

ПІДСИЛЕННЯ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ АЕС З ДЕФЕКТОМ СТОНШЕННЯ СТІНКИ ПРИ ВСТАНОВЛЕННІ ЗВАРНОЇ ЛАТКИ

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

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

Ремонт трубопроводів АЕС з дефектами ерозійно-корозійного зношення є актуальною проблемою атомної енергетики України. При ремонті трубопроводу вирізають дефектну ділянку та встановлюють за допомогою зварювання нову котушку труби. Але для великої кількості технологічних трубопроводів з виявленими окремими дефектами, недопустимими за розмірами стоншеннями стінки, заміна ділянки труби пов'язана з великим об'ємом ремонтних робіт. Для продовження ресурсу дефектну ділянку трубопроводу можна підсилювати, наприклад, приварюванням накладної латки, наплавленням, встановленням бандажу або зварної муфти. З метою обґрунтування доцільності використання при ремонті трубопроводу підсилюючих конструкцій типу зварна накладна латка проведено скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом ерозійно-корозійного зношення під дією внутрішнього тиску до та після ремонту. Результати аналізу показали високу ефективність розвантаження дефектної ділянки трубопроводу у випадку використання при ремонті підсилюючої конструкції типу зварна накладна латка. Отримані результати можуть бути використані при обґрунтуванні впровадження на АЕС України альтернативних технологій ремонту трубопроводів. Бібліогр. 8, рис. 8.

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

Вступ. Однією з поширених проблем при довгостроковій експлуатації АЕС є ерозійно-корозійне зношення (ЕКЗ) в трубопроводах. При ремонті дефектну ділянку трубопроводу вирізають і встановлюють нову котушку труби за допомогою зварювання. Даний процес є достатньо трудомістким і вимагає зливання транспортованої рідини. Стосовно трубопроводів першого та другого контурів енергоблоків АЕС така технологія ремонту найбільш надійна та повністю відновлює ресурс трубопроводу. Але для великої кількості технологічних трубопроводів заміна ділянки труби, особливо коли виявлено неприпустимі за розмірами окремі локальні стоншення стінки, може бути надлишковою. В інших галузях, наприклад в магістральному трубопроводному транспорті [1], або в закордонних стандартах [2, 3] існує декілька способів ремонту трубопроводів шляхом підсилення дефектної ділянки, а саме, приварю-

вання накладної латки, наплавлення, встановлення бандажу або зварної муфти. Ефективність підсилення дефектної ділянки шляхом встановлення бандажу або зварної муфти розглядалась раніше [4]. У даній роботі розглянуто варіант підсилення трубопроводу саме зварною накладною латкою. Варіант встановлення накладної латки та його геометричні параметри зображено на рис. 1.

Метою роботи є розрахункове обґрунтування з точки зору міцності можливості використання альтернативної технології ремонту технологічних трубопроводів АЕС з дефектами ЕКЗ шляхом приварювання накладної латки.

Оцінку допустимості подальшої роботи ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ приймали з точки зору в'язкого руйнування, а саме, за результатами прогнозування приросту інтенсивності пластичних деформацій (деформаційний критерій) у зоні дефекту під дією експлуатаційного

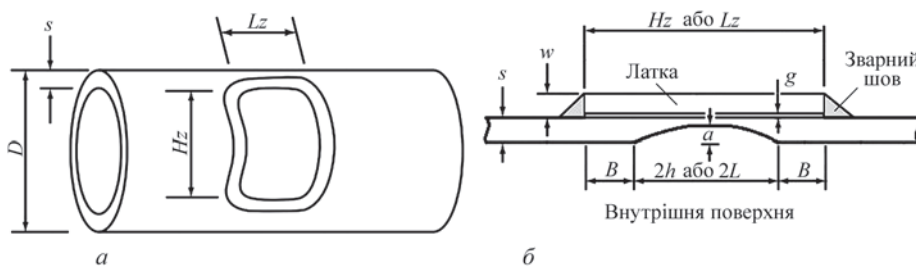


Рис. 1. Схема підсилення дефектної ділянки трубопроводу зварною накладною латкою: а – загальний вид трубопроводу із встановленою латкою; б – переріз у зоні накладної латки

Ворона Г.В. – <https://orcid.org/0000-0002-9724-3759>, Костеневич О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-7427-2805>, Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>
© Г.В. Ворона, О.С. Костеневич, О.С. Міленін, О.В. Махненко, 2024

навантаження. Використовуючи метод скінченних елементів, досліджувався вплив геометричних параметрів, а саме, початкового зазору між поверхнею трубопроводу й зварною латкою та лінійного розміру латки відносно розміру дефекту стоншення стінки, а також залишкових зварювальних напружень від приварювання накладної латки на ефективність розвантаження прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом стоншення стінки.

Постановка задачі. У якості прикладу розглядалася прямолінійна ділянка трубопроводу, що має один із стандартних розмірів і параметрів навантаження для технологічних трубопроводів АЕС: матеріал – сталь 20, зовнішній діаметр трубопроводу $D = 630$ мм, товщина стінки $s = 25$ мм, проєктний тиск $P = 11,8$ МПа, температура $T = 300$ °С.

Критично небезпечні геометричні параметри дефекту стоншення стінки трубопроводу (рис. 2, б) визначались за методикою МТ-Т.0.03.224-18 [5] з точки зору можливості подальшої допустимості експлуатації ділянки трубопроводу. Розміри небезпечного дефекту стоншення стінки (ідеалізований дефект ЕКЗ напівеліпсоїдної форми) можуть бути наступними: довжина $L = 2s = 50$ мм, ширина $h = s = 25$ мм, глибина $a = 20$ мм.

Обрано наступні розміри підсилюючої конструкції типу зварна накладна латка: товщина латки дорівнює товщині трубопроводу $W = s = 25$ мм, відстань від краю стоншення до краю латки $B = 70$ мм, довжина латки в окружному напрямку $H_z = 190$ мм, в осьовому $L_z = 240$ мм.

Скінченно-елементна модель. За даними параметрами побудовано геометричну та скінченно-елементну модель прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ. Внаслідок симетрії в двох (повздовжній і поперечній) площинах побудована модель складається з 1/4 частини від повної моделі (рис. 2, а). Механічні

властивості матеріалу наступні: модуль Юнга $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуасона $\mu = 0,3$, границя текучості для сталі 20 при температурі $T = 300$ °С $\sigma_T = 177$ МПа [2]. Відповідним чином було створено скінченно-елементну модель з використанням зварної латки.

Задача напружено-деформованого стану дефектної ділянки трубопроводу розглядалась у пружно-пластичній постановці, тому що в зоні дефекту ЕКЗ під дією внутрішнього тиску можливе утворення пластичних деформацій. У зоні дефекту на внутрішню поверхню труби діє робочий тиск $P = 11,8$ МПа. До торцевої поверхні моделі в якості граничної умови додано осьові розтягувальні напруження [8]:

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

Мінімальний розмір скінченних елементів (гексагональний об'ємний елемент) сітки моделі дорівнює 3 мм (рис. 3, б). Мінімальний розмір елементів побудованої сітки був обраний виходячи з умови, що значення максимальної еквівалентної пластичної деформації змінюється менш ніж на 5 % при зменшенні мінімального розміру сітки в 2 рази.

У трубопроводах з виявленими дефектами ЕКЗ характер руйнування під дією внутрішнього тиску, як правило, зумовлений в'язким механізмом. Для прогнозування критичного стану при в'язкому руйнуванні під дією внутрішнього тиску матеріалу трубопроводу з дефектом ерозійно-корозійного зношення використано деформаційний критерій [7]:

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

де $d\varepsilon_i^p$ – приріст інтенсивності пластичних деформацій; ε_c – критичне значення пластичної деформації, що залежить від жорсткості напруженого стану, температури, неоднорідності матеріалу тощо.

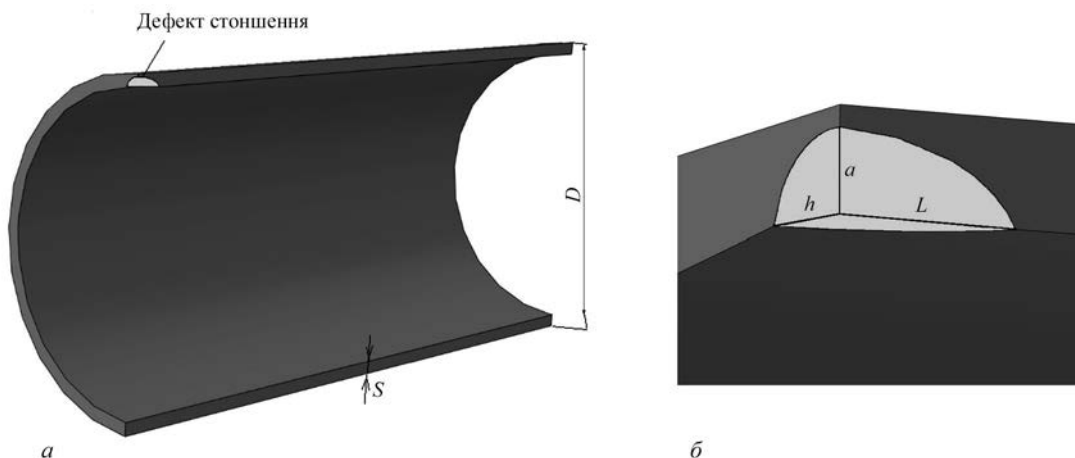


Рис. 2. Геометрична модель прямолінійної дефектної ділянки трубопроводу (1/4 частина) (а) та внутрішнього напівеліптичного дефекту стоншення стінки (б)

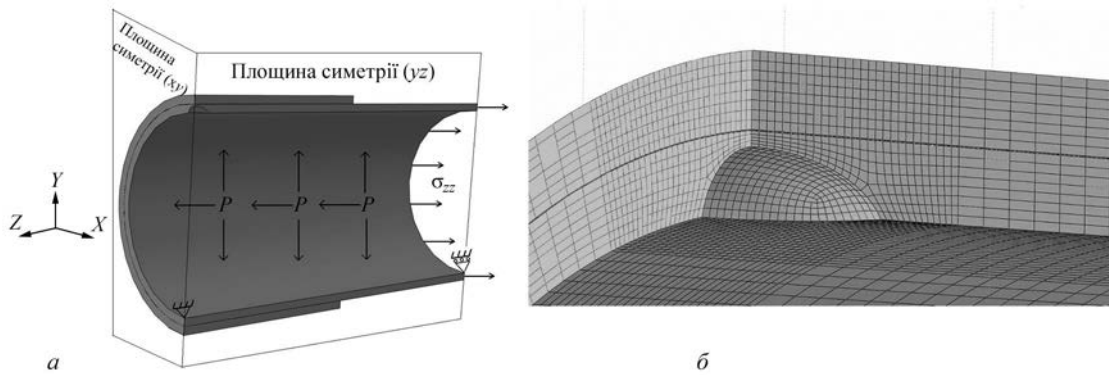


Рис. 3. Скінченно-елементна модель прямолинійної ділянки трубопроводу з дефектом стоншення стінки та підсилюючою зварною накладною латкою: *а* – схема моделі; *б* – сітка скінченних елементів у зоні дефекту

Результати скінченно-елементного аналізу НДС. Результати проведеного аналізу НДС ділянки трубопроводу без підсилюючої конструкції показали, що під дією внутрішнього тиску величиною $P = 11,78$ МПа в дефектній зоні виникають максимальні колові напруження до 227 МПа (рис. 4), що перевищує границю текучості матеріалу (177 МПа).

Номінально допустиме напруження статичної міцності визначається згідно з ПНАЕ Г 7-002-86 [6] за умови:

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

При температурі $T = 300$ °С границя текучості та границя міцності складають $\sigma_T = 177$ та $\sigma_B = 363$ МПа відповідно. Згідно з (3) допустиме напруження становить $[\sigma] = 118$ МПа. Такий підхід, що базується на порівнянні діючих напружень стінки трубопроводу, утворених від внутрішнього тиску, з допустимими напруженнями для матеріалу трубопроводу на практиці використовується

для визначення номінальних розмірів під час проектування. Оцінюючи граничний стан, який визначається розвитком в'язкого руйнування матеріалу трубопроводу з дефектом стоншення, даний підхід надто консервативний. Доцільнішим є наведений вище (2) підхід, заснований на аналізі результатів приросту інтенсивності пластичних деформацій у дефектній зоні.

За результатами скінченно-елементного аналізу у випадку дефектної ділянки трубопроводу без підсилюючої конструкції максимальні колові напруження (227 МПа) перевищують допустимі напруження та досягають границі текучості матеріалу (рис. 4, *а*), а максимальна інтенсивність пластичних деформацій (рис. 5, *а*) в зоні дефекту ЕКЗ становить $d\varepsilon_i^p = 0,011$ (1,1 %). Даний приріст інтенсивності пластичних деформацій перевищує встановлену «умовну» граничну величину $\varepsilon_c = 0,01$ (1%) [7]. Тобто можна припустити, що створюються умови початку розвитку в'язкого руйнування матеріалу.

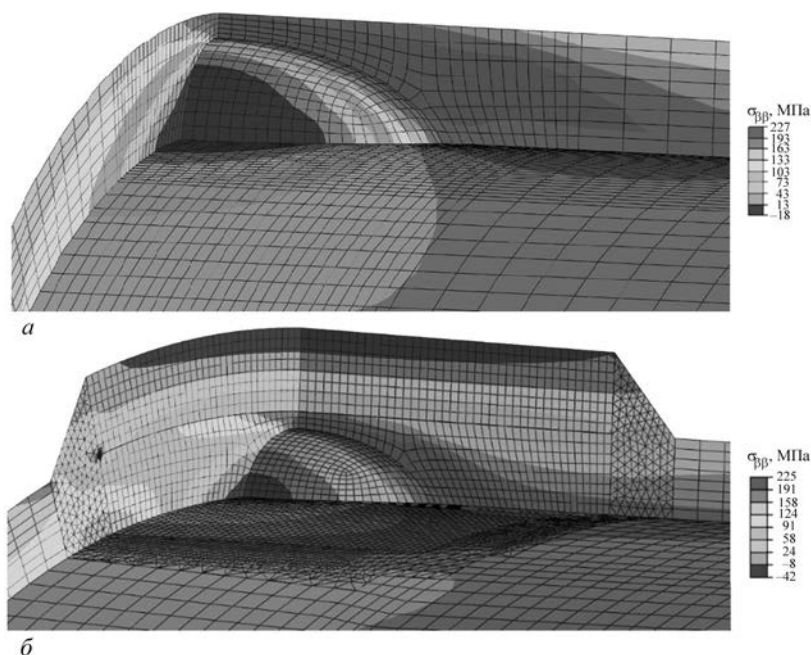


Рис. 4. Розподіл колових напружень σ_{ϕ} у дефектній зоні ділянки трубопроводу: *а* – без підсилюючої конструкції; *б* – з накладною латкою

У випадку дефектної ділянки трубопроводу із встановленою накладною латкою, хоч максимальні колові напруження (225 МПа) все ще перевищують допустимі напруження і досягають границі текучості матеріалу (рис. 4, б), але максимальна інтенсивність пластичної деформації (рис. 5, б) знизилася до $d\varepsilon_i^p = 0,004$ (0,4 %) і вже не перевищує граничну деформацію 1 %. Таким чином, встановлення підсилюючої конструкції типу зварна накладна латка ефективно сприяє запобіганню розвитку пластичних деформацій та руйнуванню трубопроводу в зоні дефекту стоншення стінки під дією внутрішнього тиску.

Вплив початкового зазору. Отримані результати чисельного прогнозування напружено-деформованого стану дефектної ділянки трубопроводу при її підсиленні встановленням накладної латки показали, що величина зазору g між поверхнями трубопроводу та латки при її встановленні не має впливу на ефективність розвантаження дефектної ділянки (рис. 6, а). Тобто розвантаження відбувається не за рахунок контактної взаємодії між по-

верхніми трубопроводу та латки, а в результаті підсилення дефектної ділянки через зварне з'єднання накладної латки. Це є важливою перевагою такої ремонтної технології, тому що перед встановленням зварної накладної латки не потрібно проводити ретельних робіт із підготовки поверхні латки та притискання її до поверхні трубопроводу.

Вплив розмірів накладної латки. Іншим важливим параметром технології підсилення дефектної ділянки трубопроводу зварною накладною латкою є геометричні розміри латки. Товщину латки прийнято брати рівною товщині стінки трубопроводу, який підсилюється, оскільки у випадку розвитку дефекту ЕКЗ наскрізь накладна латка буде мати несучу здатність, близьку до несучої здатності стінки трубопроводу. А лінійний розмір накладної латки повинен бути більше розмірів дефекту стоншення стінки. На рис. 1 це збільшення розмірів з кожної сторони накладної латки позначено як розмір B – відстань від краю дефекту до краю латки. Мінімальний розмір B повинен бути [3]:

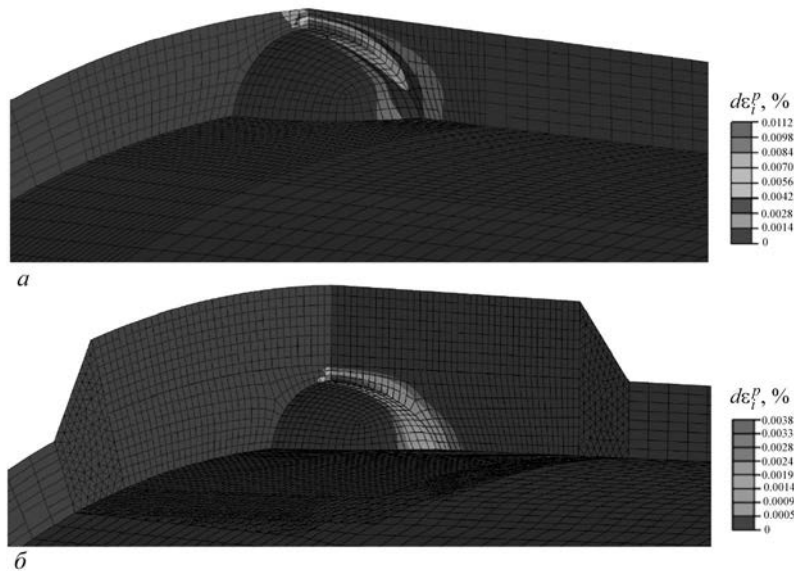


Рис. 5. Розподіл приросту інтенсивності пластичних деформацій в дефектній зоні ділянки трубопроводу: а – без підсилюючої конструкції $d\varepsilon_i^p = 0,011$; б – з накладною латкою $d\varepsilon_i^p = 0,004$

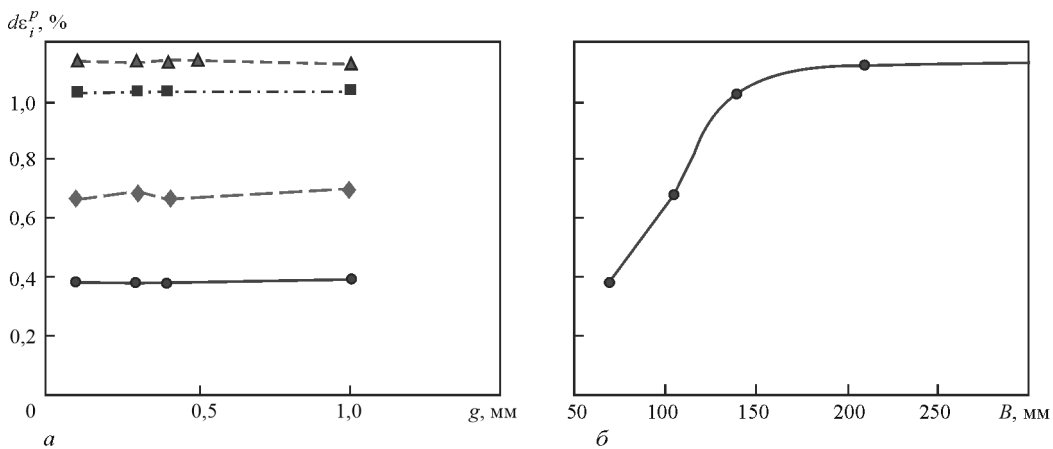


Рис. 6. Залежність максимальних значень приросту інтенсивності пластичних деформацій $d\varepsilon_i^p$ в зоні дефекту трубопроводу від величини зазору g (а) та для різних за розміром B накладних латок (б): ● – $B = 70$ мм; ◆ – 105; ■ – 140; ▲ – 210

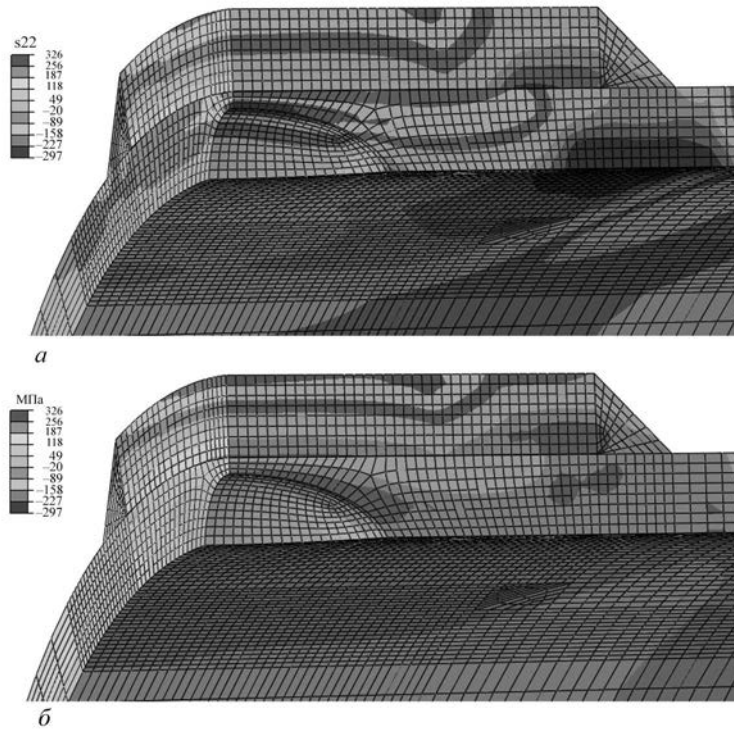


Рис. 7. Розподіл колових напружень в зоні дефектної ділянки трубопроводу з накладною латкою: *a* – залишкові зварювальні напруження; *б* – від експлуатаційного навантаження з урахуванням залишкових зварювальних напружень

$$B = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{D \cdot s}{2}} = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{630 \cdot 25}{2}} \approx 70 \text{ мм} \quad (4)$$

Результати прогнозування впливу розміру *B* на розвантаження дефектної ділянки трубопроводу (рис. 6) показали, що при збільшенні лінійного розміру латки приріст інтенсивності пластичних деформацій від експлуатаційного навантаження в зоні стоншення стінки значно зростає, тобто ефективність підсилюючої конструкції зменшується. Це також пояснюється тим, що підсилення дефектної ділянки відбувається через зварне з'єднання накладної латки, і чим більше віддаляється зварне з'єднання від зони стоншення стінки, тим нижче стає ефективність розвантаження в зоні стоншення. Тому при ремонті доцільніше використовувати мінімально допустимі лінійні розміри накладних латок, що матиме більшу ефективність підсилення дефектної ділянки, зменшить витрати на матеріали та час на зварювання.

Вплив залишкових зварювальних напружень. Враховуючи, що зварні з'єднання накладної латки

можуть впливати на НДС зони дефекту трубопроводу, було проведено чисельне визначення залишкового стану дефектної ділянки після приварювання накладної латки. Зварювання проводилось кутовим швом за три проходи. Швидкість зварювання 2 мм/с, погона енергія першого проходу 23219 Дж/см, другого і третього – 28528 Дж/см.

Залишкові напруження та деформації визначались у результаті термопластичного аналізу методом скінченних елементів у результаті простежування за часом кінетики напружень і деформацій під дією термічних циклів нагріву та охолодження при виконанні кожного зварювального проходу по краю накладної латки.

Згідно з результатами чисельного дослідження (рис. 7) у зоні зварних з'єднань накладної латки утворюються високі (до границі текучості і вище) розтягувальні залишкові напруження, які в зоні дефекту стоншення стінки викликають появу врівноважуючих високих стискувальних напружень

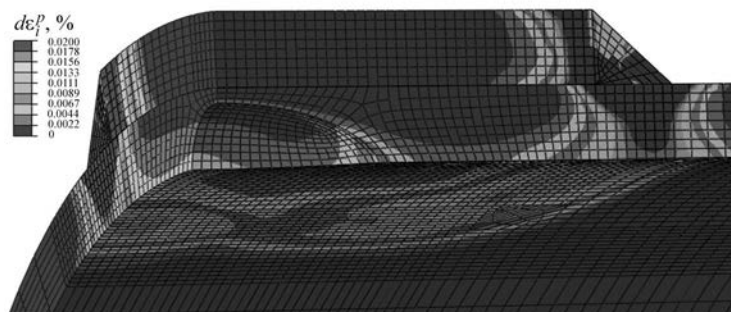


Рис. 8. Розподіл інтенсивності пластичних деформацій $d\varepsilon_p^p$ ділянки трубопроводу з дефектом стоншення стінки з накладною латкою після зварювання та навантаження внутрішнім тиском і температурою (в зоні стоншення $d\varepsilon_p^p = 0,001 \dots 0,002$)

до –200 МПа. При експлуатаційному навантаженні під дією внутрішнього тиску $P = 11,8$ МПа і температури $T = 300$ °С залишкові напруження перерозподіляються та в зоні дефекту стоншення стінки утворюється напружений стан (рис. 7), який характеризується меншою за розмірами зоною високих розтягувальних напружень (до границі текучості матеріалу) у порівнянні з даними без урахування зварювальних залишкових напружень (рис. 4, б). Відповідно приріст інтенсивності пластичних деформацій $d\varepsilon_i^p$ в зоні стоншення стінки дефектної ділянки трубопроводу від експлуатаційного навантаження зменшився з 0,004 до 0,001...0,002 (рис. 8). Можна зробити висновок, що стискувальні залишкові напруження, які утворюються в зоні стоншення стінки в результаті приварювання накладної латки, можуть сприяти підвищенню ефективності підсилення дефектної ділянки трубопроводу.

Висновки

Результати проведеного комплексу розрахункових досліджень ефективності розвантаження дефектної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ показали, що встановлення зварної накладної латки може бути ефективною технологією ремонту технологічних трубопроводів з дефектами ЕКЗ для потреб атомної енергетики. Визначено, що:

1. Доцільно використовувати мінімально допустимі розміри накладних латок, що забезпечує найбільшу ефективність розвантаження дефектної ділянки трубопроводу та зменшує витрати на матеріали і час ремонту.

2. Суттєвою перевагою зварних накладних латок перед бандажами та зварними муфтами є те, що початковий зазор між підсилюючою конструкцією у випадку зварної накладної латки не впливає на ефективність розвантаження дефектної ділянки трубопроводу. Цей фактор дозволяє значно знизити трудомісткість процесу підготовки та встановлення (приварювання) латки при ремонті трубопроводу.

REINFORCEMENT OF AN NPP PIPELINE WITH A WALL THINNING DEFECT BY APPLYING EXTERNAL WELD OVELAY

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

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

Repair of NPP pipelines with erosive and corrosive wear defects is an urgent problem of the nuclear power industry of Ukraine. When repairing the pipeline, the defective section is cut out and a new pipe coil is installed by welding. But for a large number of technological pipelines with identified isolated defects, inadmissible wall thinning, replacement of a pipe section is associated with a large volume of repair work. To extend the service life, the defective section of the pipeline can be reinforced, for example, by welding an external overlay, building-up, installing a bandage or a welded sleeve. In order to justify the expediency of using reinforcing structures of welded external overlay type at pipeline repair, a finite-element analysis of the stress-strain state of a straight section of the pipeline with an erosion-corrosion wear defect under the action of internal pressure before and after repair was carried out. The results of the analysis showed a high efficiency of reinforcing the defective section of the pipeline in the case of using a welded external overlay at repair. The obtained results can be used at justifying the introduction of alternative pipeline repair technologies at NPPs of Ukraine. 8 Ref., 8 Fig.

Keywords: NPP, pipeline, erosion-corrosion wear, wall thinning defect, reinforcing structure, welded external overlay, stress-strain state, ductile fracture, finite element method

3. Стискувальні залишкові напруження, які утворюються в зоні стоншення стінки в результаті приварювання накладної латки, можуть сприяти підвищенню ефективності підсилення дефектної ділянки трубопроводу.

Список літератури/References

- (2011) ГБН В.3.1-00013741-12:2011. *Магістральні газопроводи, ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації*. Київ, Міністерство енергетики та вугільної промисловості України.
- (2011) GBN V.3.1-00013741-12:2011. *Main gas pipelines. Repair by arc welding in service conditions*. Ministry of Energy and Coal of Ukraine [in Ukrainian].
- Jaske, Carl E., Hart, Brian O., Bruce, William A. (2006) *Updated pipeline repair manual*. R2269-01R, United States.
- Repair of Pressure Equipment and Piping*. An American national standard. ASME PCC-2-2018 (Revision of ASME PCC-2-2015).
- Ворона Г.В., Махненко О.В., Міленін О.С. (2023) Ефективність розвантаження ділянки трубопроводу АЕС з дефектом стоншення стінки при встановленні бандажу або зварної муфти. *Техн. діагност. та неруйнів. контроль*, 4, 11–19. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.04.02>
- Vorona, G.V., Makhnenko, O.V., Milenin, O.S. (2023) Effectiveness of unloading a section of NPP pipeline with a pipe wall thinning defect by mounting a band or welded sleeve. *Tekh. Diagnost. ta Neruivniv. Kontrol*, 4, 11–19. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.04.02>
- (2019) *Методика определения допустимых толщин элементов трубопроводов АЭС из углеродистых сталей подверженных действию эрозивно-коррозионного износа МТ-Т.0.03.224-18*. ГП НАЭК «Енергоатом».
- (2019) МТ-Т.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].
- (1989) ПНАЭ Г-7-002-86 *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*. Москва, Энергоатомиздат.
- (1989) PNAE G-7-002-86 *Norms of strength analysis of equipment and pipelines of nuclear power plants*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
- Milenin, A., Velikoivanenko, E., Rozyuka, 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>
- Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. (1966) *Пластинки и оболочки*. Москва, Наука.
- Timoshenko, S.P., Voinovsky-Krieger, S. (1966) *Plates and shells*. Moscow, Nauka [in Russian]

Отримано 23.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 17.05.2024

Прийнято 10.06.2024