

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГРАНИЧНОГО СТАНУ ЗВАРНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В УМОВАХ УЛЬТРАМАЛОЦИКЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

О.В. Махненко, О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак

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

Експертний аналіз надійності та роботоздатності зварних трубопроводів з виявленими корозійно-ерозійними пошкодженнями за ультрамалоциклового навантаження вимагає врахування кількох взаємопов'язаних фізико-механічних явищ, які визначають граничний стан конкретної конструкції. Для цього в даній роботі було розроблено комплексну чисельну методіку скінченно-елементної оцінки накопичення докритичного руйнування та прогнозування граничного стану типових трубопроводів з тривимірними дефектами стоншення стінки. Як основний було розглянуто в'язкий механізм докритичного пошкодження, крім того, було враховано зміцнення та знеміцнення матеріалу при пластичному деформуванні (деформаційне зміцнення, ефект Баушингера). Цей комплексний підхід дозволив виявити основні закономірності руйнування типового елемента трубопроводу залежно від зовнішнього навантаження. Бібліогр. 14, рис. 7.

Ключові слова: зварний трубопровід, корозійно-ерозійний дефект, ультрамалоциклове навантаження, ефект Баушингера, в'язке руйнування, граничний стан.

Чисельна оцінка залишкової міцності трубопроводних елементів (ТЕ) з виявленими корозійно-ерозійними втратами металу є характерним завданням експертного аналізу надійності різних промислових систем. Загальноприйнятим підходом до вирішення цього завдання є оцінка граничного стану конкретної конструкції при номінальному експлуатаційному навантаженні. Оскільки більшість трубопроводів є зварними, слід враховувати вплив залишкового напружено-деформованого стану (НДС), якщо втрати металу знаходяться в зоні зварювання. Ця проблема добре вивчена для статичного навантаження (наприклад, внутрішнім тиском) [1–3], тоді як для циклічного силового впливу просторова неоднорідність і взаємопов'язаність фізико-механічних процесів, які викликають докритичне пошкодження та руйнування матеріалу, потребують суттєвої консервативності відповідних аналітичних методів. Зокрема, ультрамалоциклова втома відрізняється значним пластичним плином матеріалу, що вимагає врахування його деформаційного зміцнення, знеміцнення за ефектом Баушингера та зародження пор в'язкого руйнування [4]. Наявність зварного з'єднання і локальних геометричних аномалій конструкції (експлуатаційні дефекти корозійно-ерозійної втрати металу) визначає особливості напружено-деформованого стану трубопроводних елементів під дією внутрішнього тиску і/або згинального моменту та впливає на опір руйнуванню.

В рамках даної роботи на основі скінченно-елементного прогнозування досліджено ха-

рактерні особливості накопичення докритичного пошкодження та граничного стану зварних трубопроводів з корозійно-ерозійними втратами металу при ультрамалоциклового навантаженні.

Математична модель кінетики стану зварного ТЕ під дією статичного та циклічного навантаження. Граничний стан кородованого (еродованого) ТЕ залежить від низки фізико-механічних процесів, ініційованих експлуатаційним і технологічним впливом. У разі значного деформування за циклічного навантаження (наприклад, землетрус, зсув, перевантаження, втрата стійкості та ін.) граничний стан трубопроводу визначається розвитком пластичних деформацій та відповідним накопиченням докритичного пошкодження аж до зародження макродефекту. Локальні втрати металу та відповідні концентратори механічних напружень призводять до певного зниження несучої здатності ТЕ під тиском. Їх допустимість визначається відповідними стандартними нормами на проектні експлуатаційні умови, але ультрамалоциклове навантаження (кількість циклів від 10 до 100) веде до виняткових режимів експлуатації трубопроводу, що ускладнює експертний аналіз їх відповідності проектним вимогам. Основна складність полягає в нелінійній реакції матеріалу на циклічне пластичне деформування та розвитку його властивостей. Таким чином, поряд із характерним деформаційним зміцненням можна виділити два можливі механізми знеміцнювання матеріалу: ефект Баушингера через зміну напрямку пластичної деформації та накопичення пористості в'язкого руйнування із супутнім зменшенням несучого нетто-перерізу конструкції [5]. Наявність зварних швів викликає

просторову неоднорідність НДС та складну взаємодію експлуатаційних та залишкових напружень. Це також слід враховувати, особливо у випадку близького розташування вграт металу та зварного шва.

За відсутності гострих геометричних концентраторів напружень переважаючим механізмом порушення цілісності матеріалу є в'язке руйнування, яке полягає в зародженні рівномірно розподілених пор [6]. Для прогнозування їх зародження при пластичному плинні матеріалу в неізотермічних випадках пропонується використання деформаційного критерію, згідно з яким у деякому об'ємі металу з'являється початкова пористість із об'ємною концентрацією f_0 при виконанні наступної умови:

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

де $d\varepsilon_i^p = \sqrt{2/3} \cdot \sqrt{d\varepsilon_{ij}^p \cdot d\varepsilon_{ij}^p}$ – інтенсивність приросту пластичних деформацій; $\varepsilon_c(T)$ – критична величина пластичних деформацій; $i, j = r, \beta, z$ – координати в циліндричній системі координат (рис. 1).

Подальше зростання концентрації пор в'язкого руйнування в процесі пластичного деформування металу, зокрема, при експлуатаційному статичному або циклічному навантаженні, відповідає закону Райса-Трейсі [7]:

$$df = \begin{cases} 1,28 \exp\left(\frac{3}{2} \frac{\sigma}{\sigma_i}\right) d\varepsilon_i^p, & \text{якщо } \frac{\sigma}{\sigma_i} > 1 \\ 1,28 \left(\frac{\sigma}{\sigma_i}\right)^{1/4} \exp\left(\frac{3}{2} \frac{\sigma}{\sigma_i}\right) d\varepsilon_i^p, & \text{якщо } \frac{1}{3} \leq \frac{\sigma}{\sigma_i} \leq 1. \end{cases} \quad (2)$$

Математичний розгляд об'єднаної задачі кінетики температурного поля при зварюванні, розвитку НДС і формування мікропор базується на скінченно-елементному описанні з використанням восьмивузлових скінченних елементів (СЕ). Приріст тензора деформацій було представлено як суму відповідних компонентів [8]:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + \delta_{ij} (d\varepsilon_T + df/3), \quad (3)$$

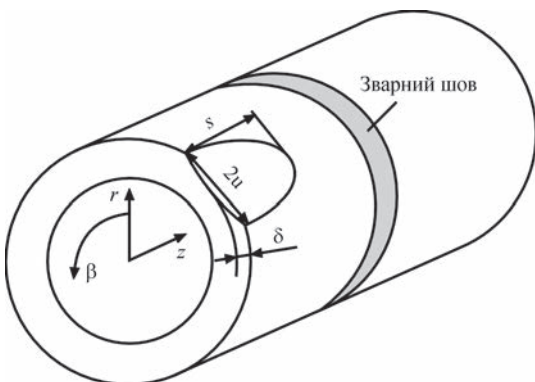


Рис. 1. Схема ділянки дефектного трубопроводу в циліндричній системі координат

де $d\varepsilon_{ij}^e$, $d\varepsilon_{ij}^p$, $\delta_{ij} \cdot d\varepsilon_T$, $\delta_{ij} \cdot df/3$ – компоненти приросту тензора деформацій, обумовлених пружним механізмом деформування, деформаціями миттєвої пластичності, кінетикою неоднорідного температурного поля та пористістю, відповідно.

Виходячи зі сказаного вище, прирости тензора деформацій можуть бути представлені у вигляді суперпозиції приростів відповідних складових:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) + \delta_{ij}(K\sigma + \Delta\varepsilon_T + \Delta f/3) - \frac{1}{2G}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)^* - (K\sigma)^*, \quad (4)$$

де символ «*» відносить відповідну змінну до попереднього кроку простежування; Ψ – функція стану матеріалу визначає умову пластичного плинну відповідно до критерію Мізеса з додатковим урахуванням зменшення несучого нетто-перерізу скінченного елемента в результаті формування несучільності в рамках моделі Гурсона-Твергаарда-Нідлмана [9]:

$$\Psi = \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_s = \\ = \sigma_T \sqrt{1 + (q_3 f')^2 - 2q_1 f' \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma}{2\sigma_T}\right)}, \\ \Psi > \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s, \quad (5)$$

стан $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимий.

Визначення функції Ψ проводиться ітеруванням на кожному кроці чисельного простежування (за часом або за приростом навантаження) в рамках скінченно-елементного розв'язання крайової задачі нестационарної термопластичності, що дозволяє розв'язати нелінійність за пластичним плинном матеріалу з урахуванням його докритичного пошкодження [10]. Основна складність при моделюванні циклічного навантаження полягає в тому, що невеликі зміни стану металу на одному циклі навантаження, а саме накопичення і зростання докритичного пошкодження, викликають зміну поверхні плинності та відповідну зміну петлі пластичного деформування. Але при цьому на кожному етапі навантаження необхідно визначити рівноважний стан пошкодження і відповідний йому розподіл напружень і деформацій. Для цього з припущення, що стаціонарний стан характеризується нехтовно малою швидкістю зростання об'єму пор в'язкого руйнування, пропонується проводити наступний ітераційний процес по функції Ψ_k :

$$F = \begin{cases} F + dF, & \text{якщо } f_0 K_1 \exp(K_2 \frac{\sigma}{\sigma_i}) d\varepsilon_i^p = \\ = \Psi_k \leq \Psi_k^0 \approx 10^{-5}; \\ F, & \text{якщо } \Psi_k > \Psi_k^0, \end{cases} \quad (6)$$

де F – система зовнішніх силових навантажень, що діють на конструкцію; dF – приріст силових навантажень у процесі чисельного простежування; K_1, K_2 – константи.

Деформаційне зміцнення металу впливає на форму поверхні плинності Мізеса, яку, залежно від інтенсивності накопичених пластичних деформацій, прийнято розглядати в наступному вигляді [11]:

$$\sigma_T = \sigma_T^0 \left[1 + c_1 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) + c_2 \left\{ \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right\}^2 \right] \left[1 + \left(\frac{\epsilon^p}{\epsilon_0} \right)^m \right], \quad (7)$$

де $c_1 = 2,149 \cdot 10^{-3}$; $c_2 = 9,112 \cdot 10^{-2}$; $\epsilon_0 = 1,540 \cdot 10^{-4}$, $m = 0,14$ – константи; крапкою над змінною позначено диференціювання за часом.

В разі необхідності врахування зміни напрямку пластичного деформування (наприклад, при змінному статичному навантаженні, що викликає знакозмінний цикл пластичного деформування), використовувалася модель кінематичного зміцнення матеріалу в наступній формі [12]:

$$\sqrt{\frac{3}{2}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma - \bar{X})(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma - \bar{X})} - \sigma'_T(f') \left[1 + \left(\frac{\epsilon^p}{\epsilon_0} \right)^M \right] \leq 0, \quad (8)$$

де $\sigma'_T(f')$ – поточна істинна межа плинності пошкодженого матеріалу відповідно (9); M, ϵ_0 – константи матеріалу; \bar{X} – тензор зсуву:

$$\bar{X} = \text{sign}(\epsilon^p) \frac{C}{\gamma} + \left[X_0 - \text{sign}(\epsilon^p) \frac{C}{\gamma} \right] \times \exp \left[-\text{sign}(\epsilon^p) (\epsilon^p - \epsilon_0^p) \right]. \quad (9)$$

Виходячи з конкретного значення функції Ψ із (5) визначається поле деформацій на кожному етапі навантаження з урахуванням залежності $\sigma_s(T, \epsilon^p)$. Компоненти тензора напружень задовольняють рівнянням статики для внутрішніх СЕ і граничним умовам – для поверхневих. У свою чергу, компоненти вектора $\Delta U_i = (\Delta U, \Delta V, \Delta W)$ задовольняють відповідним умовам на границі. Розв’язується система рівнянь у змінних вектора приростів переміщень у вузлах СЕ на кожному кроці простежування та ітерацій по Ψ (Ψ_k) визначається мінімізацією наступного функціонала [13]:

$$\mathcal{E}_I = -\frac{1}{2} \sum_V (\sigma_{ij} + J_{ij}) \Delta \epsilon_{ij} V_{m,n,r} + \sum_{S_p} F_i \Delta U_i \Delta S_p^{m,n,r}, \quad (10)$$

де \sum_V – оператор суми по внутрішніх СЕ, \sum_{S_p} – оператор суми по поверхневих СЕ, на яких задані компоненти силового вектора F_i .

Критерієм зародження макродефектності матеріалу ТЕ є виконання однієї з трьох умов руйнування [14]:

$$\Psi \geq \frac{1}{2G} + \frac{\epsilon_f - (\epsilon_i^p)^*}{1,5\sigma_s(\epsilon_i^p)};$$

$$f' \geq f_F = \frac{1}{q_1} \exp \left(-\frac{3q_2\sigma}{2\sigma_T} \right); \quad (11)$$

$$\frac{\sigma_1}{1 - 2f/3} > S_K,$$

де ϵ_f – гранична деформація, яка, у загальному випадку, залежить від жорсткості напруженого стану; S_K – напруження мікротрещини; q_1, q_2 – константи.

Якщо зазначений процес втрати несучої здатності СЕ відбувається на даному етапі навантаження, охоплюючи все більшу кількість сусідніх СЕ, і не дозволяє перейти до наступного кроку навантаження, то даний крок визначає граничне навантаження «спонтанного руйнування».

Результати і обговорення. Як було зазначено вище, залишковий НДС в області зварного шва, кінематичне зміцнення та в’язке руйнування впливають на граничний стан дефектного ТЕ при ультрамалоциклового навантаженні внутрішнім тиском і моментом згину. Однією з основних задач, яку необхідно розв’язати за допомогою розробленого чисельного підходу, є визначення впливу цих взаємопов’язаних явищ на несучу здатність конкретної зварної конструкції. Як для цього було розглянуто характерний приклад ТЕ розміром $D \times t = 315 \times 10$ мм з неіржавної сталі 316L ($E = 193$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\sigma_T = 170$ МПа) з локальною ерозійною втратою металу напівліпчастої форми на внутрішній поверхні труби ($2s \times 2u \times \delta = 40 \times 20 \times 5$ мм). Приклади розподілу напружень в перерізі труби після зварювання та в робочих умовах наведені на рис. 2.

На рис. 3, а показані залежності локальних напружень $\sigma_{\beta\beta}$ від деформації $\epsilon_{\beta\beta}$ поблизу внутрішнього дефекту ерозійного стоншення з урахуванням та без урахування пластичного пошкодження матері-

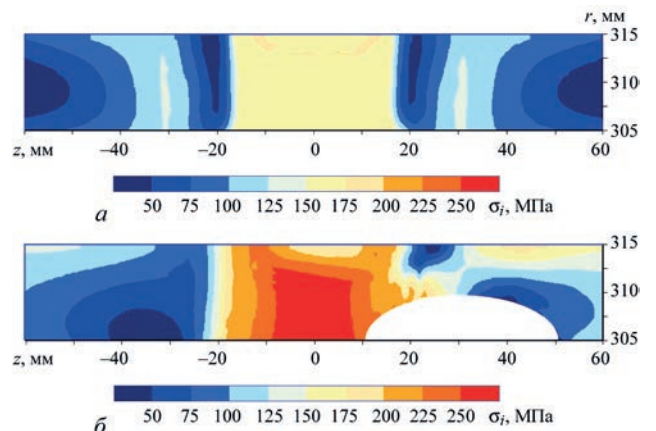


Рис. 2. Розрахункові розподіли інтенсивності напружень σ_i в трубопроводі ($D \times t = 315 \times 10$ мм, неіржавна сталь 316L): а – залишковий стан в області кільцевого монтажного зварного шва; б – з внутрішнім ерозійним дефектом ($2s \times 2u \times \delta = 40 \times 20 \times 5$ мм) під робочим тиском $P = 8,0$ МПа

алу, спричиненого внутрішнім тиском $P = 10$ МПа і моментом згину M від -85 до 85 кН·м (що відповідає діапазону максимального осьового напруження від -120 до 120 МПа). Як видно, накопичення пористості в'язкого руйнування за пластичного деформування сталевих труб призводить до переміщення петель гістерезису напруженості до вищих деформацій через зменшення пористих матеріалів та зменшення перерізу несучої конструкції.

Інтенсивність накопичення пластичного пошкодження при ультрамалоцикловому навантаженні (тобто швидкість зростання концентрації об'єму пористості f за кількості циклів N) має три основні етапи: пластична деформація перед зародженням пластичного пошкодження; зародження пористості та перерозподіл полів деформацій і напружень; стабільне зростання пластичних деформацій та концентрації об'єму пористості до граничного стану. Перші два етапи відповідають статичному навантаженню і відбуваються на перших циклах, тоді як третій

пов'язаний зі втомним руйнуванням пластично деформованого матеріалу. На рис. 3, б показані результати чисельної оцінки накопичення пластичного пошкодження для розглянутого прикладу еродованого ТЕ в стабільній стадії росту. Як видно, концентрація пористості f збільшується квазілінійно, починаючи з другого циклу навантаження моментом згину під тим же внутрішнім тиском P . Це означає, що швидкість росту f в основному залежить від прикладеного діапазону навантаження згином, але не від шляху пластичного (або загального) деформування.

Слід зазначити, що в разі впливу виключно змінного за симетричним циклом тиску (наприклад, для випадку підводних трубопроводів або складних посудин тиску – баків ракет носіїв, що знаходяться під впливом як внутрішнього, так і зовнішнього тиску) залежність поточних напружень від деформацій у характерній області концентратора напружень ТЕ з дефектом стоншення стінки має класичний вигляд замкненої петлі гістерезису (рис. 4).

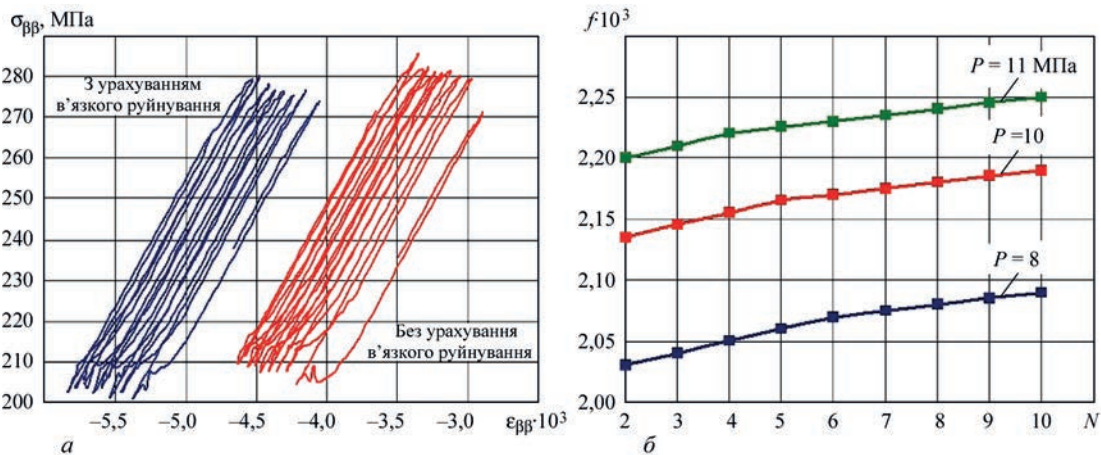


Рис. 3. Залежності напружень $\sigma_{\text{вв}}$ від деформацій $\epsilon_{\text{вв}}$ поблизу внутрішнього дефекту ерозійного стоншення стінки ($2s \times 2u \times \delta = 40 \times 20 \times 5$ мм) трубопроводного елемента ($D \times t = 315 \times 10$ мм, 316L) з урахуванням і без урахування пошкодження матеріалу за в'язким механізмом (внутрішній тиск $P = 10$ МПа та момент згину $M = -85 \dots 85$ кН·м) – (а) та максимальна об'ємна концентрація пор f від кількості циклів N – (б)

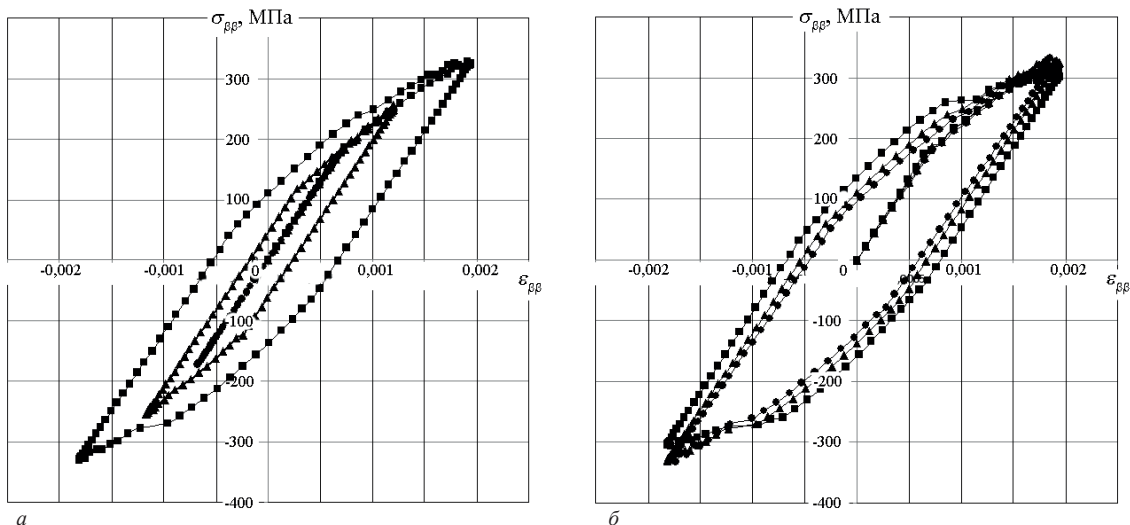


Рис. 4. Вплив змінного внутрішнього тиску на кінетику напружено-деформованого стану дефектного зварного ТЕ ($D \times t = 315 \times 10$ мм, 316L): (а) – $2s \times 2u \times \delta = 40 \times 20 \times 5$ мм, $P = -20 \div 20$ МПа, $M = 0$ кН·м (●), $P = -30 \dots 30$ МПа, $M = 0$ кН·м (▲), $P = -40 \dots 40$ МПа, $M = 0$ кН·м (■); (б) – $P = -40 \dots 40$ МПа, $M = 0$ кН·м, $2s \times 2u \times \delta = 40 \times 20 \times 4$ мм (●), $2s \times 2u \times \delta = 40 \times 20 \times 5$ мм (■), $2s \times 2u \times \delta = 40 \times 20 \times 6$ мм (▲).

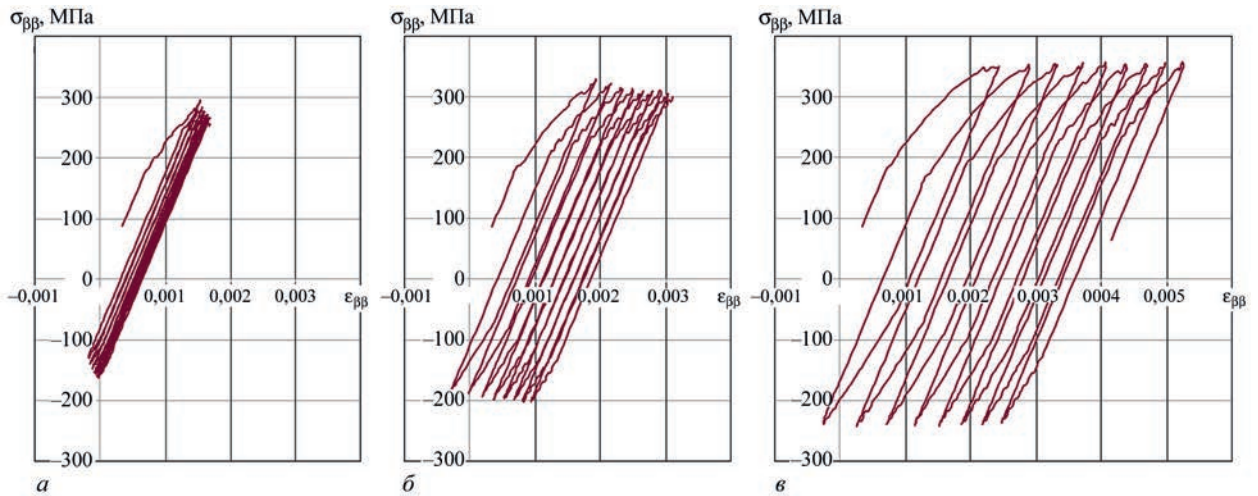


Рис. 5. Особливості впливу асиметрії циклу навантаження ТЕ ($D \times t = 315 \times 10$ мм, 316L) внутрішнім тиском на кінетику накопичення пластичних деформацій: *a* – $P = -15 \dots 35$ МПа, $M = 0$ кН·м; *б* – $P = -20 \dots 40$ МПа, $M = 0$ кН·м; *в* – $P = -25 \dots 45$ МПа, $M = 0$ кН·м

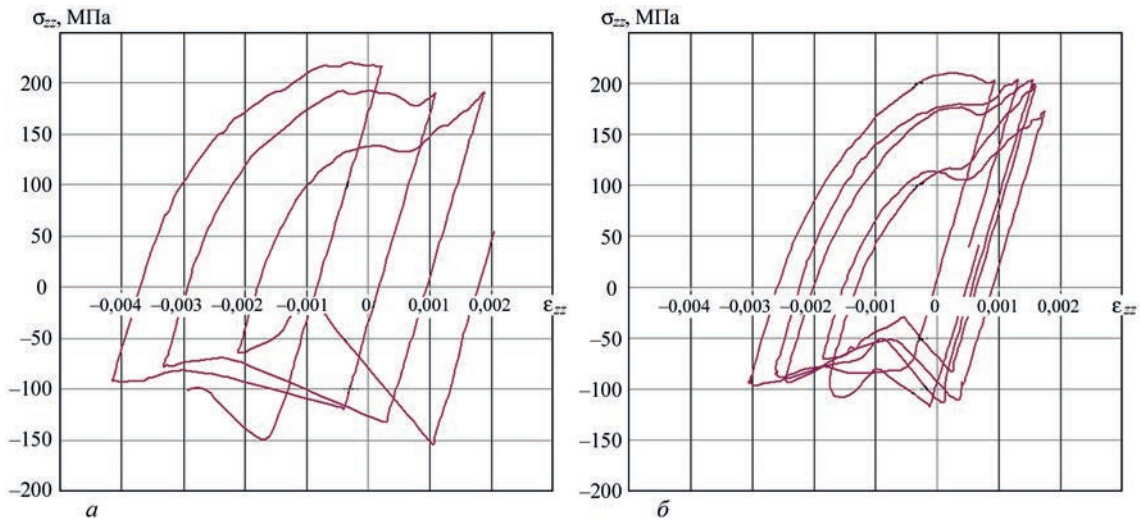


Рис. 6. Кінетика напружено-деформованого стану дефектного зварного ТЕ ($D \times t = 315 \times 10$ мм, 316L) під дією циклічного навантаження моментом згину: *a* – $P = 10$ МПа, $M = -70 \dots 70$ кН·м; *б* – $P = 8$ МПа, $M = -70 \dots 70$ кН·м

форма петлі в такому разі залежить від розмаху значень тиску, а також від розміру дефекту. Це означає, що обмеження роботоздатності в такому випадку зумовлене виключно накопиченням докритичного пошкодження за в'язким механізмом, яке викликає поступове руйнування матеріалу та досягнення ним граничного стану. При асиметрії циклу навантаження інтенсивності позитивних і негативних пластичних деформацій не врівноважені, що викликає поступове зміщення петлі гістерезису вздовж вісі деформацій (рис. 5), що для вказаного випадку пояснюється більшим впливом деформаційного зміцнення у порівнянні з ефектом Баушингера.

Для практично важливих випадків така асиметрія циклу характерна для трубопроводів під тиском, що додатково циклічно навантажені знакозмінним моментом згину. При цьому до власне згинальних повздовжніх напружень і деформацій, що типово змінюються за симетричним циклом, додається постійна компонента, яка пропорційна внутрішньому тиску відповідно до розв'язання задачі Ламе. Тому слід очікувати, що при незмінному циклі наванта-

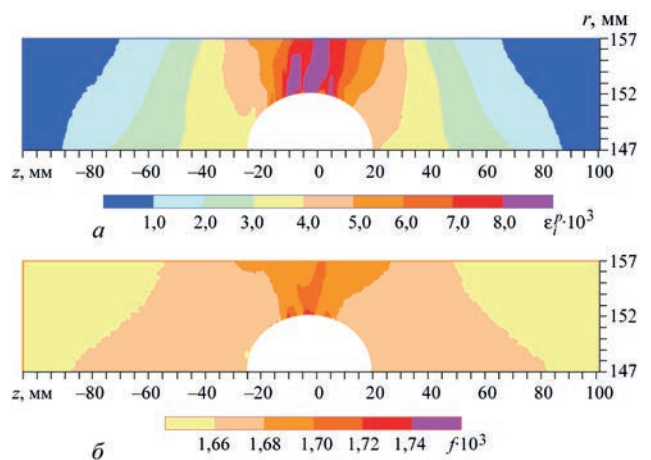


Рис. 7. Розподіл інтенсивності пластичних деформацій (*a*) та концентрації пор в'язкого руйнування (*б*) в перерізі трубопровідного елемента ($D \times t = 315 \times 10$ мм, 316L) з внутрішнім стоншенням стінки ($2s \times 2u \times \delta = 40 \times 20 \times 5$ мм) при граничному стані під дією внутрішнього тиску $P = 8$ МПа та циклічного моменту згину $M = -85 \dots 85$ кН·м)

ження моментом згину збільшення внутрішнього тиску матиме суттєвий негативний вплив на несучу здатність дефектного трубопроводу по причині

більш значного зміщення петлі гістерезису напружено-деформованого стану. Це підтверджується результатами розрахунків, приведених на рис. 6.

Характерною особливістю поля об'ємної концентрації докритичного пошкодження f в перерізі дефектного трубопроводу, що перебуває під впливом як внутрішнього тиску, так і змінного моменту згину, достатньо вузька область максимальної концентрації пор в поточному та граничному стані конструкції (рис. 7). Це пояснюється тим, що в умовах циклічного навантаження в залежності від напрямку деформування максимальне та мінімальне напруження формуються поперемінно на різних поверхнях труби в області геометричного концентратора.

Висновки

1. Побудовано математичні моделі напружено-деформованого і пошкодженого стану трубопроводних елементів з виявленими дефектами локального стоншення стінки при ультрамалоциклового навантаженні. Для адекватного врахування нелінійності властивостей матеріалу при циклічному пластичному деформуванні (ефект Баушингера) і накопиченні в'язкого руйнування запропоновано відповідне описання поверхні пластичного плину матеріалу в рамках континуальної моделі пружно-пластичного суцільного середовища.

2. На характерному прикладі зварного трубопроводного елемента ($D \times t = 315 \times 10$ мм, неіржавна сталь 316L) з виявленим внутрішнім дефектом ерозійного стоншення стінки показані особливості кінетики напружено-деформованого стану в умовах навантаження циклічним внутрішнім тиском і моментом згину. Показано суттєвий вплив асиметрії циклу навантаження на накопичення пластичних деформацій: порушення балансу між деформаційним зміцненням і знеміцненням за ефектом Баушингера викликає поступове зміщення петлі напружено-деформованого стану.

3. Показано, що накопичення пластичних деформацій в процесі знакозмінного циклічного навантаження викликає зародження та зростання пор в'язкого руйнування в області дефекту локального стоншення стінки з формуванням досить вузької

області максимальної концентрації пор. Це викликано тим, що в умовах циклічного навантаження максимальне та мінімальне напруження формуються на різних поверхнях труби в області геометричного концентратора (в залежності від циклу).

Список літератури/References

- (2004) *Recommended Practice*, DNV-RP-F101. Corroded Pipelines. Edited by O. Bjornoy. Hovik, Det Norske Veritas..
- Hertelé, S., Cosham, A., Roovers, P. (2016) Structural integrity of corroded girth welds in vintage steel pipelines. *Engineering Structures*, 124, 429–441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.045>.
- 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>
- Morin, L., Michel, J.-C., Leblond, J.-B. (2017) A Gurson-type layer model for ductile porous solids with isotropic and kinematic hardening. *Int. J. of Solids and Structures*, 118–119, July, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.03.028>
- Chun, B.K., Jinn, J.T., Lee, J.K. (2002) Modeling the Bauschinger effect for sheet metals, part I: theory. *International J. of Plasticity*, 18, 571–595. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00046-8](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00046-8).
- Xue, L. (2008) Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 3343–3366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.07.022>
- Chen, Z., Butcher, C. (2013) *Micromechanics Modelling of Ductile Fracture*. Dordrecht, Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6098-1>.
- Makhnenko, V. (2013) Problems of examination of modern critical welded structures. *The Paton Welding J.*, 5, 21–28.
- Zhang, Z.L. (2001) *A complete Gurson Model*. Nonlinear Fracture and Damage Mechanics. Edited by M. H. Alibadi. UK, WIT Press Southampton, 223–248.
- Velikoivanenko, E., Milenin, A., Popov, A. et al. (2019) Methods of numerical forecasting of the working performance of welded structures on computers of hybrid architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, 55, 1, 117–127. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00117-8>.
- Cowper, G.R., Symonds, P.S. (1958) *Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams*. Brown Univ, Applied Mathematics Report.
- Lemaitre, J., Chaboche, J.-L. (1990) *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167970>.
- Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
- Makhnenko, V.I. (2006) *Safe service life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- Milenin, O. (2017) Numerical prediction of the current and limiting states of pipelines with detected flaws of corrosion wall thinning. *J. of Hydrocarbon Power Engineering*, 4, 1, 26–37.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE FEATURES OF LIMITING STATE OF WELDED PIPELINE ELEMENTS UNDER ULTRA-LOW-CYCLE LOADING

O.V. Makhenko, O.S. Milenin, O.A. Velikoivanenko, G.P. Rozyinka, N.I. Pivtorak

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str, 03150, Kyiv, Ukraine,

E-mail: office@paton.kiev.ua

Expert analysis of the reliability and performance of welded pipelines with detected corrosion-erosion damage under ultra-low-cycle loading requires taking into account several interrelated physico-mechanical phenomena, which determine the limiting condition of a specific structure. For this purpose, integrated numerical procedure was developed in this study for finite-element assessment of subcritical fracture accumulation and prediction of the limiting state of typical pipelines with 3d defects of wall thinning. The ductile mechanism of subcritical fracture was considered as the main one. Moreover, material hardening and softening at plastic deformation (strain hardening, Bauschinger effect) was taken into account. This integrated approach allowed revealing the main regularities of failure of a typical pipeline element, depending on external loading. 14 Ref., 7 Fig.

Keywords: welded pipeline, corrosion-erosion defect, ultra-low-cycle loading, Bauschinger effect, ductile fracture, limiting condition

Надійшла до редакції 30.11.2021