

ЧИСЕЛЬНА МЕТОДОЛОГІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЗВАРНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ КОРОЗІЙНО-ЕРОЗІЙНИМИ ДЕФЕКТАМИ

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

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

Для розв'язання типових практичних задач експертного аналізу технологічного стану та залишкового ресурсу безпечної експлуатації зварних елементів магістральних та технологічних трубопроводів із виявленими в процесі діагностики дефектами корозійно-ерозійної втрати металу розроблено комплекс методик, математичних моделей та засобів їх скінченно-елементної реалізації. Для зниження консервативності аналізу враховано взаємопов'язані процеси термодформування при монтажному та ремонтному зварюванні, а також зародження та розвиток докритичного пошкодження матеріалу дефектної конструкції за в'язким механізмом в процесі експлуатації за складних температурно-силових умов зовнішнього впливу. Було розроблено методики статистичного аналізу схильності зварних трубопроводів до руйнування на основі методів Вейбула та Монте-Карло, підтверджено адекватність розроблених розрахункових методів. Визначено особливості впливу зварювання на надійність та працездатність магістральних і технологічних трубопроводів із виявленими дефектами корозійно-ерозійної втрати металу для мінімально консервативних рекомендацій щодо можливості безпечної експлуатації трубопроводів. Бібліогр. 18, табл. 2, рис. 12

Ключові слова: трубопровід, дефект корозійно-ерозійної втрати металу, зварне з'єднання, граничний стан, надійність, ймовірність руйнування, в'язке руйнування

Визначення залишкової міцності та працездатності трубопроводних елементів (ТЕ) з виявленою дефектністю є типовою задачею в комплексі заходів аналізу фактичного технічного стану та забезпечення надійної експлуатації. Зокрема, для магістральних та технологічних трубопроводів довготривалої експлуатації типовим є накопичення дефектів несучільності металу, які знижують їх несучу здатність аж до аварійного стану. Найбільш поширеними дефектами є поверхневі корозійно-ерозійні стоншення стінки труби, поява яких викликана взаємодією конструкції з агресивним середовищем чи негативним впливом продукту, що транспортується. Оцінка припустимості ізольованих дефектів корозійно-ерозійної втрати металу регламентується низкою вітчизняних та закордонних нормативних документів, загальність яких вимагає суттєвої консервативності. Зокрема, типовим інженерним підходом є суттєве спрощення чи ігнорування особливостей напружено-деформованого стану (НДС) ТЕ в області монтажних або ремонтних зварних швів в разі наявності на його периферії дефекту стоншення стінки. Це пов'язано зі складністю опису процесів взаємодії напружень різного типу (залишкових і в зоні концентратора) та відповідного розвитку докритичного руйнування матеріалу труби, яке, в свою чергу, визначає граничний стан дефектного ТЕ.

Для визначення граничного стану зварних конструкційних елементів за складного зовнішнього

впливу та розв'язання споріднених прикладних задач однією з сучасних тенденцій в світовій науковій практиці є розробка методів чисельного скінченно-елементного прогнозування просторових мультифізичних процесів, що визначають зародження та розвиток руйнування матеріалу. Для зазначеної задачі експертного аналізу надійності зварних ТЕ з локальними втратами металу в рамках цього дослідження було поставлено за мету розробити комплексну методологію чисельного прогнозування залишкового НДС в області монтажного (ремонтного) зварювання, моделювання спільного розвитку напружень, деформацій, докритичного пошкодження і сформулювати відповідні критерії граничного стану та параметрів надійності.

В залежності від проектних умов експлуатації конкретного ТЕ необхідно враховувати різні фактори впливу на схильність конструкції до руйнування. Стосовно трубопроводів із виявленими тривимірними дефектами корозійно-ерозійної втрати металу основним механізмом докритичного пошкодження матеріалу прийнято вважати в'язкий механізм, який полягає в зародженні та розвитку пористості матеріалу певної об'ємної концентрації f за пластичного плинину металу під дією зовнішнього статичного чи циклічного навантаження [1, 2]. Таким чином, чисельне простежування напружено-деформованого та пошкодженого станів дефектного ТЕ має враховувати особливості зовнішнього експлуатаційного

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

© О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак, 2020

впливу на матеріал труби, зокрема, на кінетику необоротних деформацій, що зумовлюють зародження та розвиток пористості в'язкого руйнування.

При визначенні залишкового НДС в області монтажних нероз'ємних з'єднань необхідно враховувати як власне вплив технологічних параметрів зварювання, так і температурні залежності основних властивостей матеріалу труби. Для цього в рамках цієї роботи проводилося чисельне прогнозування кінетики температурних полів шляхом розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності. Отриманий таким чином розвиток просторово розподілених температур, а також зміна структурного складу визначають формування і наступний перерозподіл напружень і деформацій у конструкції, що, у свою чергу, визначає особливості граничного стану в експлуатаційних умовах.

Моделювання кінетики НДС та докритичного пошкодження проводилося в рамках скінченно-елементної постановки крайової задачі нестационарної термопластичності та в'язкого руйнування. Так, приріст тензора деформацій в конкретному скінченному елементі (СЕ) при зварюванні та подальшій експлуатації з урахуванням наявності мікропор в'язкого руйнування визначався у відповідності з наступним виразом [3]:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + d\epsilon_{ij}^c + \delta_{ij} (d\epsilon_T + df/3), \quad (1)$$

де $d\epsilon_{ij}^e$, $d\epsilon_{ij}^p$, $d\epsilon_{ij}^c$, $\delta_{ij} \cdot d\epsilon_T$, $\delta_{ij} \cdot df/3$ – компоненти приросту тензора деформацій, обумовлених пружним механізмом деформування, деформаціями миттєвої пластичності, повзучістю, кінетикою неоднорідного температурного поля та пористістю, відповідно, $(i, j) = \{r, \beta, z\}$ (рис. 1).

Прирости тензора деформацій було представлено у вигляді суперпозиції приросту відповідних складових [4, 5]:

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_{ij} = & \left[\Psi + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta\tau \right] (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) + \\ & + \delta_{ij} (K\sigma + \Delta\epsilon_T + \Delta f/3) - \\ & - \left[\frac{1}{2G} + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta\tau \right] (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma)^* - (K\sigma)^*, \end{aligned} \quad (2)$$

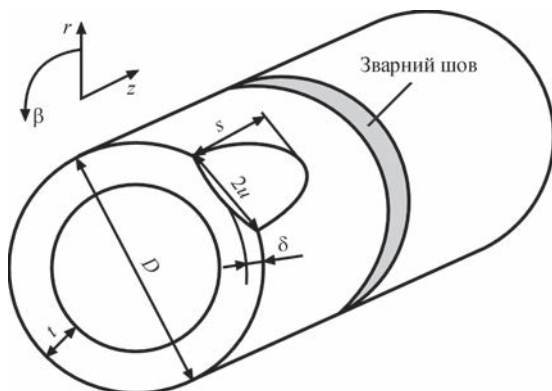


Рис. 1. Схема трубопроводного елемента з локальним дефектом втрати металу на зовнішній поверхні в циліндричній системі координат

де символ «*» відносить відповідну змінну до попереднього кроку простежування; G – модуль зсуву; $\Omega(\sigma_i, T) = A_c \exp\left(\frac{G_c}{T + 273}\right) \cdot \sigma_i^{n_c}$ – функція

повзучості; n_c , A_c , G_c – константи; Ψ – функція стану матеріалу, що визначає умову пластичного плину відповідно до моделі Гурсона-Твергаарда-Нідлмана [6]:

$$\Psi = \frac{1}{2G} + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta\tau, \quad \text{якщо } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T \sqrt{1 + (q_3 f')^2 - 2q_1 f' \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma}{2\sigma_T}\right)}, \quad (3)$$

$$\Psi > \frac{1}{2G} + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta\tau, \quad \text{якщо } \sigma_i = \sigma_s,$$

стан $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимий.

Визначення функції Ψ проводиться ітеруванням на кожному кроці чисельного простежування. Додаткова нелінійність за докритичним пошкодженням при зміні зовнішнього силового фактору F розв'язується за допомогою наступного ітераційного процесу по функції Ψ_k [7]:

$$F = \begin{cases} F + dF, & \text{якщо } f_0 K_1 \exp\left(K_2 \frac{\sigma}{\sigma_i}\right) d\epsilon_i^p = \\ \Psi_k \leq \Psi_k^0 \approx 10^{-5}; \\ F, & \text{якщо } \Psi_k > \Psi_k^0, \end{cases} \quad (4)$$

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

Деформаційне зміцнення металу впливає на форму поверхні плинності Мізеса, яку, залежно від інтенсивності накопичених пластичних деформацій, прийнято розглядати в наступному вигляді [8]:

$$\begin{aligned} \sigma_T = & \sigma_T^0 \left[1 + c_1 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0}\right) + c_2 \left\{ \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right\}^2 \right] \times \\ & \times \left[1 + \left(\frac{\epsilon^p}{\epsilon_0}\right)^m \right], \end{aligned} \quad (5)$$

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 [9]:

$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{3}{2}} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma - \bar{X}) (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma - \bar{X}) - \\ & - \sigma_T'(f') \left[1 + \left(\frac{\epsilon^p}{\epsilon_0}\right)^m \right] \leq 0, \end{aligned} \quad (6)$$

де \bar{X} – тензор зсуву; $\sigma'_t(f')$ – поточна істинна межа плинності пошкодженого матеріалу відповідно (5); M, ϵ_0 – константи матеріалу.

Для прогнозування зародження в'язкого руйнування при пластичному плинні матеріалу трубопроводів і посудин тиску з характерних сталей і сплавів в неізотермічних випадках використовувався модифікований критерій Джонсона-Кука, згідно з яким у деякому об'ємі металу з'являється початкова пористість із концентрацією f_0 при виконанні наступної умови [10]:

$$\chi_\epsilon = \int \frac{d\epsilon_i^p}{\epsilon_c(T)} > 1, \quad (7)$$

де $d\epsilon_i^p = \sqrt{2/3} \cdot \sqrt{d\epsilon_{ij}^p \cdot d\epsilon_{ij}^p}$ – інтенсивність приросту сумарних пластичних деформацій (миттєвої пластичності та повзучості); $\epsilon_c(T)$ – критична величина пластичних деформацій.

Подальше зростання концентрації пор в'язкого руйнування в процесі пластичного деформування металу, зокрема, при експлуатаційному статичному або циклічному навантаженні, відповідає модифікованому закону Райса-Трейсі [11]. В якості критерію зародження макроскопічного руйнування запропоновано чисельний критерій крихко-в'язкого руйнування, а саме виконання однієї з трьох умов: пластичної нестійкості пористого матеріалу з урахуванням його обмеженої деформаційної здатності за умовою Маккензі, критичного розвитку пор в'язкого руйнування та мікротріщини S_K [12].

Визначення граничного стану ТЕ з дефектом локальної втрати металу на основі детермінованих критеріїв може не в повній мірі відображати схильність конструкції до руйнування, бо розглядає руйнування в найбільш критичній точці. Крім того, невизначеність експертного аналізу, що може бути зумовлена неповнотою вхідних даних або неточністю експериментальних вимірювань, потребує відповідного підвищення консервативності висновків про технічний стан ТЕ. Одним із альтернативних підходів, що дозволяють формально врахувати ці фактори, є використання інтегральних статистичних теорій міцності. Зокрема, типові підходи до аналізу НДС відповідальних конструкцій з точки зору їх схильності до руйнування базуються на статистичній теорії міцності Вейбула [13]. Вона передбачає, що ймовірність ініціювання пошкодження p є функцією напруженого стану і може бути виражена за допомогою трипараметричного розподілу Вейбула (σ -процедури). Для постульованої задачі прогнозування міцності та працездатності трубопроводу зі сталі або алюмінію з виявленими корозійно-ерозійними дефектами вона формулюється наступним чином:

$$p = 1 - \exp \left[- \int_S \left(\frac{\sigma_1 - A_\sigma}{B_\sigma} \right)^{\eta_\sigma} \frac{dS}{S_0} \right], (\sigma_1 > A_\sigma), \quad (8)$$

де σ_1 – поле головних напружень; S – площа перерізу труби; S_0 – константа масштабного фактору; $A_\sigma, B_\sigma, \eta_\sigma$ – параметри Вейбула.

Застосовність σ -процедури (8) обмежена природою докритичного пошкодження матеріалу, що розглядається, а саме: якщо конструкція не буде втрачати працездатність при пластичному плинні металу аж до досягнення граничного стану, ймовірність відмови відповідно буде майже незмінною через невеликі зміни напружень, тоді як схильність до руйнування збільшиться. Наприклад, відомо, що достатнє накопичення деформацій повзучості в трубах при високотемпературній експлуатації призводить до ініціювання та накопичення докритичної пористості, проте при цьому не спостерігається відповідного збільшення напружень. Більш того, при цьому спостерігається релаксація напружень певного типу (наприклад, залишкові напруження в зоні зварювання). Тому можна зробити висновок про те, що моделі типу (8) є придатними для конструкцій, граничний стан яких визначається крихкими або в'язко-крихкими механізмами макроруйнування (матеріали, окрихчені в результаті радіаційного опромінення або насичення воднем, тощо).

Оскільки граничний стан трубопроводу з виявленою втратою металу в основному залежить від в'язкого макроруйнування (особливо для пластичних металів або при експлуатації за високої температури), то альтернативою (8) є моделі Вейбула для оцінки ймовірності на основі аналізу деформованого стану конструкції (ϵ -процедури) в наступній формі [14]:

$$p = 1 - \exp \left[- \int_S \left(\frac{\epsilon_i - A_\epsilon}{B_\epsilon} \right)^{\eta_\epsilon} \frac{dS}{S_0} \right], (\epsilon_i > A_\epsilon), \quad (9)$$

де ϵ_i – інтенсивність деформації, отримана при скінченно-елементному аналізі; $A_\epsilon, B_\epsilon, \eta_\epsilon$ – параметри Вейбула.

Зокрема, для труб з типових сталей ряд чисельних досліджень граничного стану в залежності від властивостей матеріалу та розміру напівеліптичного поверхневого дефекту (вхідні дані розрахунків наступні: $D \times t = 1420 \times 20$ мм, $E = 210$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\sigma_T = 300 \dots 600$ МПа, $f_0 = 0,01$, $S_K = 1000$ МПа, $\epsilon_c = 0,01$). Розв'язання оберненої задачі показало, що залежності консервативних значень параметрів Вейбула B_σ та B_ϵ від межі плинності σ_T трубної сталі квазілінійні (рис. 2) і незначно залежать від розміру дефекту (діапазон розглянутих розмірів дефектів відповідно до рис. 1 – $\delta = 3 \dots 17$ мм, $2s = 20 \dots 200$ мм, $2u = 20 \dots 200$ мм).

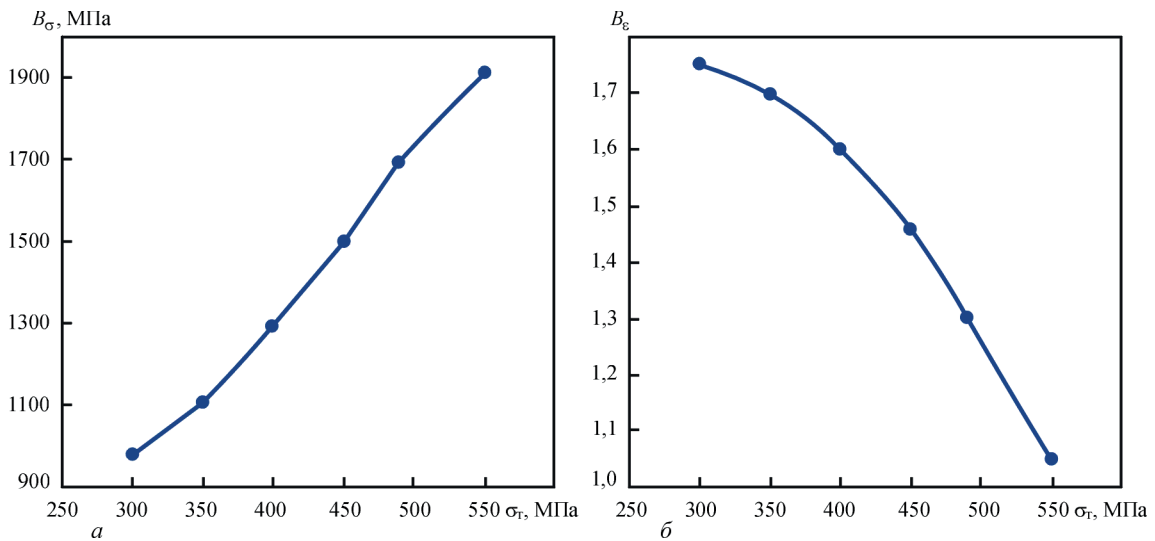


Рис. 2. Залежності консервативного значення параметра Вейбула B_{σ} (а) та B_{ϵ} (б) від межі плинності σ_T матеріалу дефектного ТЕ (сталі)

Подібні результати отримані для алюмінієвих сплавів різної міцності (рис. 3).

Для визначення впливу масштабного фактора, який враховано в методології ймовірнісного інтегрального аналізу напружень і деформацій (8)-(9) за допомогою параметра S_0 , було проведено статистичні випробування на одновісний розтяг зразків 165×20 мм різної товщини (6 та 10 мм) з алюмінієвого сплаву АМг6. Більш тонкі зразки було отримано з тієї ж плити товщиною 10 мм шляхом зішліфовування, нероз'ємне стикове з'єднання було виконано дуговим зварюванням. Як показано на рис. 4, зразки товщиною 10 мм мають стабільно нижчий рівень граничних напружень, схильність до руйнування описується трипараметричною функцією Вейбула ($A_{\sigma} = 240$ МПа; $B_{\sigma} = 250$ МПа; $\eta_{\sigma} = 4$), при цьому S_0 відповідає значенню 0,25 мм² для обох випадків. Це підтверджує попередні висновки про те, що параметри Вейбула в (8)-(9) є функціями матеріалу, а інтегруван-

ня по поперечному перерізі адекватно враховує масштабний фактор.

Для випадку високотемпературної експлуатації трубопроводів із виявленою дефектністю втрати металу (наприклад, ерозії) для оцінки ймовірності руйнування можливе використання виключно ϵ -процедури з урахуванням кінетики накопичення деформацій повзучості. Оскільки властивості матеріалу та його схильність до деформування за механізмом повзучості залежать від температури, слід очікувати залежність коефіцієнтів Вейбула від температури. Так, стосовно типових сталей 15Х2НМФА та 10ГН2МФА, які широко застосовуються для виготовлення корпусів і технологічних трубопроводів АЕС і ТЕС, на прикладі елемента технологічного трубопроводу з напівеліптичним дефектом стоншення стінки було досліджено закономірності формування граничного стану за умов сумісної дії внутрішнього тиску та високої температури на при-

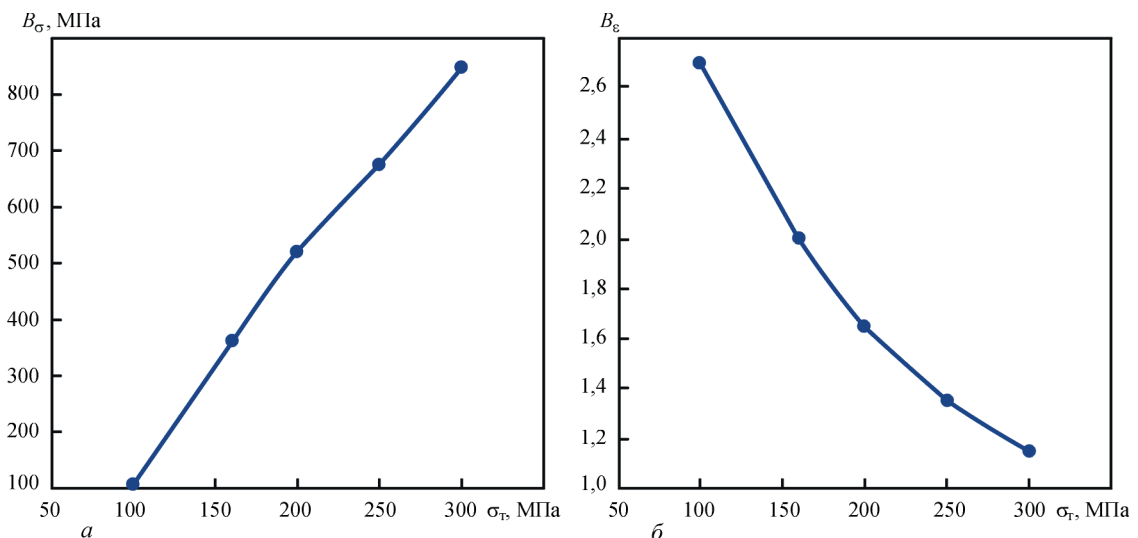


Рис. 3. Залежності консервативного значення параметра Вейбула B_{σ} (а) та B_{ϵ} (б) від межі плинності σ_T матеріалу дефектного ТЕ (алюмінієві сплави)

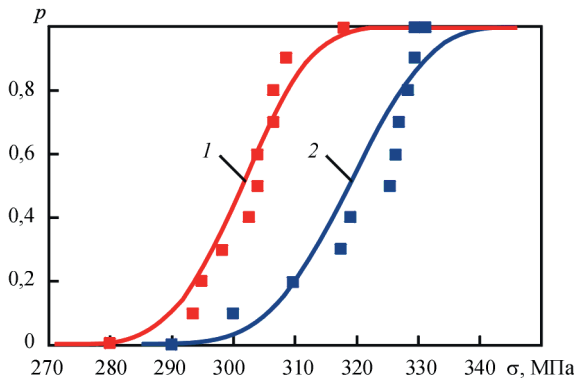


Рис. 4. Визначення впливу масштабного фактора (товщини зразків) на ймовірність руйнування зварних зразків з алюмінієвого сплаву АМг6 відповідно до теоретичного розрахунку (суцільна лінія) та за статистичними лабораторними випробуваннями (■): 1 – зразки товщиною 10 мм, 2 – 6

кладі ТЕ $D \times t = 300 \times 15$ мм. Коефіцієнти функцій повзучості наступні: 15Х2НМФА – $n_c = 5,0$; $G_c = -101069$ °С; $A_c = \exp(69,40)$; 10ГН2МФА – $n_c = 4,2$; $G_c = -61955$ °С; $A_c = \exp(34,78)$ [15].

Отриманий скінченно-елементним розрахунком розподіл деформацій в стінці трубопроводу з напівеліптичним дефектом локального стоншення дозволив розв’язати обернену задачу граничного стану. Це дозволило визначити функціональні залежності параметру B_e від типу матеріалу та температури експлуатації. Як показано на рис. 5, для сталей 15Х2НМФА та 102ГНМФА залежності B_e від температури квазілінійні для обраного температурного діапазону і відповідають діапазону значень від 5,9 до 7,0. При цьому зміна розміру дефекту незначно впливає на значення параметрів Вейбула.

Відомо, що статистичні теорії розрахунку базуються на припущенні про наявність невизначеності певних вхідних даних чи фізичних процесів. Статистична теорія міцності Вейбула розглядає макроскопічні характеристики стану матеріалу (напруження, деформації) як характеристики його схильності до мікроруйнування шляхом відповідного статистичного опису. Іншим типовим факто-

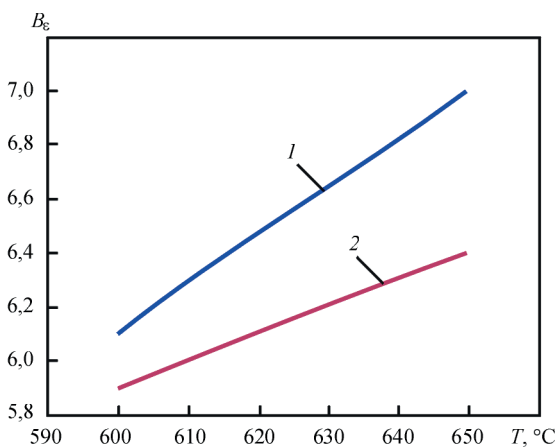


Рис. 5. Залежності параметра Вейбула B_e сталей 10ГН2МФА (1) та 15Х2НМФА (2) від температури

ром невизначеності при аналізі технічного стану конструкцій довготривалої експлуатації є природний просторовий розкид властивостей матеріалу. Для формального опису цього явища був використаний алгоритм, заснований на методі Монте-Карло [16], в рамках якого приймається, що ймовірність руйнування трубопроводу p при деякому внутрішньому тиску P визначається частотою досягнення граничного стану в рамках репрезентативної вибірки рівноможливих комбінацій властивостей матеріалу труби, тобто:

$$p(P) = N_p / N_r, \quad (10)$$

де N_p – кількість випробувань, при якій конструкція досягла граничного стану при тисках, менших або рівних P ; N_r – загальна кількість випробувань в межах репрезентативної вибірки.

Для формального описання просторової неоднорідності таких властивостей матеріалу, як межа плинності та модуль Юнга, прийнято використовувати нормальний розподіл, тобто щільність ймовірності характеристики X (прийняти конкретне значення X_{ijk} ($i, j, k = r, \beta, z$)) може бути представлена у вигляді:

$$\frac{\partial p}{\partial X_{ijk}} = \frac{1}{\beta_x \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(X_{ijk} - \alpha_x)^2}{2\beta_x^2} \right], \quad (i, j, k = r, \beta, z), \quad (11)$$

де α_x, β_x – коефіцієнти нормального розподілу для характеристики X .

Стосовно різних параметрів опору матеріалу руйнуванню, часто застосовується закон розподілу Вейбула. Тому в задачі, що розглядається, деяка величина Y в точці з координатами (i, j, k) приймає конкретне значення Y_{ijk} відповідно до наступного співвідношення:

$$Y_{ijk} = \left[-\ln(1 - RND) \right]^{1/\eta_Y} (B_Y - A_Y) + A_Y, \quad (i, j, k = r, \beta, z), \quad (12)$$

де A_Y, B_Y, η_Y – коефіцієнти Вейбула для характеристики Y ; RND – довільне число з діапазону $[0;1]$.

Валідаційна процедура розроблених моделей визначення граничного стану ТЕ з дефектом стоншення стінки полягає у порівнянні граничного тиску P_{max} , отриманого в рамках чисельного дослідження, з наявними експериментальними даними [17] про тиск руйнування P_{exp} , що широко використовуються, зокрема, при розробці нормативних документів. Для сталевих труб різного класу міцності розрахунки дозволили уточнити вхідні параметри моделей та підтвердити застосовність розроблених підходів для ТЕ різних типорозмірів і підтвердити задовільну точність розроблених методик (табл. 1).

Стосовно алюмінієвих ТЕ з локальними геометричними аномаліями корозійно-ерозійного типу валідація проводилася також шляхом порівняння результатів чисельного прогнозування граничного тиску в циліндричних зразках зі сплаву АА 6082 з базою даних лабораторних випробувань (табл. 2) [18]. Як показують результати порівняння розрахункових і експериментальних даних, похибка чисельного прогнозування граничного тиску не перевищує 10 %, що для більшості практичних задач є достатнім.

На основі розроблених підходів було досліджено вплив монтажного зварювання на граничний стан ТЕ з локальною втратою металу на типових випадках дефектних ділянок магістральних та технологічних трубопроводів. Так, було розглянуто сталевий елемент магістрального трубопроводу ($D = 1420$ мм, $t = 20$ мм) з ізольованим дефектом локального стоншення стінки напівеліптичної форми на зовнішній поверхні труби ($2s \times 2u \times \delta =$

$= 20 \times 20 \times 5$ мм). Наявність кільцевого зварного шва викликає формування залишкового НДС в області монтажного зварювання та зміну схильності до в'язкого руйнування в результаті наявності градієнта жорсткості напружень $r_{st} = \sigma/\sigma_i$ (рис. 6). Слід зазначити, що жорсткість напруженого стану конструкції є одним з факторів, що визначають опірність руйнуванню в умовах розвиненого пластичного плинину металу під дією зовнішнього навантаження. При цьому найбільший вплив локальної неоднорідності r_{st} в області зварного шва спостерігається на перших етапах пластичного плинину металу ТЕ під дією внутрішнього тиску, бо суттєвий розвиток пластичного деформування зумовлює певну гомогенізацію напруженого стану.

Таким чином, за наявності в області кільцевого монтажного зварного шва локальної геометричної аномалії у вигляді поверхневої втрати металу, можна виділити два осередки інтенсивного зростання докритичного пошкодження металу

Таблиця 1. Порівняння результатів чисельних розрахунків граничного тиску P_{max} в дефектних трубопровідних елементах з результатами експериментальних випробувань P_{exp} з міжнародних баз даних (сталеві труби різного класу міцності) [17]

t , мм	D , мм	δ , мм	$2s$, мм	$2u$, мм	σ_p , МПа	Клас міцності	P_{exp} , МПа	P_{max} , МПа	Похибка, %
4,83	275	2,11	157,5	43,1	350,6	X42	12,62	13,80	9,35
5,00	274	2,16	124,5	43,1	350,6	X42	13,35	14,15	5,99
4,93	274	1,60	45,7	43,0	350,6	X42	14,99	16,40	9,41
4,88	273	2,18	101,6	42,9	350,6	X42	15,18	14,15	6,79
8,64	324	0,00	0,0	0,0	356,4	X46	24,44	25,15	2,91
8,64	324	0,00	0,0	0,0	356,4	X46	24,52	25,15	2,57
8,53	324	0,00	0,0	0,0	356,4	X46	25,01	25,15	0,56
8,51	324	0,00	0,0	0,0	356,4	X46	25,06	25,15	0,36
9,37	864	4,62	91,4	135,7	356,4	X46	9,17	8,35	8,94
9,47	864	3,00	185,4	135,7	356,4	X46	10,56	11,20	6,06
8,43	324	0,00	0,00	0,00	356,4	X46	23,27	25,15	8,08
8,74	324	0,00	0,00	0,00	356,4	X46	23,92	25,25	5,56
8,61	324	3,30	144,8	50,8	356,4	X46	23,93	22,60	5,56
8,64	323	2,16	63,5	50,8	356,4	X46	24,37	26,50	8,74
8,64	323	2,69	61,0	50,8	356,4	X46	25,23	25,20	0,12
5,26	273	1,73	139,7	42,9	402,5	X52	18,06	17,75	1,72
5,74	507	3,02	132,1	79,6	462,3	X55	10,73	10,25	4,47
17,50	762	8,75	200,0	50,0	464,5	X65	9,17	8,35	8,94
17,50	762	8,75	200,0	100,0	464,5	X65	10,56	11,20	6,06
17,50	762	4,38	200,0	50,0	464,5	X65	10,73	10,25	4,47

Таблиця 2. Порівняння результатів чисельних розрахунків граничного тиску в дефектних алюмінієвих трубопровідних елементах з даними лабораторних випробувань [18]

t , мм	D , мм	δ , мм	$2s$, мм	$2u$, мм	P_{exp} , МПа	P_{max} , МПа	Похибка, %
3,1750	145,542	1,6002	38,1508	9,525	10,5494	10,5	0,47
3,2512	145,694	1,6764	38,0492	38,0492	13,1695	11,9	9,64
2,8448	145,898	0,508	40,2336	10,1092	14,8243	14,5	2,19
2,8448	142,850	2,0066	38,2016	10,0076	7,23975	7,30	0,83
3,1496	137,871	2,413	12,1412	3,9878	14,4795	13,2	8,84
3,1242	137,820	2,540	6,1214	9,652	15,6861	16,6	5,83
3,1242	137,820	2,2606	59,6392	10,2616	6,55025	6,50	0,77
3,1496	137,871	2,3876	12,319	363,499	8,9635	9,40	4,87
6,2992	145,694	5,3594	53,4924	9,8298	11,7215	11,6	1,04
6,2484	145,593	4,699	13,7668	9,779	22,7535	24,1	5,92

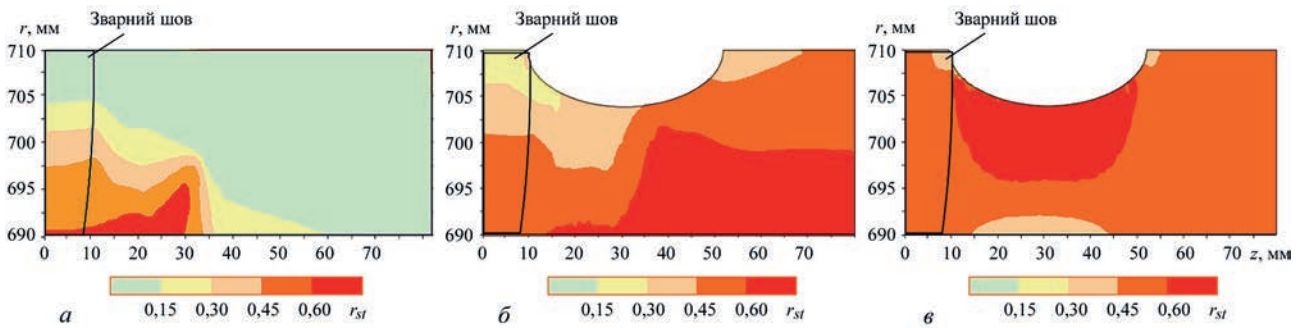


Рис. 6. Розподіл жорсткості напружень r_{st} у поперечному перерізі трубопроводу ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, Х65) із зовнішнім корозійним дефектом ($2s \times 2u \times \delta = 40 \times 20 \times 5$ мм) в області кільцевого шва при внутрішньому тиску P : a – після зварювання; b – 7,5 МПа; c – при граничному тиску 22,8 МПа

при збільшенні внутрішнього тиску: зварний шов та зона термічного впливу з підвищеною жорсткістю напруженого стану та власне геометричний концентратор напружень (рис. 7). При близькому розташуванні (меншому за довжину дефекту) шва та втрати металу між ними формується загальне поле докритичного пошкодження, що має негативний вплив на несучу здатність трубопроводу, бо є місцем потенційного зародження макродефекту.

В разі високотемпературної експлуатації ТЕ наявність локального концентратора напружень у вигляді поверхневої геометричної аномалії має принципово інший вплив на стан ТЕ. Так, на прикладі елемента технологічного трубопроводу зі сталі 10ГН2МФА ($D \times t = 300 \times 15$ мм) із напівеліптичним локальним стоншенням стінки ($2s \times 2u \times \delta = 40 \times 40 \times 7$ мм) на зовнішній поверхні труби було показано, що наявність дефекту викликає аналогічні закономірності накопичення докритичного пошкодження за високотемпературної експлуатації ($T = 625^\circ\text{C}$, $P = 13$ МПа), проте основним механізмом деформування тут є високотемпературна повзучість (рис. 8). Так, на початку експлуатації просторовий розподіл концентрації пор в'язкого руйнування характеризується дво-

ма локальними максимумами, а саме біля дефекту і в області зварного шва. Подальший розвиток деформацій повзучості викликає збільшення та об'єднання цих двох областей докритичного пошкодження, що визначає граничний стан зварного трубопроводу. Слід зазначити, що характерною особливістю руйнування ТЕ в процесі повзучості матеріалу є релаксація післязварювальних напружень в результаті накопичення необоротних деформацій повзучості, що поступово знижує швидкість росту пор в'язкого руйнування в області шва.

Оцінка припустимості дефекту локального стоншення стінки трубопроводу для випадку низькотемпературної експлуатації суттєво відрізняється від такої, що стосується умов силового впливу при високих температурах: корозійно-ерозійний дефект, який при аналізі статичної міцності відноситься до припустимих і незначно знижує несучу здатність ТЕ за певного діапазону значень внутрішнього тиску, в процесі експлуатації призводить до накопичення пошкодження та подальшого макроскопічного руйнування конструкції, що необхідно враховувати при обґрунтуванні залишкового ресурсу експлуатації відповідальних ТЕ. Вплив розмірів дефекту локального стоншення

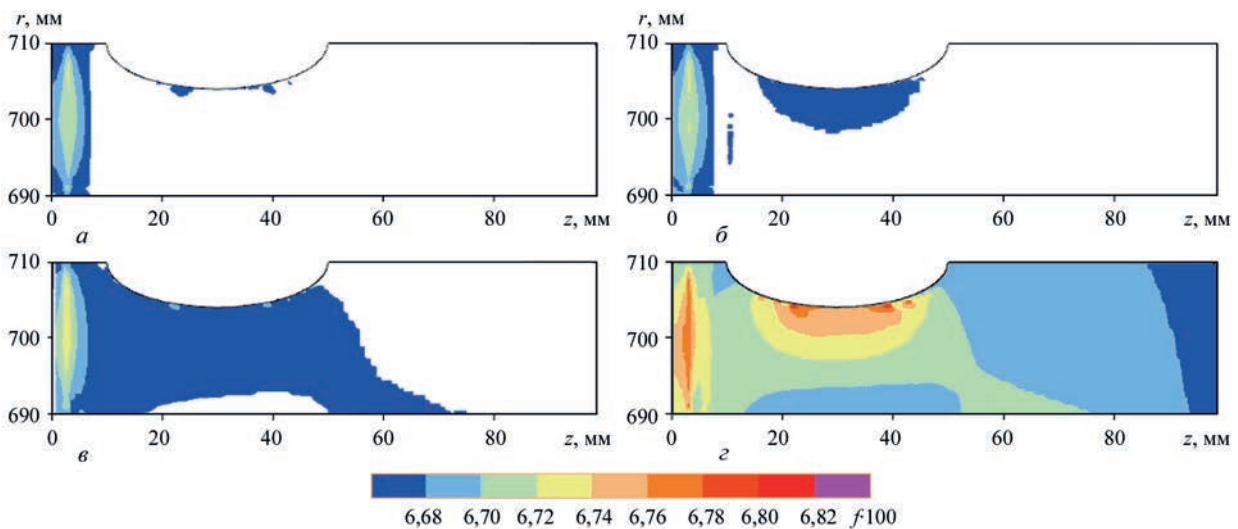


Рис. 7. Розподіл поля об'ємної концентрації пор в'язкого руйнування f в перерізі стінки трубопроводного елемента ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, Х65) з локальною втратою металу на периферії кільцевого зварного шва при різних значеннях внутрішнього тиску P : a – 16,5 МПа; b – 17,0; c – 17,5; d – 20

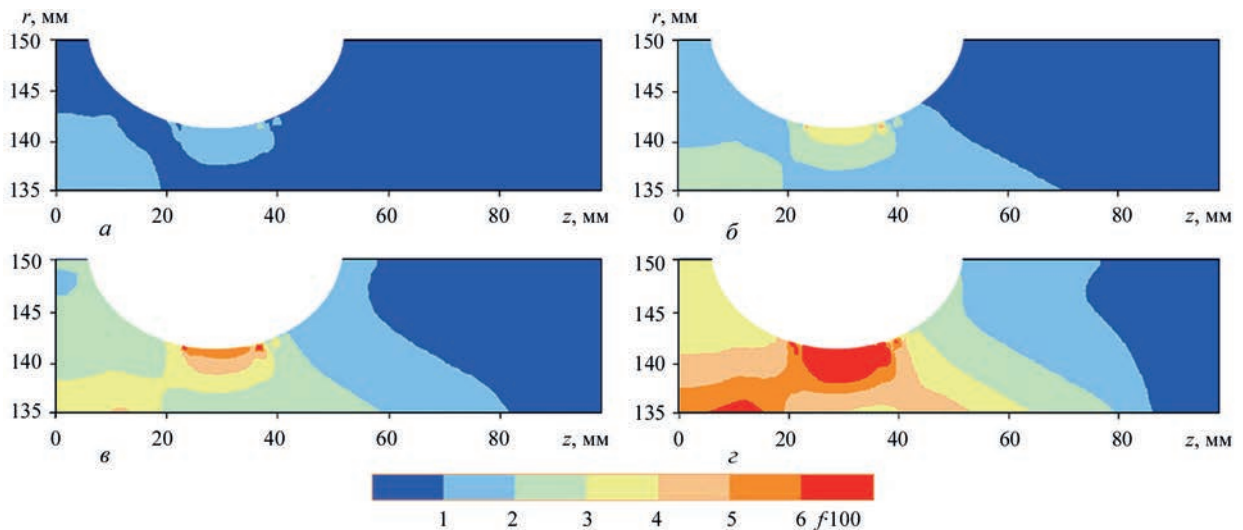


Рис. 8. Розподіл поля об'ємної концентрації пор в'язкого руйнування f в перерізі стінки трубопровідного елемента ($D \times t = 300 \times 15$ мм, 10ГН2МФА) з локальною втратою металу на периферії кільцевого зварного шва за різного часу τ високотемпературної експлуатації ($T = 650$ °С, $P = 13$ МПа): а – 400 с; б – 800 с; в – 1200 с; з – 1500 с

стілки трубопроводу на час до макроскопічного руйнування трубопровідного елемента τ_k , що було досліджено на прикладі ТЕ з дефектами різної глибини δ ($T = 650$ °С, $P = 13$ МПа) за допомогою чисельного моделювання, має виражено нелінійний характер (рис. 9). Це пов'язано з багатофакторністю процесів пружно-пластичного деформування та руйнування трубопроводу з певним залишковим післязварювальним НДС.

Результати скінченно-елементного розрахунку НДС трубопроводу з виявленою корозійно-ерозійною дефектністю дають можливість чисельного прогнозування ймовірності руйнування ТЕ в рамках теорії Вейбула (8)-(9). При цьому враховуються

не тільки просторовий розподіл полів напружень (деформацій), взаємодія полів напружень першого та другого роду, але й фактичні характеристики опірності матеріалу в'язкому руйнуванню. Так, використання тривимірних моделей напружено-деформованого та пошкодженого станів ТЕ з тривимірним дефектом локального стоншення стінки дозволяють з мінімальною консервативністю враховувати особливості фактичної геометрії конструкції, зокрема, поверхню розташування дефекту (рис. 10, а). Крім того, таким чином можливий кількісний аналіз впливу монтажного зварювання на різних етапах навантаження внутрішнім тиском аж до граничного стану (рис. 10, б).

Для чисельного аналізу впливу стохастичності розподілу властивостей матеріалу досліджуваного дефектного ТЕ на поточний НДС та граничний стан було прийнято, що просторовий розкид має межа плинності матеріалу (за нормальним законом, $\alpha = 408$ МПа, $\beta = 10,34$ МПа), критична деформація зародження пор в'язкого руйнування (за розподілом Вейбула, $A_\epsilon = 0,001$, $B_\epsilon = 0,0061$, $\eta_\epsilon = 4$), початкова концентрація пор в'язкого руйнування (за розподілом Вейбула, $A = 0,0001$, $B = 0,000397$, $\eta_f = 2$), напруження мікрівідколу (за розподілом Вейбула, $A = 800$ МПа; $B = 972$ МПа; $\eta = 4$). Наявність дефекту в області кільцевого монтажного зварного шва в умовах експлуатаційного навантаження внутрішнім тиском незначно впливає на характер зміни поточного та граничного НДС через розкид властивостей матеріалу ТЕ (рис. 11).

Тому можна зробити висновок, що незважаючи на неоднорідність властивостей матеріалу природа взаємодії залишкових напружень в області зварювання та експлуатаційних напружень (із врахуванням геометричного концентратора напружень) залишається такою ж, як і при традиційному моде-

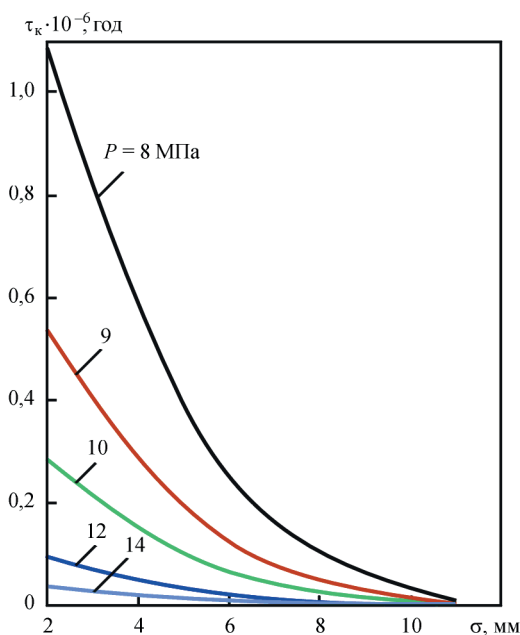


Рис. 9. Залежності величини часу до макроскопічного руйнування трубопровідного елемента τ_k ($D \times t = 300$ мм \times 15 мм, 10ГН2МФА) від глибини дефекту стоншення δ в області зварного монтажного шва при різних значеннях внутрішнього тиску P (довжина дефекту $2s = 30$ мм)

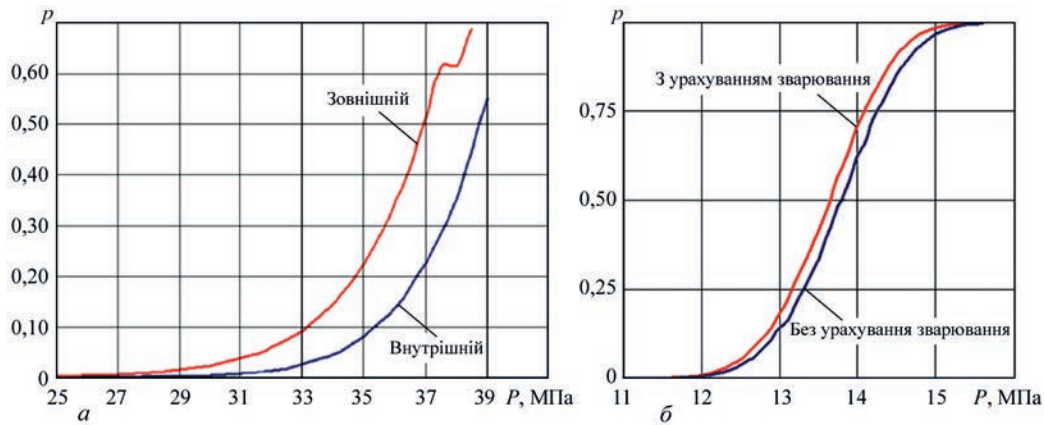


Рис. 10. Вплив поверхні розташування дефекту стоншення ($2s \times 2u \times \delta = 100 \times 80 \times 9$ мм, $D \times t = 530 \times 18$ мм, Х65) – (а) та наявності кільцевого зварного шва ($2s \times 2u \times \delta = 50 \times 50 \times 5$ мм, $D \times t = 350 \times 10$ мм, АМГ6) – (б) на ймовірність руйнування ТЕ p при різних значеннях внутрішнього тиску P

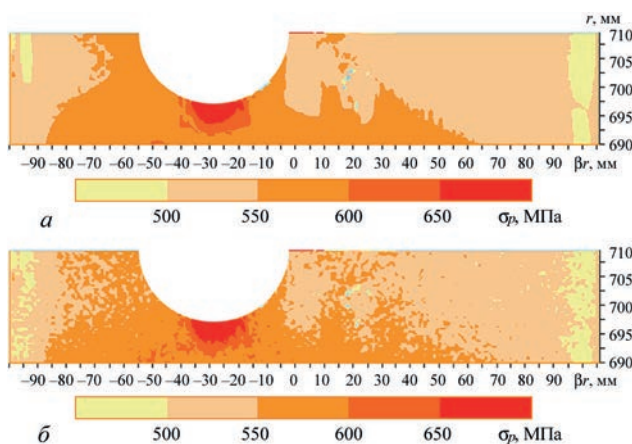


Рис. 11. Розподіл залишкових еквівалентних напружень в трубопроводі ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь Х65) із зовнішнім корозійним дефектом ($2s \times 2c \times \delta = 55 \times 40 \times 10$ мм) при граничному внутрішньому тиску: а – традиційний розрахунок з постійними властивостями матеріалу; б – розрахунок згідно з алгоритмом Монте-Карло

люванні в рамках моделей однорідного суцільного середовища. Найбільш суттєво неоднорідність впливає на початок зародження макроруйнування та настання граничного стану конструкції: поява послаблених ділянок в нетипових зонах зумовлює більш низький тиск руйнування, або навпаки,

зміцнення найбільш слабких ділянок підвищує несучу здатність конструкції.

Використання прямих методів Монте-Карло поряд із відповідним скінченно-елементним розв'язанням мультифізичних задач визначення граничного стану дозволяє оцінити вплив типових параметрів фактичного стану дефектних ділянок трубопроводів із урахуванням невизначеності просторового розподілу властивостей матеріалу конструкції на їх надійність. Зокрема, відомо, що найбільший вплив на несучу здатність ТЕ з дефектом локального корозійно-ерозійного стоншення має глибина дефекту. Для розглянутого вище випадку ТЕ з виявленим дефектом стоншення, ймовірність руйнування в залежності від внутрішнього тиску при різних значеннях глибини дефекту показана на рис. 12, а. Збільшення глибини дефекту викликає зміщення кривої $p(P)$ при збереженні подібності. Це пояснюється тим, що цей діапазон варіювання радіального розміру дефекту не викликає зміни механізму руйнування.

Наявність дефекту в області зварного монтажного шва має додатковий негативний вплив на несучу здатність дефектної ділянки трубопроводу, що зумовлено інтенсифікацією зростання пор

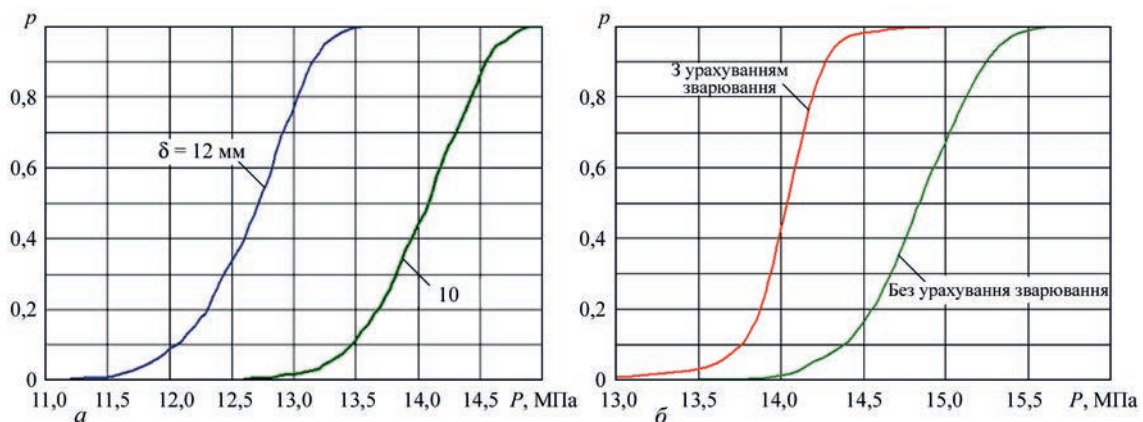


Рис. 12. Залежності ймовірності руйнування трубопроводу p ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, Х65) із зовнішнім корозійним дефектом ($2s \times 2c \times \delta = 20 \times 20 \times 10$ мм) від внутрішнього тиску P , враховуючи стохастичну неоднорідність властивостей: а – для різних значень глибини дефекту δ ; б – з урахуванням наявності зварного шва на периферії дефекту

в'язкого руйнування в областях підвищеної жорсткості напруженого стану. Кількісно це описується відповідними ймовірнісними кривими, приклад яких наведено на рис. 12, б. З цих даних видно, що наявність зварного шва змінює схильність дефектного ТЕ до руйнування під дією внутрішнього тиску: окрім очікуваного зміщення кривої $p(P)$ відносно випадку незварної труби, за наявності зварного шва зменшується нахил ймовірнісної кривої руйнування.

Висновки

1. Розроблено комплекс математичних моделей для прогнозування спільних процесів термодформування та докритичного руйнування металу зварних елементів магістральних і технологічних трубопроводів і посудин тиску з виявленими дефектами локальної корозійно-ерозійної втрати металу в умовах зварювання та подальшої експлуатації. Показана задовільна точність чисельного визначення граничного тиску в ТЕ з поверхневими дефектами.

2. На основі результатів чисельних досліджень граничного стану типових трубопровідних елементів з поверхневими втратами металу біля ділянок монтажного або ремонтного зварювання показано, що взаємодія цих двох аномалій конструкції полягає у формуванні загальної області докритичного руйнування за в'язким механізмом, яка є зоною потенційного формування макроскопічного дефекту та порушення цілісності труби. Для випадку високотемпературної експлуатації трубопроводів цей ефект є більш суттєвим через додаткове деформування металу за механізмом повзучості.

3. Розроблено методики чисельного визначення ймовірності руйнування зварних трубопровідних елементів із виявленими поверхневими дефектами локальної корозійно-ерозійної втрати металу на основі статистичної теорії міцності Вейбула та прямого методу Монте-Карло. Стосовно трубних сталей з різним класом міцності, а також алюмінієвих сплавів отримано значення коефіцієнтів Вейбула як функції властивостей матеріалу

4. За результатами чисельних досліджень впливу просторової неоднорідності властивостей ТЕ на ймовірність руйнування показано, що незважаючи на неоднорідність властивостей матеріалу природа взаємодії залишкових напружень в області зварювання та експлуатаційних (із урахуванням геометричного концентратора напружень) залишається такою ж, як і при традиційному моделюванні в рамках моделей однорідного суцільного середовища.

Список літератури/References

1. Lemaitre, J., Desmorat, R. (2005) *Engineering Damage Mechanics. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*. Berlin, Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/b138882>.

2. de Geus, T.W.J., Peerlings, R.H.J., Geers, M.G.D. (2015) Microstructural modeling of ductile fracture initiation in multi-phase materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 147, 318–330. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.04.010>.

3. Makhnenko, V. (2013) Problems of examination of modern critical welded structures. *The Paton Welding J.*, 5, 21–28.

4. Wei, Y., Zhang, L., Au, F.T.K. et al. (2016) Thermal creep and relaxation of prestressing steel. *Construction and Building Materials*, 128, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.068>.

5. 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. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00117-8>.

6. Xue, L. (2007) Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading. *Int. J. of Solids and Structures*, 44, 5163–5181. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.12.026>.

7. Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. (2016) Моделирование процессов зарождения и развития докритической поврежденности металла сварных трубопроводных элементов при малоцикловом нагружении. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 14–20. <https://doi.org/10.15407/tdnk2016.04.03>.

8. Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A., Rozyinka, G.F., Pivtorak, N.I. (2016) Simulation of subcritical damage of metal in welded pipeline elements at low-cycle loading. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 14–20. <https://doi.org/10.15407/tdnk2016.04.03>.

9. Jones, N. (2012) *Structural Impact*. Second edition. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511624285>

10. Lemaitre, J., Chaboche, J.-L. (1990) *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167970>.

11. Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. (2013) Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях. *Автоматическая сварка*, 5, 22–29.

12. Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A., Rozyinka, G.F., Pivtorak, N.I. (2013) Simulation of processes of initiation and propagation of ductile fracture pores in welded structures. *The Paton Welding J.*, 9, 26–31

13. Chen, Z., Butcher, C. (2013) *Micromechanics Modeling of Ductile Fracture*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6098-1>.

14. Milenin, O. (2017) Numerical prediction of the current and limiting states of pipelines with detected flaws of corrosion wall thinning. *Journal of hydrocarbon power engineering*, 4, 1, 26–37.

15. Lindquist, E.S. (1994) Strength of materials and the Weibull distribution. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 9, 3, 191–194. [https://doi.org/10.1016/0266-8920\(94\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0266-8920(94)90004-3).

16. Milenin, A., Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *International J. of Pressure Vessels and Piping*, 171, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>.

17. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.

18. Makhnenko, V.I. (2016) *Safe operating life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

19. Lawless, J.F. (2002) *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. <https://doi.org/10.1002/9781118033005>.

20. Cronin, D. (2000) *Assessment of Corrosion Defects in Pipelines*. PhD thesis. University of Waterloo.

21. Kitching, R., Zarrabi, K. (1982) Limit and burst pressures for cylindrical shells with part-through slots. *International J. of Pressure Vessels and Piping*, 10, 4, 235–270. [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(82\)90035-7](https://doi.org/10.1016/0308-0161(82)90035-7)

NUMERICAL METHODOLOGY OF PREDICTION OF THE RELIABILITY
AND RESIDUAL LIFE OF WELDED PIPELINE ELEMENTS WITH
CORROSION-EROSION DEFECTS

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

A set of procedures, mathematical models and tools for their finite-element realization were developed, to solve typical practical tasks of expert analysis of the technological condition and residual safe operating life of welded elements of the main and technological pipelines with defects of corrosion-erosion metal loss detected during diagnostics. In order to lower the conservativeness of analysis, the inter-related processes of thermal deformation at erection and repair welding, as well as initiation and propagation of subcritical damage of the defective structure material by the ductile mode in operation under complicated temperature-force conditions of external impact, were taken into account. Procedures of statistical analysis of fracture susceptibility of welded pipelines were developed on the base of Weibull and Monte-Carlo methods, and adequacy of the developed computational methods was confirmed. Peculiarities of the effect of welding on the reliability and serviceability of the main and technological pipelines with detected defects of corrosion-erosion metal loss were determined, in order to develop minimally conservative recommendations as to the possibility of safe operation of the pipelines. 18 Ref., 2 Tabl., 12 Fig.

Keywords: pipeline, defect of corrosion-erosion metal loss, welded joint, limit state, reliability, fracture probability, ductile fracture

Надійшла до редакції
19.08.2020



**Industry and Associations stand by Trade Fair Dates:
Wire and Tube will be held from 7 to 11 December 2020**

Messe Düsseldorf creates all the requirements for holding successful and hygiene-conforming trade fairs in COVID-19 times – enjoying strong support from the industries and their professional associations.

The European umbrella organisations as well as major companies of the leading international trade fairs wire and Tube clearly speak out in favour of the trade fair dates from 7 to 11 December 2020 at Düsseldorf Fairgrounds.

In a meeting of the European associations acting as conceptual sponsors of the events in Düsseldorf the decision has now been taken that a commitment to the leading trade fairs from their respective sectors of industry is indispensable despite these challenging times. Personal encounters, one-on-one conversations and the expert exchange at the trade fair stand have never been more important than in the current situation.

«all parties are making an effort to return to a normal course of affairs in spite of the existing COVID-19 measures and risks», says Dr. Uwe-Peter Weigmann, CEO of WAFIOS AG and President of VDKM.

Weigmann adds: «We are confident that personal conversations and live demonstrations of machinery offered by a trade fair cannot be replaced by video conferences. This is why WAFIOS will exhibit its latest innovations at the trade fair – albeit on a smaller scale than usual. We are aware that the trade fairs in December will not be comparable to a «normal» Wire & Tube. But we expect customers to come and want to be at their service. Since Messe Düsseldorf has shown at the CARAVAN SALON that it can and does implement the necessary hygiene measures to keep risks to a minimum for both exhibitors and visitors, WAFIOS also wants to send a signal with its participation: business must carry on and even in COVID-19 times personal conversations can be had to a limited extent and in a protected setting complying with hygiene rules».

«Against the backdrop of industries ramping up again we – like many other companies from the sector – continue focusing

on sustainable partnerships with our customers», says Ralf Kappertz, CEO of Maschinenfabrik NIEHOFF GMBH & Co KG and President of IWCEA.

Kappertz emphasises: «Therefore, we want to prove this partnership also in difficult times like these and will walk our talk by making a convincing appearance at the trade fair in Düsseldorf in December – even if different from previous trade fair years».

«Our industry is synonymous with innovation, sustainability and a long-term orientation. Even though many companies find it difficult to organise and execute a trade fair participation these days, there are still numerous enterprises that speak out in favour of the trade fair dates in December. We will now be doing our utmost to also make this Wire and Tube – despite being held under special circumstances – what they have always been: the communication and business platforms of the wire, cable and tube industries», adds Kappertz.

«The industries need their most relevant sectoral platforms in order to present innovations and meet their business partners again,» confirms Ferruccio Bellina, CEO of TKT Group Spa and President of the Italian industry association ACIMAF with conviction and goes on to say: «A major share of the EU COVID-19 recovery funds adopted will be invested in the extension and renovation of infrastructure and therefore also flow directly into our industries».

Nevertheless, the international situation has to be re-assessed anew every day. «We are aware that in the current situation most visitors will come from Europe to see us and wire and Tube will have a primarily European character in 2020», says Daniel Ryfisch, Project Director Wwire, Tube & Flow Technologies at Messe Düsseldorf.

«We are all the more delighted to send a positive signal to the industries by holding the two events», adds Friedrich-Georg Kehrer, Global Portfolio Director Wire, Tube & Flow Technologies.

For current information also on the hygiene concept visit our Internet portals at: www.wire.de and www.tube.de.