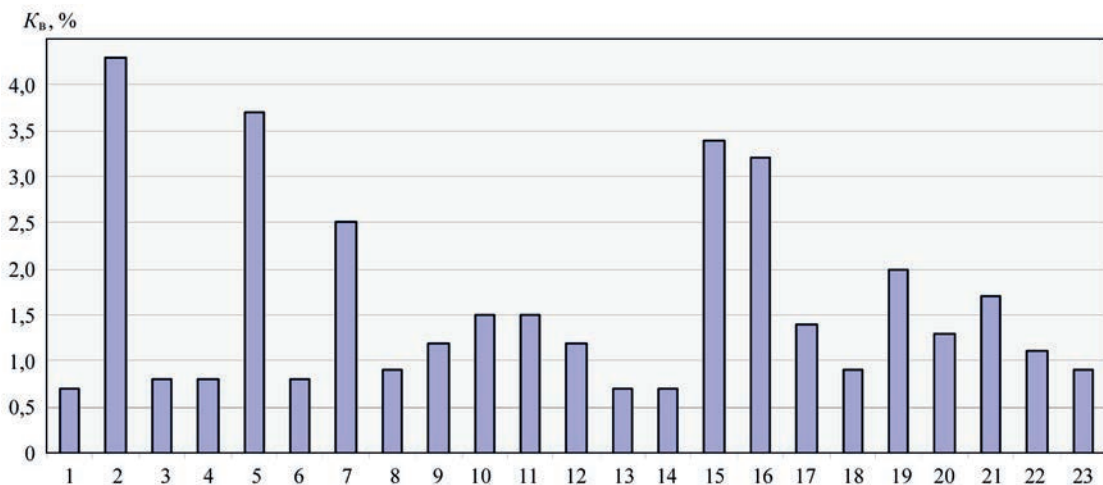


Рис. 2. Коефіцієнти K_b для припуску на оплавлення $S_{оп}$ восьми машин К1000 (1-8) та 15 машин К922(9-23)

датчику контролю переміщення рухомої колони зварювальної машини. Зазвичай цей датчик побудований на інкрементальному датчику Siemens 6FX2001, має дискретність вимірювання 0,1 мм і вплив електромагнітної перешкоди на точність вимірювання неможливий. В наведених даних варіація $S_{оп}$ значно вища через те, що при зварюванні нової партії рейок можлива необхідність коректування режиму, яку виконували зазвичай саме зміною заданого припуску на оплавлення. За даними K_B для восьми машин K1000 та 15 машин K922 різних РЗП видно, що тільки у випадку переналаштування режиму варіація параметру $S_{оп}$ досить велика. При постійному заданому режимі K_B менше 1,0...1,5 % (рис. 2). Зрозуміло, що за іншими алгоритмами, наприклад, завдання етапів за часом, цей параметр може мати випадковий характер розподілу з своїм середнім відхиленням та с.к.в.

Параметри швидкості оплавлення $V_{оп}$, переходу від оплавлення до осаджування $V_{ф}$ та осаджування $V_{ос}$, які входять у ТУ, форма струму перед осаджуванням (час можливого короткого замикання $T_{кз}$), а також час зварювання T_3 та електрична енергія оплавлення $Q_{оп}$ задаються непрямым шляхом та є результатом ходу процесу КСЗО і відповідно результатом дії різноманітних неконтрольованих збурень.

Швидкості оплавлення $V_{оп}$ та переходу до осаджування $V_{ф}$

$$V_{оп}, V_{ф} = F(V_B, V_H, I_B, I_O, I_H, I_3), \quad (2)$$

де $V_B, V_H, I_B, I_O, I_H, I_3$ – параметри регулятора приводу подачі рухливої колони залежно від зварювального струму I_3 ;

Час зварювання

$$T_3 = S_k/V_k + S_{оп}/V_{оп} + S_{ф}/V_{ф} + T_{ос}i,$$

де $S_k, V_k, S_{оп}, V_{оп}, S_{ф}, V_{ф}$ – припуск і середня швидкість на етапах зняття косини, оплавлення та переходу до осаджування.

Швидкість осаджування $V_{ос}$ залежить від заданого тиску осаджування, технічного стану приводу осаджування й рухливої колони та нагрівання зварювальних рейок перед осаджуванням. Імпеданс к.з. вторинного контуру $Z_{кз}$ характеризує технічний стан машини.

Із перелічених параметрів, що контролює система управління машин K1000 та K922, найбільш вразливими з точки зору K_B є швидкості $V_{оп}, V_{ф}, V_{ос}$ та час зварювання T_3 і електрична енергія, яка виділилась на вході зварювального трансформатора на етапі оплавлення, $Q_{оп}$ (рис. 1). Слід відзначити, що крім дії збурень, на с.к.в швидкостей $V_{оп}, V_{ф}$ впливає те, що похибка їх вимірювання наближається до абсолютного значення вимірювальної величини.

Вимірювання швидкостей виконуються за датчиком переміщення і абсолютна похибка складає $\Delta V = 0,1 \text{ мм} / T_{вим}$, де $T_{вим}$ – інтервал між вимірюваннями. Дискретність вимірювання системи управління у часі дорівнює 0,01 с, таким чином маємо або дуже велику статичну похибку, або велику динамічну похибку для стабілізації цих параметрів.

За даними гістограм (рис. 3) відтворення параметрів процесу КСЗО, зокрема $V_{оп}, V_{ф}, V_{ос}$, можна зробити припущення, що розподіл похибки цих параметрів відносно середнього значення відповідає нормальному закону.

Розрахунок коефіцієнтів точності K_T (1), які враховують величину поля допуску і прийняті для статистичного керування технологічними процесами, підтверджує загальне співвідношення точності відтворення параметрів K_B (рис. 4). За даними коефіцієнта точності K_T , який враховує допуск на відхилення параметрів згідно ТУ (див. таблицю) видно, що за умовою, що середнє значення швидкості $V_{оп}, V_{ф}, V_{ос}$ близько до середини

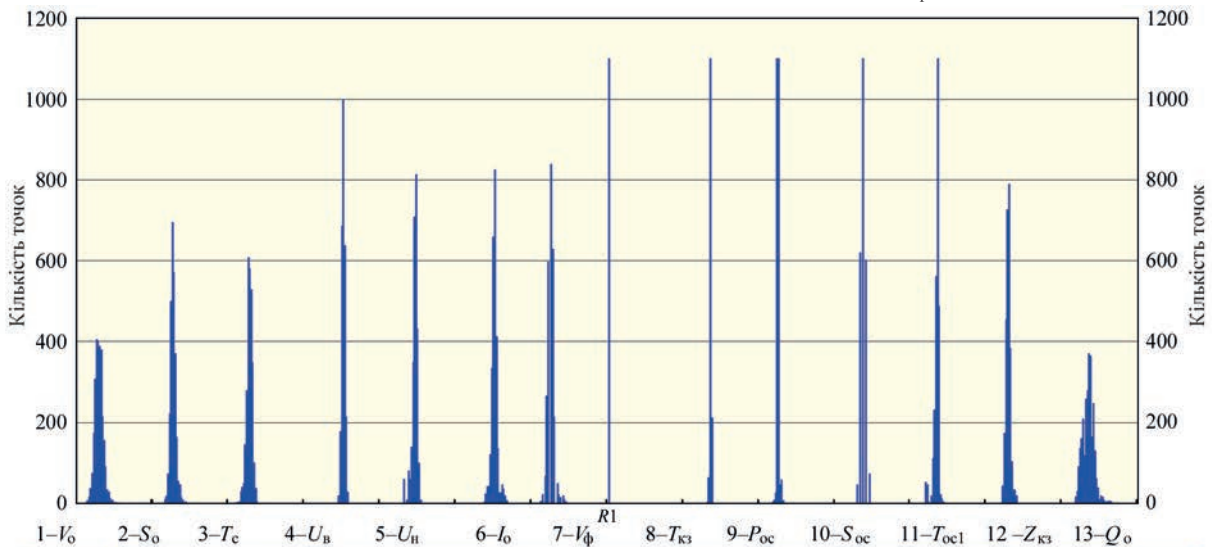


Рис. 3. Гістограма розподілу параметрів процесу КСЗО 10230 стиків рейок на машині K1000, яку розраховували на інтервалі досліджень по кожному параметру (таблиця), кількість інтервалів для всіх параметрів була 50, крок кожного складає $\Delta X = (X_{д.в} - X_{д.н})/50$, де $X_{д.в}$ та $X_{д.н}$ – верхній та нижній інтервали досліджень (наприклад, для $\Delta S_{оп} = (30-5)/50 = 0,5 \text{ мм}$)

полю допуску, маємо вірогідність відповідності ТУ більше ніж 99,7 % стиків. Для інших параметрів умова знаходження середнього значення у середині допуску вже не є такою жорсткою.

Для виявлення будь-яких трендів у часі, наприклад, зміни технічного стану зварювальної машини, були розраховані коефіцієнти K_v та K_t з інтервалом півроку (рис. 1, б, 4, б). Видно, що протягом терміну контролю хід зварювального процесу був незмінним с точки зору варіації параметрів КСЗО і дані контролю зразків технологічної проби (див. рис. 1) за цими параметрами відповідають ходу процесу зварювання рейок (середні значення та с.к.в. параметрів відрізняються у межах статистичної похибки, див. K_n та K_t на рис. 4) та дані випробувань зразків технологічною пробою можна використовувати для оцінки якості стиків рейок.

Вплив відхилення виходу від відхилення вхідних параметрів, крім інших факторів, залежить

від можливих взаємних зв'язків між входами. Сумарна дисперсія для багатofакторного процесу у випадку, коли фактори не пов'язані один з одним, складається з суми дисперсій кожного фактору. У випадку з корельованими між собою факторами до цієї суми додаються з відповідним знаком складові коваріації (англ. covariance) – міри спільної мінливості двох випадкових змінних. Абсолютне відхилення виходу функції $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ від відхилення будь-якого параметру $\Delta x_i = S_i$ у точці $x_i = \bar{x}_i, i = 1 \dots n$, через K_{vxi} залежить від значення параметра $x_i = \bar{x}_i$ та часткової похідної $\partial Y / \partial x_i$ параметра $x_i = \bar{x}_i$ у цій точці $\Delta Y = \partial Y / \partial x_i \bar{x}_i K_{vxi}$. Таким же чином можна показати, що коефіцієнт точності дорівнює

$$K_t = 6 \bar{x}_i K_{vxi} / \delta. \quad (3)$$

Вплив кожного вхідного фактору – часткову похідну $\partial Y / \partial x_i$ – можна оцінити за математичною

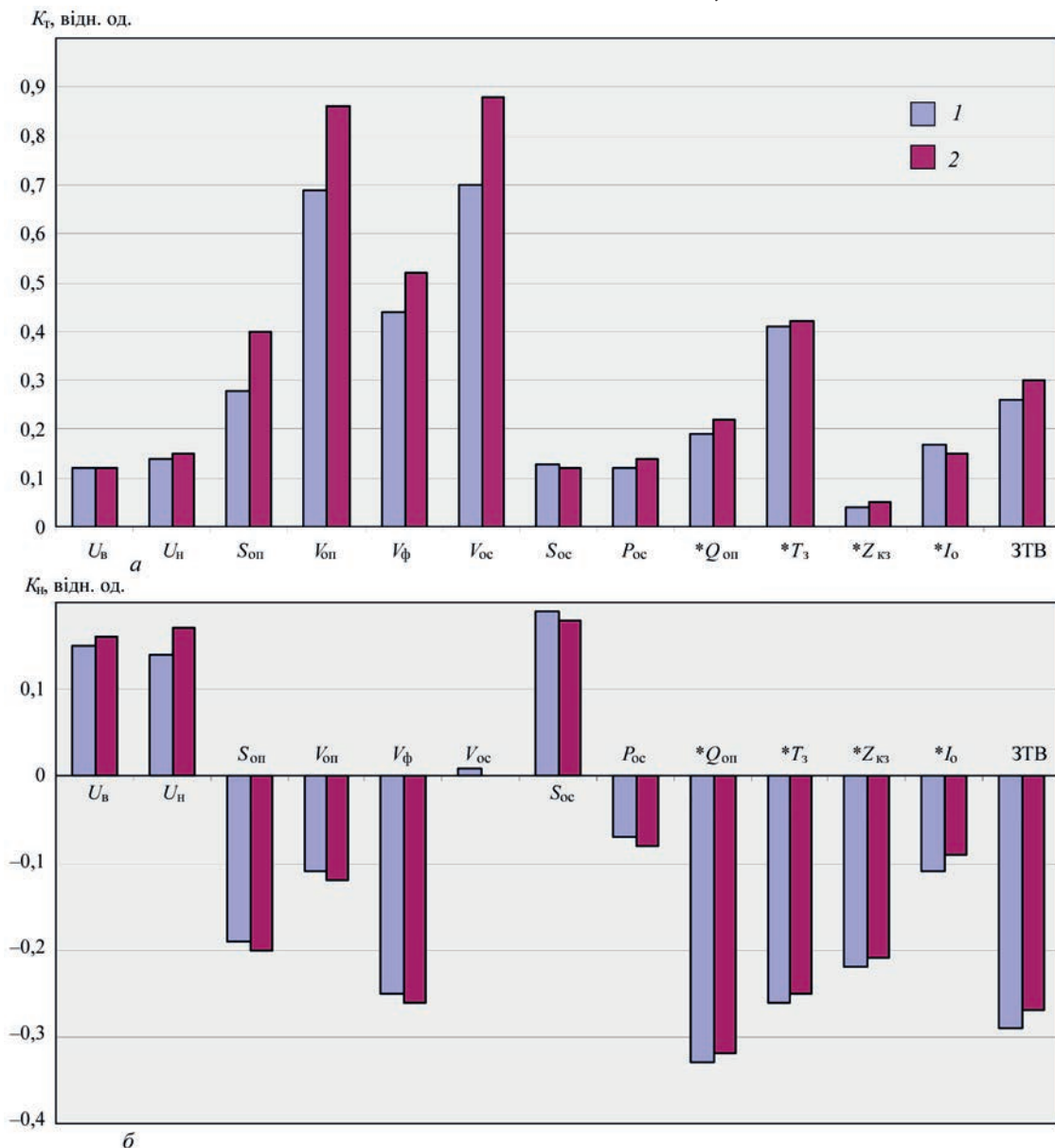


Рис. 4. Коефіцієнти точності K_t (а) та налаштованості K_v (б) при зварюванні рейок Р65 марки К76Ф на машині К1000 (1 – дані зварювання зразків технологічної проби; 2 – дані зварювання рейок)

залежністю вихідного параметру від вхідних. Наприклад, швидкість оплавлення $V_{оп}$, припуск на оплавлення $S_{оп}$, електрична енергія при оплавленні $Q_{оп}$ визначають температурне поле при КСЗО. Математичні регресійні залежності ЗТВ від $V_{оп}$, $S_{оп}$ та $Q_{оп}$ були отримані з використанням експериментальних даних та математичної моделі кінетики температурного поля при безперервному оплавленні з урахуванням багатофакторного впливу на інтенсивність нагріву швидкоплинних процесів утворення та руйнування одиничних контактів, що формуються при технологічному циклі контактного зварювання залізничних рейок [5, 6]. Для оцінки впливу відхилень параметрів на ЗТВ у разі використання найпростішої залежності першого порядку маємо

$$L_{зТВ} = a_0 + a_1 V_{оп} + a_2 S_{оп} + a_3 Q_{оп} - S_{ос}.$$

Відхилення ширини ЗТВ від значення при середніх параметрах процесу має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta L &= L - L(V_{оп} = \bar{V}_{оп}, S_{оп} = \bar{S}_{оп}, Q_{оп} = \bar{Q}_{оп}) = \\ &= a_1(V_{оп} - \bar{V}_{оп}) + a_2(S_{оп} - \bar{S}_{оп}) + a_3(Q_{оп} - \bar{Q}_{оп}) - (S_{ос} - \bar{S}_{ос}) = \\ &= a_1 \bar{S}_{оп} K_{вСоП} + a_2 \bar{V}_{оп} K_{вВоП} + a_3 \bar{Q}_{оп} K_{вQоП} + \bar{S}_{ос} K_{вСоС} = \\ &= -23 K_{вСоП} + 4 K_{вВоП} + 34 K_{вQоП} - \Delta S_{ос}. \end{aligned}$$

Таким чином, незважаючи на те, що $K_{вСоП}$ значно менше $K_{вВоП}$, вплив відхилення припуску на якість зварювального стику майже такий же, як і швидкості оплавлення. У той же час суттєвий вплив маємо від електричної енергії оплавлення $K_{вQоП} \approx 3 K_{вСоП}$ і стає важливим контроль електричної енергії при оплавленні $Q_{оп}$ і введення її у перелік параметрів ТУ по зварюванню рейок (таблиця).

Складність вимірювання активної енергії пов'язана з тим, що гармонійна складова активної потужності визначається тими гармоніками, які представлені в сигналі струму і в сигналі напруги. За даними комп'ютерного моделювання при фазовому регулюванні напруги на вході силового трансформатора в діапазоні кутів φ (від 0 до 90°) і кутів включення тиристорного контактора α (від φ до 120°) сигнали струму, напруги та потужності по спектру частот укладаються в діапазон до 1 кГц. Ці результати були підтверджені експериментально при записі зварювального струму і напруги на вході силового трансформатора з частотою 10 кГц і подальшим обчисленням за ними активної енергії. Для контролю енергії $Q_{оп}$ в ІЕЗ ім. Є.О. Патона був розроблений вимірювальний перетворювач середньої активної електричної потужності з імпульсним виходом, який адаптований до систем керування машинами K1000 та K922 на основі промислового контролера Siemens CPU 314C-2PTR або CPU1512C-1PN, з вхідними сигналами струму до 1000 А та напруги до 440 В, смугою частот цих сигналів до 1 кГц і наведеною похибкою вимірювання до 1 %.

За даними зварювання зразків технологічної проби на РЗП, які пройшли дослідження на ста-

тичний згин та були визнані як відповідні ТУ, видно, що $K_{в}$ стріли прогину $L_{р}$ та руйнівного зусилля $P_{р}$ майже у 2 рази менше ніж $K_{в}$ параметрів швидкості оплавлення, форсування та осаджування (рис. 1, а). Параметри, що задаються безпосередньо системою керування машини, навпаки, мають $K_{в}$ майже в 2 рази менше ніж для показників якості стику. Таким чином, досить обережно можна припускати найбільш суттєвий вклад цих швидкостей на якість. Але безумовно ці параметри найбільш вразливі з точки зору можливостей точності роботи системи керування у відтворенні потрібних значень $V_{оп}$, $V_{ф}$, $V_{ос}$. Крім того, з огляду на вплив параметрів на ширину ЗТВ до переліку контрольних параметрів у ТУ (таблиця) необхідно додати величину електричної енергії, що виділяється при оплавленні.

При виборі поля допуску треба враховувати, що при розв'язуванні будь-якої статистичної гіпотези можливі два види помилок:

- помилка першого роду полягає в тому, що відкидається гіпотеза, яка насправді вірна – у нашому випадку якісний стик буде визнаний як неякісний;
- помилка другого роду полягає в тому, що гіпотеза ухвалюється, а вона насправді невірна – неякісний стик буде визнаний якісним.

Межа між ознаками відповідності та невідповідності ТУ є досить розмитою та якщо вірогідності помилок можна оцінити, має вибиратися з урахуванням ціни заміни якісного стику у пліті (у першому випадку) та ціни пропуску неякісного стику у пліті у другому. Цілком природно у такому випадку вибирати більш жорсткі допуски для контролю параметрів. За даними по прогнозуванню ЗТВ видно, що найбільш об'єктивні оцінки допусків можна отримати із аналітичних залежностей показників якості від параметрів процесу, що у випадку КСЗО наразі неможливо.

Слід відзначити, що хоч контроль за допусками є дуже розповсюдженим засобом запобігання браку, на прикладі настроювання припуску на оплавлення для різних партій рейок видно, що допуску $S_{оп}$ у ТУ можуть відповідати досить широкі значення якості, а сама варіація $S_{оп}$ для налаштованого режиму значно менше допуску. Таким чином, умова виконання допуску не використовує всіх особливостей зварювального обладнання і технології у цілому.

За методом управління виробництвом [7] вважають, що дотримання допусків контрольних факторів є недостатнім критерієм, щоб судити про якість продукції. Необхідно постійно прагнути до номіналу, який був отриманий при налаштуванні режиму, і зменшенню варіації факторів навіть всередині меж, які встановлені проектом. При цьому налаштування оптимальних рівнів контрольних факторів процесу виконується досягненням оптимального відношення «сигнал/шум», яке у нашому випадку відповідає зворотному значенню коефіцієнта варіації $K_{в}$.

Висновки

1. Статистичні дослідження за протоколами процесу КСЗО залізничних рейок на РЗП показали, що параметри контролю процесу стикового зварювання, що наведені у ТУ і задаються безпосередньо системою керування зварювальної машини, несуттєво залежать від зовнішніх збурень і відтворюються з точністю стабілізації системи керування.

2. Параметри, значення яких є результатом ходу процесу зварювання і дії неконтрольованих збурень, а саме швидкостей оплавлення, переходу до осаджування, осаджування та активна електрична енергія, яка виділилася у стику, відтворюються з похибкою, що у 5..10 разів більше похибки системи управління.

3. Для підвищення точності контролю процесу КСЗО рейок до переліку параметрів контролю у ТУ на зварювання рейок слухним є введення контролю активної електричної енергії на вході зварювального трансформатора за час оплавлення. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблений датчик контролю такої енергії, який адаптований для існуючої системи керування зварювальних машин.

Список літератури

1. (2016) *Рейки нові зварні для залізниць*. Технічні умови. ТУ У 24.1-40075815-002:2016.
2. 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.*
3. *Портал знаній StatSoft*. URL: <http://statistica.ru/>

4. *Process capability index*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Process_capability_index
5. Кучук-Яценко С.И., Миленин А.С., Великоиваненко Е.А. и др. (2018) Математическое моделирование процесса нагрева металла при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением. *Автоматическая сварка*, **10**, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2018.10.01>
6. Кучук-Яценко С.И., Руденко П.М., Гавриш В.С. та ін. (2020) Оперативний контроль як засіб оцінки якості зварних з'єднань при контактному стиковому зварюванні сучасних високоміцних сталей методом оплавлення. *Наука і інновація*, **16**, **2**, 72–78.
7. Rao S., Samant P., Kadampatta A., Shenoy R. (2013) An Overview of Taguchi Method: Evolution, Concept and Interdisciplinary Applications. *Int. J. of Scientific & Engineering Research*, **4**, 10.

References

1. (2016) *New welded rails for railways*. Specifications: TU U 24.1-40075815-002:2016.
2. DIN EN 14587-2. *Railway applications – Track – Flash butt welding of rails. Pt 2: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails by mobile welding machines at sites other than a fixed plant.*
3. *Portal of knowledges StatSoft*. URL: <http://statistica.ru/>
4. *Process capability index*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Process_capability_index
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2018) Mathematical modeling of the process of metal heating in continuous flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, **10**, 2-8. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2018.10.01>
6. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. et al. (2020) Operational control as a method of quality evaluation of welded joints in resistance flash butt welding of modern high-strength steels. *Nauka i Innovatsii*, **16**(2), 72–78 [in Ukrainian].
7. Rao S., Samant P., Kadampatta A., Shenoy R. (2013) An overview of Taguchi method: evolution, concept and interdisciplinary applications. *Int. J. of Scientific & Engineering Research*, **4**, 10.

OPERATIONAL CONTROL OF THE PROCESS OF FLASH BUTT WELDING OF RAILWAY RAILS BY THE METHOD OF PULSATING FLASHING

[S.I. Kuchuk-Yatsenko], P.M. Rudenko, O.V. Didkovsky, Ye.V. Antipin

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 article presents a study of the accuracy of reproduction of parameters of operational control of flash butt welding of railway rails in order to increase the reliability of evaluating the compliance of the process to the Technical Specifications (TS) and improve the quality of welded joints. For the statistical analysis of protocols of welding rails at rail-welding enterprises the review of existing indices of accuracy and stability of technological processes was made. For the analysis, the coefficient of variation C_v was chosen, which is not related to the tolerance of the deviation of the process parameter. Evaluations of C_v coefficients according to the welding protocols of more than 10 thous. joints and more than 100 specimens of a technological test for the stationary machine K1000 showed that the mode parameters set directly by the control system, are reproduced with an error of not more than 1.5%. The C_v coefficients increase sharply for the rate of flashing, transition from flashing to deposition and particularly deposition, which are included in the TS for welding rails and an active electric power, that occurred during flashing at the input of the welding transformer. The studies of C_v coefficients with grouping of welding data by six months showed that the variation of process parameters had no trends and the process was stable over time with a sufficient accuracy. The mean values and the standard deviation of the parameters of the process of welding rails and specimens of a technological sample differ within the statistical error, which indicates the possibility of approximating the results of test studies on the rail joints. Evaluation of effect of parameters of the process of rate, allowance and energy of flashing on the heat-affected-zone (HAZ) with the use of linear regression dependence showed an essential dependence of HAZ on variation of electric energy during flashing. For control of active energy, the measuring converter of average active electric power with a pulse output was developed, which is adapted to the control systems of K1000 and K922 machines with input signals of current to 1000 A and voltage to 440 V, a frequency band of these signals to 1 kHz and the resulted error of measurement to 1%. It is recommended to include active power energy released during melting at the input of the welding transformer in the list of control parameters to the TS, and to improve the quality of joints not only to control the parameters within tolerance, but to create the conditions of the smallest variation of parameters from obtained data. 7 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: flash butt welding, railway rails, statistical control, coefficient of variation, process parameters, quality parameters, heat-affected-zone, active electric power during flashing, quality control

Надійшла до редакції 05.04.2021