

УДК 658.562.012.7

Гаєвський В. О., Гаєвський О. А., Зворикін К. О.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Україна, м. Київ

ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ НЕВИКОНАННЯ ВИМОГ ПРИ ОЦІНЮВАННІ РИЗИКІВ ЗВАРЮВАННЯ

В роботі визначені підходи до класифікації показників процесів та продукції зварювального виробництва, які забезпечують кількісне оцінювання ризиків невиконання вимог до якості. Запропонована класифікація характеристик якості по статистичних ознаках та застосування відповідних законів аналізу змінюваності цих характеристик. Визначено статичні залежності, необхідні для розрахунку ймовірності невиконання вимог за безперервною, порядковою та альтернативною ознакою. Запропоновані алгоритми, дій які можуть бути покладені в основу процедур керування ризиками в сучасній системі управління якістю зварювального виробництва.

Ключевые слова: статистичний розподіл; керування ризиками; ймовірність невиконання вимоги.

Вступ

Прийнята у вересні 2015 року п'ята версія міжнародних вимог до систем управління якістю [1] передбачає, планування всіх процесів системи управління якістю з врахуванням потенційного впливу ризиків невідповідності зварних виробів

встановленим до них вимогам. Такий підхід до процесів управління якістю є новим і потребує орієнтованої на ризики систематизації показників процесів у зварювальному виробництві.

Виконання вимог до керування ризиками в системі управління якістю зварювання може базуватися на двох складових:



по-перше, результатом багаторічних технологічних досліджень особливостей впливу процесів життєвого циклу на якість продукції зварювального виробництва стало розроблення міжнародних стандартів, які встановлюють вимоги до виконання зварювання плавленням металевих матеріалів та визначають обов'язкові процеси системи управління якістю у зварювальному виробництві [2];

по-друге, достатньо добре досліджені загальні підходи до оцінки технологічних ризиків, зведені у методику аналізу видів та наслідків потенційних відмов – FMEA [3-5].

Постановка задачі

Для оцінювання ризиків у системі управління якістю зварювального виробництва слід систематизувати характерні для цього виробництва показники процесів та забезпечити можливість застосування методів описової статистики для визначення ймовірності невиконання вимог до якості зварних виробів.

Мета роботи – визначення підходів до класифікації показників процесів і продукції, характерних для системи управління якістю у зварювальному виробництві, орієнтованих на оцінювання ризиків невиконання вимог до якості зварних виробів.

Основна частина

Якість зварного з'єднання характеризується, у тому числі, показниками, фактичні значення котрих можуть бути визначені тільки руйнівними методами (міцність, відносне подовження, ударна в'язкість металу зварного шва та зони термічного впливу), або прихованими дефектами (внутрішні пори, шлакові включення, тріщини). Як наслідок, у системах управління якістю процеси зварювання відносять до спеціальних процесів, що потребують атестації як самого процесу так і операторів-зварників [6]. Зварні вироби часто відносять потенційно небезпечних об'єктів з жорстко регламентованими правилами виконання зварювальних робіт при виготовленні, монтажі та ремонті. За цих обставин для зварювання плавленням розроблені та стандартизовані системні заходи, що забезпечують якість зварного виробу на ключових етапах його життєвого циклу [2]:

аналіз контракту, який передбачає виконання зварювальних робіт;

передавання зварювальних робіт, контролю, неруйнівних випробувань, термообробки у суб-підряд;

забезпечення кваліфікації зварювально-технічного персоналу та персоналу для контролю та випробувань;

забезпечення придатності виробничого та випробувального обладнання;

планування, підготовки та виконання зварювальних робіт;

поводження зі зварювальними матеріалами та основним металом;

термообробка після зварювання;

контроль та випробування в ході підготовки, виконання зварювання та приймання зварних виробів;

поводження з невідповідною продукцією;

калібрування та затвердження вимірювального, випробувального та контрольного обладнання;

ідентифікація виробів та простежуваність операцій зварювання;

ведення протоколів з якості в ході підготовки та виконання зварювання.

У системі управління якістю зварювального виробництва на названих етапах встановлюють процедури, які забезпечують якість зварних виробів. У відповідності з новими вимогами до систем управління якістю [1] об'єм та складність таких процедур повинна корелювати з рівнем ризиків, пов'язаних з невиконанням вимог до якості зварних виробів, призначених для зовнішнього споживача.

Ризик є наслідком невизначеності [7]. В системі управління якістю, невизначеність пов'язана з тим, виконуються чи не виконуються вимоги до якості продукції. Система управління якістю реалізує процеси, необхідні для забезпечення якості продукції, тому невиконання вимог відбувається достатньо рідко і на цей випадок передбачені процедури управління невідповідною продукцією. Невиконання вимог до якості продукції може призводити до небажаних наслідків для споживачів. Таким чином, не дивлячись на потенційну можливість як позитивного, так і негативного впливу відхилення від очікуваного результату, ризики у системі управління якістю пов'язують, в основному, з негативними наслідками.

При оцінюванні ризику враховують, по-перше, можливість невиконання вимог до якості зварного виробу, по-друге, важкість наслідків невиконання вимог [5]. Кількісно можливість невиконання вимоги визначається ймовірністю такої події. Наслідки невиконання вимог можуть змінюватися від «можливості сприймати тільки спеціально навченим персоналом» до «можливості раптового руйнування зварних виробів з людськими жертвами та втратами для оточуючого середовища». Чим вище ймовірність інциденту та потенційно можливі наслідки, тим вище ризики.

Першим кроком для дій, пов'язаних з управлінням якістю, у тому числі і дій по оцінюванню ризиків є визначення переліку характеристик якості продукції і вимог до них з встановленими діапазонами допустимих значень. Для зварних з'єднань, виконаних зварюванням плавленням на сталях, нікелі, титані та їх сплавах (крім променевих про-

цесів) основою визначення діапазонів допустимих значень являються норми оцінки дефектів, регламентовані міжнародним стандартом ISO 5817:2014 [8]. Стандарт встановлює двосторонні (*USL* и *LSL*), але частіше односторонні (*USL* або *LSL*) обмеження допустимих значень характеристики якості зварних з'єднань, що контролюється.

Всі характеристики якості зварних виробів та процесів зварювання можуть бути віднесені до однієї з трьох статистичних ознак:

- безперервної (кількісної);
- порядкової (дискретної);
- альтернативної (якісної).

Для визначення фактичних значень характеристик якості, що відносяться до безперервної ознаки, використовують вимірювальні процеси. Прикладом характеристик якості, які відносяться до безперервної статистичної ознаки, можуть бути розміри, механічні властивості, хімічний склад металу зварного шва, зони термічного впливу, кратеру, час виконання окремої операції або замовлення, параметри режиму зварювання, вимірні характеристики дефектів (протяжність, глибина розташування, діаметр, ширина розкриття тріщини). Численні дослідження адекватності застосування статистичних законів до аналізу розподілу даних по безперервній ознаці показують, що як правило, змінюваність безперервної ознаки адекватно описується законом нормального розподілу. Виключенням з правила являється змінюваність розмірів дефектів зварного шва, котра підпорядковується закону Вейбулла [9, 10].

Для виконання статистичного аналізу нормально розподілених даних слід за представницькою вибіркою визначити μ – математичне очікування (центр настроювання процесу зварювання за характеристикою якості, що контролюється) та σ – середньоквадратичне відхилення для контрольованої характеристики якості. Ймовірність невиконання вимоги може бути розрахована через процедуру стандартизації заданих гранично допустимих значень (*USL*; *LSL*).

На рис.1 проілюстровано визначення ймовірності невиконання вимоги за нижньою границею допустимих значень ($P(x < LSL)$) та верхньою границею допустимих значень ($P(x > USL)$).

Для двостороннього допуску ймовірність невиконання вимоги розраховується (1) за правилом додавання ймовірностей

$$P_{n/c} = P(x < LSL) + P(x > USL). \quad (1)$$

При нормуванні вимог до розмірів дефектів зварних швів [8], як правило, встановлюють односторонню межу (*USL*) – верхнє гранично допустиме значення розміру дефекту (d_*). Ймовірність невиконання вимоги до розміру дефекту може бути

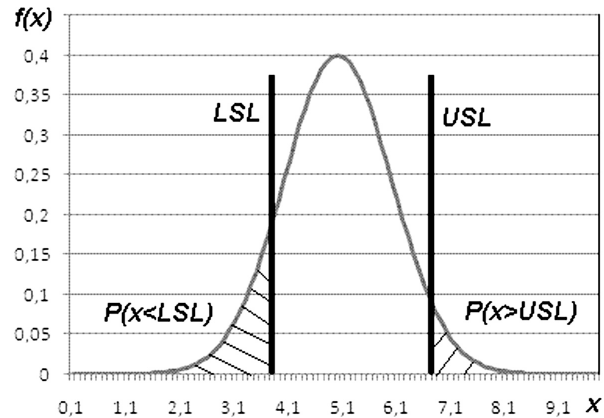


Рис. 1. Приклад нормального розподілу характеристики якості для $\mu = 5,0$; $\sigma = 1,00$

визначена (2) як ймовірність перевищення верхнього гранично допустимого значення (d_*)

$$P(d > d_*) = 1 - F(d_*; a_d; b_d), \quad (2)$$

де $F(d_*; a_d; b_d)$ – значення функції розподілу Вейбулла для заданого гранично допустимого значення (d_*) та відомих параметрах a_d – масштабу та b_d – форми Вейбулівського розподілу розміру дефекту.

Значення функції розподілу Вейбулла (3) може бути розраховано

$$F(d_*, a_d, b_d) = 1 - e^{-\left[\left(\frac{d_*}{a_d}\right)^{b_d}\right]}. \quad (3)$$

На рис. 2 наведена ілюстрація до визначення ймовірності не перевищення ($P(d \leq d_*)$) та перевищення ($P(d > d_*)$) верхнього гранично допустимого розміру дефекту.

Значення параметрів масштабу (a_d) та форми (b_d) Вейбулівського розподілу розміру дефекту можуть бути оцінені за вибіркою представницького об'єму.

До статистичної порядкової (дискретної) ознаки відносять показники якості, які передбачають реес-

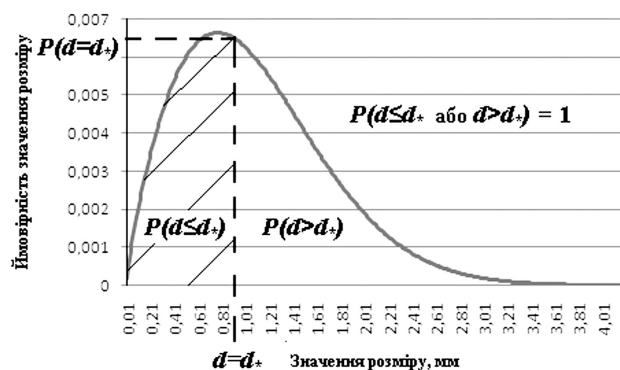


Рис. 2. Приклад розподілу значень розміру дефекту за законом Вейбулла для $a_d = 1,21$; $b_d = 1,791$

трацію кількості подій на одиницю, наприклад, кількість пор, шлакових включень, зареєстрованих на одиничній ділянці зварного шва; кількість дефектів, зареєстрованих на один зварний виріб або на партію зварних виробів; кількість дефектів, зареєстрованих на протязі встановленого проміжку часу; кількість рекламаций, отриманих на протязі встановленого проміжку часу; кількість невідповідностей, виявлених в ході аудиторської перевірки. Для аналізу розподілу даних, які відносяться до порядкової ознаки, може бути використаний закон Пуассона.

Для характеристики якості, що контролюється за порядковою ознакою, як правило, встановлюють верхнє гранично допустиме значення (USL). При цьому ймовірність невиконання вимог до контрольованої характеристики якості (4) може бути визначена

$$P(x > USL) = 1 - G(USL, \mu), \quad (4)$$

де $G(USL, \mu)$ — функція розподілу Пуассона для заданого значення USL та відомого значення математичного очікування кількості подій на одиницю μ .

Функція розподілу Пуассона (5) може бути розрахована

$$G(USL, \mu) = \sum_{i=0}^{USL} \left(\frac{\mu^i}{i!} e^{-\mu} \right), \quad (5)$$

Математичне очікування кількості подій на одиницю μ може бути оцінено як середньоарифметичне значення для представницької вибірки.

На рис. 3 показано приклад застосування розподілу Пуассона для розрахунку ймовірності невиконання вимог по порядковій ознаці.

Якщо для контролю якості зварних швів використовуються шаблони або візуальний метод контролю, то за результатом такого контролю характеристики якості призначається статус — «відповідає» або «не відповідає» встановленій вимозі та всі наступні рішення приймаються тільки за цим статусом. Описана ситуація визначає застосування статистичної альтернативної ознаки.

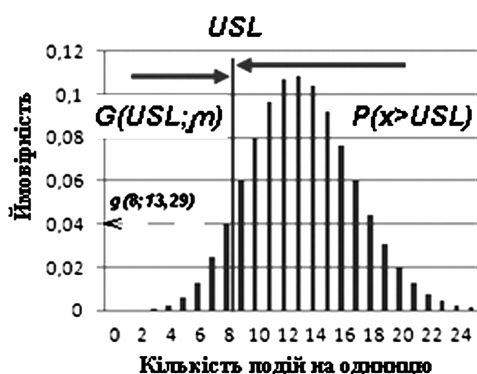


Рис. 3. Стовбчаста діаграма розподілу Пуассона для $\mu = 13,29$

Як правило, за альтернативною ознакою виконують вибірковий контроль значень характеристики якості за планом контролю ($n - c$), де n — об'єм вибірки (кількість відібраних з партії продукції та перевічених на відповідність вимогам об'єктів), c — приймальне число. Якщо кількість невідповідних об'єктів (зварних швів або виробів) не перевищує приймального числа c , то вся партія продукції приймається, в іншому випадку — відбраковується. Таким чином, при застосуванні альтернативної ознаки актуальні два питання — ймовірність того, що при заданому об'ємі вибірки n в ній буде виявлено рівно x^* невідповідних одиниць та ймовірність того, що кількість невідповідних одиниць x у вибірці об'ємом n не перевищить значення приймального числа c (ймовірність приймання партії продукції).

Ймовірність того, що при заданому об'ємі вибірки n в ній буде визначено рівно x^* невідповідних одиниць, може бути розрахована (6; 7) через функцію ймовірності при відомому значенні p — рівня невідповідностей у партії продукції

$$P(x = x^*) = g(x^*, n, p) = \binom{n}{x^*} p^{x^*} (1-p)^{n-x^*}, \quad (6)$$

де

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{(n-x)! x!}. \quad (7)$$

Ймовірність того, що при плані контролю ($n - c$) партія продукції з рівнем невідповідностей p буде відбракована, може бути знайдена як ймовірність перевищення кількістю виявлених у вибірці об'ємом n невідповідних одиниць приймального числа c

$$P(x > c) = 1 - G(c, n, p), \quad (8)$$

де $G(c, n, p)$ — значення функції біноміального розподілу

$$G(c, n, p) = \sum_{x=0}^c \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}, \quad (9)$$

На рис. 4 проілюстровано розрахунок ймовірності приймання партії продукції при плані контролю (100-1) та рівні невідповідностей у партії продукції 10%.

Таким чином, нами встановлені загальні підходи до визначення ймовірності невиконання вимог до характеристики якості, яка відноситься до безперервної, порядкової або альтернативної ознаки. Якщо до об'єкту (продукції) встановлені вимоги одразу за кількома характеристиками, то ймовірність невиконання вимог, хоча б за однією характе-

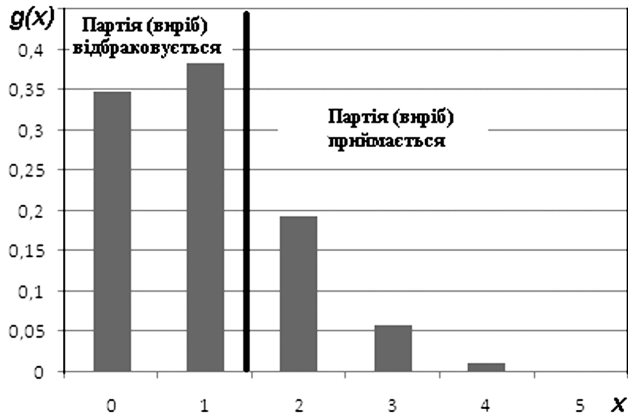


Рис. 4. Столбчатая діаграма біноміального розподілу для $n = 100, p = 0,10$

ристикой, може бути визначена (10) за правилом добутку ймовірностей

$$P_c = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_i), \quad (10)$$

де P_i — ймовірність невиконання вимог по i -ій характеристиці якості зварного виробу; k — кількість характеристик якості зварного виробу за якими встановлені вимоги.

За ймовірністю невиконання вимог кількісно визначається перша складова ризику — ранг можливості невиконання вимог (відмови) [11]. Для кількісного визначення другої складової ризику (впливу невиконання вимоги) команда експертів, яка складається з технологів зварювального виробництва, розробників зварного виробу, спеціалістів по технічному контролю використовує відповідні таблиці [12].

Висновки

Показано, що для кількісного визначення ризиків невиконання вимог до якості зварного виробу слід:

1. Визначити перелік характеристик якості зварного виробу в цілому або окремого зварного з'єднання та діапазони допустимих значень для кожної з них.
2. Для кожної характеристики якості визначити відповідні статистичну знаку та статистичний розподіл.
3. Статистичним аналізом даних, які характеризують реальні процеси зварювання, визначити значення математичного очікування та середньоквадратичного відхилення для нормально розподілених даних, параметр масштабу та параметр форми для розподілу Вейбулла, математичне очікування кількості подій на одиницю для розподілу Пуассона,

ймовірність невиконання вимоги процесом для біноміального розподілу.

4. По наведеним у статті залежностям розрахувати ймовірність невиконання вимог за кожною окремою характеристикою якості та ймовірність того, що не виконується вимога хоча б за однією характеристикою якості.

5. Використати отримані дані при оцінці ризиків для кількісного визначення можливості невиконання вимоги.

Сформульовані пропозиції кількісної оцінки ризиків, основані на розрахунку ймовірності невиконання вимог до якості зварних виробів, можуть бути використані при переході на нову версію міжнародного стандарту ISO 9001:2015.

Подальші дослідження доцільно зосередити на можливостях зниження ризиків шляхом своєчасного виявлення та усунення причини невиконання вимоги.

Позначення

- USL — верхнє гранично допустиме значення;
 LSL — нижнє гранично допустиме значення;
 $P(x < LSL)$ — ймовірність невиконання вимоги за нижнім гранично допустимим значенням;
 $P(x > USL)$ — ймовірність невиконання вимоги за верхнім гранично допустимим значенням;
 $P_{n/c}$ — ймовірність невиконання вимоги для двостороннього допуску;
 $F(d_*, a_d; b_d)$ — функція розподілу Вейбулла;
 $G(x, \mu)$ — функція розподілу Пуассона;
 $G(c, n, p)$ — функція біноміального розподілу.

Література

- [1] ISO 9001:2015. Quality management systems. Requirements. — Publish Date: 2015-09-15. — Switzerland: ISO copyright office, 2015. — 40 p.
- [2] ISO 3834-2:2005. Quality requirements for fusion welding of metallic materials. Part 2: Comprehensive quality requirements. — Publish Date: 2005-12-15. — Brussels: CEN, 2005. — 20 p.
- [3] Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем / А. М. Лепихин, Н. А. Махутов, В. В. Москвичев, А. П. Черняев. — Новосибирск: Наука, 2003. — 174 с.
- [4] Gaievskiy V. Limitation of risks of non-compliance of weld metal porosity / V. Gaievskiy, V. Prokhorenko, M. Ziberov // Graduaзго em Engenharia Mecvnica. — 2014. — vol. 1. — pp. 4-7.
- [5] Анализ видов и последствий потенциальных отказов. FMEA. Ссылочное руководство. [Текст] — Н.Новгород: ООО СМЦ «Приоритет», 2009. — 148с.
- [6] ISO 15607:2003. Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. General rules. —



- Publish Date: 2003-12-15. — Brussels: CEN, 2003. — 19 p.
- [7] ISO 9000:2015. Quality management systems. Fundamentals and vocabulary. — Publish Date: 2015-09-15. — Switzerland: ISO copyright office, 2015. — 57 p.
- [8] ISO 5817:2014. Welding — Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) — Quality levels for imperfections. — Publish Date: 2014-02-15. — Brussels: CEN-CENELEC, 2014. — 28 p.
- [9] Тарарычкін І. А. Статистическіе методы обезпечення квалітета продукції сварочного виробництва / І. А. Тарарычкін — Луганск, Восточноукр. нац. ун-т ім. В.Даля, 2002. — 335 с.
- [10] Прохоренко В. М. Ймовірність невиконання вимог до пористості шва при зварюванні під флюсом / В. М. Прохоренко, В. О. Гаєвський // Технологіческіе системи, — 2014. — № 3(68). — С. 33-41. — ISSN 2074-0603.
- [11] Державний стандарт України ДСТУ ISO Guide 73:2013. Керування ризиком. Словник термінів. — Надано чинності 2014-07-01. — К.: Мінекономрозвитку України, 2014. — 17с.
- [12] Гаєвський В. О. Расчёт минимально необходимого объёма выборки для контроля пористости сварных швов / В. О. Гаєвський, В. М. Прохоренко // Технологіческіе системи, — 2013. — № 4(65). — С. 55-61. — ISSN 2074-0603.

Haievskiy V. O., Haievskiy O. A., Zvorykin C. O.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Ukraine, Kiev

DETERMINATION OF THE PROBABILITY OF NON-COMPLIANCE WHEN ASSESSING THE RISKS OF WELDING

In the work defined approaches to the classification of the indicators of the processes and products of welding production that provide a quantitative evaluation of risks of non-fulfilment of quality requirements. Classification of quality characteristics on the statistical characteristics and the application of the relevant laws of the analysis of variability of these characteristics. Defined static dependency needed to calculate the probability of failure for continuous, sequence and alternative. The algorithms of actions that can be taken as a basis of risk management procedures in the modern system of quality management of welding production.

Keywords: statistical distribution; risk management; probability of failure requirements.

References

- [1] ISO 9001:2015. Quality management systems. Requirements. Switzerland, ISO copyright office Publ., 2015. 40 p.
- [2] ISO 3834-2:2005. Quality requirements for fusion welding of metallic materials. Part 2: Comprehensive quality requirements. Brussels, CEN Publ., 2005. 20 p.
- [3] Lepikhin A.M., Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Chernyaev A.P. Veroyatnostnyy risk-analiz konstruktsiy tehnikeskikh sistem [Probabilistic risk analysis of structures of technical systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003. 174 p.
- [4] Gaievskiy V., Prokhorenko V., Ziberov M. Limitation of risks of non-compliance of weld metal porosity, Graduaзro em Engenharia Mecvnica, 2014, vol. 1, pp. 4-7.
- [5] Analiz vidov i posledstviy potentsialnykh otkazov. FMEA. Ssylochnoe rukovodstvo. [Analysis of the types and consequences of potential failures. FMEA. Reference guide]. Nizhniy Novgorod, OOO SMTS «Prioritet» Publ., 2009. 148p.
- [6] ISO 15607:2003. Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. General rules. Brussels, CEN Publ., 2003. 19 p.
- [7] ISO 9000:2015. Quality management systems. Fundamentals and vocabulary. Switzerland, ISO copyright office Publ., 2015. 57 p.
- [8] ISO 5817:2014 Welding — Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) — Quality levels for imperfections. Brussels, CEN-CENELEC Publ., 2014. 28 p.
- [9] Tararychkin I.A. Statisticheskie metody obespecheniya kachestva produktsii svarochnogo proizvodstva [Statistical methods of providing of quality of products of welding production]. Lugansk, Vostochnoukr. Nats. Univer. im. V.Dalya Publ., 2002. 335 p.

- [10] Prokhorenko V. M. The probability of non-compliance to porosity of the weld when welding under flux [Ymovirnist nevykonannya vymog do porystosti shva pry zvariuvanni pid flusom] / V. M. Prokhorenko, V. O. Gaievskiy // Technological Systems. – #3(68). – 2014. – P. 33-41. – ISSN 2074-0603.
- [11] DSTU ISO Guide 73:2013. Keruvannya ryzykom. Slovnyk terminiv. [State Standard ISO Guide 73:2013. Risk management. Vocabulary.] Kyiv, Minekonomrozvytku Ukrainy Publ., 2014. 7 p.
- [12] Gaievskiy V. O. Calculation minimum necessary sample size for control of porosity of the weld-fabricated guy-sutures [Raschet minimalno neobkhdimogo obyema vyborki dla kontrolya porystosti svarynykh shvov] / V. O. Gaievskiy, V. M. Prokhorenko // Technological Systems. – #4(65). – 2013. – P. 55-61. – ISSN 2074-0603.