

# **МОДЕЛЮВАННЯ ЗАРОДЖЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ДОКРИТИЧНОГО ПОШКОДЖЕННЯ МАТЕРІАЛУ ЗВАРНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В УМОВАХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

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

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Україна

Прогнозування роботоздатності елементів відповідальних конструкцій, машин і механізмів вимагає формулювання відповідних консервативних критеріїв граничного стану, що враховують особливості зовнішнього впливу, фізико-механічних властивостей матеріалу та його характеристики опору різним видам руйнування, тощо. В разі складної системи експлуатаційного навантаження (силового, температурного) аналіз фактичного стану досліджуваного елемента та його залишкового ресурсу ускладнюється необхідністю врахування багатofакторності впливу на ступінь пошкодженості матеріалу та на несучу здатність конструкції, що, в свою чергу, зумовлює доцільність використання методів математичного та комп'ютерного моделювання відповідних фізичних процесів. Використання методів математичного моделювання поряд із сучасними уявленнями про фізичні особливості зародження та розвитку мікро- та макропошкодження конструкційних матеріалів дозволяє враховувати весь комплекс експлуатаційного впливу на поточний і граничний стани конструкції чи механізму. Окремим класом такого роду задач є визначення ступеня пошкодженості матеріалу зварних конструкцій, які характеризуються локальною неоднорідністю структури та полями залишкових напружень і деформацій, що, в свою чергу, ускладнює визначення напружено-деформованого стану конструкційного елемента в умовах додаткового експлуатаційного статичного чи змінного навантаження.

За відсутності гострих геометричних концентраторів пошкодження матеріалу конструкції визначається в'язким і крихко-в'язким механізмами, які залежать від ступеня розвитку пластичного деформування і являють собою комплексні процеси зародження рівномірно розподіленої мікропористості, її розвиток та перехід у макроскопічні дефекти. Тому аналіз докритичного руйнування матеріалу є важливим етапом визначення граничного стану та міцності відповідальних конструкцій. Але поява мікронесуцільності матеріалу взаємопов'язана із розвитком напружено-деформованого стану конструкції через нерівномірної зміни несучого нетто-перерізу. Тому побудова відповідних моделей прогнозування граничного стану зварних відповідальних елементів вимагає розробки та реалізації методології чисельного аналізу багатовимірних задач термопластичності та докритичного пошкодження.

В цій роботі на прикладі аналізу граничного стану та роботоздатності зварних трубопровідних елементів із неіржавіючих сталей на основі сучасних математичних моделей і критеріїв руйнування досліджено особливості впливу зовнішнього навантаження в умовах високотемпературної експлуатації на пошкоджений стан матеріалу та несучу здатність конструкції.

Зварні трубопровідні елементи (ТЕ) відносяться до типового класу конструкцій тривалої експлуатації, що характеризуються складним впливом зовнішніх чинників, таких як внутрішній силовий тиск транспортованого продукту, моменти згину на протяжних ділянках, підвищена температура, агресивне середовище, тощо. Це викликає деградацію властивостей матеріалу конструкції та появу дефектів несучильності (як макроскопічних, так і на мікрорівні), що призводить до зниження несучої здатності ТЕ, тому має бути враховане в рамках процедур технічної діагностики фактичного стану зварних труб для коректної експертної оцінки статичної міцності та залишкового ресурсу, в тому числі, із врахуванням набутої дефектності корозійно-ерозійного типу.

Для аналізу кінетики складних процесів при зварюванні та експлуатації зварних ТЕ

доцільно використовувати методи математичного моделювання на основі апробованих засобів чисельної і комп'ютерної реалізації просторових кінетичних моделей. Так, температурне поле при зварюванні визначається термічним впливом рухомого поверхневого зварювального джерела тепла. Теплопередача у зразку, що зварюється, зумовлена кондуктивними процесами, описання яких зводиться до розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності:

$$c\gamma(r, \beta, z, T) \cdot \frac{\partial T(r, \beta, z)}{\partial t} = \nabla [\lambda(r, \beta, z, T) \cdot \nabla T(r, \beta, z)],$$

де  $T, \lambda, c\gamma$  – температура, теплопровідність і об'ємна теплоємність матеріалу конструкції в даній точці, відповідно;  $r, \beta, z$  – координати в циліндричній системі.

Стік тепла в навколишнє середовище, температура якого  $T_c$ , враховується постановкою відповідних граничних умов за законами Ньютона і Стефана-Больцмана:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_T \cdot (T - T_c) + \varepsilon_{SB} \cdot \sigma_{SB} \cdot (T^4 - T_c^4),$$

де  $n$  – нормаль до поверхні,  $\alpha_T$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\varepsilon_{SB}$  – ступінь чорноти поверхні конструкції,  $\sigma_{SB}$  – константа Стефана-Больцмана.

Зародження пор в'язкого руйнування визначається розвитком пластичного плину металу як в ізотермічному, так і в неізотермічному випадку, тому в якості критерію зародження мікропор певної концентрації  $f_0$  було обрано підхід Джонсона-Кука:

$$\int \frac{d\varepsilon_i^p}{\varepsilon_c} > 1,$$

де  $d\varepsilon_i^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{d\varepsilon_{ij}^p \cdot d\varepsilon_{ij}^p}$ ,  $d\varepsilon_{ij}^p$  – компоненти тензора приростів пластичних деформацій,  $\varepsilon_c$  – критична величина пластичних деформацій.

Наявність несучільності металу має вплив на розвиток напружено-деформованого стану металу конструкції при зовнішньому силовому впливі. Одним із визнаних підходів, які дозволяють врахувати цей фактор, є використання континуальної моделі Гурсона-Твергаарда-Нідлмана, в рамках якого поверхня текучості описується наступним чином:

$$\Phi = \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_T} \right)^2 - (q_3 \cdot f')^2 + 2 \cdot q_1 \cdot f' \cdot \cosh \left( q_2 \cdot \frac{3 \cdot \sigma_m}{2 \cdot \sigma_T} \right) - 1,$$

де  $q_1, q_2, q_3$  – константи;  $f'$  – еквівалентна концентрація пор.

Подальше зростання пор, що зародилися, залежить від жорсткості напруженого стану та інтенсивності пластичного деформування металу і описується законом Райса-Трейсі:

$$dR = R_0 \cdot K_1 \cdot \exp \left( K_2 \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_i} \right) d\varepsilon_i^p,$$

де  $R, R_0$  – поточний і початковий радіус пор, відповідно;  $\sigma_i$  – інтенсивність напружень;  $K_1 = 0,28, K_2 = 1,5$  – константи.

Математичний розгляд об'єднаної задачі кінетики температурного поля, розвитку напружень і деформацій та формування докритичної пошкодженості базується на відповідному скінченно-елементному описі. Приріст тензора деформацій (з урахуванням наявності та рівномірного розподілу мікропор) може бути представлений наступним виразом:

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

де  $d\varepsilon_{ij}^e, d\varepsilon_{ij}^p, \delta_{ij} \cdot d\varepsilon_T, \delta_{ij} \cdot df/3$  – компоненти приросту тензора деформацій, що зумовлені пружним механізмом деформування, пластичними деформаціями (миттєвої пластичності  $\varepsilon^m$  та повзучості  $\varepsilon^c$ ), кінетикою неоднорідного температурного поля та пористістю, відповідно,  $i, j = r, \beta, z; f$  – об'ємна концентрація пор.

Якщо деформації миттєвої пластичності визначаються положенням стану скінченного елемента відносно поверхні текучості, то процеси повзучості залежать від часу витримки та

поля напружень відповідно до функції повзучості конкретного матеріалу  $\Omega$ :

$$d\varepsilon_{ij}^c = \Omega(\sigma_i, T) \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma) dt.$$

Залежність деформацій від напружень визначається законом Гука та асоційованим законом пластичного плину, виходячи з наступного співвідношення:

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

де  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера, тобто  $\delta_{ij} = 1$ , якщо  $i = j$  і  $\delta_{ij} = 0$ , якщо  $i \neq j$ ,  $\sigma$  – середнє значення нормальних компонентів тензора напружень  $\sigma_{ij}$ ,  $K = (1 - 2\nu)/E$  – модуль об'ємного стиску,  $G = 0,5E/(1 + \nu)$  – модуль зсуву, символ «\*» відносить змінну до попереднього кроку простежування,  $\Psi$  – функція стану матеріалу, що визначає умову пластичного плину в рамках моделі Гурсона-Твергаарда-Нідлмана.

Для розв'язання нелінійності при пластичному деформуванні було розглянуто функцію стану матеріалу  $\Psi$ , що задовольняє наступним умовам на поверхні текучості:

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

$$\Psi > \frac{1}{2 \cdot G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s;$$

стан  $\sigma_i > \sigma_s$  недопустимий.

В якості критерію зародження макроскопічного руйнування використовувалася умова крихко-в'язкого руйнування, а саме виконання однієї з трьох умов:

$$\left(\Psi - \frac{1}{2 \cdot G}\right)_{KP} \geq \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_p^*}{1,5 \cdot \sigma_i} \approx \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_p^*}{1,5 \cdot \sigma_s(\varepsilon_p, T)};$$

$$f' \rightarrow f_d = \frac{2 \cdot q_1}{q_3} \cdot \cosh\left(\frac{3 \cdot q_2 \cdot \sigma_m}{2 \cdot \sigma_T}\right);$$

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

де  $S_K$  – напруження величини мікровідколу.

В рамках цього дослідження за допомогою наведеної чисельної методології було досліджено особливості граничного стану типового зварного технологічного трубопроводу діаметром  $D=300$  мм і товщиною стінки  $\delta=15$  мм, матеріал труби – неіржавіюча теплостійка сталь 15X2НМФА, що використовується для потреб атомної енергетики. Місце зварювання – кільцевий монтажний шов без термооброблення, периферія якого є областю зниженої стійкості металу до корозії, тому передбачено можливість формування локального дефекту втрати металу корозійно-ерозійної природи на поверхні труби біля зварного шва. Було проведено моделювання процесу однопрохідного монтажного зварювання для отримання розподілу залишкових напружень і деформацій в області нероз'єднаного з'єднання. Розглядалися випадки ТЕ з наявним дефектом локального стоншення напівеліптичної форми на периферії шва та трубопроводу без макродефектів, умови експлуатації – температура  $T_e=600-675$  °С при різних значеннях внутрішнього тиску транспортованого продукту  $P$ . В залежності від величини  $P$  інтенсивність розвитку деформацій повзучості різна і зумовлюється як власне експлуатаційними напруженнями в стінці ТЕ із урахуванням їх взаємодії з залишковими післязварювальними, так і концентратором напружень в області дефекту стоншення. Як приклад, на Рис. 1 показано порівняння накопичення пошкодження за в'язким механізмом в залежності від часу експлуатації для бездефектної труби (а) і з урахуванням наявності дефекту стоншення глибиною  $a=5$  мм та довжиною  $2s=50$  мм (б). Як видно з цих результатів, накопичення докритичного пошкодження є нелінійним, наявність концентратора суттєво знижує стійкість матеріалу трубопроводу до руйнування і знижує максимальний безпечний час експлуатування.

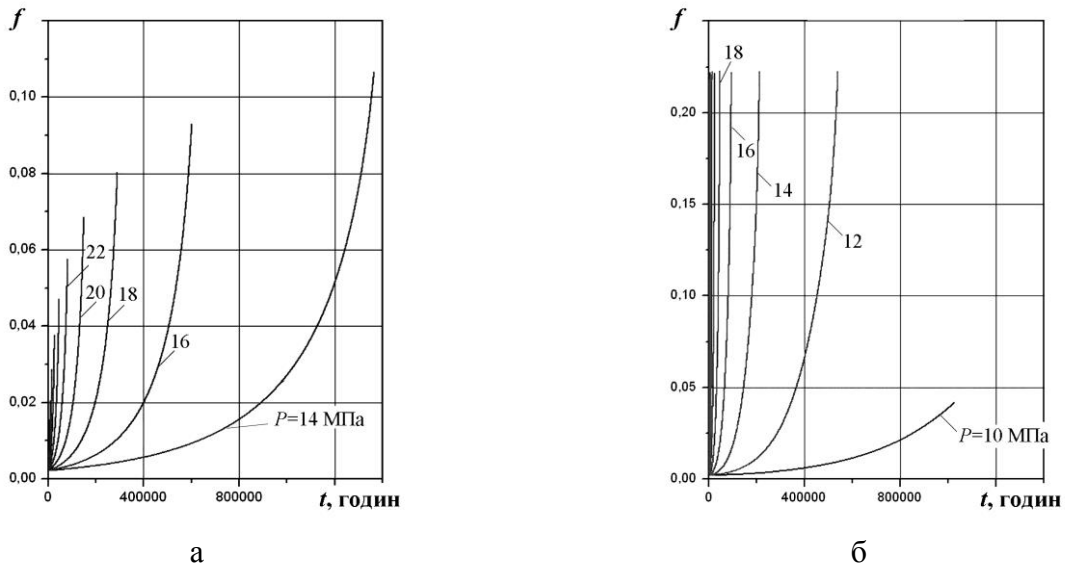


Рис. 1. Розвиток концентрації докритичного пошкодження матеріалу  $f$  трубопровідного елемента ( $D \times \delta = 300 \times 15$  мм, сталь 15Х2НМФА) в процесі експлуатації при температурі  $625$  °С та різних значеннях тиску  $P$ : а – бездефектний випадок; б – за наявності локального дефекту стоншення

Розмір дефекту впливає на концентрацію напружень і, відповідно, на розвиток необоротних деформацій повзучості та докритичного пошкодження матеріалу. Це змінює стійкість дефектного ТЕ до макроруйнування, знижуючи граничний час експлуатації  $t_k$  в умовах комплексної дії внутрішнього тиску та високої температури. На Рис. 2 наведено розрахункові залежності  $t_k$  трубопроводу з дефектом стоншення стінки при  $T_e = 650$  °С і  $P = 8$  МПа, з яких можна зробити висновок про те, що в умовах високотемпературної експлуатації наявність дефекту стоншення, припустимого з точки зору статичної міцності, може значно впливати на скорочення довгострокового ресурсу через накопичення докритичної пошкоженості матеріалу в результаті деформування за механізмом повзучості.

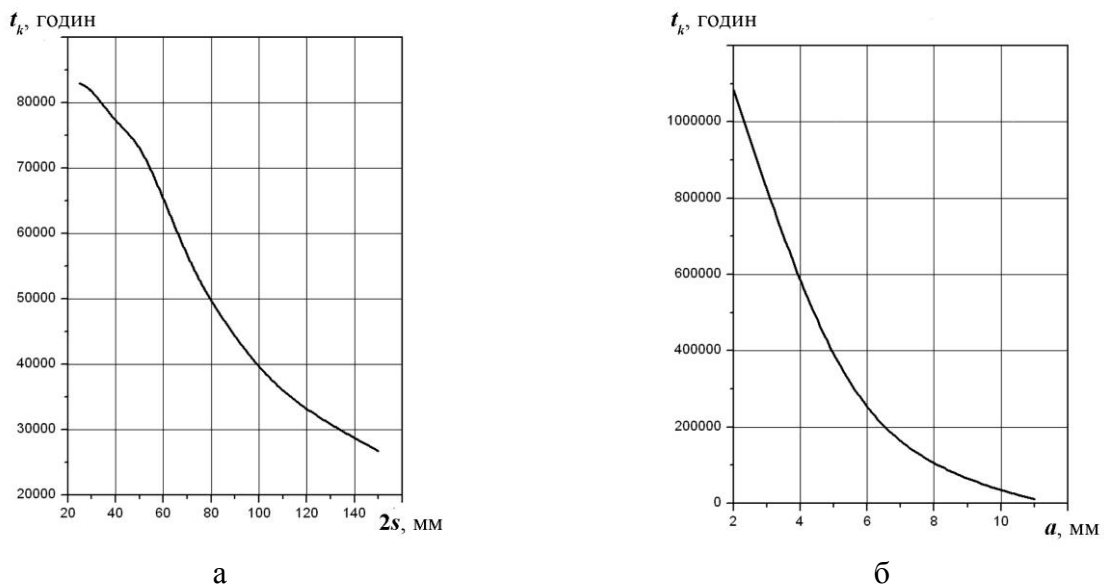


Рис. 2. Розрахункові залежності часу експлуатації трубопровідного елемента ( $D \times \delta = 300 \times 15$  мм, сталь 15Х2НМФА при температурі  $T_e = 650$  °С і тиску  $P = 8$  МПа від розмірів дефекту стоншення: а – від довжини  $2s$  при глибині  $a = 8$  мм; б – від глибини  $a$  при довжині  $2s = 30$  мм