УДК 620.191.33

О.Л. Білий

ВПЛИВ ФОРМИ ТРІЩИНИ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ СТРИЖНІВ

У роботі запропоновано критерій оцінювання міцності та надійності конструкцій з тріщиноподібними дефектами на основі показника „опірності елемента конструкції росту тріщини", який є характеристикою швидкості зміни коефіцієнта інтенсивності напружень біля вершини тріщини під час її росту у конкретному конструктивному елементі. За зміною цього параметра залежно від геометрії конструктивного елемента та способу його навантаження, форми і розташування тріщиноподібного дефекту можна порівняльно оцінювати ризик руйнування конструкцій чи їх компонентів, зокрема стрижнів а також формулювати вимоги до процедури їх технічної діагностики під час експлуатації. Наведено приклади оцінювання залишкової довговічності та ризику руйнування пошкоджених стрижнів із урахуванням експлуатаційних чинників (характер навантаження, дія робочих середовищ, стан матеріалу тощо).

Ключові слова: *елементи конструкцій; тріщиноподібні дефекти; швидкість росту тріщини; коефіцієнти інтенсивності напружень; показник опірності матеріалу росту тріщини.*

Форм. 5. Рис. 2. Табл. 1. Літ. 10.

О.Л. Билый

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ТРЕЩИНЫ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТЕРЖНЕЙ

В работе предложен критерий оценки прочности и надежности конструкций, которые содержат трещиноподобные дефекты на основе показателя "сопротивляемости элемента конструкции роста трещины", что является характеристикой скорости изменения коэффициента интенсивности напряжений около вершины трещины на протяжении ее роста в конкретном конструктивном элементе. По изменению этого параметра в зависимости от геометрии конструктивного элемента и способа его нагрузки, формы и расположения трещиноподобного дефекта можно сравнительно оценивать риск разрушения конструкций или их компонентов, в частности стержней, а также формулировать требования к процедуре их технической диагностики во время эксплуатации. Приведены примеры оценки остаточной долговечности и риска разрушения поврежденных стержней с учетом эксплуатационных факторов (характер нагрузки, действие рабочих сред, состояние материала и т.д.).

Ключевые слова*: элементы конструкций; трещиноподобные дефекты, скорость роста трещины; коэффициенты интенсивности напряжений, показатель сопротивляемости материала роста трещины.*

O. Bilyy

INFLUENCE OF CRACKS SHAPE ON DURABILITY OF BARS

In the work the criterion for assessment of the strength and reliability of structures with crack-like defects is proposed on the base of a concept „resistance of structural element to crack growth", which is a characteristic of the variation rate of the stress intensity factor change at the crack tip during its development in a considered structural element. Basing on the dependence of this parameter on the geometry of structural element and a mode of its loading and also on the shape and location of crack-like defects it is possible to assess the fracture risk of the structures or their components, including bars, and also to formulate the requirements to the procedure of the technical diagnostics of structures during their operation. The examples of the assessment of residual lifetime and fracture risk assessment of defected bars with account of the operation factors (loading mode, influence of environments, material state, etc.) are presented.

Key words*: structural elements, crack defects, crack growth rate, stress intensity factor; index material crack growth resistance.*

Проблема надійної та безпечної роботи різноманітного обладнання, є актуальною як для України, так і для інших країн [3]. Плановий ресурс експлуатації обладнання вичерпується, і в останні роки виявляється все більша кількість пошкоджень різноманітного характеру [1]. Як відомо, проектування елементів конструкцій для їх роботи в заданих умовах експлуатаційних навантажень проводиться на основі підходів механіки суцільного середовища. Однак, кожен конструктивний елемент завжди містить певні дефекти, що утворюються як на стадії його виготовлення, так і на стадії подальшої експлуатації [3]. У зв'язку з цим, для забезпечення надійної та безаварійної роботи обладнання необхідні кількісні підходи до оцінювання ступеня небезпеки виявлених тріщиноподібних дефектів. Також виникає потреба в методах експрес-аналізу, які, ґрунтуючись на даних неруйнівного контролю чи відомостях про стан досліджуваної поверхні матеріалу зможуть дати оцінку тому чи іншому дефекту та залишковому ресурсу конструктивного елемента чи конструкції в цілому.

Як правило зі збільшення потужності виробництва, на елементи конструкцій зростає вплив різноманітних факторів, що призводять до небажаних наслідків (поломки, аварії тощо). Технічна діагностика [1, 3] технологічного обладнання засвідчують, що в елементах конструкцій зростає кількість, так званих нетрадиційних пошкоджень, які не прогнозують нормативні інструкції та документи і виникають внаслідок тривалої роботи устаткування, або різноманітних відхилень від експлуатаційних режимів. Такі пошкодження, здебільшого, мають корозійно-механічну природу і

© О.Л. Білий

утворюються, в першу чергу, в місцях підвищеної концентрації напружень, що спричинена конструктивними особливостями або технологією виготовлення деталі. [2].

Методичні аспекти роботи. У роботах [5, 7] проведено аналіз по визначенню КІН для типових елементів конструкцій – стрижнів, що широко використовуються як в будівельній, так і в енергетичній галузях промисловості. Однак дані дослідження не дають чіткої відповіді по подальшому оцінюванню довговічності таких елементів конструкції. Для такої оцінки в даній роботі наведені аналітичні співвідношення для КІН K_{I} та швидкості їх зміни dK_{I}/da біля вершини тріщини розміром a у конструктивних елементах (тут a – характерний розмір тріщиноподібного дефекту). Розглянуто типові випадки – стрижні з дефектами різних форми та розташування за умов дії квазістатичних навантажень. Така аналітична база слугує для оцінювання міцності та надійності стрижнів із тріщиноподібними дефектами за запропонованим показником „опірності елемента конструкції росту тріщини" [3, 8, 9, 10], який є характеристикою швидкості зміни КІН K_{I} біля вершини тріщини довжиною a під час її росту у конкретному конструктивному елементі.

Аналітичні співвідношення. У дані роботі були розглянуті випадки стрижнів під дією розтягу, кожен з яких містить в собі тріщини різної форми, а саме: пряма фронтальна тріщина в стрижні за розтягу; кутова фронтальна тріщина у стрижні за розтягу; замкнута кільцева тріщина у стрижні за розтягу.

І випадок. Пряма фронтальна тріщина в стрижні за розтягу. Для цієї схеми (рис. 1а) за умови $0{,}0625 \le \dfrac{a}{2r} \le 0{,}625$ КІН розраховують так [5]:

$$K_{\mathrm{I}} = (Y\sigma)\sqrt{\pi a}\,, \tag{1}$$

де

$$Y\sigma = (Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s;\ (Y\sigma)_p = \left[k_{tm}M_m P_m + k_{tb}M_b\left\{P_b + (k_m - 1)P_m\right\}\right];$$

$$(Y\sigma)_s = M_m Q_m + M_b Q_b;$$

$$M_m = 0{,}926 - 1{,}771\left(\frac{a}{2r}\right) - 26{,}421\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 78{,}481\left(\frac{a}{2r}\right)^3 + 87{,}911\left(\frac{a}{2r}\right)^4;$$

$$M_b = 1{,}04 - 3{,}64\left(\frac{a}{2r}\right) + 16{,}86\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 32{,}59\left(\frac{a}{2r}\right)^3 + 28{,}41\left(\frac{a}{2r}\right)^4.$$

Швидкість зміни КІН (рис. 1а) обчислюємо так:

$$\frac{dK_{\mathrm{I}}}{da} = \frac{d(Y\sigma)}{da}\sqrt{\pi a} + \frac{1}{2}(Y\sigma)\sqrt{\frac{\pi}{a}}\,. \tag{2}$$

Тут Θ – параметричний кут по фронту тріщини; P_m, Q_m – первинне та вторинне мембранні навантаження; P_b, Q_b – первинне та вторинне згинальні навантаження; k_{tm}, k_{tb} – мембранні та згинальні коефіцієнти концентрації напружень; M_{km}, M_{kb} – мембранні та згинальні КІН, що з'являються в місцях локальної концентрації напружень; M_m – корекційний коефіцієнт залежно від геометрії тріщини та близькості до поверхні; k_m – коефіцієнт збільшення напруження залежно від розрегульованості.

ІІ випадок. Кутова фронтальна тріщина у стрижні за розтягу. Для цієї схеми (рис. 1б) КІН (якщо $\dfrac{a}{2r} < 0{,}6$) розраховують за співвідношенням (1) [5], де

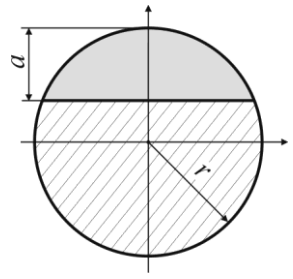
$$Y\sigma = (Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s;\ (Y\sigma)_p = \left[k_{tm}M_mP_m + k_{tb}M_b\left\{P_b + (k_m - 1)P_m\right\}\right];$$
$$(Y\sigma)_s = M_mQ_m + M_bQ_b;$$
$$M_m = g\left[0,752 + 2,02\left(\frac{a}{2r}\right) + 0,37\left[1 - \sin\left(\frac{\pi a}{4r}\right)\right]^3\right];$$
$$M_b = g\left[0,923 + 0,199\left[1 - \sin\left(\frac{\pi a}{4r}\right)\right]^4\right];\ g = \frac{\frac{1,84}{\pi}\sqrt{\frac{\mathrm{tg}\left(\frac{\pi a}{4r}\right)}{\left(\frac{\pi a}{4r}\right)}}}{\cos\left(\frac{\pi a}{4r}\right)}.$$

Швидкість зміни КІН (рис. 1б) обчислюємо за співвідношенням (2).

ІІІ випадок. Замкнута кільцева тріщина у стрижні за розтягу. Для схеми на рис. 1в використовують залежності (1) для визначення КІН [7], де

$$Y\sigma = (Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s;\ (Y\sigma)_p = \left[k_{tm}M_mP_m + k_{tb}M_b\left\{P_b + (k_m - 1)P_m\right\}\right];$$
$$(Y\sigma)_s = M_mQ_m + M_bQ_b;$$
$$M_m = \frac{r^{1,5}}{2(r-a)^{1,5}}\left\{1 + 0,5\left(\frac{r-a}{r}\right) + 0,375\left(\frac{r-a}{r}\right)^2 - 0,363\left(\frac{r-a}{r}\right)^3 + 0,731\left(\frac{r-a}{r}\right)^4\right\};$$
$$M_b = \frac{0,375r^{2,5}}{(r-a)^{2,5}}\left\{\begin{array}{l}1 + 0,5\left(\frac{r-a}{r}\right) + 0,375\left(\frac{r-a}{r}\right)^2 - 0,313\left(\frac{r-a}{r}\right)^3 + \\ +0,273\left(\frac{r-a}{r}\right)^4 + 0,537\left(\frac{r-a}{r}\right)^5\end{array}\right\}.$$

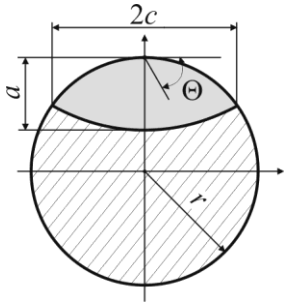
Швидкість зміни КІН (рис. 1в) відповідно обчислюємо за співвідношенням (2)



а)

Випадок I

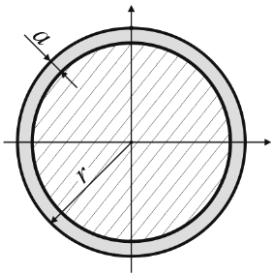
Рис. 1а. **Круглий стрижень за розтягу з прямою фронтальною тріщиною:** a **– глибина тріщини;** r **– радіус стрижня.**



б)

Випадок II

Рис. 1б. **Круглий стрижень з кутовою фронтальною тріщиною:** a **– глибина тріщини;** $2c$ **– її ширина;** r **– радіус стрижня;** Θ **– параметричний кут по фронту тріщини.**



в)

Випадок III

Рис. 1в. **Круглий стрижень із замкнутою кільцевою тріщиною:** a **– глибина тріщини;** r **– радіус стрижня.**

Аналіз результатів та їх обговорення. У роботі для розглянутих випадків з тріщиноподібним дефектом заданої форми і розташування побудовано відповідні безрозмірні залежності типу $(\sqrt{t}/\sigma)\cdot(dK_I/da) = F(a/2r)$; σ – прикладене зовнішнє навантаження. Такі залежності мають таку особливість. У них завжди існує деякий розмір дефекту $(a/2r)_*$, починаючи з якого різко зростає швидкість зміни КІН K_I. Цей розмір розглядали як характеристичний для оцінювання міцності та надійності стрижнів з тріщиноподібними дефектами. Дефект для якого значення $(a/2r)_*$ є найменшим, вважали найнебезпечнішим щодо

ризику руйнування конструктивного елемента. На цій підставі залежно від геометрії конструктивного елемента, способу його навантажування, форми та розташування тріщиноподібного дефекту можна порівняти небезпеку дефектів та ризик руйнування стрижнів, у випадках наявності тріщиноподібних дефектів.

Для круглих стрижнів з тріщинами, що знаходяться під дією одновісного розтягу [5, 7], найнебезпечніша кільцева тріщина, коли значення характеристичного параметра $(a/2r)_*$ є найменшим (рис. 2).

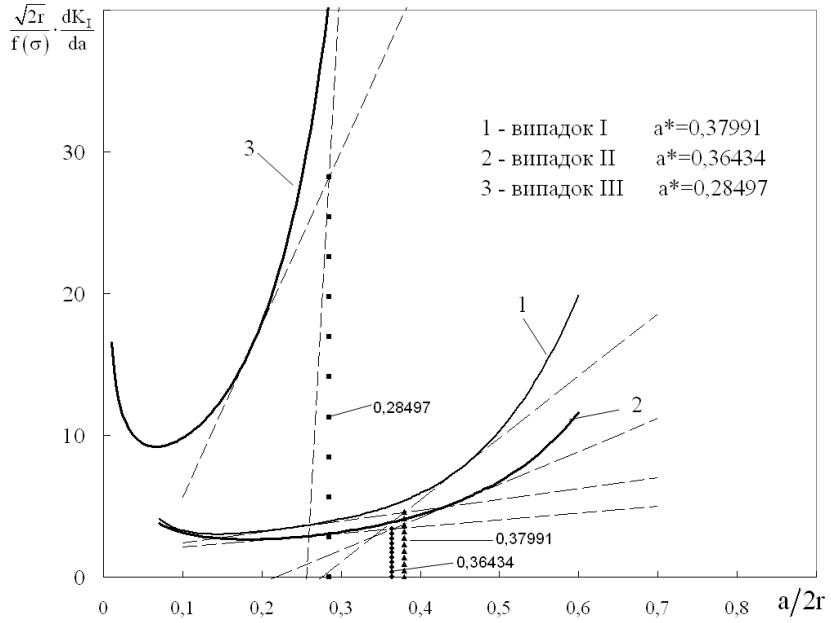


Рис. 2. **Порівняльне оцінювання небезпеки різних за формою та розташуванням тріщиноподібних дефектів у круглих стрижнях за розтягу: *1* – стрижень з прямою фронтальною тріщиною; *2, 3* – з кутовою фронтальною і кільцевою тріщинами.**

Для прикладу практичної реалізації оцінювали довговічність круглих стрижнів радіусом $r = 40$ мм, виготовлених зі сталі 12Х1МФ, за розтягу напруженнями $\sigma = 0{,}5 \cdot \sigma_{0,2}$ у водних середовищах різного складу [4, 6]. Розрахунки виконували на основі відомої формули [3], яка передбачає досягнення умов спонтанного (катастрофічного) руйнування конструктивного елемента, тобто

$$N_{fc} = \int_{a_{th}}^{a_{fc}} \frac{da}{F(\Delta K_{\mathrm{I}})}, \tag{4}$$

де N_{fc} – кількість циклів навантаження до руйнування конструктивного елемента; a_{th} та a_{fc} – відповідно пороговий та критичний розмір тріщини; $F(\Delta K_{\mathrm{I}})$ – відома функція КІН ΔK_{I}, яка описує швидкість росту втомної тріщини в даному матеріалі, коли задані умови випробування. Окрім цього, для кожного розглянутого випадку розраховано період (кількість циклів навантаження) N_*, за якого тріщиноподібний дефект досягає характеристичного розміру a_*, починаючи з якого різко зростає швидкість зміни КІН K_{I}. Величину N_* розраховували за аналогічною до (4) формулою:

$$N_* = \int_{a_{th}}^{a_*} \frac{da}{F(\Delta K_{\mathrm{I}})}. \tag{5}$$

Слід зазначити, що значення a_* залежить тільки від геометрії конструктивного елемента і способу його навантаження, а також від форми та розташування тріщиноподібного дефекту, а a_{fc} – від тих самих чинників, а також від матеріалу та умов його випробування. Тому під час розгляду конкретних конструктивних елементів, виготовлених із заданого матеріалу і які знаходяться у визначених експлуатаційних умовах (середовище заданого складу, температура, тип

навантаження тощо), значення параметра a_* може формально бути меншим або більшим від критичного розміру дефекту a_{fc}.

Таблиця 1. **Дані для розрахунку довговічності стрижнів ($r = 40$ мм), виготовлених зі сталі 12Х1МФ, із тріщиноподібними дефектами різної форми ($\sigma = 0,5 \cdot \sigma_{0,2} = 130$ МПа)**

Схема стрижня з дефектом	Середовище	a_{th}, мм	a_*, мм	a_{fc}, мм	N_*, тис. циклів	N_{fc}, тис. циклів
Випадок I	1	31,07	15,20	32,00	–	866,62
	2	9,68	15,20	32,00	3169,70	4896,80
Випадок II	1	8,75	14,56	32,00	3404,04	5500,07
	2	1,62	14,56	5,96	–	189,45
Випадок III	1	3,48	11,40	17,12	1544,90	1575,14
	2	1,00	11,40	2,55	–	35,10

1 – повітря; 2 – $H_2O + NH_3$ до pH9 + 100 мг/кг N_2H_4

Було виявлено, що найнебезпечнішим є кільцевий тріщиноподібний дефект (табл. 1). Для розглянутих випадків залишкова довговічність стрижня із таким дефектом є найменша порівняно з іншими типами тріщин.

Висновки. На основі чисельно-аналітичної моделі запропоновано критерій оцінювання довговічності конструкційних елементів, зокрема стрижнів. Такі оцінки засновані на підходах механіки руйнування і можуть бути використані для експрес-аналізу різноманітних елементів конструкцій. Ґрунтуючись на даних неруйнівного контролю чи відомостях про стан досліджуваної поверхні матеріалу дані оцінки зможуть дати інформацію про той чи інший дефект та залишковий ресурс роботи конструктивного елемента чи конструкції в цілому. Так, наприклад, в роботі виявлено, що найбільш несприятливим є кільцевий тріщиноподібний дефект для стрижнів підданих розтягу.

1. *Вайнман А.Б.* Современное состояние проблемы коррозии металла пароводяного тракта энергоблоков СКД ТЭС Украины // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2002. – Спец. вип. № 3. – С. 44-50.
2. *Дмитрах І.М.* Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І.М. Дмитрах, В.В. Панасюк – Львів: Національна академія наук України. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. – 1999. – 341 с.
3. *Механіка* руйнування і міцність матеріалів: [Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка.] Том 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Стащук, Л. Тот; під ред. І.М. Дмитраха. – Київ: ВД „Академперіодика”, 2005. – 378 с.
4. *Dmytrakh I. M.*, Vainman A. B., Vovk R. I. Degradation of corrosion fatigue crack growth resistance of a power plants pipe-line steel under operating conditions // Fracture from Defects: 12th European Conf. on Fracture (ECF-12), 14–18 Sept., 1998: Sheffield (UK): proceedings. – Sheffield (UK): EMAS Publishing, 1998. – P. 1145–1150.
5. *James L. A.*, Mills W. J. Review and synthesis of stress intensity factor solutions applicable to cracks in bolts // Eng. Fract. Mech. – 1988. – 30. – P. 641–653.
6. *Panasyuk V. V.*, Dmytrakh I. M., Fedorova V. A. et al. Assessment of corrosion damage liability and corrosion crack resistance of corrosion-resistant build-up- and reactor steel welded combination // Problems of Mat. Sci. (Russia). – 2007. – № 3 (51). – P. 218–226.
7. *Toribio J.* Effect of crack shape and loading conditions on the stress intensity factor for a cracked bolt // Offshore mechanics and arctic engineering: 11th international conference (OMAE’92), 7–12 June, 1992: Calgary (Canada): proceedings [Ed. by Barbas et al.]. – New-York (USA): ASME, 1992. – V. III-B (Materials Engineering). – P. 363–370.
8. *Toth L.* Crack propagation sensitivity index as the tool to promote the fracture mechanics concepts // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – 37, № 2. – С. 63–68.
9. *Toth L.* Describing the fatigue crack growth circumstances by damage process // GEP. – 1981. – 33. – P. 257–262.
10. *Toth L.* Reliability assessment of cracked structural elements under cyclic loading // Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures / Ed. by A. Carpinteri. – Elsevier, 1994. – P. 1643–1683.

Стаття надійшла до редакції 28.04.2013.

© О.Л. Білий