

УДК 621.791.019

В.О. Гаєвський, В.М. Прохоренко

**РОЗРАХУНОК ІМОВІРНОСТІ ВИКОНАННЯ ВИМОГ ДО ДІАМЕТРА ПОР У ЗВАРНИХ ШВАХ**

Mathematical dependence accounting changeability in formation of pores at welding and allows expecting probability of implementation of requirements to the diameter of pores from the experimentally found descriptions of the statistical distributing of amount and diameter of pores on the single area of the weld-fabricated guy-sutures is in-process shown out. For the development of mathematical dependence the static laws of distributing of Veybull and Puasson and rule of probabilities increasing were used. Adequacy of the theoretical dependence was tested by calculation of boundary conditions. Obtained mathematical dependence allows on the determination of the fitness of welding processes by the limited amount of experimental information, meeting the requirements at tests on firmness to formation of pores during development of welding materials, at setting of parameters of the welding mode, at the analysis of data about imperfectness in a welding production, at the analysis of possible refuses of process of welding and consequences of such refuses, at the estimation of technological risks in a welding production.

**Keywords:** welding, porosity, implementation of requirements, diameter of pores.

**Вступ**

Сучасні нормативні документи обмежують пористість зварних швів по трьох показниках, а саме по діаметру пор, по сумарній відносній площі пор, по кількість пор на одиничній ділянці зварного шва. Максимальний діаметр пор є одним із найбільш важливих показників їх допустимості у зварних швах, а неперевищення максимально допустимого діаметра пор є одним із обов'язкових показників якості зварного шва. За незмінних умов зварювання пори можуть не з'являтися або з'являтися, при цьому діаметр пор може істотно змінюватися в межах довжини зварного шва. Таким чином, наявність пор та їх діаметр належать до статистичних показників якості зварних швів. Значний внесок у впровадження статистичних підходів для забезпечення якості зварювання зроблено В.Н. Волченком, І.А Тараричкіним та іншими вченими-зварниками [1–6]. Однак застосовувані методи оцінювання стійкості зварювальних матеріалів і технологічних процесів зварювання до утворення пор базуються на детермінованих показниках стійкості до утворення пор і не враховують статистичної природи пористості, що є значною проблемою при визначенні здатності процесів зварювання забезпечувати якість зварних швів. Застосування математичної залежності ймовірності виконання вимог до діаметра пор від експериментально знайдених характеристик статистичного розподілу кількості та діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва дасть змогу враховувати змінюваність в утворенні пор при визначенні придатності процесів зварювання.

**Постановка задачі**

Метою роботи є виведення математичної залежності, яка враховує змінюваність в утворенні пор при зварюванні і дає можливість розрахувати ймовірність виконання вимог до діаметра пор по експериментально знайдених характеристиках статистичного розподілу кількості та діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва.

**Виведення математичної залежності ймовірності виконання вимог до діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва**

Контроль пористості здійснюється на одиничних ділянках зварного шва. Довжину одиничної ділянки встановлюють не меншою десяти товщин зварюваного металу. Як правило, довжину одиничної ділянки покладають рівною 100 мм. Фактично після зварювання на кожній одиничній ділянці зварного шва нормативні вимоги до допустимого діаметра пор або виконані, або не виконані. Отже, ймовірність виконання вимог до діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва може бути визначена за формулою

$$P_{kd} = 1 - P_{n/cd}, \quad (1)$$

де  $P_{n/cd}$  – ймовірність невиконання вимог до діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва.

Ймовірність невиконання вимог до діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва можна знайти як ймовірність появи на одиничній ділянці пор з діаметром, який перевищує гра-

нично допустиме значення  $d_{USL}$ . Для цього необхідно визначити ймовірність одночасного настання двох подій: по-перше, пори повинні з'явитися, і по-друге, їх діаметр повинен перевищувати гранично допустиме значення  $d_{USL}$ .

Ймовірність одночасного настання цих двох подій визначається за правилом множення ймовірностей. Таким чином, ймовірність невиконання вимог до діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва може бути знайдена як

$$P_{н/сd} = P_{пор} \cdot P(d \geq d_{USL}), \quad (2)$$

де  $P_{пор}$  – ймовірність появи пор на одиничній ділянці зварного шва;  $P(d \geq d_{USL})$  – ймовірність того, що діаметр пор перевищує задане гранично допустиме значення  $d_{USL}$ .

За даними праць [2–4] статистичний розподіл кількості пор, що реєструються на одиничній ділянці зварного шва, відповідає закону Пуассона, а статистичний розподіл діаметра пор відповідає закону Вейбулла.

Таким чином, ймовірність появи пор на одиничній ділянці зварного шва може бути знайдена як ймовірність того, що кількість пор на ділянці не дорівнює нулю:

$$P_{пор} = 1 - G(0, \mu), \quad (3)$$

де  $G(0, \mu)$  – ймовірність того, що пори на одиничній ділянці зварного шва не з'являються (тобто кількість пор на ділянці дорівнює нулю), розрахована за статистичним розподілом Пуассона для  $\mu$  – середньої кількості пор на одиничній ділянці зварного шва:

$$G(0, \mu) = \frac{\mu^0}{0!} e^{-\mu} = e^{-\mu}. \quad (4)$$

Ймовірність того, що діаметр пор перевищує задане гранично допустиме значення  $d_{USL}$ , може бути знайдена як

$$P(d \geq d_{USL}) = 1 - F(d_{USL}, a_d, b_d), \quad (5)$$

де  $F(d_{USL}, a_d, b_d)$  – ймовірність того, що діаметр пор не перевищує задане гранично допустиме значення  $d_{USL}$ , знайдена за статистичним розподілом Вейбулла [5] з параметром розміру  $a_d$  і параметром форми  $b_d$ :

$$F(d_{USL}, a_d, b_d) = 1 - e^{-\left(\frac{d_{USL}}{a_d}\right)^{b_d}}. \quad (6)$$

Таким чином, виходячи з рівнянь (1)–(6), ймовірність виконання вимог до діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва розраховується за формулою

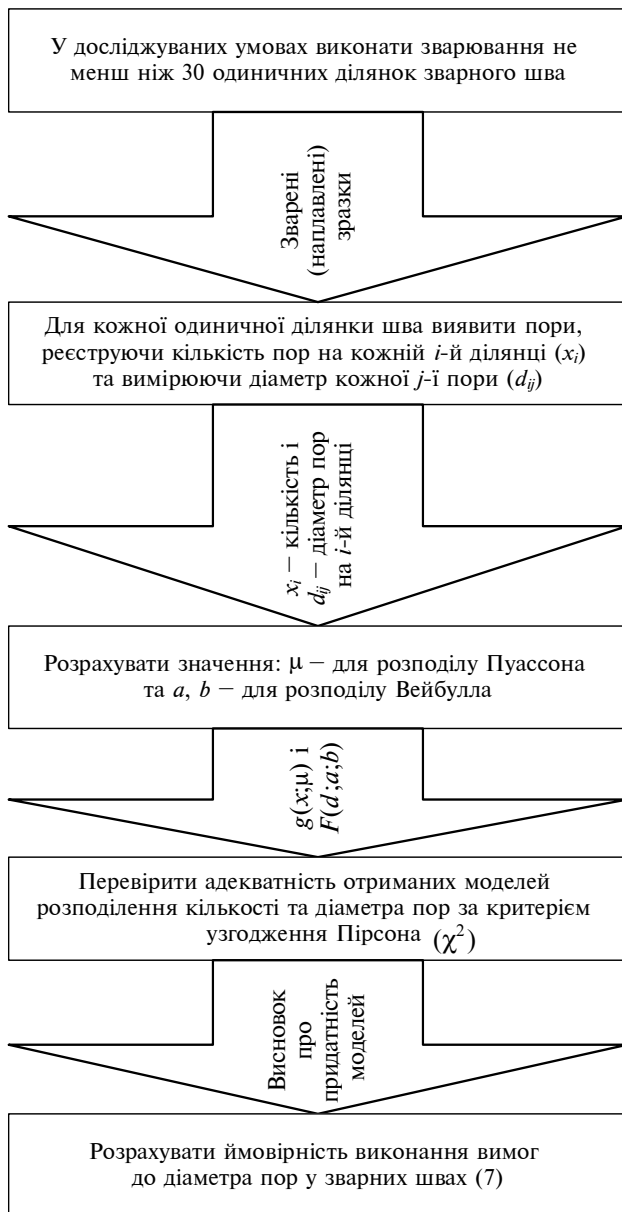
$$P_{kd} = 1 - (1 - e^{-\mu}) \cdot e^{-\left[\left(\frac{d_{USL}}{a_d}\right)^{b_d}\right]}. \quad (7)$$

Для використання наведеної залежності слід знати гранично допустиме значення діаметра пор  $d_{USL}$ , яке визначається з технічних вимог до зварного виробу. Значення середньої кількості пор  $\mu$  на одиничній ділянці зварного шва та параметрів  $a_d$  і  $b_d$  вейбулівського розподілу діаметра пор розраховуються за даними експериментального дослідження пористості зварних швів згідно з алгоритмом, наведеним на рисунку.

Для перевірки адекватності теоретично отриманої залежності ймовірності виконання вимог до діаметра пор від експериментально знайдених характеристик статистичного розподілу кількості та діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва розглянемо граничні ситуації.

*Перша гранична ситуація.* На одиничних ділянках пори не утворюються, тобто середня кількість пор на одиничній ділянці зварного шва  $\mu$  дорівнює нулю. Підстановка нульового значення  $\mu$  в залежність (7) дає розрахункове значення ймовірності виконання вимог до діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва  $P_{kd}$ , рівне одиниці. Такий результат розрахунку повністю логічний. За відсутності пор ймовірність виконання вимог до їх діаметра дорівнює одиниці.

*Друга гранична ситуація.* На одиничних ділянках пори утворюються в необмеженій кількості, тобто середня кількість пор на одиничній ділянці зварного шва  $\mu$  дорівнює нескінченності. Підстановка нескінченно великого значення  $\mu$  в залежність (7) дає розрахункове значення ймовірності виконання вимог до діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва  $P_{kd}$ , рівне  $F(d_{USL}, a_d, b_d)$  – ймовірності того, що діаметр пор не перевищує задане гранично допустиме значення  $d_{USL}$ , тобто при нескінченно великій кількості пор ймовірність виконання вимог до діаметра пор визначається виключно вейбулівським розподілом діаметра пор. Такий результат розрахунку також є абсолютно логічним.



Алгоритм підготовки даних для розрахунку ймовірності виконання вимог до діаметра пор для одиничної ділянки зварного шва

*Третя гранична ситуація.* Задане гранично допустиме значення  $d_{USL}$  дорівнює нулю, тобто пори взагалі не допускаються. Підстановка нульового значення  $d_{USL}$  у залежність (7) дає розрахункове значення ймовірності виконання вимог до діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва  $P_{kd}$ , рівне  $e^{-\mu}$ , що своєю чергою відповідає  $G(0, \mu)$  — ймовірності того, що пори на одиничній ділянці зварного шва не з'являються. Тобто в ситуації, коли гранично

допустиме значення  $d_{USL}$  дорівнює нулю, ймовірність виконання вимог до діаметра пор дорівнює ймовірності відсутності пор на одиничній ділянці зварного шва, що також є абсолютно логічним.

*Четверта гранична ситуація.* Задане гранично допустиме значення  $d_{USL}$  дорівнює нескінченності, тобто допускаються пори будь-якого діаметра. Підстановка нескінченно великого значення  $d_{USL}$  у залежність (7) дає розрахункове значення ймовірності виконання вимог до діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва  $P_{kd}$ , рівне одиниці. Тобто за фактичної відсутності обмежень по допустимому діаметру пор будь-яка одинична ділянка зварного шва гарантовано відповідає вимогам до діаметра пор. Такий висновок є логічним.

Перевірочні розрахунки, виконані за залежністю (7), не суперечать загальновідомим уявленням, досвіду та логіці. Таким чином, теоретично отримана залежність ймовірності виконання вимог до діаметра пор від експериментально знайдених характеристик статистичного розподілу кількості та діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва є адекватною.

Експериментальне дослідження пористості зварних швів згідно з алгоритмом, поданим на рисунку, зводиться до виконання зварювання в досліджуваних умовах і визначення на кожній одиничній ділянці зварного шва кількості пор і діаметра кожної окремої пори. Мінімальна протяжність зварних швів дорівнює довжині тридцяти одиничних ділянок. Експериментально знайдена середньоарифметична кількість пор на одиничній ділянці зварного шва є оціночним значенням параметра  $\mu$  для статистичного розподілу Пуассона. Обробка даних по діаметру пор за допомогою ймовірнісного паперу дає змогу визначити оціночні значення параметрів розміру  $a_d$  і форми  $b_d$  статистичного розподілу Вейбулла. Для перевірки гіпотези про відповідність експериментально отриманого розподілу кількості пор на одиничній ділянці зварного шва теоретичному закону Пуассона з оціночними значеннями середньої кількості пор  $\mu$  та експериментально отриманого розподілу діаметра пор теоретичному закону Вейбулла з оціночними значеннями параметрів  $a_d$  і  $b_d$  використовують критерії згоди. Найбільш універсальним і прийнятним в умовах обмеженої кількості експериментальних даних вважається критерій узгодження Пірсона [4]. Він може бу-

ти рекомендованим для розв'язання нашої задачі, але це не виключає можливості застосування інших загальних або спеціалізованих критеріїв узгодження. Значення параметрів  $\mu$ ,  $a_d$  і  $b_d$  можна використовувати для подальших розрахунків тільки після перевірки гіпотези про відповідність експериментально отриманого розподілу теоретичним законам.

Розрахункове значення ймовірності виконання вимог до діаметра пор на одиничній ділянці зварного шва визначає частку одиничних ділянок, які відповідають вимогам до максимально допустимого діаметра пор, і може бути використане як характеристика здатності процесу зварювання задовольняти вимоги до якості зварних швів у випадках [5]:

– випробувань на стійкість до утворення пор при розробленні зварювальних матеріалів і призначенні параметрів режиму зварювання;

– аналізу даних про дефектність у зварювальному виробництві;

– аналізу можливих відмов процесу зварювання і їх наслідків при оцінці технологічних ризиків у зварювальному виробництві.

Використання статистично обґрунтованих характеристик здатності процесів зварювання виконувати вимоги до діаметра пор у зварних швах підвищує достовірність і відтворюваність

результатів аналізу даних, оцінок і рішень, що приймаються.

### Висновки

За отриманою математичною залежністю за обмеженою кількістю експериментальних даних розраховується ймовірність виконання вимог до діаметра пор у зварних швах.

Розроблено алгоритм підготовки експериментальних даних, необхідних для розрахунку ймовірності виконання вимог до діаметра пор у зварних швах. Отримані результати можуть бути використані для визначення стійкості процесів зварювання до утворення пор при розробленні зварювальних матеріалів та призначенні параметрів режиму зварювання, аналізуванні даних про дефектність в умовах зварювального виробництва. Запропонований підхід до розрахунку ймовірності виконання вимог до діаметра пор дає можливість застосовувати кількісні методи обмеження ризиків, пов'язаних із виникненням пор у зварних швах.

Подальші дослідження будуть спрямовані на математичне моделювання комплексних статистичних показників здатності процесу зварювання одночасно виконувати вимоги до діаметра пор, кількості пор на одиничній ділянці зварного шва і відносної сумарної площі пор.

### Список літератури

1. *Тараричкін І.О.* Статистичні методи забезпечення якості продукції зварювального виробництва: Монографія. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2002. – 336 с.
2. *Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем / А.М. Лепихин, Н.А. Махутов, В.В. Москвичев, А.П. Черняев.* – Новосибирск; Наука, 2003. – 174 с.
3. *Волченко В.Н.* Статистические методы управления качеством по результатам неразрушающего контроля. – М.: Машиностроение, 1976. – 64 с.
4. *Капур К., Ламберсон Л.* Надежность и проектирование систем. – М.: Мир, 1980. – 598 с.
5. *Прохоренко В.М., Чертов И.М., Гаевский В.О.* Научно-техническая проблема автоматизированного контроля качества сварных соединений // Вісник ДДМА. – 2012. – № 3. – С. 236–240.
6. *Чвертко Є.П.* Прогнозування якості з'єднань при контактному стиковому зварюванні безперервним оплавленням // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2013. – № 2. – С. 119–123.

Рекомендована Радою  
Механіко-машинобудівного інституту  
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції  
24 січня 2014 року