

ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗВАНТАЖЕННЯ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ АЕС З ДЕФЕКТОМ СТОНШЕННЯ СТІНКИ ПРИ ВСТАНОВЛЕНІ БАНДАЖУ АБО ЗВАРНОЇ МУФТИ

Г.В. Ворона, О.В. Махненко, О.С. Міленін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

Утворення дефектів ерозійно-корозійного зношення в трубопроводах АЕС є однією з актуальних проблем атомної енергетики. При ремонті трубопроводу вирізають дефектну ділянку і встановлюють за допомогою зварювання нову котушку труби, що є досить трудомістким процесом, потребує зливу рідини, що транспортується. Для продовження ресурсу дефектну ділянку трубопроводу можна підсилувати встановленням ремонтної конструкції, наприклад, бандажу або зварної муфти. З метою обґрунтування доцільності використання при ремонті трубопроводу підсилюючих конструкцій проведено скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом ерозійно-корозійного зношення під дією внутрішнього тиску, а також оцінку ефективності розвантаження дефектної ділянки у випадку використання при ремонті підсилюючої конструкції типу бандажа або зварної муфти. Результати аналізу показали високу ефективність використання таких конструкцій. Отримані результати можуть бути використані при обґрунтуванні впровадження на АЕС України альтернативних технологій ремонту трубопроводів, переважно технологічних, особливо в тих випадках, коли ремонт традиційними способами не є можливим або доцільним за технічними або економічними причинами. Бібліогр. 18, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: АЕС, трубопровід, ерозійно-корозійний знос, дефект стоншення стінки, підсилююча конструкція, бандаж, муфта, напружено-деформований стан, в'язке руйнування, метод скінченних елементів

Вступ. Утворення дефектів ерозійно-корозійного зношення (ЕКЗ) в трубопроводах атомних електростанцій (АЕС) є однією з актуальних проблем атомної енергетики [1, 2]. Ерозійно-корозійне зношення являє собою поєднання двох процесів – механічного зношення металу стінки трубопроводу внаслідок дії ерозії та хімічного руйнування внаслідок дії корозії [3–5]. Через комбінацію цих двох явищ відбувається зниження стійкості трубопроводу до навантажень, підвищується схильність до виникнення критичних дефектів та руйнування матеріалу [1, 6, 7].

На практиці у випадку виявлення ЕКЗ дефектну ділянку трубопроводу АЕС вирізають і встановлюють за допомогою зварювання нову котушку труби. Такий ремонт відбувається під час зупинки енергоблоку і при можливості зливу рідини, що транспортується. Існує альтернативна технологія, а саме, для продовження ресурсу дефектну ділянку трубопроводу можна підсилувати встановленням ремонтної конструкції, наприклад, бандажем або зварною муфтою [8, 9, 10, 15]. Бандажування трубопроводу – це підсилення по периметру його стінки металевими кільцями, стрічкою, дротом або неметалевими матеріалами. Можливі варіанти за способом встановлення бандажу у варіанті металевих кілець на дефектну ділянку трубопроводу зображені на рис. 1. Встановлення зварної муфти (рис. 2) використовується

для зміцнення дефектної ділянки та усунення витoku шляхом герметизації підсилюючої конструкції зварними швами. Ремонт із встановленням муфти або бандажу може бути доцільним, оскільки є менш трудомістким, ніж заміна цілої ділянки, не потребує зливу рідини із трубопроводу та може виконуватись навіть під час роботи енергоблоку.

Бандаж відрізняється від муфти тим, що встановлюється на трубопроводі без приварювання до несучої труби. Він забезпечує посилення дефектної ділянки та за потреби може бути досить легко демонтований для проведення капітального ремонту трубопроводу. Також бандаж може використовуватись багаторазово. Використання бандажу доцільно лише для тих дефектів, які не втратять герметичність ще за тривалий період експлуатації або як тимчасовий засіб до наступного планового ремонту [9].

Метою роботи є обґрунтування використання альтернативних ремонтних технологій трубопроводів з дефектами ЕКЗ для потреб атомної енергетики, розробка математичних моделей і проведення скінченно-елементного аналізу напружено-деформованого стану (НДС) прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ під дією внутрішнього тиску, а також оцінка ефективності розвантаження дефектної ділянки у випадку використання при ремонті підсилюючої конструкції типу бандажа або зварної муфти.

Ворона Г.В. – <https://orcid.org/0000-0002-9724-3759>, Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>,

Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>

© Г.В. Ворона, О.В. Махненко, О.С. Міленін, 2023

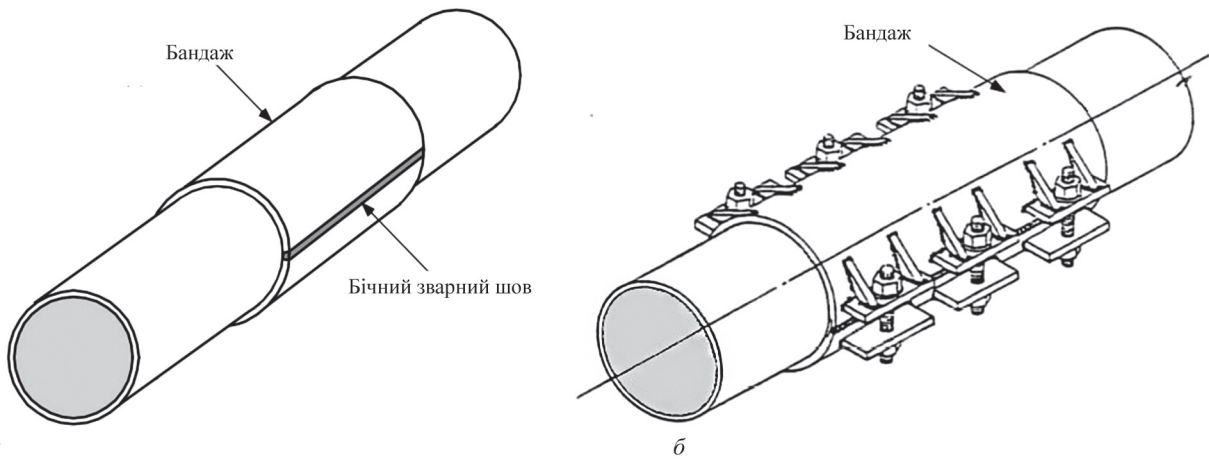


Рис. 1. Види бандажів за способом встановлення: а – зварний; б – на болтових з’єднаннях

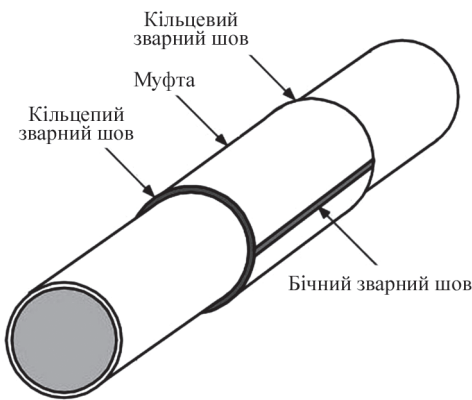


Рис. 2. Підсилення дефектної ділянки трубопроводу зварною муфтою

При оцінці допустимості ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ до подальшої експлуатації граничний стан трубопроводу оцінюється з точки зору в’язкого руйнування, наприклад, за результатами прогнозування інтенсивності пластичних деформацій в зоні дефекту. У роботі методом скінченних елементів досліджувався вплив геометричних параметрів підсилюючої конструкції (товщина, довжина та початковий проміжок між зовнішньою поверхнею трубопроводу та внутрішньою поверхнею підсилюючої конструкції) на роботоздатність прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ.

Постановка задачі. У якості прикладу розглядалася прямолінійна ділянка трубопроводу, яка має стандартні розміри та параметри навантаження для технологічних трубопроводів АЕС (матеріал – сталь 20): зовнішній діаметр $D = 630$ мм, товщина стінки $s = 25$ мм, проектний тиск $P = 11,8$ МПа, температура $T = 300$ °С.

Критичні, тобто недопустимі геометричні параметри дефекту стоншення стінки трубопроводу (рис. 3), визначені згідно з методикою МТ-Т.0.03.224-18 [11, 18], що регламентує процедуру

розрахункової оцінки допустимої товщини елементів трубопроводів АЕС з вуглецевих сталей, що піддаються дії ерозійно-корозійного зносу і яка введена в дію ДП НАЕК «Енергоатом» у 2019 р. Проведено експрес-оцінку допустимості до подальшої експлуатації ділянки трубопроводу з різними геометричними параметрами дефекту ЕКЗ, за результатами якої визначено розміри критичного дефекту стоншення стінки, а саме, ідеалізований дефект ЕКЗ напівеліптичної форми завдовжки $2L = 4s = 100$ мм, завширшки $2h = 2s = 50$ мм, завглибшки $a = 20$ мм (рис. 3).

Розміри підсилюючої конструкції типу бандаж та муфта були вибрані наступними (рис. 4): внутрішній діаметр $D = 630$ мм, напівдовжина $L_b = 630$ мм, товщина $s_b = s = 25$ мм. Геометричні моделі бандажу та зварної муфти відрізняються лише наявністю кільцевих зварних швів приєднання муфти до трубопроводу.

Розробка скінченно-елементної моделі. За вказаними параметрами побудовано геометричну та скінченно-елементну модель прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом стоншення (рис. 3). Враховуючи наявність двох площин, модель включає 1/4 частину даної ділянки трубопроводу з дефектом. Використано наступні механічні властивості матеріалу: модуль Юнга $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$, границя текучості для сталі 20 при температурі $T = 300$ °С, $\sigma_T = 177$ МПа [12]. Аналогічно були створені скінченно-елементні моделі з використанням підсилюючих конструкцій типу бандаж та зварна муфта (рис. 4, 5).

Задача НДС ділянки трубопроводу розглядається в пружно-пластичній постановці, оскільки під дією внутрішнього тиску в зоні дефекту стоншення стінки можливо утворення і розвиток пластичних деформацій. Деформаційне зміцнення матеріалу в розробленій моделі пружно-пластичного деформування не враховується, що робить модель з точки зору визначення пластичних деформацій

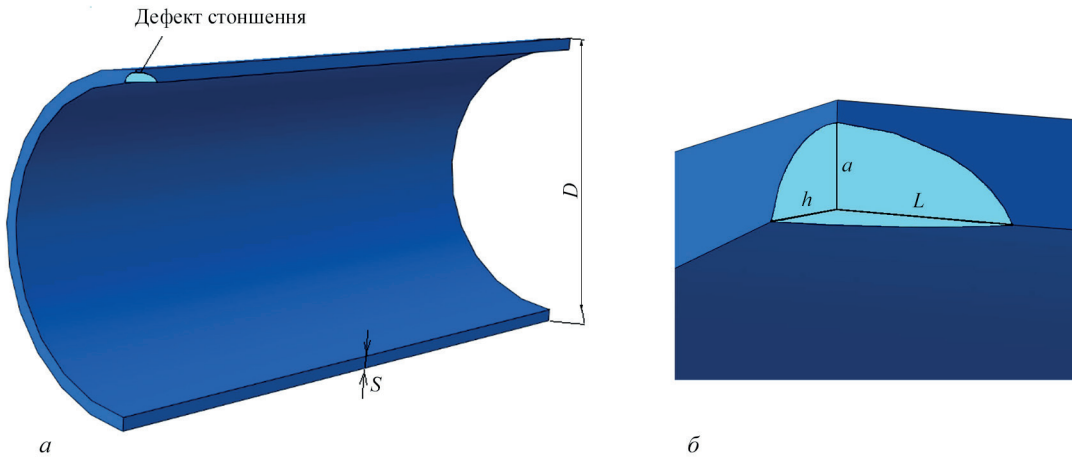


Рис. 3. Геометрична модель 1/4 прямолинійної дефектної ділянки трубопроводу (а) та внутрішнього напівеліптичного дефекту стоншення стінки (б)

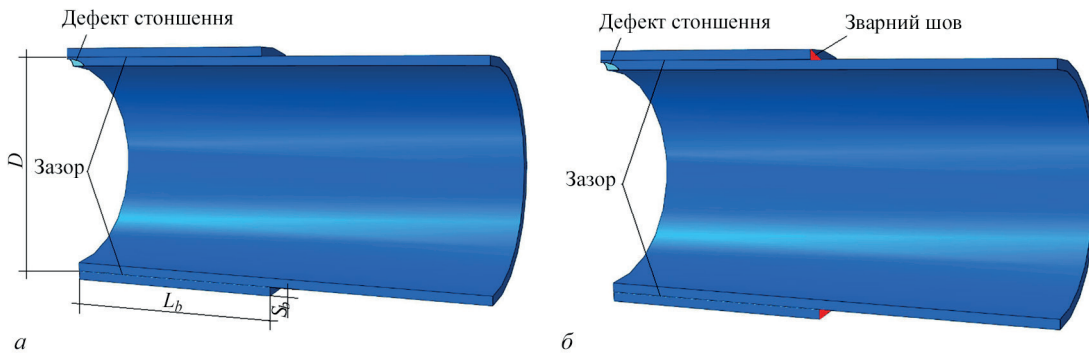


Рис. 4. Геометричні моделі прямолинійної ділянки трубопроводу, підсиленої бандажем (а) або зварною муфтою (б)

цій консервативнішою. На внутрішню поверхню трубопроводу та зону дефекту прикладено проектний тиск $P = 11,8$ МПа. На торцеву поверхню моделі додано граничні умови у вигляді осьових розтягуючих напружень σ_{zz} величиною [14]:

$$\sigma_{zz} = \frac{P \cdot D}{2s} \rightarrow \sigma_{zz} = 72,6 \text{ МПа} \quad (1)$$

Мінімальний розмір скінченного елемента (гексагональний об'ємний елемент) – 3 мм (рис. 5). Модель ділянки трубопроводу з дефектом стоншення стінки складається з 149556 елементів, а модель з використанням ремонтної конструкції – з 213316

елементів. Мінімальний розмір елемента сітки було обрано з умови, що значення максимальної еквівалентної пластичної деформації змінюється менш ніж на 5 % при зменшенні розміру сітки в 2 рази.

Граничний стан типових конструкцій зазвичай визначається складними фізико-механічними явищами, такими як необоротна пластична деформація, тривісність напружень, докритичне пошкодження, взаємодія субкритичних дефектів, зародження та поширення макропошкоджень. Оскільки трубопроводи з виявленими ЕКЗ не характеризуються різкими геометричними концентраторами напружень, руйнування зумовлене в'яз-

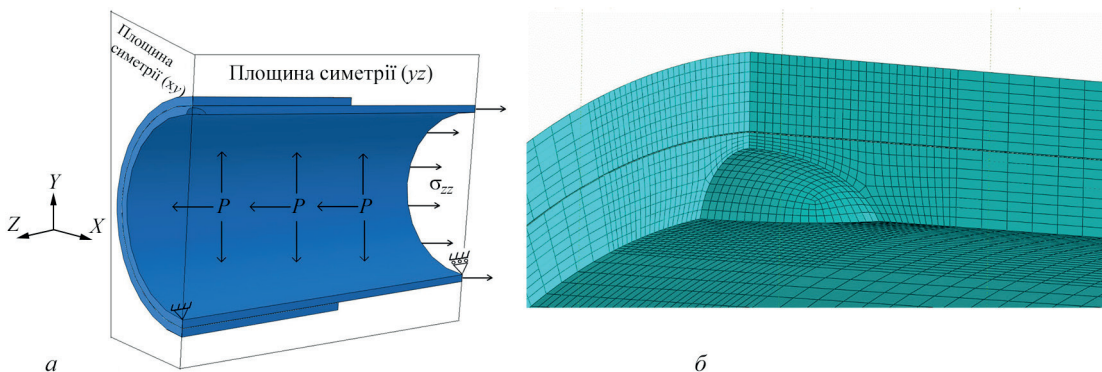


Рис. 5. Скінченно-елементна модель прямолинійної ділянки трубопроводу з дефектом стоншення стінки та підсилюючою конструкцією: а – схема моделі; б – сітка скінчених елементів в зоні дефекту

ким механізмом. Для чисельного прогнозування критичного стану за механізмом в'язкого руйнування в матеріалі трубопроводу під внутрішнім тиском з ерозійною-корозійною втратою металу може бути використаний деформаційний критерій [13]:

$$\int \frac{d\varepsilon_i^p}{\varepsilon_c} > 1, \quad (2)$$

де $d\varepsilon_i^p$ – приріст інтенсивності пластичних деформацій,

$$d\varepsilon_i^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_{xx}^p - d\varepsilon_{yy}^p)^2 + (d\varepsilon_{yy}^p - d\varepsilon_{zz}^p)^2 + (d\varepsilon_{zz}^p - d\varepsilon_{xx}^p)^2 + \frac{3}{2}(d\varepsilon_{xy}^{p2} + d\varepsilon_{yz}^{p2} + d\varepsilon_{zx}^{p2})}$$

або в тензорній формі $d\varepsilon_i^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p}$, $d\varepsilon_{ij}^p$ – компоненти тензора приросту інтенсивності пластичних деформацій; ε_c – критичне значення пластичної деформації, що залежить від тривісності напружень, температури, неоднорідності матеріалу тощо.

Результати скінченно-елементного аналізу НДС. Результати чисельного аналізу НДС даної ділянки трубопроводу без підсилюючої конструкції показали, що під дією внутрішнього тиску $P = 11,8$ МПа в зоні дефекту стоншення виникають максимальні окружні напруження до 227 МПа (рис. 6), які перевищують границю текучості матеріалу (177 МПа) при заданій температурі $T = 300$ °С, а також, звісно, перевищують номінально допустиме напруження статичної міцності, що визначається згідно з ПНАЕ Г 7-002-86 [12] за наступної умови:

$$[\sigma] = \min \{ \sigma_B / 2,6; \sigma_T / 1,5 \} \quad (3)$$

Границя текучості та границя міцності для сталі 20 за температури $T = 300$ °С складають $\sigma_t = 177$ МПа та $\sigma_B = 363$ МПа відповідно. Згідно з (3) допустиме напруження дорівнює $[\sigma] = 118$ МПа.

Але такий підхід на основі порівняння діючих напружень у стінці трубопроводу від внутрішнього тиску з допустимими напруженнями статичної міцності для матеріалу трубопроводу на практиці використовують для вибору номінальних розмірів при проектуванні, а для оцінки граничного стану, що визначається розвитком в'язкого руйнування

металу трубопроводу з дефектом ЕКЗ, є занадто консервативним. Тому доцільнішим є приведений вище (2) підхід на основі аналізу результатів приросту інтенсивності пластичних деформацій в зоні дефекту.

Згідно з результатами скінченно-елементного моделювання максимальна інтенсивність пластичних деформацій в зоні дефекту ЕКЗ становить 0,0112 (1,12 %) (рис. 7, а), що перевищує «умовну» граничну деформацію $\varepsilon_c = 0,01$ (1 %) [13]. Це означає, що реалізуються умови зародження в'язкого руйнування матеріалу. З метою запобігання подальшим деформаціям і руйнуванню трубопроводу може бути встановлена ремонтна підсилююча конструкція типу бандажа зварної муфти. При цьому максимальні напруження (227 МПа) все одно перевищують допустимі напруження статичної міцності, але за рахунок встановлення підсилюючої конструкції максимальна інтенсивність пластичної деформації не перевищує граничну деформацію в 1 % (рис. 7, б).

Визначення мінімальної товщини стінки дефектних ділянок трубопроводів. Для перевірки коректності використання деформаційного підходу (2) оцінки граничного стану за критерієм в'язкого руйнування трубопроводу з дефектом ЕКЗ на основі аналізу приросту інтенсивності пластичних деформацій в зоні дефекту проведено порівняння для різних трубопроводів значень мінімальної товщини стінки дефектних ділянок, визначених за Методикою МТ-Т.0.03.224-18 [11] і за підходом (2) методом скінченно-елементного моделювання. Результати, наведені в табл. 1, показали, що мінімальні товщини стінок за Методикою в більшості варіантів приблизно дорівнюють результатам розрахунку за використаним деформаційним підходом. Тільки в одному варіанті трубопроводу 720×24 мм мінімальна товщина стінки згідно Методики на 30 % нижче, ніж розрахована за критерієм (2). Тобто результати використання підходу (2) оцінки критичного стану в'язкого руйнування трубопроводу з дефектом ЕКЗ узгоджуються з методикою МТ-Т.0.03.224-18 [11, 18]. Але ширші можливості скінченно-елементного моделювання з точки зору точності описання

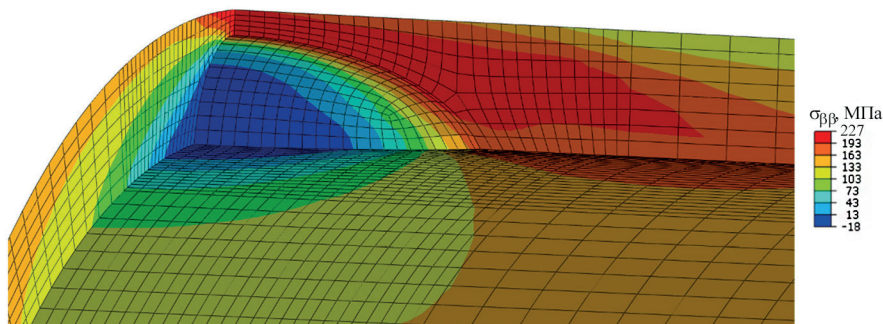


Рис. 6. Розподіл окружних напружень $\sigma_{\phi\phi}$ в зоні дефекту стоншення стінки трубопроводу без підсилюючої конструкції

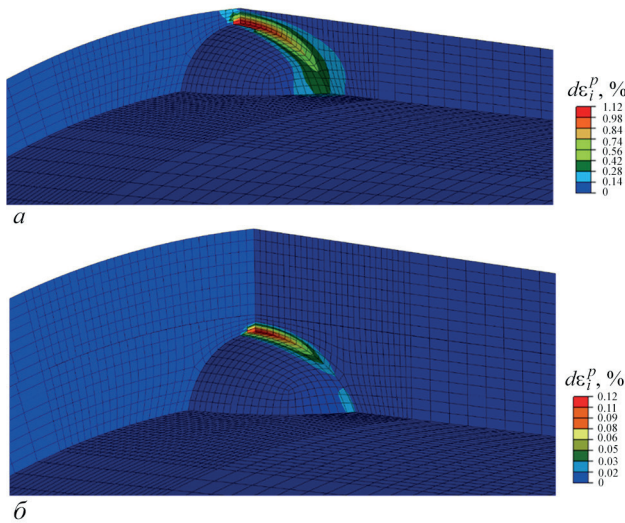


Рис. 7. Розподіл приросту інтенсивності пластичних деформацій $d\varepsilon_i^p$ ділянки трубопроводу з дефектом: *a* – без підсилюючої конструкції $d\varepsilon_i^p = 1,12\%$; *б* – з підсилюючою конструкцією $d\varepsilon_i^p = 0,12\%$ (на порядок нижче)

фізико-механічних процесів, що визначають надійність зварних конструкцій, робить його раціональним для використання, зокрема при плануванні ремонтно-відновлювальних робіт.

Вплив початкового зазору. На розвантаження дефектної ділянки трубопроводу суттєво впливає початковий зазор між трубопроводом і ремонтною конструкцією [15]. Надто велика величина проміжку може призвести до того, що розвантаження ремонтною конструкцією не відбуватиметься, а її встановлення буде не ефективним. Тому на практиці використовують спеціалізоване обладнання, для того щоб при встановленні притиснути підсилюючу конструкцію до трубопроводу і забезпечити мінімальний проміжок. Результати стосовно залежності величини приросту інтенсивності пластичних деформацій від величини проміжку зображено на рис. 8.

Результати чисельного прогнозування ступеня розвантаження зони дефекту трубопроводу при встановленні бандажу та зварної муфти показали, що дані ремонтні конструкції працюють на розвантаження зони дефекту стоншення стінки майже однаково. Різниця в осьових переміщеннях бандажу та муфти відносно трубопроводу не визначено. Але зварна муфта внаслідок наявності зварного з'єд-

нання ще додатково забезпечує герметичність у випадку розвитку дефекту до наскрізного. При збільшенні початкового проміжку між трубопроводом і ремонтною конструкцією величина максимальних пластичних деформацій збільшується. При величині проміжку в 0,2 мм і більше ремонтна конструкція перестає працювати на розвантаження даної ділянки, оскільки під дією внутрішнього тиску (11,8 МПа) в трубопроводі ($D = 630$ мм, $s = 25$ мм) виникають радіальні деформації, які становлять 0,22 мм, і трубопровід лише вибирає початковий проміжок, а бандаж або муфта не підсилюють дефектну ділянку. Тому такі технологічні параметри, як початковий проміжок, скидання внутрішнього тиску перед і підняття після встановлення підсилюючої конструкції, є важливими.

Вплив товщини та довжини підсилюючої конструкції. Було розглянуто вплив таких геометричних параметрів, як товщина та довжина ремонтної конструкції, на розвантаження пошкодженої ділянки трубопроводу. Також варто зазначити, що для полегшення аналізу дані моделі були побудовані без урахування проміжку між ремонтною конструкцією і трубопроводом, тобто ремонтна конструкція починає працювати на розвантаження відразу. Результати аналізу впливу зміни товщини при сталій довжині конструкції та зміни довжини зі сталою товщиною відповідно були зображені на графіках (рис. 9).

Як видно з рис. 9, *a*, при зменшенні товщини ремонтної конструкції максимальне значен-

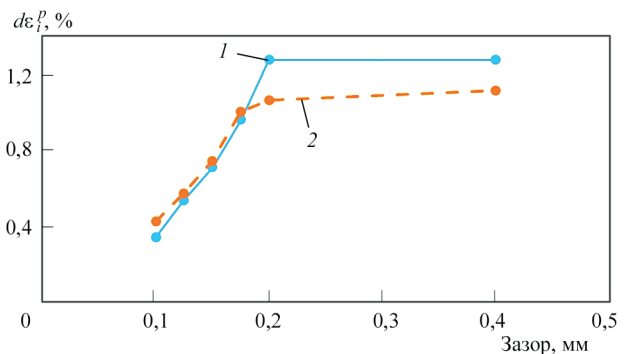


Рис. 8. Залежності максимальних значень приросту інтенсивності пластичних деформацій $d\varepsilon_i^p$ від початкового проміжку між трубопроводом і підсилюючою конструкцією: 1 – муфта; 2 – бандаж

Таблиця 1. Порівняння мінімальних товщин стінки дефектних ділянок трубопроводів за Методикою МТ-Т.0.03.224-18 і за підходом (2)

Параметри трубопроводу					МТ-Т.0.03.224-18		Підхід (2)		
D , мм	s , мм	L/h , мм	T , °C	P , МПа	s_{\min} , мм	$d\varepsilon_i^p$, %	s_{\min} , мм	$d\varepsilon_i^p$, %	
89	2,8	5,6/2,8	295	7,85	0,5	0,43	0,3	1,00	
325	16	32/16	150	9,8	4,5	0,07	4,05	1,01	
630	25	50/25	300	11,78	5	1,12	5,5	1,00	
720	24	48/24	150	10,8	3	1,94	4,6	0,95	

Примітка. s_{\min} – мінімально допустима товщина в зоні дефекту; $d\varepsilon_i^p$ – інтенсивність пластичних деформацій.

ня еквівалентної пластичної деформації зростає. Натомість при зменшенні напівдовжини ремонтної конструкції, як показано на рис. 9, б, з 630 мм до ≈ 300 мм інтенсивність пластичних деформацій майже не зростає, а при зменшенні до 150 мм їх значення найнижчі. З цього можна зробити висновок, що використання занадто довгої ремонтної конструкції не є доцільним, а зменшення її довжини до 300 мм дозволить зменшити витрати на ремонт пошкодженої ділянки трубопроводу.

Ефективність розвантаження за рахунок підсилюючої конструкції. Для перевірки ефективності ремонту розраховано навантаженість дефектної ділянки трубопроводу до ремонту та після встановлення підсилюючої конструкції. Коефіцієнт розвантаження за рахунок встановлення підсилюючої конструкції визначається за формулою:

$$\eta = 1 - \frac{P_{ld}}{P_l} \quad (4)$$

де P_{ld} – граничний тиск в дефектній ділянці трубопроводу без підсилюючої конструкції; P_l – тиск, при якому досягається гранична пластична деформація $\epsilon_c = 0,01$ в дефектній ділянці трубопроводу з підсилюючою конструкцією.

Розраховані коефіцієнти розвантаження розглянутих типових варіантів трубопроводів занесені в табл. 2. Визначені значення коефіцієнтів розвантаження (0,43...0,51) дефектних ділянок при використанні підсилюючої конструкції типу бандаж з товщиною, що дорівнює товщині стінки, для трубопроводів різних типорозмірів показали досить високу ефективність використання таких конструкцій.

Прогнозування ресурсу дефектної ділянки після ремонту. Термін залишкового ресурсу де-

фектної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ можна оцінити [16]:

$$t_r = \frac{s_r - s_{min}}{w_{ЕКЗ}}, \text{ якщо } s_r > s_{min} \quad (5)$$

де s_r – залишкова товщина стінки в зоні дефекту, мм; s_{min} – розрахункова мінімально допустима товщина стінки, мм; $w_{ЕКЗ}$ – швидкість розвитку дефекту ЕКЗ, мм/рік.

Термін безпечної експлуатації дефектної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ після встановлення підсилюючої конструкції можна прогнозувати із умови розвитку дефекту стоншення стінки наскрізь. Якщо встановлюються бандаж або муфта однакової товщини з трубопроводом, тоді у випадку розвитку дефекту стоншення стінки наскрізь буде забезпечуватись міцність, а для муфти – ще і герметичність ділянки. Таким чином, якщо зробити припущення про постійну швидкість розвитку дефекту ЕКЗ, термін безпечної експлуатації t_r дефектної ділянки трубопроводу із встановленим бандажем або муфтою складає:

$$t_r = \frac{s_r}{w_{ЕКЗ}}, \quad (6)$$

Швидкість розвитку дефекту ЕКЗ $w_{ЕКЗ}$ можна визначити в першому наближенні на основі даних стосовно терміну експлуатації ділянки трубопроводу до ремонту t_E , рік, та різниці початкової s і залишкової s_r товщини стінки в зоні дефекту ЕКЗ на момент ремонту, мм:

$$w_{ЕКЗ} = \frac{s - s_r}{t_E} \quad (7)$$

Наприклад, для трубопроводу $D = 630$ мм, $s = 25$ мм, який працює під дією внутрішнього тиску 11,8 МПа вже 30 років, при плановому контролі

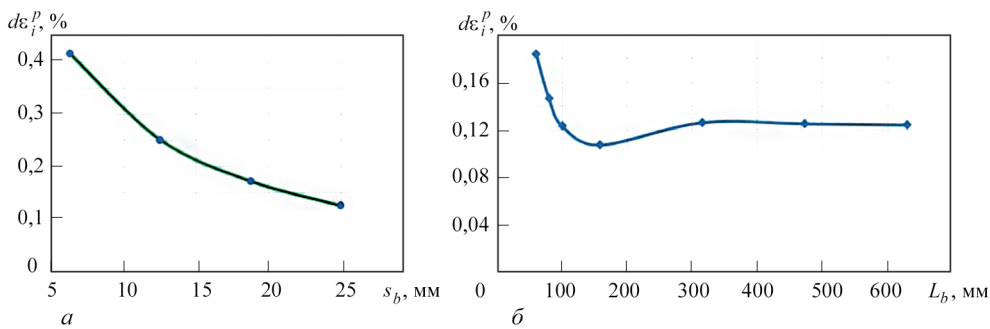


Рис. 9. Залежність максимальних значень приросту інтенсивності пластичних деформацій $d\epsilon_i^p$ в зоні дефекту ЕКЗ трубопроводу ($D = 630$ мм, $s = 25$ мм) від геометричних параметрів підсилюючої конструкції: а – товщини s_b ; б – напівдовжини L_b

Таблиця 2. Визначення коефіцієнтів розвантаження η ділянок трубопроводів при встановленні підсилюючої конструкції

D, мм	s, мм	P, МПа	T, °C	L/h/a, мм	s _{min} , мм	Критичний тиск P, МПа		η
						P _{ld}	P _l	
89	2,8	7,85	295	5,6/2,8/2,3	0,5	7,85	16	0,51
325	16	9,8	150	32/16/13,5	2,5	9,8	18	0,46
630	25	11,78	300	50/25/20	5	11,78	21	0,44
720	24	10,8	150	48/24/19,5	4,5	10,8	19	0,43
820	18	1,57	188	36/18/16	2,0	6	11	0,45

виявлено дефект ЕКЗ розміром 50×25 мм з мінімальною товщиною 5 мм. Тоді встановлення бандажу завтовшки $s_b = 25$ мм може подовжити термін експлуатації дефектної ділянки приблизно на:

$$t_r = \frac{s_r \cdot t_E}{(s - s_r)} = 5 \cdot 30 / (25 - 5) = 7,5 \text{ років.}$$

У випадку встановлення зварної муфти термін експлуатації дефектної ділянки може бути ще довшим, який можна порівнювати з терміном експлуатації ділянки після ремонту за традиційною технологією вставки нової котушки, але це потребує додаткового обґрунтування міцності кільцевих зварних з'єднань під дією внутрішнього тиску в порожнині між трубою і муфтою.

Чим більша залишкова товщина стінки трубопроводу в зоні ЕКЗ та нижча швидкість розвитку дефекту, тим доцільніше встановлювати ремонтну підсилюючу конструкцію, оскільки термін її використання до наступного ремонту буде тривалішим. Так, відповідно до вимог ГБН [17] встановлення бандажу на магістральний трубопровід виконують у тому випадку, коли максимальна глибина поодиноких дефектів або групових корозійних ушкоджень не перевищує 50 % від номінальної товщини стінки трубопроводу.

Висновки

За результатами проведеного аналізу НДС прямолинійної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ під дією внутрішнього тиску можна зробити висновок, що проводити оцінку граничного стану в'язкого руйнування трубопроводу з дефектом ЕКЗ на основі порівняння діючих напружень в стінці трубопроводу від внутрішнього тиску з допустимими напруженнями статичної міцності для матеріалу трубопроводу є занадто консервативним. Доцільнішим є використання підходу на основі аналізу утворення пластичних деформацій в зоні дефекту і допущення, що приріст інтенсивності пластичних деформацій не перевищує умовну граничну деформацію, наприклад, $\epsilon_c = 1$ %. Результати використання такого підходу оцінки граничного стану в'язкого руйнування трубопроводу з дефектом ЕКЗ добре узгоджуються з введеною в дію ДП «НАЕК «Енергоатом» в 2019 р. методикою МТ-Т.0.03.224-18, яка регламентує визначення допустимих товщин елементів трубопроводів АЕС з вуглецевих сталей під дією ерозійно-корозійного зносу.

З метою обґрунтування використання альтернативних ремонтних технологій трубопроводів для потреб атомної енергетики розроблено математичні моделі та засоби їх скінченно-елементної реалізації для визначення НДС і граничного стану дефектної ділянки трубопроводу при встановленні ремонтної підсилюючої конструкції типу бан-

даж або зварної муфти. Результати скінченно-елементного аналізу показали:

1. На розвантаження дефектної ділянки трубопроводу суттєво впливає початковий проміжок між трубопроводом і ремонтною конструкцією, оскільки при його наявності ремонтна конструкція починає розвантаження дефектної ділянки трубопроводу, лише коли даний проміжок буде вибраний трубопроводом внаслідок радіальної деформації під дією внутрішнього тиску при експлуатації. Доцільно використовувати спеціалізоване обладнання для притискання підсилюючої конструкції до трубопроводу під час її встановлення.

2. Ремонтні конструкції типу бандаж і зварна муфта працюють на розвантаження зони дефекту стоншення стінки однаково. Перевагою бандажу є низька трудомісткість його встановлення і можливість його багаторазового використання, а перевагою зварної муфти є забезпечення герметичності у випадку розвитку дефекту наскрізь.

3. У більшості випадків доцільно використовувати підсилюючі конструкції, товщина яких дорівнює товщині трубопроводу. При зменшенні товщини ремонтної конструкції ефективність розвантаження зони дефекту стоншення стінки суттєво знижується.

4. Використання ремонтної конструкції великої довжини не є доцільним, оскільки при зменшенні довжини до певного значення ефективність розвантаження не змінюється. Для локального дефекту стоншення стінки оптимальна довжина підсилюючої конструкції може дорівнювати половині діаметра трубопроводу. Використання ремонтної конструкції з оптимальною довжиною дозволить зменшити витрати на матеріал ремонтної конструкції та спростить її встановлення.

5. Дані результати можуть бути використані переважно при ремонті технологічних трубопроводів АЕС, особливо в тих випадках, коли ремонт за традиційними способами вирізки дефектної ділянки і вварювання нової котушки трубопроводу не є можливим або доцільним з різних причин.

6. Розрахований коефіцієнт розвантаження (0,43...0,51) дефектної ділянки при встановленні підсилюючої конструкції типу бандаж з товщиною, що дорівнює товщині стінки, для трубопроводів АЕС різних типорозмірів показав високу ефективність використання таких конструкцій.

7. Термін безпечної експлуатації дефектної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ після встановлення підсилюючої конструкції можна визначати з умови розвитку дефекту стоншення стінки наскрізь. Чим більша залишкова товщина стінки трубопроводу в зоні ЕКЗ та нижча швидкість розвитку дефекту, тим доцільніше встановлювати ремонтну конструкцію, оскільки термін її використання до наступного ремонту буде тривалішим.

Таким чином, ремонтні технології встановлення підсилюючих конструкцій типу бандаж або зварної муфти дозволяють ефективно посилювати ділянки трубопроводів АЕС з дефектами стоншення стінки, відновлювати їх несучу здатність, і можуть бути рекомендовані до впровадження на АЕС України, переважно при ремонті технологічних трубопроводів.

Список літератури

1. Ageiev, S. (2021) Methodology for Assessing the Allowable Wall Thicknesses of Carbon Steel NPP Piping under Erosion-Corrosion Wear. *J. Nuclear and Radiation Safety*, **3**(91), 32–42, DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.3\(92\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.3(92).04)
2. Ожигов Л., Митрофанов А., Крайнюк Є. та ін. (2013) Експлуатаційне зношування трубопроводів другого контуру енергоблоків ВВЕР-1000. *Вісник ТНТУ*, **69**(1), 55–62 (механіка та матеріалознавство).
3. Gribok, A., Vivek Agarwal (2015) Flow-Assisted Corrosion in Nuclear Power Plants. No. INL/EXT-15-36611-Rev000. Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States).
4. Poulson, Bryan (2014) Predicting and preventing flow accelerated corrosion in nuclear power plant. *Int. J. of Nuclear Energy*, **2014**, Article ID 423295. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/423295>
5. NEA (2015) *CODAP Topical Report: Flow Accelerated Corrosion (FAC) of Carbon Steel and Low Alloy Steel Piping in Commercial Nuclear Power Plants*. OECD Publishing, Paris.
6. Ворона Г.В., Анащенко М.С., Махненко О.В. (2023) Автоматизація процедури визначення допустимості ерозійно-корозійного зносу в трубопроводах АЕС. *Mech. Adv. Technol.*, **7**(1), 113–121. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.1.272443>
7. Махненко В.И., Великоиваненко О.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. (2010) Совершенствование метода оценки риска разрушения в зоне утонений стенки магистральных трубопроводов. *Автоматическая сварка*, **5**, 16–21.
8. Венгринюк Т.П. (2010) Відновлення і зміцнення нафтогазопроводів. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, **2**(35), 136–139. DOI: <https://rrngr.nung.edu.ua/index.php/rrngr/article/view/591>
9. Jaske, Carl E., Brian O. Hart, William A. Bruce (2006) *Updated pipeline repair manual*. No. R2269-01R.
10. *Repair of Pressure Equipment and Piping. An American national standard*. ASME PCC-2-2018 (Revision of ASME PCC-2-2015).
11. (2019) *Методика определения допустимых толщин элементов трубопроводов АЭС из углеродистых сталей подверженных действию эрозивно-коррозионного износа МТ-Т.0.03.224-18*. ГП НАЭК «Энергоатом».
12. (1989) ПНАЭ Г-7-002-86. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*. Москва, Энергоатомиздат.
13. Milenin, A., Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, **171**, 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>
14. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. (1966) *Пластинки и оболочки*. Москва, Наука.
15. Махненко В.И., Великоиваненко О.А., Міленін О.С., Пивторак Г.П. (2012) Розрахункова методика оцінки ефективності постановки муфт (бандажів) у зоні стоншення стінки магистрального трубопроводу. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: сб. наук. статей*. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, сс.15–17.
16. Кравченко В.П. (2017) Повышение безопасности и экономичности АЭС путем управления ресурсом трубопроводов второго контура. *Ядерная и радиационная безопасность*, **3**, 25–29. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2017.3\(75\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2017.3(75).04)
17. (2011) ГБН В.3.1-00013741-12:2011. *Магістральні газопроводи, ремонт дуговим зварюванням в умовах експлу-*

атації. Київ, Міністерство енергетики та вугільної промисловості України.

18. Orynyak, I., Ageiev, S., Radchenko, S., Zarazovskii, M. (2015) Local limit load analytical model for thick-walled pipe with axial surface defect. *J. of Pressure Vessel Technology*, **137**(5), 051204. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4029523>

References

1. Ageiev, S. (2021) Methodology for assessing the allowable wall thicknesses of carbon steel NPP piping under erosion-corrosion wear. *J. Nuclear and Radiation Safety*, **3**(91), 32–42, DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.3\(92\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.3(92).04)
2. Ozhygov, L., Mytrofanov, A., Krainyuk, E. et al. (2013) Operational wear of pipelines of second circuit of WWER-1000 power units. *Visnyk TNTU*, **69**(1), 55–62 [in Ukrainian].
3. Gribok, A., Vivek Agarwal (2015) Flow-Assisted Corrosion in Nuclear Power Plants. No. INL/EXT-15-36611-Rev000. Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States).
4. Poulson, Bryan (2014) Predicting and preventing flow accelerated corrosion in nuclear power plant. *Int. J. of Nuclear Energy*, **2014**, 423295. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/423295>
5. NEA (2015) *CODAP Topical Report: Flow Accelerated Corrosion (FAC) of Carbon Steel and Low Alloy Steel Piping in Commercial Nuclear Power Plants*. OECD Publishing, Paris.
6. Vorona, G.V., Ananchenko, M.S., Makhnenko, O.V. (2023) Automation of procedure for determination of acceptance of erosion-corrosion wear in NPP pipelines. *Mech. Adv. Technol.*, **7**(1), 113–121 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.1.272443>
7. Makhnenko, V.I., Velikoivanenko, O.A., Rozyinka, G.F., Pivtorak, N.I. (2010) Improvement of method for estimation of the risk of fracture within the thinning zone on walls of main pipelines. *The Paton Welding J.*, **5**, 10–14 [in Russian].
8. Vengrynyuk, T.P. (2010) Restoration and strengthening of gas-and-oil pipelines. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, **2**(35), 136–139 [in Ukrainian]. DOI: <https://rrngr.nung.edu.ua/index.php/rrngr/article/view/591>
9. Jaske, Carl E., Brian O. Hart, William A. Bruce (2006) *Updated pipeline repair manual*. No. R2269-01R.
10. *Repair of Pressure Equipment and Piping. An American national standard*. ASME PCC-2-2018 (Revision of ASME PCC-2-2015).
11. (2019) *MT-T.0.03.224-18 Procedure for determination of acceptable thicknesses of NPP pipeline elements from carbon steels subjected to erosion-corrosion wear*. NAEK Energoatom [in Russian].
12. (1989) ПНАЭ Г-7-002-86. *Norms of strength analysis of equipment and pipelines of nuclear power plants*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
13. Milenin, A., Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, **171**, 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>
14. Timoshenko, S.P., Vojnovsky-Krigger, S. (1966) *Plates and shells*. Moscow, Nauka [in Russian].
15. Makhnenko, V.I., Velykoivanenko, O.A., Milenin, O.S., Pivtorak, G.P. (2012) Computational assessment procedure of efficiency of couplings (bands) mounting in the zone of wall thinning of main pipeline. In: *Problems of service life and safety of structures, constructions and machines*. Kyiv, PWI, 15–17 [in Ukrainian].
16. Kravchenko, V.P. (2017) Increase of safety and cost effectiveness of NPP by control of service life of secondary circuit pipelines. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost*, **3**, 25–29 [in Russian]. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2017.3\(75\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2017.3(75).04)
17. (2011) ГБН В.3.1-00013741-12:2011. *Main gas pipelines, repair by arc welding in operating conditions*. Kyiv, Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine [in Ukrainian].
18. Orynyak, I., Ageiev, S., Radchenko, S., Zarazovskii, M. (2015) Local limit load analytical model for thick-walled pipe with axial surface defect. *J. of Pressure Vessel Technology*, **137**(5), 051204. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4029523>

EFFECTIVENESS OF UNLOADING A SECTION OF NPS PIPELINE WITH A PIPE WALL THINNING DEFECT BY MOUNTING A BAND OR WELDED SLEEVE

G.V. Vorona, O.V. Makhnenko, O.S. Milenin

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv. E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

Formation of erosion-corrosion wear defects in NPS pipelines is one of the urgent problems of nuclear power engineering. At pipeline repair the defective section is cut out and a new pipe spool is mounted using welding, which is a rather labour-consuming process, and requires draining of the transported liquid. To prolong the service life, the defective pipeline section can be reinforced by mounting a repair structure, for instance a band or welded sleeve. In order to substantiate the rationality of application of reinforcing structures in pipeline repair, finite element analysis of the stress-strain state of the rectilinear pipeline section with a defect of erosion-corrosion wear under the impact of internal pressure was performed, as well as evaluation of the effectiveness of unloading the defective section in the case of application of a reinforcing structure of the type of a band or welded sleeve in repair. Analysis results showed the high effectiveness of application of such structures. Obtained results can be used in substantiation of introduction in the Ukrainian NPS of alternative technologies of repair of pipelines, predominantly technological ones, particularly in those cases when repair by traditional methods is not possible or rational for technical or economic reasons. 18 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: NPS, pipeline, erosion-corrosion wear, wall thinning defect, reinforcing structure, band, sleeve, stress-strain state, ductile fracture, finite element method

Надійшла до редакції 02.10.2023



Düsseldorf, Germany

join the best: 15 - 19 April 2024

Wire & Tube 2024

Міжнародні ярмарки проводів, кабелів і труб в Дюссельдорфі
15 – 19 квітня 2024 р., Messe Düsseldorf

Через п'ять місяців представники промисловості зустрінуться у виставковому центрі м. Дюссельдорф, Німеччина. Буде проведено трендові форуми, зустрічі експертів. У тематичних павільйонах буде представлено вироби та технології з нержавіючої сталі, водню та інших регенеративних носіїв енергії, сепарації та різання, пластикових труб і готової продукції для технологій виробництва кріпильних виробів і пружин.

Ярмарку Wire буде розміщено у залах №№9–17 і вона буде займати близько 66900 м² виставкової площі, з 1026 експонентами з 60 країн, що перевищить рівень до пандемії. На ярмарку будуть представлені машини та обладнання для виробництва та обробки дроту, готова продукція, інструменти та допоміжні засоби для технологічних процесів, матеріали, технології скловолокна, спеціальні дроти та кабелі, а також інноваційні технології датчиків, контролю та діагностики. Разом із виробниками дротяно-кабельного обладнання та продукції і технологій скловолокна, у залі №17 будуть представлені сучасні машини для зварювання дротяної сітки. У залі №16 буде представлено повний технологічний цикл створення кріплень і пружин: від сировини, машин і обладнання до кріплень, з'єднувачів і промислових пружин, гвинтів, кронштейнів, будівельних компонентів і фурнітури, усіх типів пружин і деталей для згинання дроту.

Ярмарку Tube представляє весь технологічний ланцюг виробництва у трубній промисловості: машини та обладнання для виробництва і обробки труб, а також сировину, пластикові труби, трубну продукцію та аксесуари, вживане обладнання, інструменти для технологічних процесів, допоміжні засоби, сенсорну техніку, техніку для контролю, вимірювання та контролю. Цю лінійку доповнює торгівля трубами, трубопроводами, профілем.

За майже 40 р. Wire і Tube Düsseldorf перетворилися на провідні торговельні ярмарки для своїх галузей – тепер також «народжуються» у різних регіонах, де вони є лідерами ринку та рушійними силами місцевої промисловості та мають високий потенціал зростання. Аналогічні заходи в Туреччині, Єгипті, Мексиці, Китаї, Таїланді та Індії вже є невід'ємною частиною зростаючого портфоліо Metal and Flow Technologies від Messe Düsseldorf.