

СУЧАСНІ РІВНІ ОЦІНКИ КОНСТРУКЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ ТА АЛГОРИТМ ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ РИЗИК-АНАЛІЗУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗВАРНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

В.М. Тороп

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: v.torop@gmail.com

Розглянуто три рівні оцінки показників конструкційної міцності, надійності та довговічності зварних металоконструкцій для побудови системи управління цілісністю. Рівень 1 використовує критерії граничного стану зварних металоконструкцій на основі коефіцієнтів запасу міцності та реалізується нами за допомогою двокритеріального підходу. Рівень 2 імовірного аналізу безпеки та надійності передбачає формулювання та оцінку значень імовірнісних показників, що використовуються для оцінки конструкційної міцності, надійності та довговічності зварних металоконструкцій при невизначеності та відсутності повноти вхідних даних. Для рівня 3 ризик-аналізу експлуатації зварних металоконструкцій запропоновано алгоритм його реалізації та прописаний варіант впровадження у вигляді системи управління цілісністю. Двокритеріальна діаграма оцінки руйнування є основою реалізації всіх трьох рівнів. Бібліогр. 14, рис. 6.

Ключові слова: ризик, імовірність руйнування, наслідки, двокритеріальна діаграма оцінки руйнування, імовірнісний аналіз безпеки, матриця ризику, система управління цілісністю

Вступ. Сучасні високоефективні діагностичні засоби, наприклад технології внутрішньотрубно́ї діагностики, дозволяють виявити та ідентифікувати тисячі й навіть сотні тисяч дефектів, що контролюються на магістральному трубопроводі. Після проведення внутрішньотрубно́ї діагностики постає питання про класифікацію дефектів за ступенем їх впливу на надійну та безпечну експлуатацію. Необхідно розробити раціональну та обґрунтовану процедуру для проведення покращувальних заходів (ремонт, перегляд регламенту експлуатації тощо), планування наступних інспекцій (із визначенням їх термінів та об'ємів), виділити ділянки, які необхідно відремонтувати в першу чергу. Оскільки в експлуатації залишається значна кількість дефектів, які можуть кваліфікуватись як допустимі, говорити про абсолютну надійність такої конструкції мабуть не доречно. За таких обставин конструкція буде завжди мати певну ймовірність руйнування. У свою чергу ймовірність руйнування слід розглядати в поєднанні з такою важливою характеристикою, як наслідки руйнування, що вимагають експертних оцінок. Очевидно, що за однієї й тієї ж ймовірності руйнування наслідки руйнування трубопроводу першого контуру енергоблоку атомної електростанції (АЕС) і трубопроводу нафтопереробного заводу будуть різними. Таким чином, для різних елементів конструкцій в рамках розгляду одного об'єкту слід оперувати різними рівнями надійності. Добуток ймовірності руйнування на показник наслідків руйнування визначає ризик, що може викорис-

товуватись як універсальне мірило надійності та ефективності експлуатації об'єкта.

Імовірнісний ризик-аналіз, як правило, виконується для потенційно небезпечних виробництв, хімічних і техногенно-небезпечних технологічних процесів, для оцінок надійності атомних електростанцій та їх обладнання, а також в аерокосмічній галузі. Є дві причини, які дещо стримують впровадження ідеології ризик-аналізу: по-перше, низка факторів, що може викликати відмову або аварію, є настільки широкою, що вимагає комп'ютерної паспортизації об'єктів, кваліфікованої обробки статистичного матеріалу та оперування різними законами розподілу випадкових величин для отримання достовірних оціночних даних надійності, і, по-друге, більшість покращувальних заходів, спрямованих на підвищення безпеки об'єкту, що ґрунтуються на застарілих методах діагностики, можуть бути ефективними й без знання істинного ризику, пов'язаного з експлуатацією об'єкта. Останній підхід має право на існування, але він повинен бути методичною складовою загальнішої стратегії управління надійністю та ефективністю (у тому числі економічною) відповідальних об'єктів з досить переконливим обґрунтуванням їх використання.

Значна активність, що спостерігається в світі в галузі забезпечення надійності технічних систем і впровадження ідеології ризик-аналізу [1], викликана, з одного боку, конкуренцією – оптимізацією технологічного процесу в бік зменшення його затратності, а з іншого – жорсткішими правилами безпеки, що встановлюються державними контро-

Тороп В.М. <https://orcid.org/0000-0002-8807-9811>

© В.М. Тороп, 2024

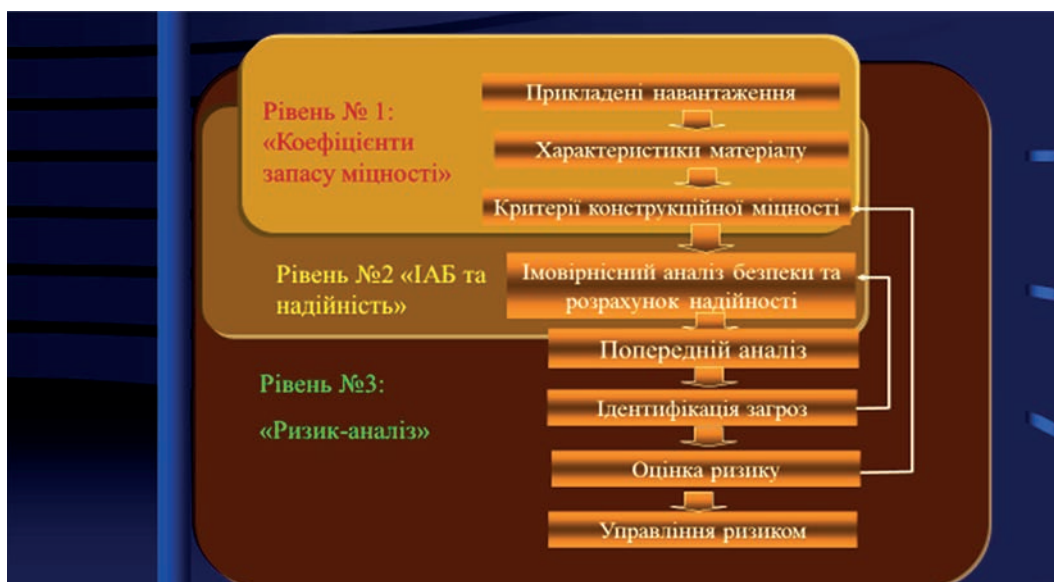


Рис. 1. Сучасні рівні оцінки показників конструкційної міцності, надійності та довговічності зварних металоконструкцій

люючими органами (регулятором, наприклад Державною інспекцією з ядерної та радіаційної безпеки України, Держгірпромнаглядом тощо).

З вищерозглянутого випливає, що в загальному випадку необхідно користуватися трирівневим підходом до оцінки показників конструкційної міцності, надійності та довговічності зварних металоконструкцій: посудин тиску, мостів, балонів, резервуарів, трубопроводів і т. і. (рис. 1).

Рівень 1 використовує критерії граничного стану зварних металоконструкцій на основі коефіцієнтів запасу міцності (КЗМ) і передбачає формулювання та використання традиційних детерміністичних показників конструкційної міцності з визначенням критеріїв граничного стану при крихкому, квазікрихкому та в'язкому руйнуванні. На цьому рівні ми рекомендуємо використовувати двокритеріальний підхід, а саме двокритеріальну діаграму оцінки руйнування (ДОР) та її розгортки [2]. На рис. 2, а наведено модифіковану ДОР, гранична крива якої використовується як критерій руйнування магістральних трубопроводів з дефектами [3]. Особливістю запропонованої нами ДОР та її температурно-навантажувальної розгортки (рис. 2, б) є використання в явному вигляді точки T_x – критичної температури крихкості (КТК), що відмежовує зону крихких руйнувань від квазікрихких та однозначно визначається координатами точки Б на ДОР у наступний спосіб: $B(1; \xi = 0,8 P_n^T / P_n^B)$ (рис. 2, а). Абсциса точки квазікрихко-в'язкого переходу В, що відповідає T_B – температурі в'язкості, на рис. 2, б визначається з умови досягнення руйнівним навантаженням граничного значення P_n^B . Ордината точки В за наявними експериментальними даними відповідає значенню $\mu = \frac{K_I}{K_{IC}} \approx 0,6...0,7$. Як видно з рис. 2, а,

при $K_r = \frac{K_I}{K_{IC}} < \mu$ реалізується критерій в'язкого руйнування: $S_r = 1$ або $P = P_n^B$, де P – узагальнене прикладене до ЕКЗТ навантаження.

ДОР, яка у загальному випадку являє собою деяку граничну область II, відокремлює область безпечної експлуатації елемента конструкції з тріщиною (ЕКЗТ) I за допомогою використання допустимих КЗМ k , від області руйнування III. В області II виділимо граничну лінію АБВГ для того, щоб, по-перше, спростити та виконати інженерну оцінку граничного стану елемента конструкції з тріщиною, по-друге, мати можливість прогнозувати крихкий (промінь 01 перетинає ділянку АБ граничної лінії ДОР на рис. 2, а), квазікрихкий або змішаний (промінь 02 перетинає ділянку БВ граничної лінії ДОР на рис. 2, а) та в'язкий (промінь 03 перетинає ділянку ВГ граничної лінії ДОР на рис. 2, а) характер руйнування.

Зеленим кольором на рис. 2, а виділено допустимо область I експлуатації ЕКЗТ, що визначається з урахуванням допустимого КЗМ k . Допустимий КЗМ за критерієм статичної міцності є нормованою величиною, що регламентується стандартами, нормами, правилами, нормативно-технічною документацією тощо. Так, для відповідального обладнання АЕС [4] $k = 2,5$, а для магістральних трубопроводів k встановлюється у відповідності до СНиП 2.05.06-85 [5]:

$$k = \frac{0,9 \cdot k_1 \cdot k_H}{m} \quad (1)$$

де m – коефіцієнт умов роботи; k_1 – коефіцієнт надійності за матеріалом; k_H – коефіцієнт надійності за призначенням.

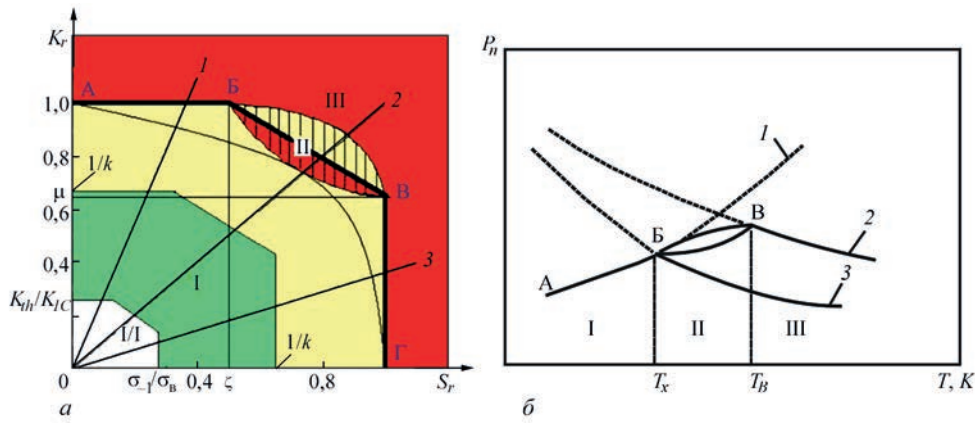


Рис. 2. Двокритеріальна ДОР (а): $S_r = \frac{P_1}{P_n^B} \cdot \xi = 0,8 \frac{P_n^T}{P_n^B}$ та її навантажувально-температурна розгортка (б): 1 – $P_n^X(K_{1C})$; 2 – $P_n^B(\sigma_B)$; 3 – $P_n^T(\sigma_T)$

Жовтим кольором на рис. 2, а виділено зону дії КЗМ II, що вимагає застосування відповідних покращувальних заходів щодо можливості подальшої безпечної експлуатації даного ЕКЗТ і відповідає субкритичному контрольованому підростанню тріщини, а червоним – недопустиму зону III експлуатації ЕКЗТ.

Білим кольором на рис. 2, а виділено область «шумів» IV, що визначається координатами

$$K_r = \frac{K_{th}}{K_{1N}} \text{ та } S_r = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B}, \text{ де } K_{th} - \text{порогове значення}$$

коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) при циклічному навантаженні; σ_{-1} – границя втоми. Ця область відповідає стадії зародження та розвитку дефектів за механізмом втоми до розмірів, що контролюються законами механіки руйнування.

Рівень 2 імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ) та надійності передбачає формулювання та оцінку значень імовірнісних показників $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ у вигляді математичного очікування $M(F, [R])$ та середньоквадратичного відхилення $C(F, [R])$ узагальненого стохастичного навантаження (прикладені навантаження), розкиду замірів геометрії конструктивних елементів та інтерпретації (схематизація, класифікація, опис геометрії та місця залягання) дефектів, що виявляються засобами неруйнівного контролю та розкиду експериментальних даних механічних властивостей і характеристик тріщиностійкості матеріалів та їх зварних з'єднань.

У загальному випадку функція граничного стану металоконструкції $g(\bar{x})$ може бути виражена у вигляді:

$$g(\bar{x}) = [R] - F(\bar{x}), \quad (2)$$

де $[R]$ – узагальнений стохастичний опір руйнуванню, що характеризується допустимими параметрами, які визначаються механічними властивостями та характеристиками тріщиностійкості з урахуванням нормованих коефіцієнтів запасу міцності (КЗМ); $F(\bar{x})$ – максимальні, еквівалент-

ні щодо вибраних критеріїв міцності, стохастичні параметри напруженого стану конструкції, що встановлені за допомогою побудови розрахункової моделі та аналізу невизначеності.

Тоді ймовірність руйнування металоконструкції, як ілюструє рис. 3, обчислюється рівнянням:

$$P_f = \int_{g(x) \leq 0} f_{[R], F(\bar{x})}([R], F(\bar{x})) dR dF(\bar{x}) \quad (3)$$

У якості інтегральної функції для показників надійності експлуатації металоконструкцій RN^* можуть виступати [9, 10]:

- математичне очікування та середньоквадратичне відхилення відповідних показників надійності металоконструкції ($M(F, [R])$ і $C(F, [R])$ відповідно);

- імовірність того, що значення відповідного показника надійності R не буде нижче заданого (нормативного) значення R_3 . Позначимо цей імовірнісний показник як $P(R \geq R_3)$

У залежності від цілей дослідження та задач, що вирішуються на основних етапах життєвого циклу елементів конструкцій (проектування, будівництво (ремонт) або експлуатація [7]), на кожний з розглянутих показників $M(F, [R])$, $C(F, [R])$, $P(R \geq R_3)$ можуть бути накладені умови оптимальності або придатності, які ще називають критерієм «придатність за призначенням» [11]. Так, для

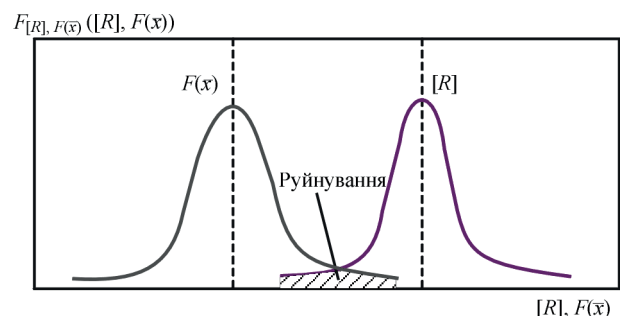


Рис. 3. Імовірність руйнування P_f , що визначається областю перетинання параметрів напруженого стану конструкції $F(\bar{x})$ з узагальненим стохастичним опором руйнуванню $[R]$

показника $P(R \geq R_3)$ критерій придатності за призначенням має вигляд:

$$P(R \geq R_3) \geq P_r \quad (4)$$

де P_r – гарантована ймовірність того, що значення відповідного показника надійності R не буде нижче нормативного значення R_3 .

В основу побудови алгоритма імітаційної моделі руйнування металоконструкції нами покладено непрямий метод статистичного ймовірнісного моделювання (метод Монте-Карло [8]), що складається з наступних кроків:

1. Відповідно до відомих законів розподілу $f_i(x_i)$ згенерувати вибірку із реалізацій N : $\overline{XN}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)_i, i = \overline{1, N}$ випадкових величин $x_1, x_2, \dots, x_n$, що належать заданій області значень (параметрів, характеристик).

2. Сформульовані реалізації $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)_i, i = \overline{1, N}$, підставити в (2) і отримати відповідну вибірку реалізацій показників надійності $F, [R]$: $RN^* = (F_p[R]_i, i = \overline{1, N})$.

3. На основі вибірки реалізацій показників надійності $RN^* = (F_p[R]_i, i = \overline{1, N})$ отримати вибірку оцінювальних значень відповідних імовірнісних показників надійності $(M^*(F, [R]), C^*(F, [R]), P^*(R \geq R_3), \dots)_i, i = \overline{1, N}$.

4. На основі вибірки оцінювальних значень відповідних імовірнісних показників надійності $(M^*(F, [R]), C^*(F, [R]), P^*(R \geq R_3), \dots)_i, i = \overline{1, N}$ зробити висновки щодо конструкційної міцності та істинності значень цих показників.

Реалізація першого кроку спирається на стандартні методи моделювання випадкових величин і векторів з використанням алгоритмічних датчиків випадкових величин [8].

Особливу увагу на другому кроці слід звернути на використання коректної детерміністичної моделі (критерію) руйнування. Ми використовуємо двокритеріальний підхід [2] та розроблені на його основі двокритеріальні діаграми оцінки руйнування.

Реалізація третього кроку заснована на отриманні точкових оцінок імовірнісних показників надійності $(M^*(F, [R]), C^*(F, [R]), P^*(R \geq R_3), \dots)_i, i = \overline{1, N}$ за допомогою вибірки реалізацій детермінованих показників $RN^* = (F_p[R]_i, i = \overline{1, N})$. Точкові значення оцінок перших двох показників (математичного очікування та середньоквадратичного відхилення) визначаються наступним чином:

$$M^*(F, [R]) = \sum_{i=1}^j \frac{(F, [R])}{j}, j = \overline{1, N} \quad (5)$$

$$C(F, [R]) = \sqrt{D(F, [R])}, j = \overline{1, N} \quad (6)$$

де $D(F, [R])_j$ – оцінка дисперсії вибірових значень:

$$D(F, [R])_j = \sum_{i=1}^j \frac{(F, [R]) - M^*(F, [R])}{j}, j = \overline{1, N} \quad (7)$$

Прикладом реалізації рівня 2 для магістральних нафто-, газопроводів може слугувати міжнародний стандарт ISO 16708:2006 [6]. У граничних станах, коли конструкція зазнає додаткових навантажень або втрати якості та порушує стандарти безпеки відповідно до детерміністичного підходу, сам детерміністичний підхід більше не може бути застосований для визначення того, чи є конструкція все ще достатньо безпечною. Граничними станами в цьому контексті є, наприклад, старіння матеріалу, значна корозія та додаткові навантаження, не враховані в початковому проекті.

У цьому випадку можна застосувати ймовірнісний підхід, розраховуючи частоту відмов конструкції. Він був введений приблизно 20 років тому при проектуванні конструкцій. Порівняно з детерміністичним підходом розрахунок частоти відмов є складним процесом. Проблемою є встановлення загальноприйнятих обмежень для частоти відмов.

Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) працювала над цим питанням протягом багатьох років і стандарт ISO 16708 «Нафтова та газова промисловість – Системи трубопроводного транспорту – Методи граничного стану, засновані на надійності» [6] часто змінювався в статусі проекту протягом тривалого періоду часу. У 2006 р. він був прийнятий як DIN EN ISO 16708 в якості національного стандарту Німеччини.

Сфера застосування стандарту DIN EN ISO 16708 дозволяє використовувати детерміністичний та ймовірнісний підхід паралельно. Стандарт має високий рівень визнання серед органів влади, експертів і спеціалістів-інженерів.

У сучасній практиці забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд використовується ДБН В.1.2-14:2018 [11], що застосовується при вишукуванні, проектуванні, будівництві та ліквідації будівель і споруд незалежно від їх призначення. Таким чином, рівень 2 ІАБ та надійності застосовується для складних питань невизначностей при створенні баз даних «Об'єкти», «Дефекти», «Навантаження», «Властивості», що необхідні для побудови розрахункової моделі, ідентифікації потенційно небезпечних перерізів зварної металоконструкції та оцінки конструкційної міцності з використанням двокритеріального підходу на основі методу Монте-Карло [8–10].

Рівень 3. На цьому рівні необхідно формулювати та оцінювати вищерозглянуті ймовірнісні

показники конструкційної міцності, надійності та довговічності з гарантованим або довірчим рівнем, що враховують наслідки руйнування [10, 12].

Вибір того або іншого рівня оцінки показників конструкційної міцності, надійності та довговічності елементів конструкції буде залежати від таких основних чинників, як: важливість конструкції, що оцінюється; етап її життєвого циклу, що розглядається; початкові дані, що використовуються для отримання відповідних оцінок показників і рівень довіри до них.

Для впровадження методології оцінки ризику експлуатації зварних металоконструкцій перш за все треба розробити програму оцінки ризику. Оператор повинен взяти до уваги всі особливості своєї металоконструкції, що працює в певній системі (наприклад, енергоблок атомної електростанції слід розглядати в якості такої системи тощо) та визначитись, який з підходів є найприйнятнішим. Основна мета оцінки ризику полягає в ідентифікації найбільших ризиків в системі так, щоб оператор міг вирішити, як, де і коли здійснити ремонтні та покращувальні заходи, щоб це найефективніше підвищило цілісність металоконструкції вказаної системи. Оператор повинен вирішити, яка інформація може бути корисною для виконання оцінки та як ця інформація має бути застосована, щоб точність і ефективність оцінок були максимальними. Спрощену схему виконання ризик-аналізу показано на рис. 4 [12, 13].

Очевидно, що ризик-аналіз включає в собі три принципові складові – аналіз ризику, що розглядає та аналізує можливість аварій (руйнувань) з їх наслідками; оцінка ризику, що співставляє отриманий ризик з існуючими критеріями його допу-

стимості; управління ризиком, що передбачає та формулює заходи зі зменшення ризику.

Обґрунтована методологія оцінки ризику повинна бути:

Структурованою. Процедури оцінки ризику зазвичай використовують вхідні дані систем моніторингу технічного стану (датчиків, контролерів тощо) або ж формулюються експертами в галузі оцінки міцності, захисту від корозії, зварювання, технологічних процесів виробництва тощо. Проте всі методи оцінки ризику визначають і використовують логічні схеми для того, щоб визначити, як дані, що розглядаються, впливають на ризик у термінах імовірності виникнення аварії чи її потенційних наслідків.

Забезпеченою достатніми ресурсами. Має бути виділено достатнє число персоналу і адекватний час для того, щоб успішно виконати всі етапи та деталізувати аналіз ризику.

Базованою на реальному досвіді. Повинні розглядатись частота і тяжкість наслідків минулих подій (на даній чи подібній зварній металоконструкції), а також розуміння та врахування всіх покращувальних заходів, що мали місце для попередження подібних ситуацій. Методи оцінки ризику повинні враховувати специфічну історію функціонування даної зварної металоконструкції.

Передбачувальною. За своєю природою процедура повинна бути дослідницькою, тобто вона повинна ідентифікувати попередньо не враховані загрози цілісності зварної металоконструкції, мають розглядатись сценарії аварій, які ніколи раніше не відбувались на даній металоконструкції.

Використовувати адекватні дані. Деякі рішення ризик-аналізу є просто суб'єктивними експертними судженнями. Тому адекватні вхідні дані систем моніторингу технічного стану металоконструкції є просто необхідними для прийняття об'єктивніших рішень і оцінок.

Здатною до впровадження зворотного зв'язку. Ризик-аналіз є інтерактивним процесом. Реальні події та вихідні дані щодо стану зварної металоконструкції повинні використовуватись для підтвердження або корекції зроблених припущень.

Перші кроки в процесі оцінки ризику. Загальноприйнятий початок процесу оцінки полягає в утворенні представницької групи експертів компанії для ідентифікації подій чи умов (аналізу ризиків), що можуть призвести до руйнування даної металоконструкції, для оцінки наслідків аварій, а також для визначення заходів, що зменшують ризик для даної металоконструкції. Ця група має включати представників із відділів управління, експлуатації, служби контролю металу, корозії, безпеки, інженерів з будівництва, представників регулятора (наглядових) органів і т.д. Головна

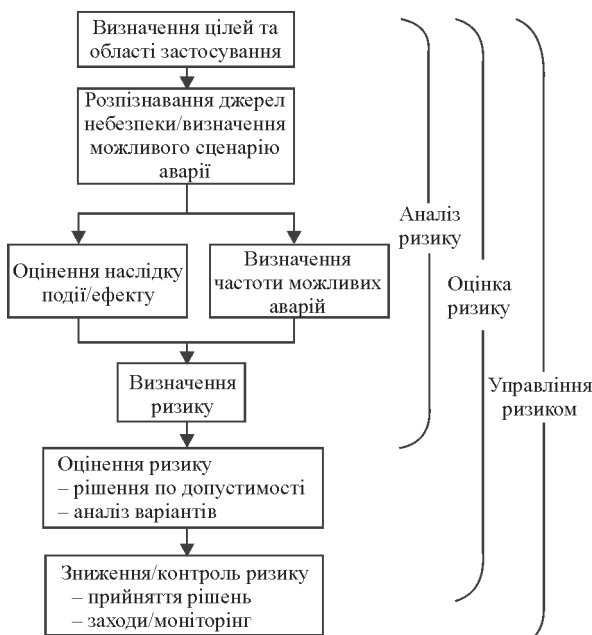


Рис. 4. Спрощена схема ризик-аналізу

мета цієї групи полягає в тому, щоб окреслити та вмонтувати в метод оцінки ризику досвід різних груп експертів так, щоб ці методи могли використовувати досвід та інформацію, які поки що не враховані в базах даних системи управління цілісності (СУЦ) [1, 7, 13, 14].

Для проведення систематичного та повного дослідження можуть використовуватись наступні загальноприйняті методи:

- вільний за формою метод «мозкового штурму» для аналізу потенційних ризиків;
- виконання посегментного аналізу (ділянка за ділянкою) металоконструкції з використанням геоінформаційних систем;
- використання списку структурованих питань, які належать до повного списку можливих загроз і проблем цілісності металоконструкції;
- застосування простих матриць ризику, що в якості прикладу наведені на рис. 5, для якісного опису ймовірності та наслідків можливих подій [1, 13].

Основні компоненти методології оцінки ризику. Оцінка ризику – це процес комбінування оцінок частоти та наслідків аварій в єдину величину ризику. Величина ризику може бути кількісною, якісною чи комбінацією двох у залежності від процедури оцінки чи мети, яку ставить собі оператор при розробці СУЦ [1, 7, 13, 14]. Чутливість і точність методів оцінки ризику є функцією числа змінних, що використовуються, і здатністю визначати зміну ризику вздовж координат зварної металоконструкції.

Деякі методи вимагають від користувача оцінювати ризик на окремих ділянках металоконструкції, використовуючи однорідні характеристики, у той час як інші враховують локальні ефекти зміни умов функціонування. Наприклад, стосовно магістральних трубопроводів це можуть бути значення показників катодного захисту, наявність дефектів, кількість діагностичних аномалій, меха-

нізми руйнування тощо. У багатьох методах ймовірність події оцінюється з використанням змінних величин і показників, що відносяться до:

- зовнішньої корозії;
 - внутрішньої корозії;
 - пошкодження третіми сторонами;
 - зрушення ґрунту (зсуви, просідання, підробітки ґрунту у районах шахт та ін.);
 - проєктні умови та характеристики матеріалу;
 - функціонування металоконструкції в системі.
- Наслідки оцінюються за допомогою змінних, що відносяться до категорій:

- вплив на оточуюче середовище;
- вплив на населення;
- економічні наслідки.

Чим більше таких змінних використовується, тим кількіснішим є аналіз. Точність кількісного аналізу поглиблюється з подальшою специфікацією змінних (ефект взаємодії з опорами, фундаментом, тип ґрунту, вік (старіння) металоконструкції, якість захисного покриття тощо).

Валідація та ідентифікація ризиків. Незалежно від процесу виконання оцінки ризиків оператор повинен проаналізувати вихідну інформацію, щоб гарантувати, що прийнята методологія дає результати, які загалом відповідають меті аналізу. Це може бути досягнуто за допомогою або спеціаліста з ризик-аналізу, що має досвід в аналізі аналогічних систем, або різнопланової команди спеціалістів з функціонування аналогічних об'єктів діагностики. Якщо отримані результати не відповідають уявленням оператора з реального ризику, він повинен вивчити причини цих розбіжностей і в разі потреби піддати ревізії методи, вхідні допущення або дані.

Після проведення валідації методів оцінки ризику оператор має необхідну інформацію для ранжування ризиків. Сегмент з більшим ступенем ризику повинен отримати більшу пріоритетність при визначенні місць, де слід проводити покращувальні заходи (першочерговість діагностики, ремонту тощо). Щоб зменшити загальний ризик, оператор спочатку має проаналізувати причини появи великого ризику на цьому сегменті. Це може бути викликано або великою ймовірністю події (руйнування), або значними наслідками. Ця інформація є важливою для прийняття рішень щодо об'єму і переліку покращувальних заходів.

Контроль ризику та покращувальні заходи. Методи оцінки ризику є важливим інструментом підтримки оператора для прийняття економічно та технічно обґрунтованих рішень щодо зменшення ризиків їхніх систем. Як тільки ідентифіковано потенціальний ризик і визначено засоби з його зменшення, методи оцінки ризику можуть бути повторно застосовані для визначення вели-

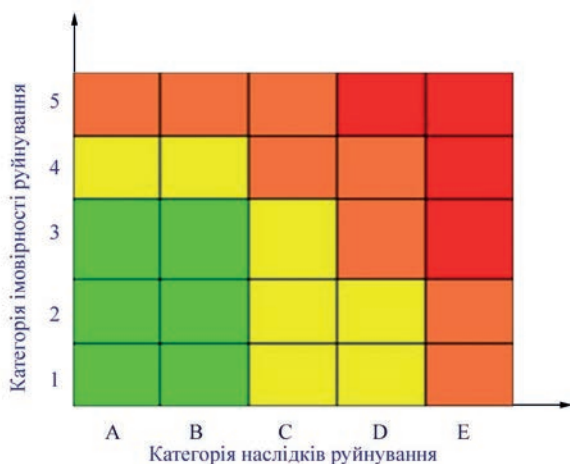


Рис. 5. Матриця ризику [1, 13]

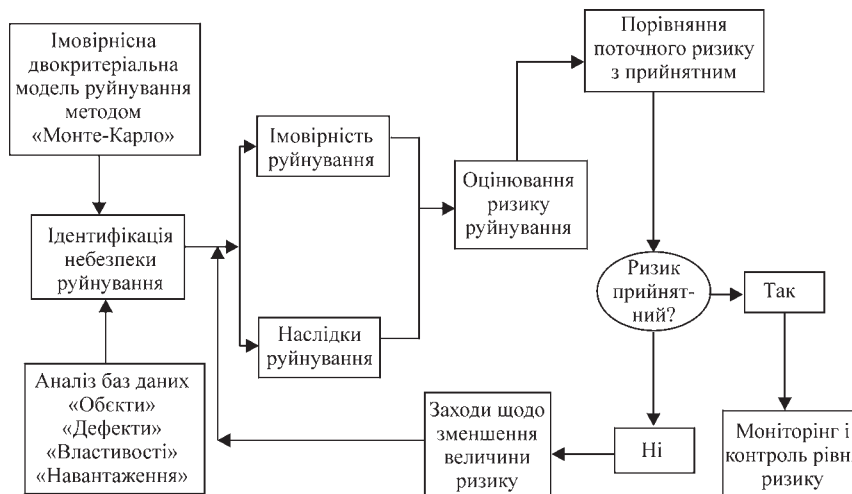


Рис. 6. Алгоритм впровадження методології оцінки ризику зварних металоконструкцій

чин зменшення ризику та отримання матеріальної вигоди. Ці методи можуть постійно застосовуватись при оцінці доцільності пропонованих покращувальних заходів. У комбінації з аналізом затрат на впровадження цих заходів ризик-аналіз дозволяє компанії вибрати найефективніші заходи, що можуть бути застосовані в даний період.

На рис. 6 представлено алгоритм впровадження методології оцінки ризику зварних металоконструкцій, що реалізований нами за допомогою програмно-методичного комплексу (ПМК) «Імовірнісний ризик-аналіз» експертної системи (ЕС) «Міцність» [7, 12].

Висновки

1. Розглянуто три рівні оцінки показників конструкційної міцності, надійності та довговічності зварних металоконструкцій для побудови системи управління цілісністю, в яких використовується двокритеріальна діаграма оцінки руйнування.

2. Запропоновано алгоритм впровадження методології оцінки ризику на основі системи управління цілісністю зварних металоконструкцій.

Список літератури

1. Тороп В.М. (2024) Сучасний стан впровадження методології ризик-аналізу в Україні. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 41–46. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.02.06>
2. Красовский А.Я., Красико В.Н., Тороп В.М., Орыняк И.В. (1987) Оценка предельной несущей способности тела с трещиной и определение температур хрупко-вязкого перехода в металлах. *Пробл. прочности*, 12, 8–13.
3. ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 *Магістральні трубопроводи. Настанови. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами*.
4. (1989) ПНАЭ Г-7-002-86 *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*.
5. (1985) СНиП 2.05.06-85 *Магистральные трубопроводы. Строительные нормы и правила*.
6. ISO 16708:2006 *Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Reliability-based limit state methods*.
7. Torop, V.M. (1994) Decision support systems for strength accompaniment of the safe operation of NPP Equipment. In:

Proc. Third Int. Conf. on Material Science Problems in NPP Equipment Production and Operation, ST. Petersburg, 17–22 June 1994, 3, 740–750.

8. (1951) *Monte Carlo Method*. Applied Mathematics Series, Vol. 12, National Bureau of Standards, Washington D.C.
9. Тороп В.М. (2005) Імовірнісний ризик-аналіз експлуатації трубопроводних систем, резервуарів та посудин тиску. Повідомлення 1. Основні підходи до побудови імовірнісних моделей. *Пробл. прочности*, 2, 85–91. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-005-0030-1>
10. Тороп В.М. (2005) Імовірнісний ризик-аналіз експлуатації трубопроводних систем, резервуарів та посудин тиску. Повідомлення 2. Метод оцінки функціональної придатності елемента конструкції за обмеженими статистичними даними. *Пробл. прочности*, 3, 96–103. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-005-0042-x>
11. ДБН В.1.2-14:2018 *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд*.
12. Тороп В.М., Тороп О.В. (2004) Реализация риск-анализа в системе обеспечения целостности магистральных трубопроводов. *14-я международная деловая встреча «Диагностика 2004»*, Москва, сс. 81–85.
13. (2016) *Risk based Inspection Technology Codes API 581 Ninth Edition*. American Petroleum Institute (API), Washington, D.C, API Publishing Services.
14. ДСТУ ISO 31000:2014 *Менеджмент ризиків. Принципи та керівні вказівки*. Нова версія від 2018 р. ДСТУ ISO 31000:2018 *Менеджмент ризиків. Принципи та настанови* (ISO 31000:2018, IDT) https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80322

References

1. Torop, V.M. (2024) Practice of implementing the methodology of risk analysis of the operation of welded metal structures in Ukraine. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 2, 41–46. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.02.06> [in Ukrainian].
2. Krasovsky, A. Ya., Krasnyko, V.N., Torop, V.M., Orynyak, I.V. (1987) Estimation of the ultimate bearing capacity of a body with a crack and determination of brittle-viscous transition temperatures in metals. *Problemy Prochnosti*, 12, 8–13 [in Russian].
3. DSTU-N B V.2.3-21:2008 *Main pipelines. Directive. Determination of the residual strength of main pipelines with defects* [in Ukrainian].
4. (1989) PNAE G-7-002-86 *Norms of strength analysis of equipment and pipelines of nuclear power plants* [in Russian].
5. (1985) SNiP 2.05.06-85 *Main pipelines. Building regulations* [in Russian].
6. ISO 16708:2006 *Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Reliability-based limit state methods*.

7. Torop, V.M. (1994) Decision support systems for strength accompaniment of the safe operation of NPP equipment. *In: Proc. of Third Int. Conf. on Material Science Problems in NPP Equipment Production and Operation*, St-Petersburg, 17–22 June 1994, Vol. 3, 740–750.

8. (1951) *Monte Carlo Method*. Applied Mathematics Series, Vol. 12, National Bureau of Standards, Washington D.C.

9. Torop, V.M. (2005) Probability hazard analysis of the operation of pipeline systems, tanks, and pressure vessels. Part 1. Algorithm of construction of the probability model. *Strength of Mater.*, **37**, 174–179. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-005-0030-1>.

10. Torop, V.M. (2005) Probability hazard analysis of the operation of pipeline systems, tanks, and pressure vessels. Part 2. Method for the evaluation of the functional fitness of a structural element according to the restricted statistical data. *Strength of Mater.*, **37**, 298–303. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-005-0042-x>.

11. DBN V.1.2-14:2018 *The fundamental principles of ensuring reliability and constructive safety of life and disputes*.

12. Torop, V.M., Torop, O.V. (2004) Implementation of risk analysis in the system of ensuring the integrity of main pipelines. *In: 14th Int. Business Meeting on Diagnostics 2004*, Moscow, 81–85 [in Russian].

13. (2016) *Risk based Inspection Technology Codes API 581 Ninth Edition*. API, Washington, D.C, API Publ. Services.

14. DSTU ISO 31000:2014 *Risk management. Principles and guidelines*. New version from 2018. https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80322 [in Ukrainian].

MODERN LEVELS OF STRUCTURAL STRENGTH ASSESSMENT AND THE ALGORITHM OF IMPLEMENTATION OF THE METHODOLOGY OF RISK ANALYSIS OF THE OPERATION OF WELDED METAL STRUCTURES

V.M. Torop

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: v.torop@gmail.com

Three levels of assessment of indicators of structural strength, reliability and durability of welded metal structures are considered for the construction of a system for managing the integrity of welded metal structures. Level 1 uses the criteria of the limit state of welded metal structures based on safety margin factors and is implemented by us using a failure assessment diagram. Level 2 of probabilistic analysis of safety and reliability involves the formulation and evaluation of the values of probabilistic indicators used to assess the structural strength, reliability and durability of welded metal structures in the presence of uncertainty and lack of completeness of input data. For level 3 of the risk analysis of the operation of welded metal structures, an algorithm for its implementation is proposed and an implementation option in the form of an integrity management system is prescribed. The failure assessment diagram of damage assessment is the basis of the implementation of all three levels. 14 Ref., 6 Fig.

Keywords: risk, probability of destruction, consequences, failure assessment diagram of destruction assessment, probabilistic safety analysis, risk matrix, integrity management system

Отримано 02.05.2024
Отримано у переглянутому вигляді 27.06.2024
Прийнято 06.09.2024

ПЕРЕДПЛАТА 2025

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.				
	місяць	два місяця	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 3041-2374 (Print). ISSN 3041-234X (Online). Передплатний індекс 70031	–	300	–	900	1800
«Сучасна електрометалургія», видається з 1975 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-238 (Print). ISSN 3041-2331 (Online). Передплатний індекс 70693	–	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-2366 (Print). ISSN 3041-2358 (Online). Передплатний індекс 74475	–	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X (Print). ISSN 3041-2293 (Online). Передплатний індекс 21971.	600	1200	1800	3600	7200

*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», «Прес Центр», «Меркурій» 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.

На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2023 рр.

Адреса видавництва
Міжнародна Асоціація «Зварювання»
03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Тел.: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com