

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-74-81

УДК 621.791.019

**Володимир Гаєвський<sup>1</sup>, Олег Гаєвський<sup>2</sup>, Іван Пічугін<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, асистент кафедри зварювального виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [v.gaevskiy@kpi.ua](mailto:v.gaevskiy@kpi.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3888-3107>

ResearcherID: [AAK-3955-2020](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107). SCOPUS Author ID: [57221567034](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [ggoa@ukr.net](mailto:ggoa@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0769-5661>

ResearcherID: [AAK-3936-2020](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661). SCOPUS Author ID: [57221567160](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661)

<sup>3</sup>здобувач вищої освіти, Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [vano9@yahoo.com](mailto:vano9@yahoo.com)

## ЗАСТОСУВАННЯ ІНДЕКСУ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПРОЦЕСУ ПРИ ВИБОРІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

На основі аналізу результатів досліджень механічних характеристик зварювальних дротів, проведених із застосуванням індексу працездатності процесу зварювання, уперше показано, що зварювальні матеріали, які вважаються прийнятними для заданого виробу в процесі оцінювання за традиційним критерієм перебування всіх експериментально отриманих значень характеристик якості в межах специфікації можуть давати невідповідні значення показників на окремих ділянках зварного шва. Запропоновано використання індексу працездатності процесу зварювання при виборі зварювальних матеріалів як більш результативного для визначення прийнятності матеріалів.

**Ключові слова:** вибір зварювальних матеріалів; індекс працездатності процесу; валідація процесів зварювання; забезпечення якості зварювання; статистичні методи у зварюванні.

Табл.: 5. Бібл.: 8.

**Актуальність теми дослідження.** Зварювальні матеріали безпосередньо беруть участь у формуванні металу зварного шва, забезпечують захист електродних крапель, металу зварювальної ванни та зони кристалізації зварного шва. Вони значною мірою визначають хімічний склад та механічні властивості металу зварного шва та наявність дефектів, таких як пори, тріщини, шлакові включення та інші. Серед механічних властивостей металу зварного шва першочергове значення мають межа плинності ( $\sigma_T$ ), тимчасовий опір руйнуванню ( $\sigma_B$ ), відносне видовження ( $\delta_5$ ), відносне звуження ( $\psi$ ) [1]. Створення нових конструкційних матеріалів, необхідність підвищення функційних характеристик зварних виробів призводить до розробки нових зварювальних матеріалів. Для кожного нового виробу слід аргументовано обирати зварювальні матеріали. Такий вибір часто супроводжується випробуваннями пілотних зразків, заварених досліджуваними зварювальними матеріалами.

Процеси зварювання характеризуються значною змінюваністю контрольованих характеристик якості зварних з'єднань [2], у тому числі, під впливом зварювальних матеріалів. Щорічне зростання номенклатури конструкційних матеріалів і, відповідно, можливих варіантів використання зварювальних матеріалів визначає актуальність застосування сучасних статистичних інструментів до прийняття рішень про прийнятність використання зварювальних матеріалів до заданого виробу.

**Постановка проблеми.** Змінюваність показників якості зварних з'єднань, навіть в умовах незмінності контрольованих показників процесу зварювання, призводить до можливості невиконання встановлених вимог до властивостей металу на окремих ділянках зварного шва. Тобто на окремих ділянках можливий вихід показників якості металу зварного шва за нижнє допустиме значення (LSL) або верхнє допустиме значення (USL). Визначення механічних властивостей металу зварного шва потребує руйнівних випробувань. Тому неможливо встановити значення механічних властивостей металу зварного шва безпосередньо у зварному шві виробу. Це робить процеси зварювання спеціальними процесами, які потребують застосування відповідних, зокрема, статистичних методів для їх валідації з врахуванням

змінюваності механічних властивостей. Підтвердження прийнятності зварювальних матеріалів до використання для заданого зварного виробу є складовою такої валідації процесу зварювання [2]. Застосування результативних статистичних методів валідації сприятиме зниженню ризиків застосування неприйнятних зварювальних матеріалів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Традиційним підходом до підтвердження прийнятності зварювальних матеріалів для заданого зварного виробу є проведення випробувань декількох зразків, заварених досліджуваним зварювальним матеріалом. При цьому критерієм прийнятності є перебування в межах допустимого всіх отриманих значень контрольованих характеристик. Недоліком такого підходу є те, що не враховується середньоквадратичне відхилення ( $\sigma$ ), математичне сподівання ( $\mu$ ) контрольованих показників і, як наслідок, не виключається можливість виходу діапазону природного розсіювання ( $\mu-3\sigma$ ;  $\mu+3\sigma$ ) контрольованої характеристики за межі діапазону допустимих значень (LSL; USL). Цей недолік може бути усунений застосуванням до визначення прийнятності зварювальних матеріалів планів статистичного вибіркового контролю за альтернативною та безперервною ознакою.

Застосування планів (n-c) статистичного контролю за альтернативною ознакою [3] передбачає виготовлення статистично обґрунтованої кількості зразків зварних з'єднань (n), заварених досліджуваним зварювальним матеріалом. За умови, якщо кількість невідповідних значень (x) не перевищує приймального числа (c), то зварювальний матеріал є прийнятним. Плани контролю (n-c) визначаються міжнародними стандартами і залежать від об'єму партій (виробництва) і прийнятного рівня якості (AQL) зварювальних матеріалів. Недоліком такого підходу є доволі значні об'єми вибірок (n), які можуть суттєво зменшені використанням статистичного вибіркового контролю за кількісною ознакою.

Статистичний вибірковий контроль за кількісною ознакою [4] проводиться за планом (n-k<sub>s</sub>). Такий підхід статистично обґрунтований, потребує відносно невеликих об'ємів вибірки, але він орієнтований на контроль окремих партій продукції і не містить ознак сучасної процесної орієнтації [5]. Між тим, на сучасних зварювальних підприємствах постачання зварювальних матеріалів розглядається саме як процес, передбачає партнерські довгострокові відносини з постачальниками [6], що дає підстави відноситися до поставок як до систематичного отримання зварювальних матеріалів, які є продукцією аутсорсингового процесу на підприємстві-постачальнику.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Загалом здатність процесу виконувати встановлені вимоги визначається за індексом працездатності процесу (C<sub>pk</sub>) [7]. Проте результативність застосування C<sub>pk</sub> до визначення можливості застосування зварювальних матеріалів до заданого виробу потребує вивчення.

**Метою статті** є визначення результативності оцінювання прийнятності зварювальних матеріалів для зварювання заданого виробу шляхом застосування індексу працездатності процесу зварювання досліджуваним матеріалом за контрольованим показником якості зварного шва.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження застосування індексу працездатності до визначення прийнятності зварювальних матеріалів проведено на прикладі вибору зварювального дроту для виготовлення балки мостового переходу. Основним матеріалом балки є сталь 10ХСНД (С390) по ГОСТ 6713-91 (аналог за стандартом EN 10025-5 сталь S355J0WP). Це низьколегована конструкційна сталь, що застосовується для виготовлення зварних конструкцій підвищеної міцності та корозійної стійкості. Для зварювання основних швів балки призначений спосіб зварювання під флюсом, для коротких швів – у захисних газах.

Вимоги до зварних швів балки мостового переходу встановлюють державні будівельні норми [8]. За окремими показниками механічних властивостей металу зварного шва ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta_5$ ) державні будівельні норми встановлюють вимоги до мінімально допустимого значення (LSL).

Для зварювання під флюсом сталі 10ХСНД може бути застосований дріт суцільного перетину Хорда S2 (класифікація за ДСТУ EN ISO 14171-A – S 42 3 MS S2) та дріт суцільного перетину Хорда S2Ni1Mo (класифікація за ДСТУ EN ISO 14171-A – S-Z 46 6 AB S2Ni1Mo). Дріт Хорда S2 має перевагу в тому, що він дешевший. Визначення прийнятності до застосування розпочали саме з цього дроту.

Дослідження службових характеристик зварювальних дротів, проведені акредитованою лабораторією ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. Визначались механічні властивості металу зварного шва межа плинності ( $\sigma_T$ ), тимчасовий опір руйнуванню ( $\sigma_B$ ), відносне видовження ( $\delta_5$ ), відносне звуження ( $\psi$ ). Для кожного варіанта застосування зварювальних матеріалів заварювалися по три стандартних зразки, тобто об'єм вибірки становив  $n = 3$ .

Для кожного досліджуваного сполучення зварювальних матеріалів визначені механічні властивості металу зварного шва за трьома зразками ( $n=3$ ), Визначені статичні характеристики вибірки  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $C_{pl}$ .

Значення математичного сподівання ( $\mu$ ) за вибіркою оцінювалось через середньоарифметичне значення ( $\bar{x}$ ):

$$\mu = \bar{x} = \frac{\sum_n x_i}{n},$$

де  $x_i$  –  $i$ - те значення у вибірці об'ємом  $n$ .

Значення середньоквадратичного відхилення ( $\sigma$ ) за вибіркою розраховувалось як стандартне відхилення ( $s$ ):

$$\sigma = s = \frac{\sum_n \sqrt{(\bar{x} - x_i)^2}}{(n - 1)}.$$

Індекс працездатності процесу визначається як мінімальне значення між індексом працездатності по верхній границі і нижній границі допустимих значень. ДБН В.2.3.-26:2010 встановлює вимоги до механічних властивостей зварних швів по нижній границі допустимих значень (LSL). Значення індексу працездатності процесу зварювання по нижній границі ( $C_{pl}$ ) за вибіркою розраховувалось:

$$C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma}.$$

Вважається, що процес здатен виконувати вимоги, якщо значенням індексу працездатності процесу перевищує 1,67 ( $C_{pl}^0 \geq 1,67$ ).

У таблицях 1-2 наведені результати визначення можливості виконання вимог ДБН В.2.3.-26:2010 до конструкцій прогонових споруд металевих мостів сталі 10ХСНД при зварюванні дротом Хорда S2 під флюсом Flux Ok 10.71.

Таблиця 1

*Стикове зварне з'єднання прокату 10ХСНД-12 (С390) 25 мм  
за ГОСТ 19281-89 X-подібне оброблення крайків*

Показник	Межа плинності $\sigma_T$ , МПа	Тимчасовий опір руйнуванню $\sigma_B$ , МПа	Відносне видовження $\delta_5$ , %	Відносне звуження $\psi$ , %
Зразок 1	371,2	527,2	34	69,8
Зразок 2	370,6	525,4	31,3	67,8
Зразок 3	374,6	527,2	32,3	67,9
LSL	390	530	16	
$\mu$	372,1333	526,6	32,53333	68,5
$\sigma$	2,157159	1,03923	1,36504	1,126943
$C_{pl}$	-2,76083	-1,09055	4,037327	

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2

*Стикове зварне з'єднання прокату 10ХСНД-2 (С390) 14 мм  
за ГОСТ 6713-91 V-подібне оброблення крайків*

Показник	Межа плинності $\sigma_T$ , МПа	Тимчасовий опір руйнуванню $\sigma_B$ , МПа	Відносне видовження $\delta_5$ , %	Відносне звуження $\psi$ , %
Зразок 1	363,3	527	33,3	70,6
Зразок 2	364,9	503,7	34	74,5
Зразок 3	361,2	496,6	35,8	61,9
LSL	390	530	16	
$\mu$	363,1333	509,1	34,36667	69
$\sigma$	1,855622	15,90314	1,289703	6,450581
$C_{pl}$	-4,82617	-0,43807	4,747002	

Джерело: розроблено авторами.

З табличних даних видно, що дріт Хорда S2 на всіх трьох зразках показав невиконання вимог до  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$  при зварюванні з'єднань із сталі 10ХСНД-2 (С390). Значення індексу працездатності по цих показниках значно менші за 1,67 (вони від'ємні). Таким чином, як за традиційними критеріями, так і за індексом працездатності досліджуване сполучення зварювальних матеріалів не здатне виконувати вимоги щодо механічних властивостей зварних швів і не може бути рекомендованим до зварювання балок мостових переходів.

Для порівняння були визначені механічні характеристики зварних з'єднань при зварюванні дротом Хорда S2 під флюсом Flux Ok 10.71 сталі 09Г2С, які систематизовані в таблиці 3.

Таблиця 3

*Стикове зварне з'єднання прокату 09Г2С-12 (С345) 12 мм  
за ГОСТ 19281-89 X-подібне оброблення крайків*

Показник	Межа плинності $\sigma_T$ , МПа	Тимчасовий опір руйнуванню $\sigma_B$ , МПа	Відносне видовження $\delta_5$ , %	Відносне звуження $\psi$ , %
Зразок 1	400,6	534,2	32,3	73,3
Зразок 2	396,7	534,1	31	71,5
Зразок 3	398,4	535,9	30,7	71,5
LSL	345	490	16	
$\mu$	398,5667	534,7333	31,33333	72,1
$\sigma$	1,955335	1,011599	0,85049	1,03923
$C_{pl}$	9,131714	14,74013	6,009607	

Джерело: розроблено авторами.

Для сталі 09Г2С всі отримані значення межі плинності, тимчасового опору руйнування, відносного видовження перевищують мінімально допустимі значення контрольованих характеристик (LSL), а індекси працездатності  $C_{pl}$  значно перевищують мінімально допустиме значення 1,67. Отже, зварювання дротом Хорда S2 під флюсом Flux Ok 10.71 може бути рекомендовано для конструкцій прогонових споруд металевих мостів, виготовлених зі сталі 09Г2С. Однак ця сталь не використовується для заданих балок мостових переходів.

Можна зробити загальний висновок, що дріт Хорда S2 при зварюванні під флюсом Flux Ok 10.71 може бути використаний для сталі 09Г2С і не рекомендується для використання для сталі 10ХСНД. Цей висновок однаковий як при використанні традиційного критерію прийнятності зварювальних матеріалів, так і при використанні як критерію індексу працездатності процесу зварювання. Розглянемо можливість використання зварювального дроту Хорда S2Ni1Mo.

У таблиці 4 наведені результати визначення можливості виконання вимог ДБН В.2.3.-26:2010 до конструкцій прогонових споруд металевих мостів при зварюванні дротом Хорда S2Ni1Mo під флюсом Flux Ok 10.71.

Таблиця 4

*Стикове зварне з'єднання прокату 10ХСНД-2 (С390) 20 мм  
за ГОСТ 6713-91 X-подібне оброблення крайків*

Показник	Межа плинності $\sigma_T$ , МПа	Тимчасовий опір руйнуванню $\sigma_B$ , МПа	Відносне видов- ження $\delta_5$ , %	Відносне зву- ження $\psi$ , %
Зразок 1	522,7	649	25,4	61,9
Зразок 2	516,8	643,8	23,3	63,9
Зразок 3	523,6	648,6	26,9	64,2
LSL	390	530	16	
$\mu$	521,0333	647,1333	25,2	63,33333
$\sigma$	3,693688	2,893671	1,808314	1,250333
$C_{pl}$	11,82498	13,49305	1,695871	

Джерело: розроблено авторами.

Усі отримані значення механічних властивостей ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta_5$ ) значно перевищують значення LSL. При цьому  $C_{pl}$  – індекси працездатності процесів зварювання за механічними властивостями металу шва суттєво перевищують мінімально допустимий рівень 1,67. Таким чином, зварювання сталі 10ХСНД товщиною 20 мм з X-подібним розробленням крайків, дротом Хорда S2Ni1Mo під флюсом Flux Ok 10.71 може бути рекомендоване для конструкцій прогонових споруд металевих мостів.

Для зварювання в захисних газах сталі 10ХСНД може бути застосований дріт суцільного перетину X-3Si1 у суміші газів M21. У таблиці 5 наведені результати визначення можливості виконання вимог ДБН В.2.3.-26:2010 до конструкцій прогонових споруд металевих мостів при зварюванні дротом X-3Si1 у суміші газів M21.

Таблиця 5

*Стикове зварне з'єднання прокату 10ХСНД-2 (С390) 14 мм  
за ГОСТ 6713-91 V-подібне оброблення крайків*

Показник	Межа плинності $\sigma_T$ , МПа	Тимчасовий опір руйнуванню $\sigma_B$ , МПа	Відносне видов- ження $\delta_5$ , %	Відносне зву- ження $\psi$ , %
Зразок 1	495,3	600,1	23,3	59,9
Зразок 2	493,7	658,8	29,5	70,7
Зразок 3	524	644,4	29,1	71,1
LSL	390	530	16	
$\mu$	504,3333	634,4333	27,3	67,23333
$\sigma$	17,05061	30,59286	3,46987	6,354001
$C_{pl}$	2,235176	1,137883	1,085535	

Джерело: розроблено авторами.

Розглянемо результати випробувань за показниками механічних властивостей окремо. За межею плинності ( $\sigma_T$ ) всі отримані значення перевищують мінімально допустиме (390 МПа), індекс працездатності по межі плинності ( $C_{pl} = 2,235$ ) також перевищує 1,67. Таким чином, за межею плинності зварювання дротом X-3Si1 у суміші газів M21 може бути використане при виготовленні балок мостового переходу. За тимчасовим опором руйнування ( $\sigma_B$ ) та відносним подовженням ( $\delta_5$ ) всі отримані значення перевищують мінімально допустимі відповідно 530 МПа та 16 % і за традиційним підходом ц ситуація є прийнятною. Однак індекс працездатності процесу і для тимчасового опору руйнуванню і для відносного видовження менші за 1,67 (1,137 і 1,085 відповідно). Це означає, що не зважаючи на відсутність експериментальних даних про недосягнення мінімально допустимих значень  $\sigma_B$  та  $\delta_5$  при виконанні зварювання дротом X-3Si1 у суміші газів M21 можуть бути ділянки зварного шва зі значеннями  $\sigma_B$  та  $\delta_5$  меншими за мінімально допустимими.

Отже, за традиційними критеріями зварювання дротом X-3Si1 у суміші газів M21 може бути рекомендований для балок мостових переходів і не рекомендується за індексом працездатності процесу зварювання по тимчасовому опору руйнування і відносному подовженню.

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що результати оцінювання прийнятності зварювальних матеріалів за традиційним критерієм (перебування всіх отриманих експериментально даних в межах діапазону допустимих значень) на 87 % співпадають з результатами оцінювання за індексом працездатності процесу ( $C_{pk} \geq 1,67$ ). При дослідженні прийнятності до використання для зварювання заданого виробу дроту X-3Si1 класичний підхід показав прийнятність зварювального дроту. При цьому індекс працездатності процесу зварювання за тимчасовим опором руйнування ( $\sigma_b$ ) та відносним подовженням ( $\delta_5$ ) мав значення, менші за 1,67, що свідчить про можливість невиконання вимог за цими показниками на окремих ділянках зварного шва. Застосування класичного підходу не враховує діапазонів природного розсіювання контрольованих характеристик і, в окремих випадках, може призводити до помилкових висновків про прийнятність зварювальних матеріалів. Застосування при виборі зварювальних матеріалів індексу працездатності процесу зварювання як критерію прийнятності для застосування матеріалів до заданого виробу підвищує результативність оцінювання у порівнянні з класичним підходом. Індекс працездатності процесу зварювання може бути рекомендований для статистично аргументованого вибору зварювальних матеріалів для заданого виробу, що сприятиме зменшенню ризиків застосування неприйнятних для заданого виробу зварювальних матеріалів. Ризики застосування неприйнятних зварювальних матеріалів потребують подальшого вивчення.

#### Список використаних джерел

1. Kinetics of strains during single-pass fusion welding of a symmetrical butt joint [Electronic resource] / V. M. Prokhorenko, D. V. Prokhorenko, C. O. Zvorykin, S. F. Hainutdinov // *Technological Systems*. – 2019. – № 3(88). – Pp. 73-84. – Accessed mode: <https://dx.doi.org/10.29010/88.11>.
2. Analysis of the influence of system welding coordination on the quality level of joints [Electronic resource] / O. Haievskiyi, V. Kvasnytskyi, V. Haievskiyi, C. Zvorykin // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. – 2020. – Vol. 5, No. 1(107). – Pp. 98-109. – Accessed mode: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204364>.
3. ISO 2859-1:1999/AMD1:2011 Sampling procedures for inspection by attributes – Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection - Amendment 1 [Electronic resource]. – Geneva : International Organization for Standardization, 2011. – 104 p. – Accessed mode: <https://www.iso.org/ru/standard/53053.html>.
4. ISO 39511:2018 Sequential sampling plans for inspection by variables for percent nonconforming (known standard deviation) [Electronic resource]. – Geneva : International Organization for Standardization, 2018. – 98 p. – Accessed mode: <https://www.iso.org/standard/67139.html>.
5. Harasawa H. Quality assurance and quality management [Electronic resource] / H. Harasawa // *Journal of the Japan Welding Society*. – 2012. – № 81(5). – Pp. 434-436. – Accessed mode: <https://doi.org/10.2207/jjws.81.434>.
6. Otsuka H. Quality assurance of welded steel of Tokyo sky tree [Electronic resource] / H. Otsuka, Y. Minoda, K. Nagayama // *Journal of the Japan Welding Society*. – 2013. – № 82(4). – Pp. 252-257. – Accessed mode: <https://doi.org/10.2207/jjws.82.252>.
7. Costa A.R. Six Sigma: Main Metrics and R Based Software for Training Purposes Purposes and Practical Industrial Quality Control [Electronic resource] / Ana Rita Costa, Carla Barbosa, Gilberto Santos, M. Rui Alves // *Quality Innovation Prosperity*. – 2019. – № 23(2). – Pp. 83-100. – Accessed mode: <https://doi.org/10.12776/qip.v23i2.1278>.
8. ДБН В.2.3-26:2010 Споруди транспорту. Мости та труби. Сталеві конструкції. Правила проектування. – К. : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2010. – 201 с.

### References

1. Prokhorenko, V.M., Prokhorenko, D.V., Zvorykin, C.O., Hainutdinov, S.F. (2019). Kinetics of strains during single-pass fusion welding of a symmetrical butt joint. *Technological Systems*, 3(88), 73-84. DOI: <https://dx.doi.org/10.29010/88.11>.
2. Haievskiy, O., Kvasnytskyi, V., Haievskiy, V., Zvorykin, C. (2020). Analysis of the influence of system welding coordination on the quality level of joints. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 5(1(107)), 98-109. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204364>.
3. International Organization for Standardization. (1999). Sampling procedures for inspection by attributes – Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection – Amendment 1 (ISO 2859-1:1999/AMD1:2011). <https://www.iso.org/ru/standard/53053.html>.
4. International Organization for Standardization. (2018). Sequential sampling plans for inspection by variables for percent nonconforming (known standard deviation) (ISO 39511:2018). <https://www.iso.org/standard/67139.html>.
5. Harasawa, H. (2012). Quality assurance and quality management. *Journal of the Japan Welding Society*, 81(5), 434-436. <https://doi.org/10.2207/jjws.81.434>.
6. Otsuka, H., Minoda, Y., Nagayama, K. (2013). Quality assurance of welded steel of Tokyo sky tree. *Journal of the Japan Welding Society*, 82(4), 252-257. <https://doi.org/10.2207/jjws.82.252>.
7. Ana Rita Costa, Carla Barbosa, Gilberto Santos, M. Rui Alves (2019). Six Sigma: Main Metrics and R Based Software for Training Purposes Purposes and Practical Industrial Quality Control. *Quality Innovation Prosperity*, 23(2), 83-100. <https://doi.org/10.12776/qip.v23i2.1278>.
8. National Transport University. (2010). Sporudy transportu. Mosty ta truby. Stalevi konstruktsii. Pravyla proektuvannia [Transport facilities. Bridges and pipes. Steel structures. Design rules] (DBN B.2.3-26:2010). Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine.

Отримано 24.01.2022

UDC 621.791.019

**Volodymyr Haievskiy<sup>1</sup>, Oleh Haievskiy<sup>2</sup>, Ivan Pichuhin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Assistant of the Department of Welding  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [v.gaevskiy@kpi.ua](mailto:v.gaevskiy@kpi.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3888-3107>  
ResearcherID: [AAK-3955-2020](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107). SCOPUS Author ID: [57221567034](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [ggoa@ukr.net](mailto:ggoa@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0769-5661>  
ResearcherID: [AAK-3936-2020](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661). SCOPUS Author ID: [57221567160](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661)

<sup>3</sup>Applicant for Higher Education  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [vano9@yahoo.com](mailto:vano9@yahoo.com)

### APPLICATION OF THE CAPABILITY INDEX OF ONE PROCESS AT CHOOSING WELDING MATERIALS

*The lists of construction materials, welding materials, welded products and areas of application of welding are constantly increasing. For each welded product should be chosen welding, taking into account the variability of the characteristics of welds. This determines the urgency of research on the effectiveness of modern statistical methods on the choice of welding materials.*

*Welding processes are special processes that require validation in the face of changing values of the quality characteristics of welded joints. Existing approaches to determining the acceptability of welding materials do not exclude the possibility of non-compliance with the requirements for welds in some areas.*

*Analysis of the literature shows that the traditional approach to confirming the acceptability of welding materials for a given welded product, based on the criterion of finding all experimentally obtained values within the range of acceptable values. This approach does not take into account the mathematical expectation and the standard deviation of the quality of welds. The application of statistical sampling requires large sample sizes and focuses on the acceptance or rejection of individual batches of welding consumables. However, in modern conditions, the supply of welding consumables should be treated as a process.*

*In the general case, the ability of the process to meet the established requirements is determined by the index of efficiency of the process. However, the effectiveness of this approach to determine the possibility of applying welding materials to a given product needs to be studied.*

*The research objective is to determine the effectiveness of assessing the acceptability of welding materials for welding a given product by applying the index of efficiency of the welding process of the test material on controlled quality indicators of the weld.*

*A study of the application of the efficiency index to determine the acceptability of welding materials in the selection of welding wire for the manufacture of bridge beams from steel S355J0WP. State building norms ДБН В.2.3-26: 2010 establish requirements for the minimum allowable value (LSL) of welds of the bridge beam on certain indicators of mechanical properties of the weld metal.*

*The use of the traditional approach and performance index was investigated to confirm the acceptability for the bridge beam welding with Chord wire S2 flux flux Ok 10.71, Chord S2Ni1Mo flux wire Flux Ok 10.71, X-3Si1 wire in a mixture of M21 gases. The mechanical properties of the weld metal were determined by the yield strength ( $\sigma_m$ ), temporary fracture toughness ( $\sigma_0$ ), relative elongation ( $\delta_5$ ), relative narrowing ( $\psi$ ).*

*According to both the traditional approach and the performance index, the Chord wire S2 is not acceptable, and the Chord wire S2Ni1Mo is acceptable for submerged arc welding Flux Ok 10.71 bridge beams. Thus, when welding under Flux Ok 10.71, both approaches gave the same result. However, for X-3Si1 wire welding in a mixture of M21 gases, the studied approaches gave different conclusions. According to the traditional approach, welding with X-3Si1 wire in a mixture of M21 gases is acceptable, and according to the process performance index, it is not acceptable for the bridge crossing beam.*

*Studies have shown that the results of assessing the acceptability of welding materials by the traditional criterion (stay of all experimentally obtained data within the range of allowable values) by 87% coincide with the results of the capability of the process index ( $C_{pk} \geq 1.67$ ). In the study of the acceptability of the use of X-3Si1 wire for welding a given product, the classical approach showed the acceptability of the welding wire. The efficiency of the welding process on the temporary resistance to failure ( $\sigma_0$ ) and elongation ( $\delta_5$ ) had values less than 1.67, which indicates the possibility of non-compliance with these indicators in some areas of the weld. The index of efficiency of the welding process can be recommended for statistically substantiated choice of welding materials for a given product, which will reduce the risks of using unacceptable welding materials for a given product.*

**Keywords:** choice of welding materials; process capability index; validation of welding processes; ensuring the quality of welding; statistical methods in welding.

Table: 5. References: 8.