

УДК 539.3

<https://doi.org/10.17721/1812-5409.2023/2.18>

Куценко О. Г.¹, к. ф.-м. н., доц.,
Харитонов О. М.¹, к. ф.-м. н., доц.,
Куценко А. Г.², к. ф.-м. н., доц.

O. G. Kutsenko¹, Ph.D (Phys.-Math.),
O. M. Kharytonov¹, Ph.D (Phys.-Math.),
A. H. Kutsenko², Ph.D (Phys.-Math.)

Розклинювання підінтерфейсної тріщини пластичним наплавленням

Wedging of the subinterface crack by plastic cladding

¹ Київський національний університет імені
Тараса Шевченка, 03127, м. Київ, пр-т
Глушкова 4е,

e-mail: Oleksii.Kutsenko@knu.ua

² Національний університет біоресурсів і
природокористування України, 03041, м. Київ,
вул. Героїв Оборони 12

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
03127, Kyiv, Glushkova av., 4e,

e-mail: Oleksii.Kutsenko@knu.ua

² National University of Life and Environmental
Sciences of Ukraine, 03041, Kyiv, Heroyiv Oborony
str., 12

Розглянуто модельну задачу про розтяг двошарового циліндру з кільцевою піднапивною тріщиною, розміщеною в основному матеріалі циліндра. Основний матеріал циліндра вважається лінійно-пружним, наплавлення — пружно-пластичним з білінійним зміцненням. Досліджується залежність коефіцієнта інтенсивності на внутрішньому фронті тріщини від величини зовнішнього навантаження та величини залишкових деформацій в напавленні. Задача розв'язувалася чисельно за допомогою методу скінченних елементів. Встановлено, що пластична зона в напавленні розвивається не за напрямком продовження тріщини, а під деяким кутом до нього. Попередньо проведений аналіз напруженого стану за відсутності тріщини дозволив пояснити цей феномен, як і деякі інші закономірності, отримані в чисельних результатах. Висновки, зроблені в роботі, можуть бути корисними при оцінці тріщиностійкості обладнання та трубопроводів з антикорозійним напавленням.

Ключові слова: двошаровий циліндр, підінтерфейсна тріщина, залишкові деформації.

The model problem of tension of a two-layer cylinder with an annular subcladding crack located at the base material of the cylinder is considered. It is assumed that the base material of the cylinder is linear elastic. The cladding of the cylinder is considered as elastic-plastic with bilinear strengthening. The base material of the cylinder is considered to be linear-elastic, the cladding is considered to be elastic-plastic with bilinear strengthening. The dependence of the stress intensity factor on the internal crack front on the value of the tension stresses and the magnitude of the residual strains in the cladding is investigated. The problem was solved numerically using the finite element method. It was established that the plastic zone in cladding does not develop in the direction of crack extension, but at some angle to it. A preliminary analysis of the stress state in the absence of a crack made it possible to explain this phenomenon, as well as some other regularities obtained in the numerical results. The conclusions presented in the work can be useful in evaluating of the crack resistance of equipment and pipes with anti-corrosion cladding.

Key Words: two-layer cylinder, subcladding crack, residual strains.

Статтю представив член-кор. НАН України, д.ф.-м.н., проф. Жук Я. О.

Вступ

В багатьох галузях промисловості для продовження терміну експлуатації відповідальне обладнання та трубопроводи вкривають шаром анти-

корозійного напавлення. При цьому ще декілька десятиліть назад, коли рівень розвитку обчислювальних засобів був недостатнім для проведення розрахунків на повномасштабних моделях, при

розрахунку такого обладнання на опір крихкому руйнуванню використовувалися наближені інженерні методи і наявність наплавлення не враховувалася (див., наприклад, [1] розділ 3.5.5). Вважалося, що такий підхід є консервативним, тобто нехтування наявності наплавлення йде у запас міцності. З початком широкого застосування комп'ютерної техніки для проведення розрахунків на міцність з'ясувалося, що це не завжди так. Наприклад, у роботі [2] продемонстрований негативний вплив наплавлення на стан напівеліптичної тріщини, що знаходиться в основному металі (ОМ) стінки корпусу реактора ВВЕР-1000 поблизу його інтерфейсної з наплавленням поверхні. Було вказано на причину такого впливу — розклинювання тріщини залишковими деформаціями, які виникають у наплавленні. Проте у вказаній роботі мета дослідження була комплексною і стосувалася, головним чином, впливу радіаційного зміцнення наплавлення на тріщиностійкість КР. Тому детально процес розклинювання тріщини залишковими деформаціями розглянутий не був. Мета даної роботи полягає в усуненні означеного упущення.

Постановка задачі та попередній аналіз

Для з'ясування механізму розклинювання розглянемо модельну задачу про розтяг двошарового циліндра з коловою підінтерфейсною тріщиною постійними осьовими напруженнями p , прикладеними до торця циліндру. Довжина тріщини l вважається постійною, незалежною від колової координати. Таким чином, маємо осесиметричну задачу з додатковою площиною симетрії — площиною розташування тріщини. За таких умов достатньо розглянути напружений стан лише у верхній половині поздовжнього перерізу стінки циліндра (див. рис. 1).

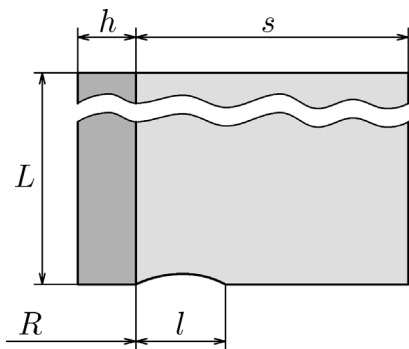


Рис. 1 Поздовжній переріз стінки циліндра

Припускається, що одна з вершин тріщини знаходиться на інтерфейсі, а сама тріщина пов-

ністю розташована в ОМ. Радіус інтерфейсної поверхні R та довжина твірної циліндра L вважаються великим у порівнянні з товщиною шару ОМ s . В свою чергу товщина шару ОМ є значно більшою за товщину наплавлення h та довжину тріщини. Тому для подальшого аналізу раціонально ввести наступні безрозмірні геометричні параметри

$$\bar{l} = l/s, \quad \bar{h} = h/s. \quad (1)$$

Матеріал ОМ вважається ідеально лінійно-пружним з модулем пружності E та коефіцієнтом Пуасона ν . Це пояснюється тим, що межа текучості ОМ значно вища за межу текучості наплавлення. Матеріал же наплавлення моделюється як білінійний з тими самими пружними властивостями. Ділянка зміцнення починається з межі текучості σ_T і відповідає ізотропному зміцненню згідно теорії пластичності Гебера-Мізеса-Генкі:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon < \varepsilon_T, \\ E\varepsilon_T + T(\varepsilon - \varepsilon_T), & \varepsilon > \varepsilon_T, \end{cases} \quad (2)$$

де σ — напруження при одноісному розтягу, ε — відповідна повна (сума пружної і пластичної) деформація, $\varepsilon_T = \sigma_T/E$, T — дотичний модуль, який відповідає залежності пластичних деформацій від напружень. При цьому повний модуль на другій ділянці E_1 рівний $ET(E + T)^{-1}$.

Для розуміння механізму розклинювання тріщини корисно проаналізувати розподіл напружень в ОМ та наплавленні за її відсутності. У цьому випадку напружений стан є лише функцією радіальної координати r . Враховуючи зроблені припущення про співвідношення характерних розмірів, можна вважати, що поздовжні напруження в наплавленні є постійними, а в ОМ — розподіленими лінійно:

$$\sigma_z^{(c)} = \sigma_{z0}, \quad \sigma_z^{(b)} = \sigma_{z1} \frac{R+s-r}{s} + \sigma_{z2} \frac{r-R}{s}, \quad (3)$$

де через $\sigma_z^{(c)}$ та $\sigma_z^{(b)}$ позначені осьові напруження в наплавленні та основному металі (cladding та base metal). Значення сталей σ_{z0} , σ_{z1} , та σ_{z2} , визначаються з умов силової та моментної рівноваги і умов рівності поздовжніх деформацій в основному металі та наплавленні.

Поки в наплавленні не виникає пластичних деформацій, всі ці три сталі рівні розтягуючим напруженням p і осьові напруження не зміню-

ються від точки до точки. Як тільки напруження за Мізесом в наплавленні перевершують межу текучості, вони стають меншими за p . Одночасно з цим зростають σ_{z1} , та σ_{z2} , причому з умови моментної рівноваги випливає, що $\sigma_{z1} > \sigma_{z2}$, тобто в ОМ утворюється згинаючий момент. У випадку наявності тріщини залишкові деформації в наплавленні після зняття зовнішнього навантаження створюють подібний момент протилежного знаку, який і призводить до розкриття берегів тріщини.

Методи дослідження

Сформульована задача розв'язувалася чисельно за допомогою скінченно-елементного пакету CalculiX [3]. Зовнішня та внутрішня границя стінки циліндра, а також берег тріщини вважалися вільним від напружень. На іншій частині нижньої границі області задавалися умови симетрії (нульові нормальні зміщення і дотичні напруження). На верхній границі на першому кроці навантаження задавалися нормальні напруження p та нульові дотичні напруження, на другому — умови вільної границі. На кожному кроці визначався коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) у вершині тріщини, розміщеній в ОМ (правій). Його значення на першому та другому кроках позначалися як K_{\max} і K_{\min} відповідно. Задача розв'язувалася в осесиметричній постановці. Оскільки ОМ вважався ідеально пружним, КІН обчислювався шляхом асимптотичної апроксимації нормальних зміщень точок берегів тріщини. При цьому у вершині тріщини використовувалися сингулярні скінченні елементи. Розрахунки були проведені для практично важливих значень параметрів:

- \bar{h} від 0,02 до 0,06 з кроком 0,01;
- \bar{l} від 0,1 до 0,2 з кроком 0,25;
- $\bar{p} = p / \sigma_T$ від 0,1 до 2 з кроком 0,1.

Результати та їх аналіз

На рис. 2 наведено залежності середньої пластичної деформації на продовженні тріщини в наплавленні від відносної величини розтягуючих напружень. Залежності наведені для різних значень відносної довжини тріщини та постійної товщини наплавлення $\bar{h} = 0,02$. Бачимо, що всі графіки є подібними і утримують дві ділянки: ділянку повільного зростання та ділянку лінійного росту. Перша ділянка відповідає виникненню та розвитку пластичної зони в напла-

вленні, друга — переходу всього наплавлення у пластичний стан. Через наявність тріщини цей перехід відбувається значно раніше, ніж p досягає значення σ_T .

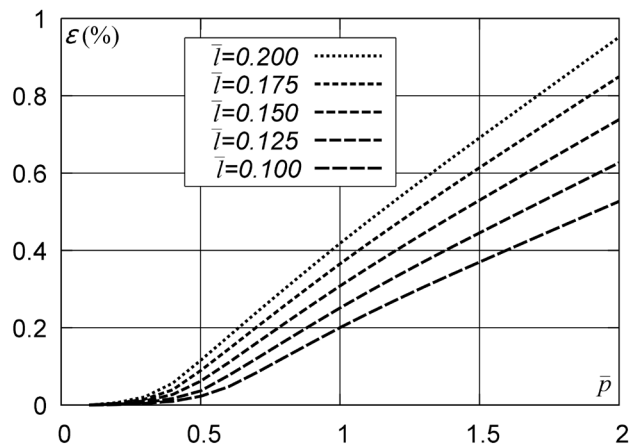


Рис. 2 Залежність середньої пластичної деформації на продовженні тріщини від навантаження при $\bar{h} = 0,02$

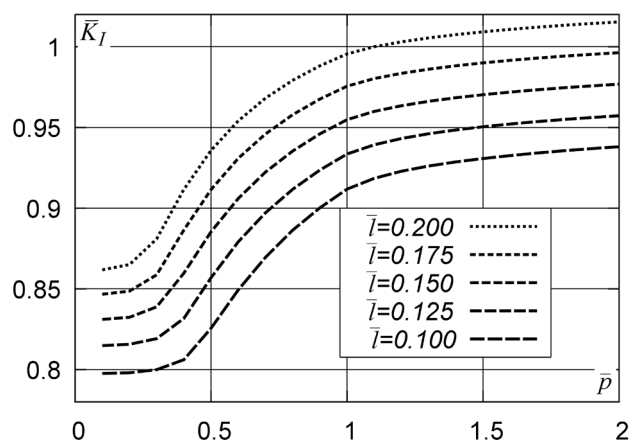


Рис. 3 Залежність КІН на кроці навантаження від його величини при $\bar{h} = 0,02$

На рис. 3 наведено залежності безрозмірного КІН $K_{\max} / (p\sqrt{\pi l})$ від \bar{p} для $\bar{h} = 0,02$. Ці залежності утримують три ділянки: дві крайні і перехідну між ними, причому крайні мають горизонтальні асимптоти. Крайня ліва відповідає малому рівню пластичних деформацій, тобто при $\bar{p} \rightarrow 0$ отримуємо внутрішню кільцеву тріщину в однорідному пружному циліндрі. При $\bar{p} \rightarrow \infty$ графік асимптотично наближається до значення КІН для внутрішньої крайової тріщини (для великих радіусів циліндра $\approx 1,12$), тобто вплив

наплавлення через великі пластичні деформації в ньому зводиться нанівещь.

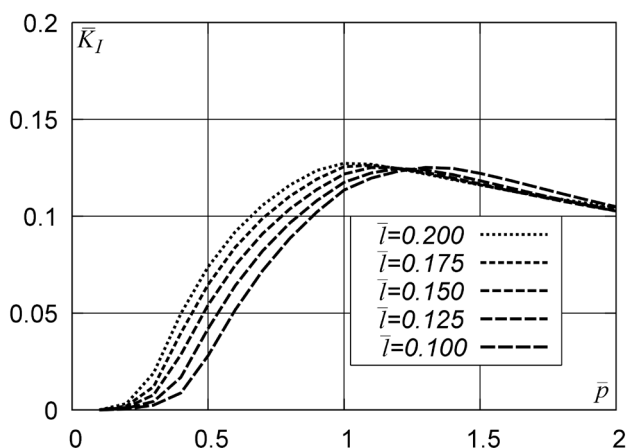


Рис. 4 Залежність КІН на кроці розвантаження від величини навантаження при $\bar{h} = 0,02$



Рис. 5 Зони, де $\sigma_z > \sigma_T$

На рис. 4 наведено залежності безрозмірного КІН $K_{\min} / (p\sqrt{\pi l})$ від \bar{p} для $\bar{h} = 0,02$. Хоч значення даної характеристики на порядок менші за $K_{\max} / (p\sqrt{\pi l})$, якісна поведінка відповідних значень схожа. Відмінним є лише наявність максимуму у кривих з рисунка 4. Крім того, перехідні ділянки на рис. 3 та 4 зміщені вправо у

порівнянні з перехідними ділянками на рис. 2. Відзначимо також, що всі наведені закономірності зберігаються і для інших значень параметра \bar{h} .

Вказані особливості пояснюються тим, що інтегрально напруження в наплавленні на продовженні тріщини зводяться не лише до осьової сили, а також і до моменту. Останнє призводить до зміщення напрямку розвитку пластичної зони з лінії продовження тріщини (див. рис. 5). Після зняття навантаження наявність пружної зони на продовженні тріщини створює момент оберненого знаку, який і розкриває тріщину поблизу внутрішньої (правої) вершини.

Висновки

Розв'язана модельна задача дозволила пояснити механізм впливу пластичних деформацій наплавлення на стан підінтерфейсної тріщини після зняття навантаження. Незважаючи на відносно невисокі відповідні значення КІН, нехтувати цим механізмом не можна, адже в умовах термоудару, коли на внутрішній поверхні обладнання чи трубопроводу різко падає температура, з нею стрімко знижується і значення критичного КІН. Тому навіть такий невисокий рівень напружень в околі вершини тріщини може призвести до її зрушення. Крім того, даний механізм наочно демонструє той факт, що неврахування пластичних деформацій не завжди є консервативним.

Список використаних джерел

1. IAEA Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: PWR Pressure Vessels. Vienna: IAEA, 1999. 175 p.
2. Kutsenko O. Effect of neutron irradiation hardening of the base metal on the results of WWER-1000 reactor pressure vessel residual lifetime assessment / O. Kutsenko, I. Kadenko, X. Pitoiset, O. Kharytonov, N. Sakhno, I. Kravchenko // Int. J. Press. Vessel. Pip. – 2019. – Vol. 171. – P. 173–183.
3. A Free Software Three-Dimensional Structural Finite Element Program [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.calculix.de>.

References

1. IAEA (1999) *Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: PWR Pressure Vessels*. Vienna: IAEA.
2. KUTSENKO, O et al. (2019) *Effect of neutron irradiation hardening of the base metal on the results of WWER-1000 reactor pressure vessel residual lifetime assessment*. Int. J. Press. Vessel. Pip. 171. p.173–183.
3. (2020) A Free Software Three-Dimensional Structural Finite Element Program. Available from: <https://www.calculix.de>.

Надійшла до редколегії 30.06.23