

УДК 621.791:658.562

**О. Міленін, канд. техн. наук; О. Великоіваненко, канд. фіз.-мат. наук;
Г. Розинка; Н. Півторак**

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗВИТКУ В'ЯЗКОГО РУЙНУВАННЯ ДІЛЯНОК МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ З ТИПОВИМИ ДЕФЕКТАМИ

***Резюме.** Побудовано комплексну математичну модель розвитку мікропошкодженості матеріалу конструкційних елементів при зварюванні та експлуатації з метою чисельного аналізу граничного стану зварних конструкцій, схильних до в'язкого руйнування. На основі сучасних скінченно-елементних моделей кінетики стану зварних конструкцій реалізовано алгоритми появи, взаємодії та росту пор в'язкого руйнування металу та їх переходу в макродефекти. На прикладі елемента магістрального трубопроводу із дефектом локальної корозійної втрати металу в області монтажного кільцевого шва досліджено специфіку розвитку розсіяного пошкодження за в'язким механізмом та його вплив на граничний стан такої конструкції.*

***Ключові слова:** в'язке руйнування, пороутворення, напружено-деформований стан, граничне навантаження, зварне з'єднання.*

O. Milenin, O. Velikoivanenko, G. Rozynka, N. Pivtorak

NUMERICAL ANALYSIS OF DUCTILE FRACTURE IN THE REGION OF TYPICAL DEFECTS OF MAIN PIPELINES

***Summary.** The limit state of main pipelines and welded pressure vessels with typical surface corrosion defects is determined with processes of ductile fracture in the region of geometrical anomalies and welded joints. For the numerical analysis of the limit state of welded constructions liable to ductile fracture, the complex mathematical model of the construction elements material microdamage growth at welding and exploitation, has been built. On the basis of up-to-date finite element models of welded constructions state kinetics the algorithms of appearance, interaction and growth of pores of metal ductile fracture and their transition to macrodefects have been realized. Therefore calculations of state of stresses and strains of the construction at welding and exploitation loading consider the changing of bearing cross-section of porous elements and the changing of plasticity condition. For the locally isothermal construction deformation correspondent criterion of ductile fracture pores nucleation has been proposed. As an example, the element of main pipeline with the defect of local corrosive metal loss in the region of circumferential field weld the features of dispersed damage growth according to ductile fracture mechanism and its influence on such construction limit state, has been explored. It has been shown, that depending on the relative position of geometrical anomaly and welded joint, the fields of damage, those caused with them, start interacting at a different internal pressure in the pipeline, and the way of this interaction determines the limit load at which macrodefects appear. The influence of possible weld metal discontinuity of gas porosity type, that appeared at welding of circumferential pipeline joints, on construction bearing capacity, has been studied. It has been shown, that the presence of such defects can substantially decrease the limit exploitation loading.*

***Key words:** ductile fracture, pores formation, stress-strain state, limit load, welded joint.*

Вступ. Аналіз стану мікро- та макропошкодженості матеріалу сучасних зварних конструкцій є важливим етапом визначення граничних навантажень, діагностики їх фактичного стану та прогнозування залишкового ресурсу безпечної експлуатації. При цьому опис процесів, що призводять до порушення суцільності матеріалу конструкційних елементів, зародження та розвитку типових дефектів, вимагає сумісного використання методик моделювання кінетики напружено-деформованого стану залежно від величини та природи зовнішньої силової дії, основ механіки руйнування, сучасних уявлень про поведінку кристалічних структур при граничній силовій дії. Крім того, наявність зварних з'єднань робить необхідним додаткове врахування стану конструкції в області зварювання з позиції залишкового напружено-деформованого і структурного станів металу та розвитку розсіяної пошкодженості, що

базується на моделюванні процесів термопластичності суцільного середовища. Як показує досвід, руйнування зварних посудин тиску і трубопроводів з високоміцних сталей у ряді випадків визначається процесами в'язкого руйнування в області зварних швів і геометричних аномалій [1 – 2]. При цьому більшість існуючих моделей в'язкого руйнування обмежується випадками структурно однорідних матеріалів в ізотермічному випадку [3 – 5], тоді як в реальних конструкціях зварні шви є слабкими ланками, і аналіз їх граничного стану є важливим аспектом технічної діагностики відповідальних конструкцій. Зокрема, при прогнозуванні розвитку напружено-деформованого стану матеріалів з порами знайшли широке застосування підходи Гурсона, Твергаарда і Нідлмана [6 – 8], які лежать в основі більшості моделей граничного стану конструкцій, схильних до в'язкого руйнування. Крім того, низку робіт присвячено розширенню цих моделей стосовно зварних конструкцій, але математичне описання власне зварювального процесу та його вплив на особливості в'язкого руйнування носить якісний характер і вимагає великої кількості експериментальних досліджень. З метою вивчення особливостей граничного стану зварних трубопровідних елементів під внутрішнім тиском у цій роботі розроблено відповідну чисельну методику аналізу в'язкого руйнування та визначення граничного стану зварних конструкцій.

У загальному випадку механізм руйнування, що розглядається, може бути розділений на такі послідовні етапи (рис. 1): а – зародження пор в'язкого руйнування при виробництві конструкції, у тому числі, в зоні локального зварювального нагріву і при розвиненому пластичному плинні металу конструкції в області фізичних та/або геометричних концентраторів при граничних значеннях зовнішнього навантаження; б – збільшення розмірів пор при пластичній деформації; взаємодія і об'єднання пор в'язкого руйнування; в – зародження макродефекту та пов'язане з ним зниження несучої здатності як дефектної ділянки, так і конструкції в цілому; г – розвиток макродефекту. Кожен із цих етапів має різну фізико-механічну природу, тому їх описання вимагає побудови відповідних взаємопов'язаних моделей.

Відповідно до сучасних уявлень механіки руйнування, зародження пор в області структурних дефектів і неоднорідностей пов'язане з істотним розвитком пластичних деформацій (первинні пори), який може бути описаний за допомогою параметра Одквіста κ [9]

$$\kappa = \int d\varepsilon_i^p, \quad (1)$$

де $d\varepsilon_{ij}^p$ – компоненти тензора приростів пластичних деформацій ($i, j = x, y, z$).

Відповідно умовою зародження пор в ізотермічному випадку є перевищення поточного значення параметра Одквіста критичної величини κ_c .

У процесі зварювання в результаті локального зварювального нагріву, фазових перетворень першого роду та супутніх ліквідаційних процесів відбувається поява локальних неоднорідностей структури металу, особливо в його міжфазній області твердо-рідкого стану (між температурами ліквідус і солідус). Для описання зародження мікропор при цьому може бути використана узагальнена залежність критичного значення параметра Одквіста κ_c від стану металу при різних температурах T :

$$\kappa_c(T) = \kappa_{c0} \cdot \exp \left\{ \left[\frac{F_0 - F(T)}{B} \right]^\beta \right\}, \quad (2)$$

де $F(T)$ – функція опору матеріалу пластичній деформації; κ_{c0} , B , F_0 , β – константи.

У випадку, якщо для даного металу не є характерними виражений температурний інтервал крихкості та істотне зміцнення, в якості функції $F(T)$ може бути прийнята температурна залежність межі плинності $\sigma_T(T)$. Таким чином, впливає, що κ_{c0} і F_0 – відповідно значення параметра Одквіста даного металу при кімнатній температурі та його нормативна межа плинності σ_T , і (2) набуває вигляду

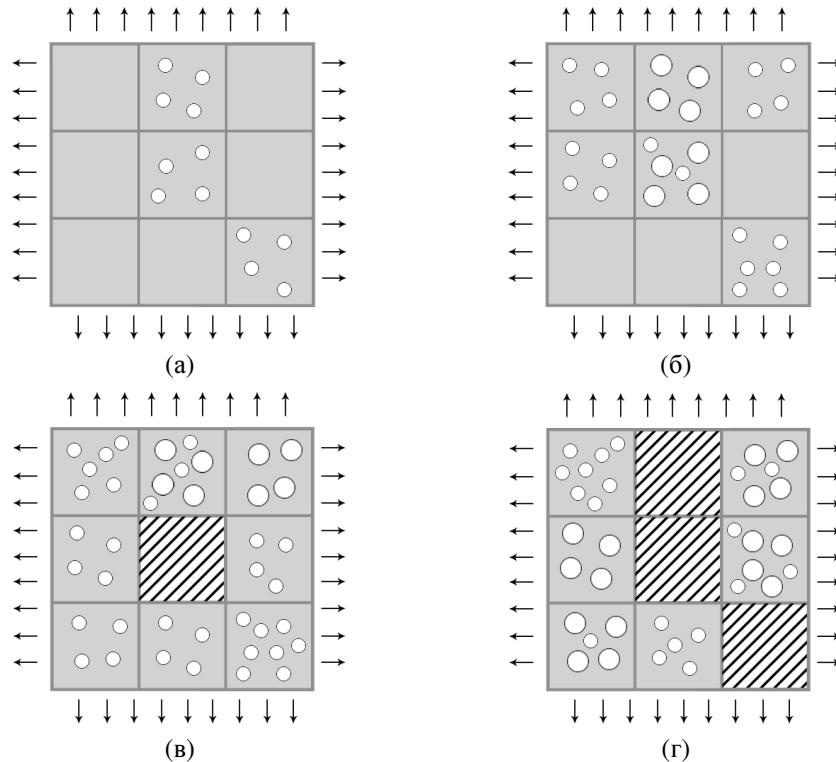


Рисунок 1. Схематичне зображення етапів розвитку в'язкого руйнування під впливом зовнішній сил в окремих прямокутних елементах скінченно-елементної моделі: а – зародження первинних мікропор; б – збільшення розмірів пор при пластичній деформації та зародження вторинних пор; в – зародження макродефекту (позначено штрихуванням); г – розвиток макродефекту

Figure 1. Schematic view of the stages of ductile fracture development under external forces in the rectangular elements of finite-element model: a – nucleation of primary micropores; b – growth of pores at plastic deformation and secondary pores nucleation; c – macrodefect nucleation (marked with hatching); d – macrodefect growth

$$\kappa_c(T) = \kappa_{c0} \cdot \exp \left\{ \left[\frac{\sigma_T - \sigma_T(T)}{B} \right]^\beta \right\}. \quad (3)$$

Для конструкційних сталей значення коефіцієнта β приблизно дорівнює 3 [10], величина B характеризує схильність матеріалу до утворення пор і знаходиться в межах $(1,0 \div 1,5) \cdot \sigma_T$.

У змінному полі температур і у випадку розвиненої кінетики накопичення пластичних деформацій критерій зародження пор у металі можна представити у вигляді

$$\chi_x = \int \frac{d\kappa}{\kappa_c(T)} \geq 1. \quad (4)$$

При виконанні умови (4) можна вважати, що в даній області конструкції зароджується несутільність у вигляді сферичних пор зварювання об'ємною концентрацією f_{pl} .

Слід зазначити, що іншим характерним механізмом зародження пор при зварюванні є формування газових бульбашок домішок у зварювальній ванні, які не встигають виділитися в газову фазу до кристалізації металу [11]. Моделювання такого процесу зародження пор є достатньо складним і в рамки цієї роботи не входить, але може бути врахований як апріорний при розгляді сумарної об'ємної концентрації пор f_0 , що з'явилися при зварюванні:

$$f_0 = f_{pl} + f_{ev}, \quad (5)$$

де f_{ev} – об'ємна концентрація пор, що зародилися в результаті процесів випаровування.

Подальше зростання пор, що зародилися, залежить від жорсткості напруженого стану та інтенсивності пластичної деформації металу і описується законом Райса-Трейсі зростання пор сферичної форми, а саме [9]:

$$dR = R_0 \cdot K_1 \cdot \exp\left(K_2 \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_i}\right) d\varepsilon_i^p, \quad (6)$$

де R , R_0 – поточний і початковий радіус пор відповідно; σ_m – мембранні напруження; σ_i – інтенсивність напружень; $\frac{\sigma_m}{\sigma_i}$ – параметр жорсткості напруженого стану; $K_1 = 0,28$, $K_2 = 1,5$ – константи.

У випадку, якщо жорсткість напруженого стану в конкретній області конструкції мала для зростання пор згідно з (6), то істотний розвиток пластичних деформацій може призвести до появи вторинних несучільностей. Згідно з [9] швидкість зародження вторинних сферичних пор залежить від концентрації включень у металі конструкції та розвитку пластичних деформацій за законом

$$f = f_0 + f_i \cdot \exp\left(-\frac{\kappa^*}{\kappa - \kappa_c}\right), \quad (7)$$

де f_i – об’ємна концентрація включень; κ^* – константа матеріалу, що характеризує максимально можливий приріст параметра Одквіста.

Слід зазначити, що значення f_i у даному випадку залежить від структурного стану металу в області зварного шва і зони термічного впливу (ЗТВ), зокрема від кількості цементиту (Fe_3C), а також початкових і набутих у процесі зварювання неметалічних включень [12].

Аналіз напружено-деформованого стану зварної конструкції з позицій в’язкого руйнування в даній роботі проводився на основі чисельного розв’язання задачі нестационарної термопластичності шляхом простежування пружно-пластичних деформацій з моменту початку зварювання до повного охолодження конструкції і подальшого навантаження до граничного стану в рамках скінченно-елементної моделі [13 – 14]. Зв’язок напружень і деформацій визначається законом Гука і асоційованим законом пластичного плину, виходячи з таких співвідношень:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Psi \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma_m) + \delta_{ij} \cdot (K \cdot \sigma_m + \Delta\varepsilon_m + \Delta\rho_l) - \frac{1}{2 \cdot G} \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma_m)^* + (K \cdot \sigma_m)^*, \quad (8)$$

де $K = \frac{1-2 \cdot \nu}{E}$; $G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)}$; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; Ψ – функція

стану матеріалу, що визначається умовою пластичного плину згідно з критерієм Мізеса з додатковим урахуванням зменшення несучого нетто-перетину скінченного елемента в результаті формування несучільності в рамках моделі Гурсона-Твергаарда:

$$\Psi = \frac{1}{2 \cdot G}, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T \cdot \sqrt{1 + (q_3 \cdot f^*)^2 - 2 \cdot q_1 \cdot \cosh\left(q_2 \cdot \frac{3 \cdot \sigma_m}{2 \cdot \sigma_T}\right)}, \quad (9)$$

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

де $q_1=1,5$, $q_2=1$, $q_3=1,5$ – константи; f^* – еквівалентна об’ємна концентрація пор, що враховує їх взаємодію в скінченнім елементі.

Величина еквівалентної концентрації пор, що фігурує в (9), визначається з наступного співвідношення, запропонованого Твергаардом і Нідлманом [7]:

$$f^* = \begin{cases} f, & \text{якщо } f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_u - f_c}{f_F - f_c} \cdot (f - f_c), & \text{якщо } f > f_c \end{cases}, \quad (10)$$

де f_c – критичне значення концентрації несучільностей, до якої окремі пори не взаємодіють і яке приймають рівним 0,15; f_F – концентрація пор, при якій відбувається

руйнування скінченного елемента; $f_u^* = 1/q_1$.

Граничний стан кожного скінченного елемента визначається двома можливими механізмами руйнування [15]: пластична нестійкість у випадку $\Psi \rightarrow \infty$ відповідно критерію Маклінтока та мікроскол.

Як приклад використання розробленої комплексної моделі для аналізу зварних конструкцій розглянуто граничний стан трубопровідного елемента (діаметр – 1420 мм, товщина стінки – 20 мм, матеріал – сталь 17Г1С) з окружним зварним швом і зовнішнім поверхневим стоншенням стінки типу втрати металу (рис. 2). Попереднє дослідження впливу процесу зварювання на стан мікропошкодженості металу конструкції в області шва та ЗТВ показало, що невелика концентрація пор в'язкого руйнування (об'ємна концентрація близько 0,0025 відносно до загального об'єму металу шва) формується в зоні сплавлення.

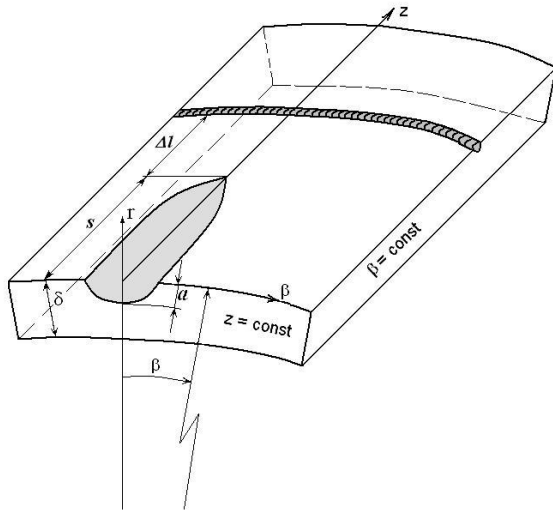


Рисунок 2. Схема ділянки трубопроводу з дефектом локального стоншення стінки в області зварного монтажного шва

Figure 2. Scheme of pipeline part with the local wall thinning defect in the region of the circular field weld

Подальше моделювання кінетики напружено-деформованого та пошкодженого стану конструкції під внутрішнім тиском із урахуванням відповідних залишкових полів після зварювання (див. приклад на рис. 3) дозволило визначити граничне навантаження відповідно до розроблених методик оцінювання розвитку процесів в'язкого руйнування. На рис. 4 наведено залежність внутрішнього тиску в трубопроводі з дефектом стоншення стінки в області кільцевого зварного шва, при якому відбувається зародження макродефектів, від відстані в аксіальному напрямку між швом і геометричною аномалією (слід зазначити, що значення граничного тиску співвідносяться з максимальним допустимим експлуатаційним тиском на ділянці трубопроводу через відповідні коефіцієнти запасу). Із цих даних бачимо, що залежно від взаємного розташування зварного шва граничний тиск на дефектній ділянці трубопроводу може знизитися на 10% порівняно з бездефектним станом, тоді як окремо дефект локального стоншення розглянутих розмірів і окружний зварний шов не мають суттєвого впливу на несучу здатність трубопроводу.

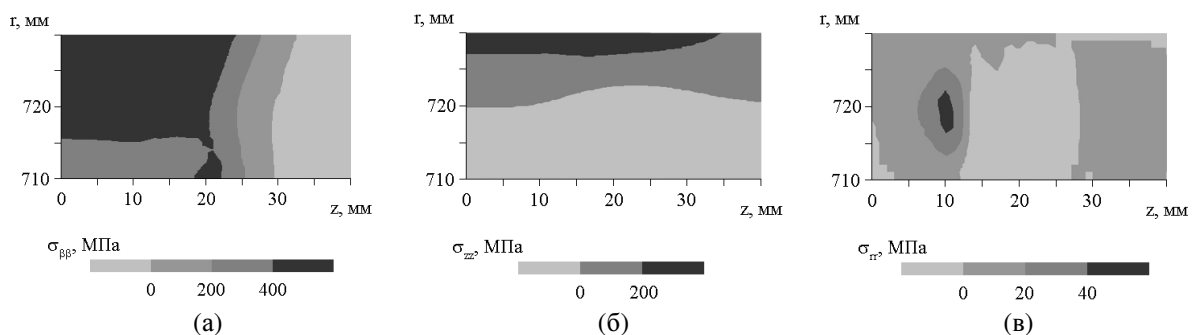


Рисунок 3. Поля залишкових напружень в області зварного кільцевого шва

(із урахуванням симетрії): окружних (а), аксіальних (б), радіальних (в)

Figure 3. Residual fields of stresses in the region of circumferential weld (taking into account the symmetry): circumferential (a), axial (b), radial (c)

Цей результат можна пояснити зміною характеру розподілу пошкодженості при збільшенні навантаження і розвитку в'язкого руйнування (рис. 5). При відстані між дефектом і швом близько 5 мм (див. рис. 5а) під дією внутрішнього тиску в трубопроводі 18,8 МПа формується характерна загальна зона рівномірної несучільності металу, де зароджуються макродефекти і порушується цілісність конструкції. При більшій відстані між швом і геометричною аномалією (50 мм, див. рис. 5б) така зона пошкодженості формується при більшому тиску 19,8 МПа і зміщена до внутрішньої поверхні труби. При цьому макродефекти з'являються безпосередньо в периферійній області дефекту стоншення. В разі суттєвого віддалення дефекту від шва (150 мм, див. рис. 5б) локальні зони пошкодженості об'єднуються при внутрішньому навантаженні 20,2 МПа, близькому до максимального тиску в бездефектній трубі (20,4 МПа), руйнування відбувається в області стоншення стінки.

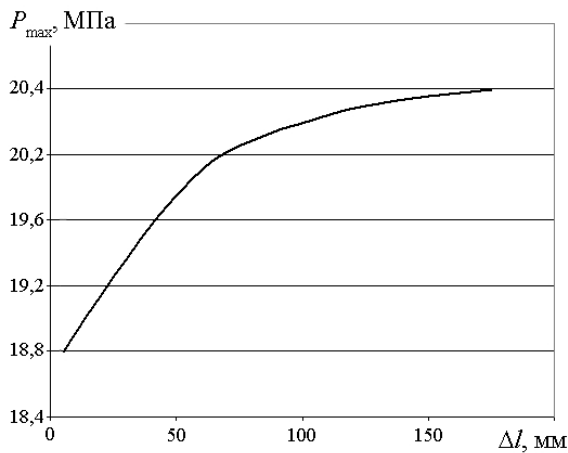
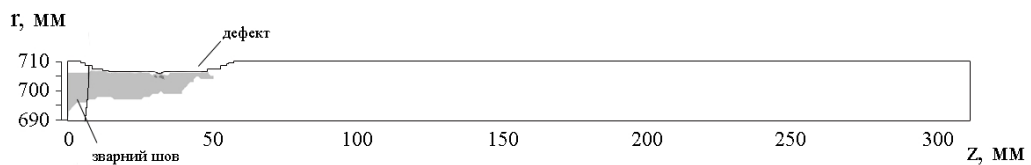


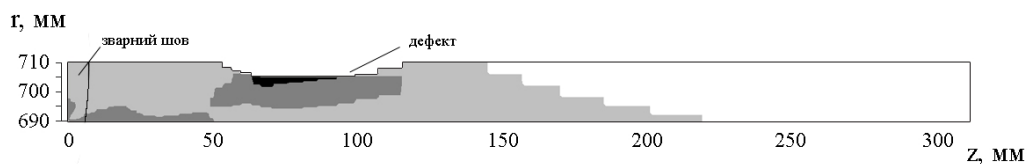
Рисунок 4. Залежність максимального внутрішнього тиску в трубопроводі P_{max} від відстані між зварним окружним швом і дефектом локального корозійного стоншення стінки Δl

Figure 4. Dependence of the maximum internal pressure in pipeline P_{max} on the distance between circumferential weld and defect of local corrosive wall thinning Δl

Як зазначалося вище, наявність газових пор у металі шва, що утворилися під час його кристалізації, може мати вплив на граничне навантаження в трубопроводі. В рамках цієї роботи було досліджено граничний стан трубопроводу в області кільцевого шва із газовими порами діаметра 1 мм при відносній концентрації несучільності у шві близько 0,07, розташованої в зоні сплавлення. Відповідно запропонованої методики чисельно визначений граничний тиск при цьому суттєво менший, ніж у бездефектному трубопроводі, а саме 17,8 МПа, що корелює із досвідом експлуатування магістральних трубопроводів та існуючими вимогами до якості монтажних швів.



(а)



(б)

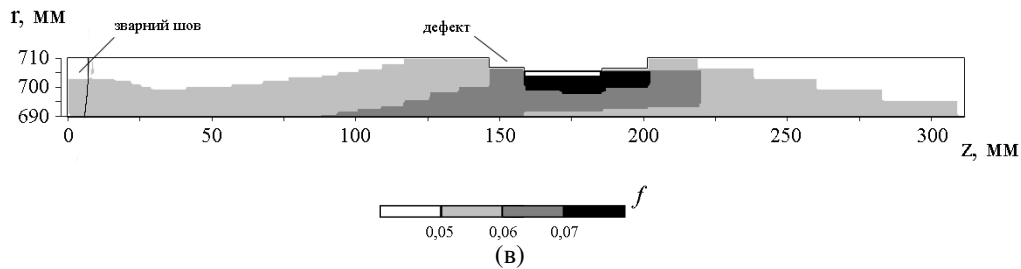


Рисунок 5. Розподіл об'ємної концентрації мікропор в'язкого руйнування f у поздовжньому перетині трубопроводу із локальним напівеліптичним стоншенням стінки в області зварного монтажного шва при граничному навантаженні внутрішнім тиском P_{\max} залежно від відстані Δl між зварним швом і дефектом:

а – $\Delta l=5$ мм, $P_{\max}=18,8$ МПа; б – $\Delta l=50$ мм,
 $P_{\max}=19,8$ МПа; в – $\Delta l=150$ мм, $P_{\max}=20,2$ МПа

Figure 5. Distribution of volume fraction of micropores of ductile fracture f on longitudinal cross-section of pipeline with local semielliptical wall thinning in the region of the field weld at the maximum internal pressure P_{\max} depending on distance Δl between weld and defect: а – $\Delta l=5$ mm, $P_{\max}=18,8$ MPa; б – $\Delta l=50$ mm, $P_{\max}=19,8$ MPa; в – $\Delta l=150$ mm, $P_{\max}=20,2$ MPa

Висновки. Побудовано комплексну методику чисельного оцінювання граничного стану зварних конструкцій, схильних до в'язкого руйнування. Запропоновано методи аналізу зародження та розвитку мікропор для локально неізотермічного режиму деформування конструкцій. На прикладі чисельного аналізу граничного стану дефектної ділянки магістрального трубопроводу з локальною корозійною втратою металу біля зварного кільцевого шва досліджено специфіку розвитку пор в'язкого руйнування та впливу пошкодженості такого типу на несучу здатність трубопроводу. Показано, що залежно від взаємного розташування геометричної аномалії та зварного шва, поля пошкодженості від них починають взаємодіяти при різному внутрішньому тиску в трубопроводі, і характер цієї взаємодії визначає граничне навантаження, при якому з'являються макродефекти. Для випадку, що було розглянуто, зменшення відстані між дефектом стоншення стінки та зварним швом викликає зниження максимального допустимого тиску до 10%. Досліджено вплив можливих несутцільностей металу шва типу газових пор, що утворилися під час зварювання кільцевого шва трубопроводу, на несучу здатність конструкції. Показано, що наявність таких дефектів може істотно знизити граничне експлуатаційне навантаження – з 20,4 МПа до 17,8 при відносній концентрації несутцільності у шві близько 0,07.

Conclusions. The complex method of numeral estimation of the limit state of the welded constructions liable to ductile fracture has been built. The methods of analysis of nucleation and growth of micropores in case of locally unisothermal construction deformation, have been proposed. As an example of numeral analysis of the limit state of main pipeline defected part with the local corrosive metal loss near the circumferential field weld, the characteristic features of ductile fracture porosity growth and the influence of damage of such type on pipeline bearing capacity have been explored. It has been shown, that depending on the relative position of geometrical anomaly and welded joint, the fields of damage, those caused by them, begin to interact at different internal pressure in pipeline, and the way of this interaction determines the limit load at which macrodefects appear. For the considered case reduction of distance between the defect of wall thinning and weld causes the decrease of maximum allowable pressure up to 10%. The influence of possible weld metal discontinuity of gas porosity type, that appeared at welding of circumferential pipeline joints, on construction bearing capacity, has been studied. It has been shown, that the presence of

such defects can substantially decrease the limit exploitation loading, from 20.4 to 17.8 MPa at discontinuity volume concentration ratio at weld about 0.07.

Список використаної літератури

1. Рыбин, В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов [Текст] / В.В. Рыбин. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
2. Material failure by void growth to coalescence. // V. Tvergaard / Advances in Applied Mechanics. – № 27. – 1990. – P. 83 – 151.
3. Hancock I., Mackenzie A.C. On the mechanism of ductile failure a high strength steel subjected in multi-axial stress state// J. Mech. Phys. Solids. – 1976 – 24, № 213. – P. 147 – 149.
4. Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials. // L. Xue / Engineering Fracture Mechanics – № 75. – 2008. – P. 3343 – 3366.
5. Modification of the Gurson Model for shear failure. // K. Nahshon, J.W. Hutchinson/ European Journal of Mechanics A/Solids – № 27. – 2008. – P. 1 – 17.
6. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part 1 – yield criteria and flow rules for porous ductile media. // A.I. Gurson / Journal of Engineering Materials and Technology. – № 1. – 1977. – P. 2 – 15.
7. Analysis Of the Cup-Cone Fracture in a Round Tensile bar // V. Tvergaard, A. Needleman / Acta Metallurgica. – № 32. – 1984. – P. 157 – 169.
8. Void growth in an elastic-plastic medium // A. Needleman / Journal of Applied Mechanics. – № 39. – 1972. – P. 964 – 970.
9. Карзов, Г.П. Физико-механическое моделирование процессов разрушения [Текст] / Г.П. Карзов, Б.З. Марголин, В.А. Швецова. – Спб.: Политехника, 1993. – 391 с.
10. Резников, А.Н. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом [Текст] / А.Н. Резников, М.А. Шатерин, В.С. Кунин и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
11. Теоретические основы сварки; под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1970. – 450 с.
12. Ductile Fracture Resistance of the Weld Metal and Heat Affected Zone in a HSLA Steel Welded Joint // A. Sedmak, V. Younise, M. Rakin et al. / TC1 Meeting, Freiburg, 10, December, 2010.
13. Махненко, В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций [Текст] / В.И. Махненко. – Киев: Наукова думка, 1976. – 320 с.
14. Махненко, В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций [Текст] / В.И. Махненко. – Киев: Наукова думка, 2006. – 618 с.
15. Махненко, В.И. Проблемы экспертизы современных сварных конструкций ответственного назначения [Текст] / В.И. Махненко // Автоматическая сварка. – № 5. – 2013. – С. 22 – 29.

Отримано 07.08.2013