УДК 539.375

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДУ ЗАРОДЖЕННЯ ВТОМНИХ ТРІЩИН БІЛЯ КОНЦЕНТРАТОРІВ НАПРУЖЕНЬ

Ю. Банахевич

Канд. техн. наук,
Управління експлуатації магістральних газопроводів і ГРС ДК «Укртрансгаз»,
м. Київ

А. Сакара

Інженер,
Фірма «ДІАЛАБ» ЛТД,
м. Одеса

На основі деформаційного підходу, а також рівняння Кофіна-Менсона побудована розрахункова модель для визначення періоду зародження втомної тріщини біля концентратора напружень. Ефективність моделі підтверджена експериментальними результатами.

циклічне навантаження, концентратор напружень, період зародження втомної тріщини, залишкова деформація, малоциклова втома, коефіцієнт інтенсивності напружень

У дослідженнях останніх років минулого століття (див., наприклад, [1 — 9]) втомного руйнування матеріалів і елементів конструкцій основна увага приділялася докритичному росту втомних тріщин. При цьому швидкість росту втомних тріщин визначали коефіцієнтами інтенсивності напружень. Проте для бездефектних матеріалів основна частка довговічності елементів конструкцій припадає на період зародження втомних тріщин. На сьогодні вже побудовано декілька розрахункових моделей для визначення періоду зародження втомних тріщин біля концентраторів напружень [3, 5, 8, 10 — 12]. В основу цих моделей покладений деформаційний підхід і гіпотеза, що деформація розтягу в околі вершини концентратора є інваріантною характеристикою втомного руйнування. Однак, як відомо [13], при циклічному навантаженні в околі концентратора напружень, особливо біля тріщини, виникають залишкові деформації і, особливо, напруження, які слід враховувати при визначенні зародження втомної тріщини біля концентраторів напружень.

У цій статті, на відміну від інших, зроблена спроба створити таку розрахункову модель, яка б дала змогу враховувати залишкові деформації при визначенні періоду зародження тріщин біля концентраторів напружень.

Розрахункова модель для визначення періоду зародження тріщини. Розглянемо пружно-пластичне тіло, що послаблене концентратором напружень у вигляді тонкого вирізу або тонкої порожнини, яка симетрична відносно її середньої площини і у вершині має радіус заокруглення ρ набагато менший від її розміру l (рис. 1). Вважатимемо, що таке тіло піддане циклічному розтягу перпендикулярно до середньої площини дефекту і знаходиться в умовах плоскої деформації. Нехай значення амплітуд зовнішніх зусиль p (p_{max} і $p_{min} > 0$) будуть такі,

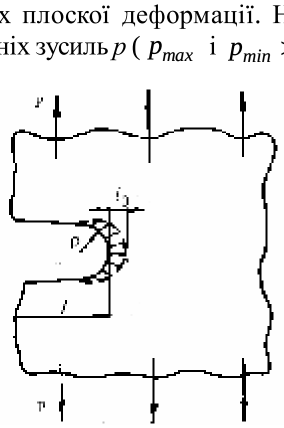

Рис. 1 Схема навантаження тіла з тріщиною

що втомне руйнування біля вершини концентратора проходить в області малоциклової втоми. Задача полягає у визначенні періоду зародження тріщини N_* біля вершини концентратора напружень.

Аналізуючи відомі [14] результати досліджень розподілу деформацій біля вершини концентратора напружень, приходимо до висновку, що тут у деякій невеликій області шириною l_0 буде зона високих майже однорідних деформацій, де і зароджуватиметься втомна тріщина. Оскільки було зроблено припущення, що втомне руйнування проходить в умовах малоциклової втоми, то період N_* зародження втомної тріщини визначатиметься розмахом пластичної деформації $\Delta\varepsilon$ за законом Кофіна-Менсона [4, 6]:

$$N_*^n \Delta\varepsilon = C, \ \left(\Delta\varepsilon = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}\right). \qquad (1)$$

Тут ε_{max}, ε_{min} — максимальне і мінімальне значення деформації ε у пластичній зоні біля вершини концентратора за цикл навантаження, а величини n, C — характеристики втомного руйнування матеріалу, які визначаються з експерименту.

На основі аналізу результатів праць [4, 6] ці характеристики для термозміцнених сталей можна наближено приймати так: $n \approx 0{,}5$, $C \approx \varepsilon_{fC}$, де ε_{fC} — критичне значення деформації ε за циклічного навантаження, що визначається з експерименту. Тоді формула (1) набуде такого вигляду:

$$N_*^{0{,}5} \Delta\varepsilon = \varepsilon_{fC} . \qquad (2)$$

Звідси отримаємо таку формулу:

$$N_* = \left(\Delta\varepsilon\right)^{-2} \left(\varepsilon_{fC}\right)^2 . \qquad (3)$$

Отже, задача звелася до визначення розмаху циклічних деформацій $\Delta\varepsilon$ у пластичній зоні біля вершини концентратора. Слід зазначити, що це питання розглядалося і в [12], де величини ε_{max},ε_{min} визначалися формально за статичними формулами через p_{max} і p_{min} без врахування залишкової деформації, яка з'являється при розвантаженні в пластичній зоні біля вершини концентратора. У цій статті зроблена спроба наближено визначити $\Delta\varepsilon$ з врахування залишкових деформацій при циклічному навантажуванні. Для цього поступаємо так. Схему циклічного розтягу реального пружно-пластичного тіла з концентратором напружень замінюємо розрахунковою моделлю, де таке ж саме тільки пружне тіло з концентратором напружень розтягується циклічно такими ж самими зусиллями, але пластична зона біля вершини концентратора замінена тріщиною довжини l_0, на берегах якої діють стримуючі розтяг напруження $\sigma_0 = 0{,}5\left(\sigma_t + \sigma_T\right)$ (σ_t, σ_T — відповідно максимальне напруження в пластичній зоні і межа текучості матеріалу). Таке моделювання відповідає тому, що запропоновано у відомій [3] δ_C-моделі Леонова-Панасюка. При такому моделюванні напружено-деформований стан $\bar{\sigma}_1$ за розтягом і напружено-деформований стан у тілі при розвантаженні $\bar{\sigma}_2$ виражатимуться лінійними співвідношеннями. Шукана величина розмаху пластичних деформацій $\Delta\varepsilon$ у пластичній зоні визначатиметься напружено-деформованим станом $\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2$. Розмірковуючи, аналогічно, як і в [13], напружено-деформований стан $\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2$ буде приблизно такий, як і в силовій схемі розтягу такого ж тіла і такими ж зусиллями, але в пластичній зоні модельної силової схеми діють зусилля $2\sigma_0$. Тоді $\Delta\varepsilon$ визначатиметься через величину деформації ε_{1-2} для різницевого напруженого стану. На основі цього, а також використовуючи результати праці [3], для визначення розмаху деформацій $\Delta\varepsilon$ в пластичній зоні біля вершини концентратора за циклічного навантаження отримаємо таку формулу:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon_{fC}^2 \left(K_{I\ max} - K_{I\ min}\right)^2}{K_{fC}^2 \left[1 + \left(\dfrac{\rho}{\rho_0}\right)^2\right]^2}, \quad \rho_0 = \frac{2K_{fC}^2}{\pi E \sigma_0 \varepsilon_{fC}} . \qquad (4)$$

Тут K_I — коефіцієнт інтенсивності напружень біля вершини концентратора, якщо радіус заокруглення його вершини $\rho = 0$; K_{fC} — його критичне значення за циклічного навантаження; $K_{I\ max}$, $K_{I\ min}$ — відповідно максимальне і мінімальне значення K_I для амплітудних значень зовнішніх зусиль p_{max} і p_{min}; E — модуль пружності.

Підставляючи співвідношення (4) в (3), для визначення періоду зародження тріщини N_* отримаємо формулу

$$N_* = \frac{K_{fC}^4 \left[1 + \left(\rho / \rho_0\right)^2\right]}{\left(K_{I\ max} - K_{I\ min}\right)^4} . \qquad (5)$$

Таким чином, якщо для заданих параметрів навантаження і геометричних розмірів тіла розраховані значення $K_{I\ max}$, $K_{I\ min}$ і з експериментальних досліджень знайдені характеристики матеріалу ε_{fC}, E, K_{fC}, σ_t, σ_T, то період зародження втомної макротріщини біля концентратора напружень визначаємо за формулою (5). Продемонструємо застосування цього підходу на прикладі конкретної задачі.

Апробація розрахункової моделі. Розглянемо нескінченну смугу ширини $2h$, яка розтягується в нескінченно віддалених точках рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності p і послаблена з обох сторін

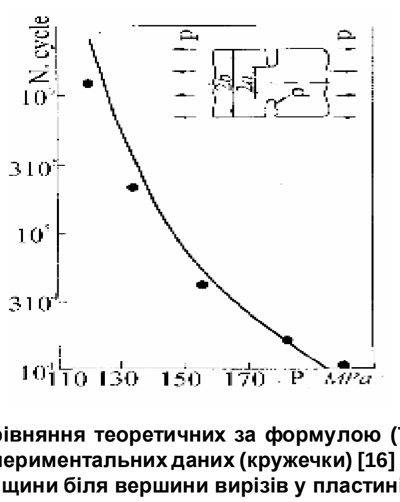

Рис. 2. Порівняння теоретичних за формулою (7) (суцільна лінія) і експериментальних даних (кружечки) [16] зародження втомної тріщини біля вершини вирізів у пластині зі сталі 65Г

вирізами довжини $l = h - a$, що мають у вершинах радіус заокруглення ρ (див. рис. 2).

Вважається, що зусилля p змінюються циклічно з нульовою асиметрією циклу ($K_{I\ min} = 0$). Задача полягає у визначенні періоду зародження втомної тріщини біля вершини концентратора $N = N_*$.

Розв'язок такої задачі здійснюємо шляхом адаптації сформульованої вище розрахункової моделі до заданого випадку, тобто за допомогою формули (5). Єдиною особливістю зміни у формулі (5) відповідно до заданої конкретної задачі буде вираз для коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{I\ max}$. Його ми шукаємо за допомогою результатів праці [15]:

$$K_{I\ max} = P\sqrt{\pi l}\Big[0{,}265(1-\varepsilon)^4 + (0{,}857 + 0{,}265\varepsilon)/(1-\varepsilon)^{3/2}\Big]. \quad (6)$$

Підставляючи співвідношення (6) у (5), для визначення періоду зародження тріщини біля вершини вирізу отримаємо таку формулу

$$N_* = K_{fC}^4 \pi^{-2} l^{-2} P^{-4}\Big[1 + (\rho/\rho_0)^2\Big] \times \Big[0{,}265(1-\varepsilon)^4 + (0{,}857 + 0{,}265\varepsilon)/(1-\varepsilon)^{3/2}\Big]^{-4}. \quad (7)$$

Формула (7) апробована на експериментальних даних [16], отриманих шляхом дослідження зародження втомної тріщини біля вершини концентратора за схемою, зображеною на рис. 2. При цьому зразки були виготовлені з нормалізованої сталі 65Г, де $\sigma_T = 560$ МПа, $\sigma_в = 920$ МПа, $\psi = 0{,}45$, $K_{fC} = 122\,\text{МПа}\sqrt{м}$, $E = 2\cdot 10^5\,\text{МПа}$, $\rho = 3{,}75\,\text{мм}$ За довжину зародженої тріщини приймали ту, яка досягала $l_з = 0{,}05$ мм .

На рис. 2 наведено порівняння так отриманих експериментальних даних і теоретичних за формулою (7). Порівняння цих даних підтверджує ефективність запропонованої тут розрахункової моделі для визначення періоду зародження втомних тріщин біля концентраторів напружень.

Висновки. На основі відомої теорії Кофіна-Менсона побудована розрахункова модель для визначення періоду зародження втомних тріщин біля концентраторів напружень. Ця модель, на відміну від відомих, враховує можливі залишкові деформації в результаті реверсивного пластичного деформування в пластичній зоні біля вершини концентратора і добре підтверджується результатами відомих експериментальних досліджень.

Література

1. *Schijve. S.* Fatigue of Structures and Materials in the State of the Art — Proc. of the ECF14. — 2002. — V.III. — P. 211—262.

2. Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures, Edit by Andrea Carpinteri. — Elsevir, 1994, vol. 1. — 952 p.

3. *Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Партон В.З.* Основы механики разрушения. — К.: Наук. думка, 1988. — 488 с.

4. *Романив О.Н., Ярема С.Я.,. Никифорчин Г.Н* и др. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. — К: Наук. думка, 1988—1990. — **4**. — 680 с.

5. *Андрейкив А.Е., Дарчук А.И.* Усталостное разрушение и долговечность конструкций. — К.: Наук. думка, 1992. — 184 с.

6. *Трощенко В.Т.* Деформирование и разрушение металлов при малоцикловом нагружении. — К.: Наук. думка, 1981. — 343 с.

7. *Черепанов Г.П.* Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974. — 640 с.

8. *Андрейкив А.Е.* Пространственные задачи теории трещин. — К.: Наук. думка, 1982. — 342 с.

9. *Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Ковчик С.Е.* Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. — К.: Наук. думка, 1977. — 278 с.

10. *Андрейкив А.Е.* Расчетная модель для определения периода зарождения усталостной макротрещины // Физ.-хим. механика материалов. — 1976. — №6. — С. 27—31.

11. *Панасюк В.В., Осташ О.П., Костык Е.М.* Зарождение усталостных трещину концентратора напряжений // Физ.-хим. механ. матер. — 1985. — №6. — С. 3—10.

12. *Стадник М.М., Ризничук Р.В.* Расчетная модель для определения усталостной долговечности тела, ослабленного тонкой полостью // Физ.-хим. механика материалов. — 1989. — №3. — С. 83—88.

13. *Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Дарчук А.И.* К теории деформирования и разрушения металлов при циклическом нагружении. — Тр. IX конференции по прочности и пластичности. — Киев-Москва, 1996. — С. 85—90.

14. *McMeeking R.M.* Finite deformation analysis of crack tip opening in elastic-plastic materials and implication for fracture // J. Mech. and Phis. Solids. — 1977. — **25**, №5. — P. 357—381.

15. Саврук М.П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. — К.: Наук. думка, 1988. — 620 с.

16. Ярема С.Я., Попович В.В. Влияние структуры и концентрации напряжений на период зарождения усталостной трещины в стали 65Г // Физ.-хим. механика материалов. — 1985. — №2. — С. 35—40.

Отримана 25.05.09

Ju. Banakhevych, A. Sakara

Determination of fatigue crack nucleation period near stress concentrators

Management of exploitation of main gas pipelines and HRS DK «Ukrtransgas», Kiev,
Firm «DIALAB» LTD, Odesa

On the basis of deformation approach, and also the Kofin-Menson equation calculation model for determination of fatigue crack nucleation period near stress concentrator have built. Model efficiency is confirmed by experimental results.