

ПРОГРАМА СТАТИСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ КОНТАКТНОГО СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ОПЛАВЛЕННЯМ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

П.М. Руденко, І.В. Зяхор, 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

Представлено програму для статистичного аналізу протоколів зварювання залізничних рейок, що надходять з рейкозварювальних підприємств до Діагностичного центру «Укрзалізниці», з метою виявлення збурень на процес і прийняття рішень щодо їхнього усунення, підвищення якості зварних стиків та оптимізації процесу в галузі. Програму розроблено з урахуванням стандартів ISO 9000, 9001, 9004, 10017, 22514. Вхідними для розрахунків є бази даних протоколів зварювання рейок, зварювальних машин, виконавців робіт, режимів зварювання тощо. Варіації кожного параметра процесу оцінюють індексом можливості процесу Срк, кількістю виходів за межі технічних умов, коефіцієнтами точності та налаштованості. Результати надано у вигляді діаграм, таблиць, гістограм. Для виявлення причини можливих збурень на процес виконують стратифікацію протоколів зварювання шляхом завдання ознак, за яким формують масиви для розрахунків. За отриманими даними може бути прийняте рішення щодо діагностики зварювального обладнання та технологічного процесу, що, крім усунення проблем, сприятиме експериментальному налаштуванню відповідного дерева прийняття рішень. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: контактне стикове зварювання оплавленням, залізничні рейки, статистична обробка інформації, бази даних, індекс можливості процесу, графічні та чисельні розрахунки

Вступ. Зварювання залізничних рейок різних марок та профілю при виготовленні нових і ремонті існуючих безстиківих залізничних колій виконують за допомогою більше півсотні стаціонарних і мобільних рейкозварювальних машин на шести залізницях України. Системи управління кожної машини, крім прямого цифрового управління, контролюють основні параметри процесу зварювання відповідно до галузевого стандарту [1]. Головними задачами виробництва стиків зварних залізничних рейок є оптимізація й удосконалення технологічного процесу зварювання безстикової колії, системи контролю та забезпечення їхньої якості відповідно до чинних нормативних документів.

Для управління якістю виробництва всіх рейкозварювальних підприємств (РЗП) України результати контролю кожного стику надсилають до Діагностичного центру (ДЦ) «Укрзалізниці» у вигляді протоколу для подальшого аналізу. До електронного протоколу зварювання додають дані ультразвукової дефектоскопії (УЗД) кожного зварного стику та результати випробування зварних зразків рейок – руйнівні випробування на статичний механічний поперечний згин, які виконують на початку і в середині зміни на розтягнення підшви та головки зварних зразків на стаціонарних машинах. На пересувних мобільних комплексах випробування проводять через кожні 50 зварних з'єднань. В роботах [2, 3] показано можливість використання статистичних методів обробки да-

них цих протоколів для контролю та управління процесом контактного стикового зварювання оплавленням (КСЗО) залізничних рейок. Враховуючи досить високу продуктивність процесу КСЗО рейок і відповідно великі обсяги інформації, зрозуміло, що обробку даних з РЗП дуже складно виконувати без автоматизації.

Мета даної роботи – це розробка програми для статистичного аналізу (ПСА) протоколів КСЗО залізничних рейок у ДЦ для своєчасного виявлення систематичних відхилень, оптимізації технологічного процесу згідно зі стандартами та забезпечення якості зварних стиків [4–6].

Блок-схема і функції. Дана програма допоможе розраховувати узагальнюючі оцінки та подавати їх у чисельному та графічному вигляді, зручному для аналізу і прийняття рішень висококваліфікованим фахівцем-технологом і таким чином виконувати всю рутинну роботу з виявлення збурень і пошуку рішення щодо їхнього подолання.

Блок-схему розробленої програми з використанням статистичних методів з урахуванням рекомендацій [7] наведено на рис. 1. Вихідні дані для аналізу складають бази даних (БД) в MS Excel. Для кожного РЗП «Укрзалізниці» – це протоколи зварювання, в яких зазначається час виготовлення, параметри процесу, дані осцилограми зварювання стику, результати контролю відповідності параметрів процесу ТУ безпосередньо на РЗП, перелік виконавців робіт (змінних майстрів, фахівців УЗД,

зварювальників) та зварювальних машин (тип і номер), даних УЗД та руйнівних досліджень зразків. Загальними для всіх РЗП є БД з переліком РЗП, режимів зварювання та даних рейок, для яких вони були налаштовані (тип рейок, категорія якості, марки сталі [8], стан рейок – нові, старопридатні), а також БД допусків операційного контролю згідно з ТУ та параметри нечіткої логічної моделі (НЛМ) для прогнозування якості зварного стику [9].

Основним методом дослідження в програмі є аналіз можливості (спроможності) процесу (*process capability*), а саме оцінка індексу можливості (*process capability index*) процесу C_{pk} [10]. Наразі для статистичних показників процесу є кілька оцінок. Це індекс можливості (*capability*) C_{pk} для статистично керованого процесу, коли варіації належать одній генеральній сукупності й вони не змінюються у часі, та індекс виконання процесу (*process performance index*) P_{pk} , коли параметри положення X_{mid} і мінливості процесу ΔX змінюються у часі. Зазвичай X_{mid} середнє \bar{x} , мода або медіана та мінливість ΔX дорівнює шести середнім квадратичним відхиленням

(с.к.в.) $6S$ або різниці між квантилями. Таким чином, C_{pk} враховує варіації в межах групи і не враховує зсув і дрейф між групами, тоді як P_{pk} оцінює загальну варіацію всіх проведених вимірювань [11].

За результатами досліджень [5, 6] можна стверджувати, що при незмінному режимі зварювання параметри процесу КЗСО рейок відповідають статистично керованому процесу з нормальним законом розподілу варіацій. Виняток можливий у випадках коректування режиму, коли змінюються властивості рейок (партії рейок різних плавок) або технічного стану зварювальної машини, що приводить до зміни заданого – цільового значення (*target value*) – одного або кількох параметрів режиму. В подальшому вважаємо, що X_{mid} дорівнює математичному сподіванню або середньому \bar{x} та $\Delta X = 6S$ і для повністю зцентрованого між допустимими межами параметра маємо

$$C_p = \Delta/6S,$$

де $\Delta = XU - XL$ – поле допуску (*specification interval*); XU, XL – верхня та нижня межа поля допуску (*upper & lower specification limit*).

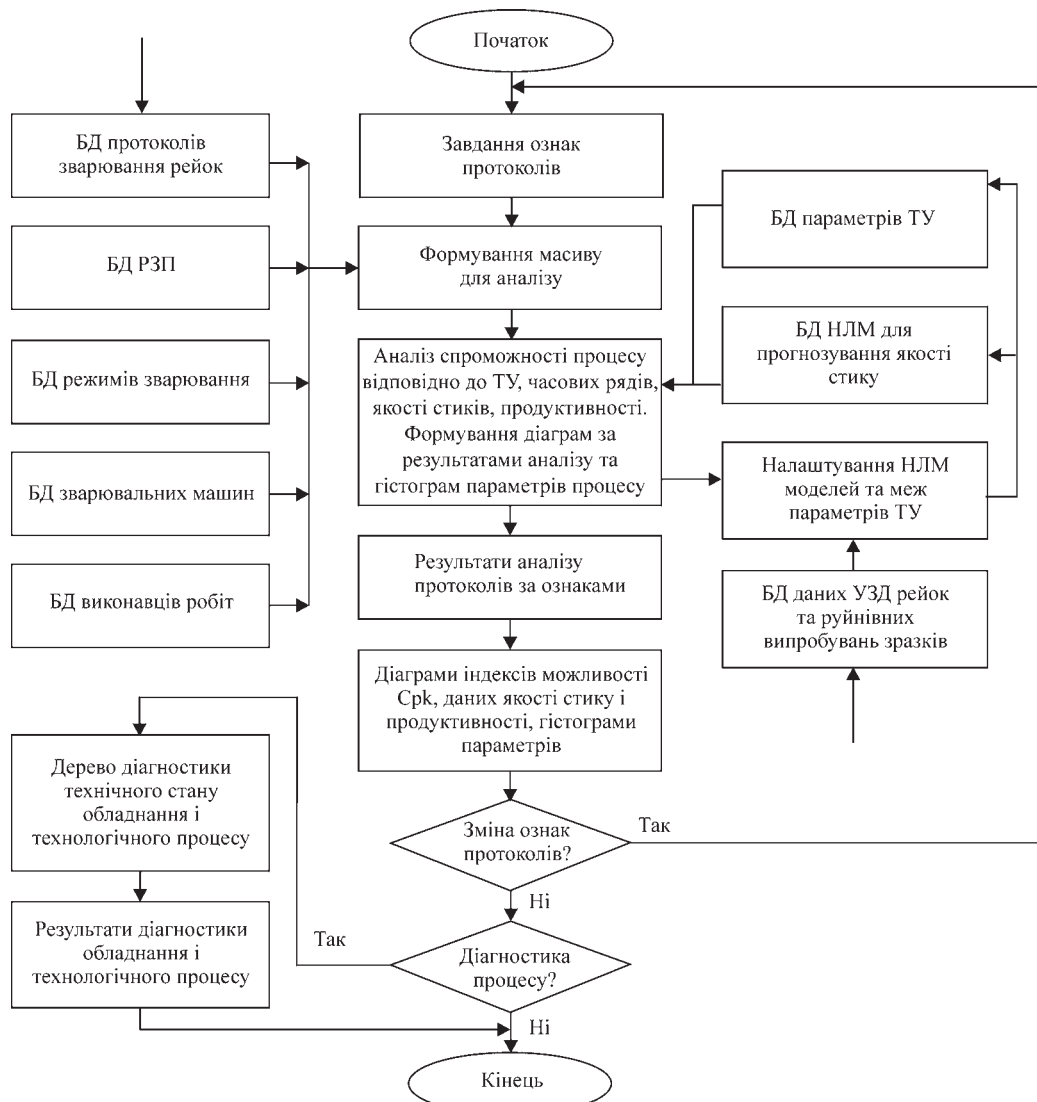


Рис. 1. Блок-схема програми статистичного аналізу протоколів зварювання

Оскільки центрованих параметрів на практиці майже нема, використовуємо оцінки нижнього, верхнього та меншого індексів можливості процесу C_{pkL} , C_{pkU} , C_{pk} (*upper, lower, minimum capability index*), що описують фактичну можливість процесу з нижньою межею

$$C_{pkL} = (\tilde{x} - XL)/3S,$$

з верхньою межею

$$C_{pkU} = (XU - \tilde{x})/3S,$$

з верхньою і нижньою межею одночасно

$$C_{pk} = \min \{C_{pkL}, C_{pkU}\} = \min \{(XU - \tilde{x})(\tilde{x} - XL)\}/3S.$$

Крім індексів можливості, по кожному параметру процесу в ПСА надається мінімальне X_{min} та максимальне X_{max} його значення в масиві, кількість виходу за межі ТУ (nX_{out}), а також окремо мінімальне ($N_{X_{min}}$) та максимальне ($N_{X_{max}}$) допустиме значення. Для всієї вибірки надається кількість стиків, що відповідають ТУ за даними контролю допусків $N_{ст}$ та результатами прогнозування якості за допомогою НЛМ Ннлм. Для кращого розуміння причини отриманого значення C_{pk} також маємо оцінки притаманної мінливості й розподілу процесу у вигляді контрольних карт середніх та с.к.в. Для зручнішого сприйняття їхні значення подаються відносно поля допуску, а саме коефіцієнт можливості або точності (*capability ratio*) $K_m = 1/C_p = 6S/\Delta$, коефіцієнт налаштованості $K_n = (\tilde{x} - x_{сер})/\Delta$.

Застосування програми для контролю КСЗО залізничних рейок. Результати розрахунків наведено в табличній формі (зазвичай також у форматі Excel) та вигляді діаграм (див. рис. 2). На цих рисунках V_0 , V_ϕ , V_{oc} – швидкості оплавлення, прискореного оплавлення перед осадкою (форсування) та осадки; S_0 , S_{oc} – припуски на оплавлення та осадку; $T_з$, $T_{кз}$, T_{ocI} – тривалість зварювання, ознака наявності короткого замикання перед осадкою (так-ні), тривалість струму під час осадки; U_ϕ , U_0 – середня напруга на вході зварювального трансформатора під час форсування та оплавлення; I_0 – середній зварювальний струм на вході зварювального трансформатора під час оплавлення; P_{oc} – тиск у камері приводу подачі рухомої колони під час осадки; $Z_{кз}$ – опір вторинного контуру зварювальної машини під час осадки; Q_0 – активна електрична енергія, що виділилася між зварювальними рейками під час оплавлення. З цих параметрів I_0 , $Z_{кз}$, Q_0 не входять до переліку параметрів ТУ, але вони важливі для контролю процесу і технічного стану обладнання. Активна енергія вимірюється тільки на пізніх зразках зварювальних машин і тому в деяких розрахунках не наявна. На діаграмах зеленим помічено C_{pk} , які мають коефіцієнти більше 1.33, жовтим $C_{pk} = 1 \dots 1.33$ (межі так званої ледве можливості –

barely capable) та червоним $C_{pk} < 1$. Величина C_{pk} на діаграмі обмежена значенням 1.5 для кращого масштабування діаграми. Коефіцієнт налаштованості K_n також обмежений.

Завдяки командним кнопкам блакитного кольору на екрані монітора (« K_n, K_t », « C_{pk}, nX_{out} », « $C_{pk}, nX_{out}, K_n, K_t$ ») можна виводити різні комбінації діаграм (рис. 3, 4), а кнопками зеленого кольору («Створити $C_{pk}, nX_{out}, K_n, K_t$ », «Додатити $C_{pk}, nX_{out}, K_n, K_t$ », « $C_{pk}, nX_{out}, K_n, K_t$ ») «запам'ятати» зроблені розрахунки і комбінувати їх з даними наступного аналізу.

«Кліком» миші на рядку статистичних даних, що відносяться до будь-якого розрахунку, можна вивести на монітор гістограму для оцінки розподілу параметрів, за якими ці дані отримано (рис. 5).

Для кращого відображення розподілу параметрів навколо меж допуску масштаб гістограми по осі ординат можна збільшити (рис. 5, б).

Всі розрахунки можна «запам'ятати» у вигляді таблиці Excel за допомогою жовтої кнопки «Зберегти розрахунки Excel», а повернутись до нових розрахунків можна натиснувши рожеву кнопку «Змінити ознаки».

Якість зварного з'єднання і пов'язані параметри процесу КСЗО залежать від складових вхідних БД і відповідних збурень в них G_j ; обраних режимів зварювання для різних марок рейок відповідно до якості металу (фізико-хімічних властивостей партії рейок), технічного стану вузлів зварювальної машини, що впливають на точність відтворення режиму, точності виконання зварювальних робіт – технологічної дисципліни персоналу (підготовки торців рейок до і механічної обробки поверхні рейок після зварювання, центрування рейок при затисненні у машині перед зварюванням та власне зварюванням, УЗД стиків тощо), зовнішніх умов виробництва на РЗП (якість живильної електроенергії, зміни температури навколишнього середовища, охолоджуючої води та інше).

Вплив кожного з цих факторів можна оцінити, порівнюючи дані статистичних оцінок розподілу параметрів та їх виходу за межі ТУ для різних значень обраного фактора відповідним групуванням протоколів зварювання. Формування масивів даних з усієї бази протоколів зварювання виконується методом стратифікації (розшарування, сортування, розділу) відповідно до ознак, що задаються оператором програми (рис. 6, таблиця).

При виборі РЗП на екрані монітора у текстових вікнах маємо стислий звіт, в якому дається перелік машин і виконавців робіт, кількість зварених стиків, їх показники відповідно до ТУ та розподіл цих даних у часі. Ця інформація корисна для подальшого формування масиву дослідження – вибір зварювальних машин, виконавців робіт, а також даних щодо зварювання окремої пліти або

партії рейок. Для дослідження можливої залежності ходу процесу для цих факторів у часі оператор може задати розрахунки в різні інтервали часу. Наприклад, при аналізі технічного стану зварювальних машин виявлено машину з великими Срк або (та) даними виходу контрольних параметрів за межі ТУ. Тоді для цієї машини оцінюється процес для обраних інтервалів часу з метою виявлення можливого старіння вузлів машини, що потребує уваги. Якщо вважати, що похибка відтворення параметрів ΔX_i умовно залежить від факторів збурень $\Delta X_i = F(G_{j1}, G_{j2}, \dots, G_{jn})$, тоді вплив збурення G_j можна спробувати оцінити, порівнюючи статистичні оцінки розподілу параметрів у масиві S , \bar{X} . Таким чином можлива діагностика технічного стану зварювального обладнання. Прогнозуван-

ня збурень на процес, у тому числі планування ремонту зварювального обладнання, режиму зварювання і технології можливе згідно з деревом діагностики технічного стану обладнання і технологічного процесу. Такий алгоритм розроблено на основі експертних оцінок і потребує відповідного досвіду з контролю процесу, який можна отримати при використанні розробленої програми. Цей алгоритм відповідає використанню циклу: плануй–виконуй–перевірй–дій (plan–do–check–act (PDCA)) з ризик-орієнтованим мисленням [5] для безперервного поліпшення ефективності системи управління та технологічного процесу КСЗО залізничних рейок у цілому. Об'єкт з найкращими показниками може бути зразковим для інших при подальшій оптимізації процесу на всіх підприємствах галузі.

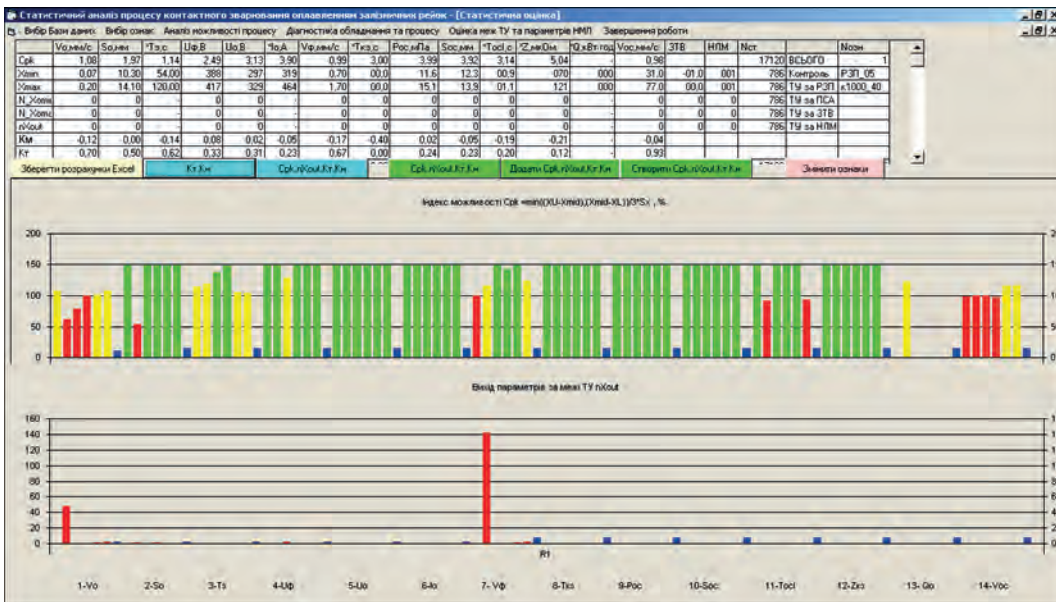


Рис. 2. Результати розрахунків Срк, пХout на РЗП-05 для трьох стаціонарних (перші три стовпчики) та трьох (другі три стовпчики) мобільних машин

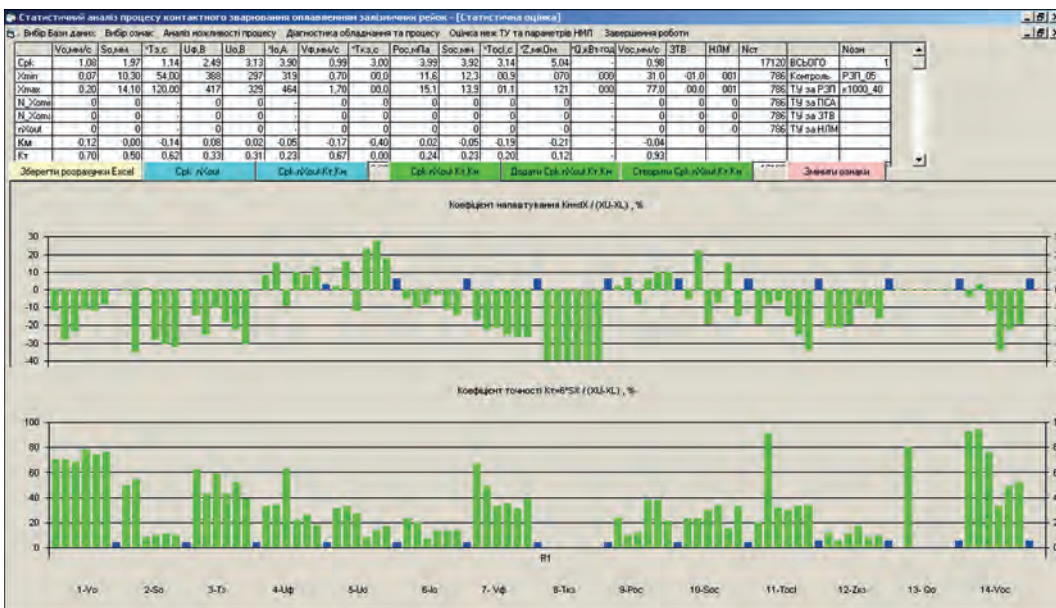


Рис. 3. Результати розрахунків Кн, Кт на РЗП-05 для трьох стаціонарних (перші три стовпчики) та трьох (другі три стовпчики) мобільних машин



Рис. 4. Результати розрахунків Срк, пХout, Кн, Кт для окремої плити (6 примірників), кожна з яких нараховує близько 40 стиків разом з контрольними зразками, вибірки протягом 2013–2020 рр. на машині К-1000

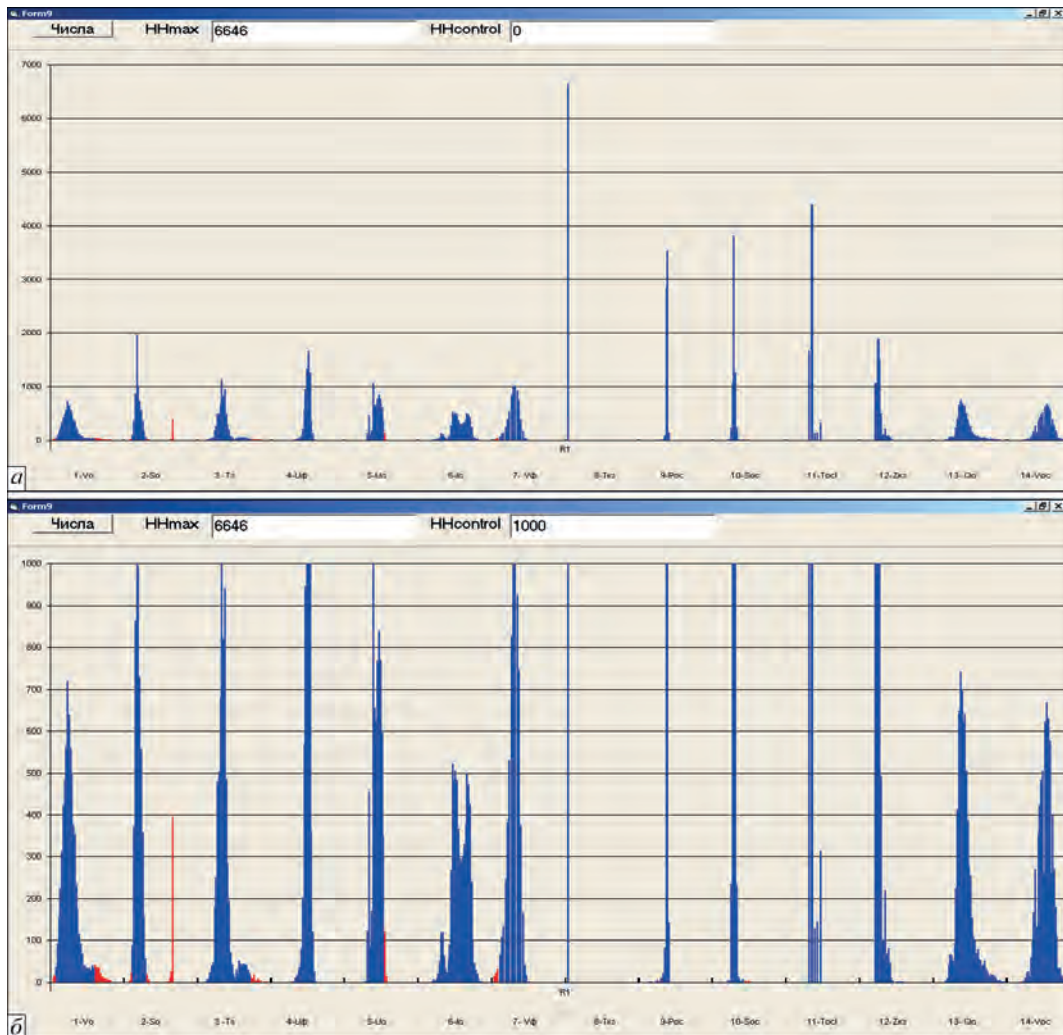


Рис. 5. Гістограми параметрів процесу стаціонарної машини К-1000 за різними масштабами (а, б), по осі ординат – кількість випадків, червоним показано варіації за межами ТУ

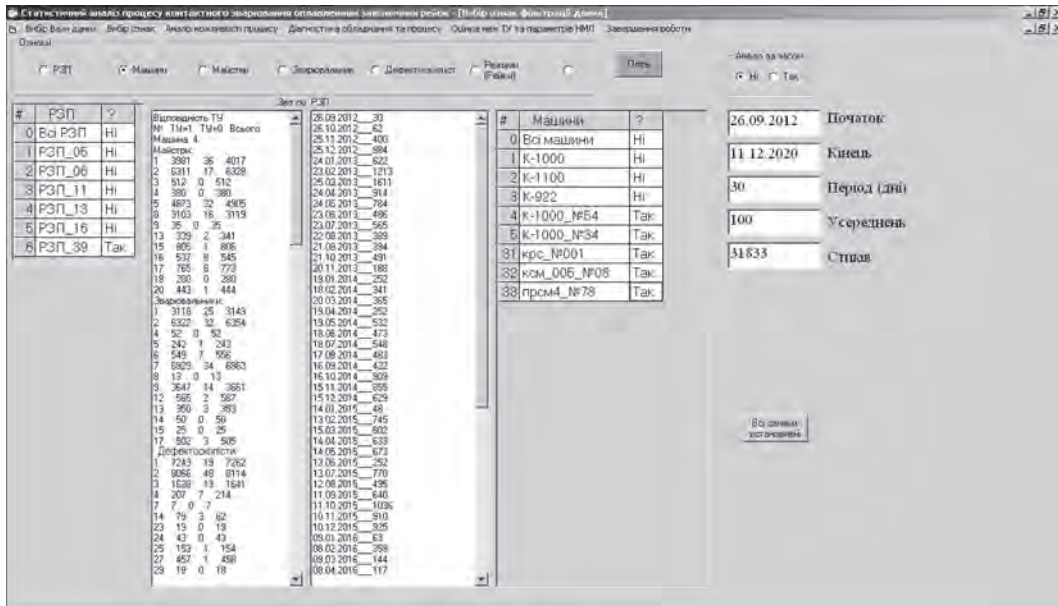


Рис. 6. Вибір ознак формування масиву протоколів для статистичного аналізу в режимі діалогу з програмою

Поділ протоколів зварювання стиків для виявлення різних збурень на технологічний процес КЗСО рейок

Причини виникнення порушення процесу	Параметри поділу масивів	Спосіб виправлення
Несприятливе поєднання параметрів процесу	№ режиму, пліті або партії рейок	Корегування режиму
Технічний стан зварювального обладнання	Тип машини, № машини	Технічне обслуговування або ремонт машини
Якість та властивість металу рейок	№ режиму, пліті або партії рейок	Корегування режиму
Технологічна дисципліна виконавців робіт	Зварювальники, майстри зміни, фахівці УЗД	Підвищення кваліфікації – навчання виконавців
Умови виробництва РЗП	РЗП з однаковим типом машин	Покращення умов (зменшення перебігу температури у цеху, якості електроенергії, технічного стану допоміжного обладнання)

Враховуючи ризики використання операційного контролю процесу КЗСО для перевірки можливості їх екстраполяції та дані руйнівних досліджень, доречно перевірка отриманих експериментальних даних при зварюванні зразків та стиків рейок на належність одній виборці. Найпростіший спосіб – це перевірка середніх значень за критерієм Стюдента [12]. При цьому в якості середніх та с.к.в. кожного параметра процесу використовують коефіцієнти K_t , K_n .

Дані руйнівних досліджень та УЗД в програмі можна використовувати для уточнення межі припустимих значень параметрів ТУ та виконувати налаштування НЛМ для прогнозування якості.

Розроблену програму рекомендовано для промислового використання у ДЦ «Укрзалізниці».

Висновок

Розроблена ПСА протоколів РЗП щодо КЗСО залізничних рейок дозволяє отримувати об’єктивну інформацію, використовуючи великий обсяг даних, а також приймати рішення висококваліфікованим спеціалістам з оптимізації процесу та підвищенні якості зварювальних стиків. Результати обчислень подаються у вигляді таблиць, діаграм, гістограм і наочно відтворюють хід зварю-

вального процесу в галузі у цілому, а також його залежність від РЗП, машин, режимів, марок рейок та виконавців робіт.

Список літератури

1. ТУ У 24.1-40075815-002:2016. *Рейки нові зварні для залізниць. Технічні умови.*
2. Кучук-Яценко С.І., Руденко П.М., Гавриш В.С. и др. (2016) Статистическое управление процессом контактной стыковой сварки рельсов. Двухуровневая система управления. *Автоматическая сварка*, 5-6, 17–20.
3. Кучук-Яценко С.І., Руденко П.М., Гавриш В.С. и др. (2019) Система управления процессом контактной сварки оплавлением рельсов в стационарных и полевых условиях для повышения ресурса и надежности железнодорожных путей. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 41–50.
4. ISO 9000:2015 *Quality management systems – Fundamentals and vocabulary.*
5. ISO 9001:2015 *Quality management systems – Requirements.*
6. ISO 9004:2018 *Quality management – Quality of an organization – Guidance to achieve sustained success* *Управління якістю. Якість організації. Наставови щодо досягнення сталого успіху.*
7. ISO/TR 10017:2003 *Guidance on statistical techniques for ISO 9001:2000.*
8. ДСТУ 4344:2004. *Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні умови.*
9. Кучук-Яценко С.І., Руденко П.М., Гавриш В.С. та ін. (2020) Операційний контроль як засіб оцінки якості зварних з’єднань при контактному стиковому зварюванні сучасних високоміцних сталей методом оплавлення. *Наука і інновація*, 16(2), 72–78.

10. ISO 22514-1:2014 *Statistical methods in process management – Capability and performance – Part 1: General principles and concepts*.

11. Kelly Jakinovich (2020) *Cpk vs Ppk? What Is The Difference and Why Is It Important*. <https://www.medical.saint-gobain.com/blog/cpk-vs-ppk-what-difference-and-why-it-important>.

12. Пустыльник Е.И. (1968) *Статистические методы анализа и обработки наблюдений*. Москва, Наука.

the service life and reliability of railway tracks. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 2, 41–50.

4. ISO 9000:2015 *Quality management systems. Fundamentals and vocabulary*.

5. ISO 9001:2015 *Quality management systems/ Requirements*.

6. ISO 9004:2018 *Quality management/ Quality of an organization. Guidance to achieve sustained success*

7. ISO/TR 10017:2003 *Guidance on statistical techniques for ISO 9001:2000*.

8. DSTU 4344:2004. *Rails are common for wide-gauge railways. General specifications*.

9. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. et al. (2020) Operational control as the method for evaluation of welded joint quality in flash butt welding of modern high-strength steels. *Nauka i Innovatsiya*, 16(2), 72–78 [in Ukrainian].

10. ISO 22514-1:2014 *Statistical methods in process management. Capability and performance. Pt 1: General principles and concepts*.

11. Kelly Jakinovich (2020) *Cpk vs Ppk? What Is The Difference and Why Is It Important*. <https://www.medical.saint-gobain.com/blog/cpk-vs-ppk-what-difference-and-why-it-important>.

References

1. TU U 24.1-40075815-002:2016. New welded rails for railways. Specifications [in Ukrainian].

2. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. et al. (2016) Statistical control of process of flash-butt welding of rails. Two-level control system. *The Paton Welding J.*, 5-6, 13-16.

3. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. et al. (2019) System of controlling the process of flash-butt welding of rails under stationary and field conditions to extend the

PROGRAM FOR STATISTICAL CONTROL OF THE PROCESS OF FLASH-BUTT WELDING OF RAILWAY RAILS

P.M. Rudenko, I.V. Zyakhor, O.V. Didkovsky, E.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 program for statistical analysis of railway rail welding protocols coming from rail welding enterprises to the Diagnostic Center of “Ukrzaliznytsia” is presented in order to reveal perturbations on the process and making of decisions on their elimination, improve the quality of welded joints and optimize the process in the industry. The program is developed meeting the standards of ISO 9000, 9001, 9004, 10017 and 22514. The input data for calculations are databases of protocols for welding rails, welding machines, contractors, welding modes, etc. Variations of each process parameter are evaluated by the process capability index Cpk, a number of cases with the violation of technical specifications, accuracy and customizability factors. The results are presented in the form of diagrams, tables and histograms. To find the cause of probable perturbations on the process, the stratification of welding protocols is performed by specifying features, based on which arrays for calculations are formed. Based on the obtained data, the decision on the diagnosis of the welding equipment and technological process can be made that in addition to elimination of problems will facilitate the experimental setting up of the appropriate decision tree. 12 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: flash-butt welding, railway rails, statistical processing of information, databases, process capabilities, graphic and numerical calculations

Надійшла до редакції 28.09.2022

ПЕРЕДПЛАТА 2023

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 12 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	280	840	1680	3360
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	280	560	1120
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	280	560	1120
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	560	1680	3360	6720

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Преса», «Прес Центр», «АС Медіа» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів.

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

Передплата через сайт видавництва:

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>, <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>, <https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>
 На сайті видавництва у 2023 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2021 рр.