УДК 620.191.33
Б 61

ДО ОЦІНКИ НЕБЕЗПЕКИ ТРІЩИН РІЗНОЇ ФОРМИ В ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЇ З ОТВОРАМИ

О. Л. Білий, старш. наук. співроб.

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів

Анотація. Обумовлено критерії оцінки міцності та довговічності елементів конструкції з дефектами. На основі концепції «опірності елемента конструкції росту тріщини» запропоновано новий критерій оцінки міцності та надійності конструкцій з тріщиноподібними дефектами, який є характеристикою швидкості зміни коефіцієнта інтенсивності напружень у вершині тріщини в процесі її розвитку в конкретному елементі конструкції.
Ключові слова: елементи конструкцій, швидкість росту тріщини, коефіцієнти інтенсивності напружень, показник опірності матеріалу росту тріщини.

Аннотация. Обусловлены критерии оценки прочности и долговечности элементов конструкции с дефектами. На основании концепции «сопротивляемости элемента конструкции росту трещины» предложен новый критерий оценки прочности и надежности конструкций с трещиноподобными дефектами, который является характеристикой скорости изменения коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины в процессе ее развития в конкретном элементе конструкции.
Ключевые слова: элементы конструкций, скорость роста трещины, коэффициенты интенсивности напряжений, показатель сопротивляемости материала росту трещины.

Abstract. The criteria of the strength and durability assessment of the defected structural elements are provided. The new criterion for the assessment of the strength and reliability of structures with crack-like defects is proposed on the base of the concept «resistance of the structural element to crack growth» which is a feature of the variation rate of the stress intensity coefficient at the crack tip during its development in a considered structural element.
Keywords: structural elements, crack growth rate, stress intensity coefficients, resistance index of the material to the crack growth.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Останнім часом засоби технічної діагностики та неруйнівного контролю, а також інженерний досвід експлуатації різноманітних відповідальних конструкцій і технологічного обладнання засвідчують [7, 8], що в таких об'єктах зростає кількість так званих нетрадиційних пошкоджень. Як правило, ці пошкодження не прогнозуються нормативними документами. Вони переважно виникають унаслідок тривалої експлуатації устаткування. Слід також відзначити, що до поломки устаткування призводять різноманітні відхилення від експлуатаційних режимів.

Вищеописані пошкодження в більшості випадків мають корозійно-механічну природу [1] та утворюються, в основному, в місцях підвищеної концентрації напружень, що, в свою чергу, спричинена конструктивними особливостями або технологією виготовлення певного елемента відповідальної конструкції чи технологічного обладнання.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Експлуатаційна практика свідчить [1, 5], що саме в таких місцях і виникають основні поломки та руйнування елементів конструкції. При цьому за фізичною природою таке руйнування є багатостадійним локалізованим процесом зародження та розвитку тріщиноподібних дефектів до критичних розмірів [4]. Вирішальне значення тут набувають фізико-хімічні чинники локальної взаємодії напруженого металу з робочим експлуатаційним середовищем. Така взаємодія принципово змінює кінетику пошкоджуваності матеріалу та суттєво пришвидшує його руйнування.

Слід зауважити, що явище концентрації напружень в елементах конструкцій відповідального промислового обладнання може проявлятися по-різному. Перш за все це випадки, що нерозривно пов'язані з конструктивними особливостями елементів конструкцій чи деталей. Сюди можна віднести різноманітні виточки, жолобки, шліцьові пази тощо. Найтиповішим прикладом такого випадку може бути півколова виточка. До другої групи належать випадки, спричинені технологією виготовлення елемента конструкції. Це, зокрема, різноманітні зварні з'єднання, оскільки в зоні зварного шва завжди існує певна неоднорідність поля напружень. Третя група — випадки, зумовлені довготривалою роботою конструкції в агресивних умовах. До них віднесемо різноманітні корозійні виразки, пітинги тощо [3].

Однак, незважаючи на різноманітне фізичне походження, для всіх перерахованих випадків характерна локалізація фізико-механічних та фізико-хімічних

процесів руйнування матеріалів [1, 3]. З огляду на це змістовним є застосування єдиного спільного методологічного підходу для оцінювання корозійно-механічної пошкоджуваності та руйнування матеріалу в різноманітних місцях підвищеної концентрації напружень. Науковим інструментарієм для такого роду досліджень є механіка руйнування матеріалів та конструкцій, що вивчає закономірності зародження й розвитку неоднорідностей і дефектів структури матеріалу типу тріщин за статичних і циклічних навантажень.

МЕТА РОБОТИ — визначення порівняльної оцінки ризику руйнування елементів конструкції з тріщинами біля отворів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Досвідом експлуатації та численними дослідженнями однозначно доведено, що пошкодження та руйнування елементів конструкцій і деталей машин під впливом експлуатаційних умов (статичні та циклічні механічні навантаження, рідинні й газоподібні агресивні середовища, підвищена температура тощо) є за своєю фізичною суттю локалізованими фізико-механічними процесами утворення та розвитку в матеріалі тріщиноподібних дефектів до критичних розмірів у місцях підвищеної концентрації напружень. Основною концепцією [1, 3] механіки руйнування матеріалів є трактування руйнування як процесу зародження і поширення тріщини у деформованому твердому тілі. За такого підходу важливо враховувати особливості напружено-деформованого стану у вершині тріщини та встановити критерії руйнування твердих тіл з тріщинами, тобто поширення тріщини в конкретному тілі за заданих умов його деформування у заданому середовищі.

У сучасній інженерній практиці характеристики тріщиностійкості конструкційних металів та сплавів розглядають як найбільш адекватну основу для оцінювання фізико-механічного стану та залишкового ресурсу елементів конструкції у заданих експлуатаційних умовах [1, 3].

Однією з найважливіших характеристик опору матеріалу поширенню в ньому втомної тріщини є діаграма циклічної тріщиностійкості матеріалу, тобто залежність швидкості росту тріщини da/dN від коефіцієнта інтенсивності напружень K_I або ΔK_I [1, 6]. Такі діаграми розміщені між двома граничними значеннями: нижнім пороговим значенням ΔK_{th}, що відповідає значенню ΔK_I, за якого не відбувається ріст корозійно-втомної тріщини, і верхнім ΔK_{fc}, що відповідає значенню ΔK_I, коли настає спонтанний (катастрофічний) ріст тріщини.

Для використання діаграм циклічної тріщиностійкості матеріалу в розрахунках залишкової довговічності дефектних елементів конструкцій їх описують аналітично. Слід зауважити, що, незважаючи на значну кількість запропонованих у літературі аналітичних виразів для опису повної діаграми циклічної тріщиностійкості, найбільшого поширення в інженерній практиці набув підхід, що базується на використанні певної залежності, тобто кожна з характерних ділянок діаграми описується степеневою залежністю типу Паріса [11, 12]

$$dc/dN = C_i(\Delta K)^{n_i},$$

де C і n — константи, що характеризують систему «матеріал–середовище»; i — порядковий номер ділянки.

Також наведені у роботі результати є основою для оцінювання міцності та надійності конструкцій із тріщиноподібними дефектами за запропонованим показником «опірності елемента конструкції росту тріщини» [2, 3], який є характеристикою швидкості зміни K_I біля вершини тріщини довжиною a під час її росту в певному елементі конструкції.

Для елемента конструкції з тріщиноподібним дефектом заданої форми і заданого розташування запропоновано залежності типу

$$\frac{\sqrt{t}}{\sigma}\frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right),$$

де t — розмір елемента конструкції в напрямку поширення тріщини; σ — параметр прикладеного зовнішнього навантаження.

Такі залежності мають особливість, яка полягає в наявності деякого значення розміру дефекту $(a/t)^*$, починаючи з якого спостерігається різке зростання швидкості зміни K_I. Це значення розміру дефекту розглядалося як характеристичне для оцінювання міцності та надійності елементів конструкцій із тріщиноподібними дефектами. Дефект, для якого значення $(a/t)^*$ є найменшим, вважався найбільш небезпечним щодо ризику руйнування даного елемента конструкції.

Для реалізації такого підходу в роботі вибрано елементи конструкції, що містять отвори, біля яких, у свою чергу, розвивається тріщина, що може слугувати моделлю дефектності зварювання чи виробництва.

Одинична тріщина від отвору в плиті скінченних розмірів під дією напружень розтягу (рис. 1) [9]

$$K_I = F\sigma\sqrt{\pi a}\,, \qquad (1)$$

де $$F = G_0 G_w; \quad G_w = \frac{\sqrt{\sin\beta}}{\beta\cos\lambda};$$

$$G_0 = 0{,}7071 + 0{,}7548Z + 0{,}3415Z^2 +$$

$$+ 0{,}642Z^3 + 0{,}9196Z^4;$$

$$Z = \left(1 + \frac{a}{R_h}\right)^{-1}; \quad \beta = 2\left(\frac{R_h}{t-e} - \frac{R_h}{t}\right);$$

$$\lambda = \frac{\pi}{2}\frac{1+\dfrac{a}{2R_h}}{\dfrac{2(t-e)}{R_h}-\dfrac{a}{2R_h}}.$$

Одинична напівеліптична тріщина від отвору в плиті скінченних розмірів під дією напружень розтягу (рис. 2) [10]

$$K_{Ia} = K_\varphi\left(\varphi = \frac{\pi}{2}\right), \qquad (2)$$

де $K_\varphi = \sigma F_1 F_{sh}\sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$; $F_1 = \sqrt{\frac{\left(\frac{4}{\pi}+\frac{ac}{2tr}\right)}{\left(\frac{4}{\pi}+\frac{ac}{tr}\right)}}$;

$$F_{sh} = \left[M_1 + M_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3\left(\frac{a}{t}\right)^4\right] g_1 g_2 g_3 f_\varphi f_w;$$

$$f_w = \left[\sec\left(\frac{\pi r}{2w}\right)\sec\left(\frac{\pi(2r+c)}{4(w-c)+c}\sqrt{\frac{a}{t}}\right)\right]^{\frac{1}{2}}.$$

Для $\frac{a}{c} \le 1$: $M_1 = 1$;

$$M_2 = \frac{0{,}05}{0{,}11+\left(\frac{a}{c}\right)^{\frac{3}{2}}}; \quad M_3 = \frac{0{,}29}{0{,}23+\left(\frac{a}{c}\right)^{\frac{3}{2}}};$$

$$g_1 = 1 - \frac{\left(\frac{a}{t}\right)^4}{1+4\left(\frac{a}{c}\right)}\cos\varphi;$$

$$g_2 = \frac{1+0{,}358\lambda+1{,}425\lambda^2-1{,}578\lambda^3+2{,}156\lambda^4}{1+0{,}08\lambda^2};$$

$$g_3 = 1+0{,}1(1-\cos\varphi)^2\left(1-\frac{a}{t}\right)^{10}; \quad Q = 1+1{,}464\left(\frac{a}{c}\right)^{1{,}65};$$

$$\lambda = \frac{1}{1+\frac{c}{r}\cos(0{,}9\varphi)}; \quad f_\varphi = \left[\left(\frac{a}{c}\right)^2\cos^2\varphi+\sin^2\varphi\right]^{\frac{1}{4}}.$$

Для $\frac{a}{c} > 1$: $M_1 = \sqrt{\frac{c}{a}}$;

$$M_2 = \frac{0{,}05}{0{,}11+\left(\frac{a}{c}\right)^{\frac{3}{2}}}; \quad M_3 = \frac{0{,}29}{0{,}23+\left(\frac{a}{c}\right)^{\frac{3}{2}}};$$

$$g_1 = 1 - \frac{\left(\frac{a}{t}\right)^4}{1+4\left(\frac{a}{c}\right)}\cos\varphi;$$

$$g_2 = \frac{1+0{,}358\lambda+1{,}425\lambda^2-1{,}578\lambda^3+2{,}156\lambda^4}{1+0{,}08\lambda^2};$$

$$g_3 = 1+0{,}1(1-\cos\varphi)^2\left(1-\frac{a}{t}\right)^{10}; \quad Q = 1+1{,}464\left(\frac{c}{a}\right)^{1{,}65};$$

$$\lambda = \frac{1}{1+\frac{c}{r}\cos(0{,}9\varphi)}; \quad f_\varphi = \left[\left(\frac{c}{a}\right)^2\sin^2\varphi+\cos^2\varphi\right]^{\frac{1}{4}}.$$

Дві чвертьеліптичні тріщини від отвору в плиті скінченних розмірів під дією напружень розтягу (рис. 3) [10]

$$K_{Ia} = K_\varphi\left(\varphi = \frac{\pi}{2}\right), \qquad (3)$$

де $K_\varphi = \sigma F_{ch}\sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$;

$$F_{ch} = \left[M_1 + M_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3\left(\frac{a}{t}\right)^4\right] g_1 g_2 g_3 f_\varphi f_w;$$

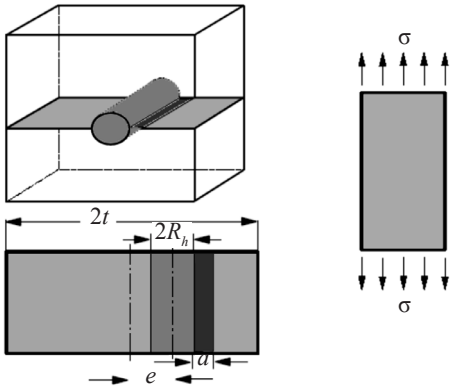

Рис. 1. Одинична тріщина від отвору в плиті під дією напружень розтягу: a — довжина тріщини; R_h — радіус отвору; $2t$ — довжина плити; σ — прикладені напруження; e — ексцентриситет

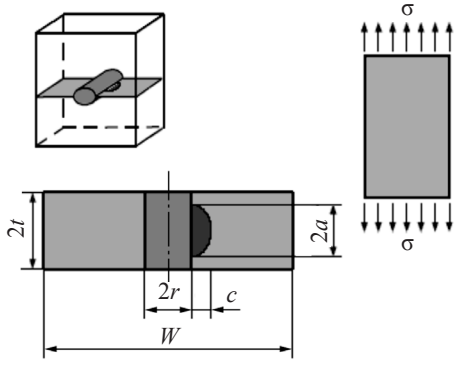

Рис. 2. Одинична напівеліптична тріщина від отвору в плиті скінченних розмірів під дією напружень розтягу: $2a$ — довжина тріщини; c — її ширина; r — радіус отвору; $2t$ — товщина плити; $2W$ — її ширина; σ — прикладені навантаження

$$f_w = \left[\sec\left(\frac{\pi r}{2w}\right)\sec\left(\frac{\pi(2r+c)}{4(w-c)+c}\sqrt{\frac{a}{t}}\right)\right]^{\frac{1}{2}}.$$

Для $\frac{a}{c} \le 1$: $M_1 = 1{,}13 - 0{,}09\frac{a}{c}$;

$$M_2 = -0{,}54 + \frac{0{,}89}{0{,}2 + \frac{a}{c}}; \quad M_3 = 0{,}5 - \frac{1}{0{,}65 + \frac{a}{c}} + 14\left(1 - \frac{a}{c}\right)^{24};$$

$$g_1 = 1 + \left[0{,}1 + 0{,}35\left(\frac{a}{t}\right)^2\right](1 - \sin\varphi)^2;$$

$$g_2 = \frac{1 + 0{,}358\lambda + 1{,}425\lambda^2 - 1{,}578\lambda^3 + 2{,}156\lambda^4}{1 + 0{,}13\lambda^2};$$

$$g_3 = \left(1 + 0{,}04\frac{a}{c}\right)\left[1 + 0{,}1(1 - \cos\varphi)^2\right]\left[0{,}85 + 0{,}15\left(\frac{a}{t}\right)^{\frac{1}{4}}\right];$$

$$Q = 1 + 1{,}464\left(\frac{a}{c}\right)^{1{,}65}; \quad \lambda = \frac{1}{1 + \frac{c}{r}\cos(0{,}85\varphi)};$$

$$f_\varphi = \left[\left(\frac{a}{c}\right)^2\cos^2\varphi + \sin^2\varphi\right]^{\frac{1}{4}}.$$

Для $\frac{a}{c} > 1$: $M_1 = \sqrt{\frac{c}{a}}\left(1 + 0{,}04\frac{c}{a}\right)$;

$$M_2 = 0{,}2\left(\frac{c}{a}\right)^4; \quad M_3 = -0{,}11\left(\frac{c}{a}\right)^4;$$

$$g_1 = 1 + \left[0{,}1 + 0{,}35\left(\frac{c}{a}\right)\left(\frac{a}{t}\right)^2\right](1 - \sin\varphi)^2;$$

$$g_2 = \frac{1 + 0{,}358\lambda + 1{,}425\lambda^2 - 1{,}578\lambda^3 + 2{,}156\lambda^4}{1 + 0{,}13\lambda^2};$$

$$g_3 = \left(1{,}13 - 0{,}09\frac{a}{c}\right)\left[1 + 0{,}1(1 - \cos\varphi)^2\right]\left[0{,}85 + 0{,}15\left(\frac{a}{t}\right)^{\frac{1}{4}}\right];$$

$$Q = 1 + 1{,}464\left(\frac{c}{a}\right)^{1{,}65}; \quad \lambda = \frac{1}{1 + \frac{c}{r}\cos(0{,}85\varphi)};$$

$$f_\varphi = \left[\left(\frac{c}{a}\right)^2\sin^2\varphi + \cos^2\varphi\right]^{\frac{1}{4}}.$$

Небезпека наскрізної тріщини від отвору в плиті, підданій рівномірному розтягу [1, 3, 10], у першу чергу, залежить від розташування самого отвору відносно осі симетрії плити. При зростанні відношення R_h/t такі тріщини стають більш небезпечними, оскільки зменшується значення характеристичного параметра $(a/t)^*$ (рис. 4, табл. 1).

Для одиничної напівеліптичної тріщини від отвору в плиті скінченних розмірів, підданій розтягу, більш видовжені тріщини є небезпечнішими і характеризуються меншими значеннями параметра $(a/t)^*$ (рис. 5, табл. 2).

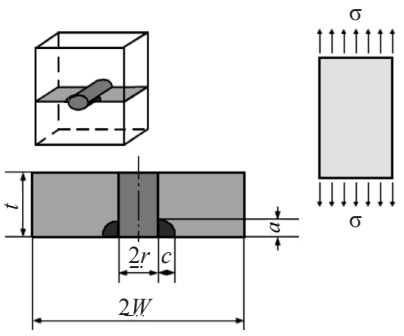

Рис. 3. Дві чвертьеліптичні тріщини від отвору в плиті скінченних розмірів під дією напружень розтягу: *a* — довжина тріщини; *c* — її ширина; *r* — радіус отвору; *t* — товщина плити; 2*W* — її ширина; σ — прикладені навантаження

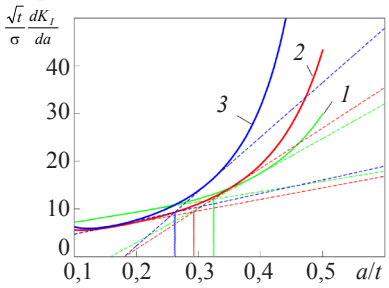

Рис. 4. Вплив розмірів отвору на небезпеку тріщин у плиті під дією напружень розтягу (див. рис. 1, співвідношення (1)): *1* — R_h/t = 0,1; *2* — R_h/t = 0,15; *3* — R_h/t = 0,2

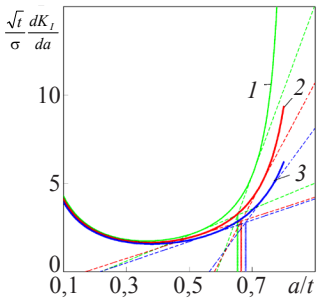

Рис. 5. Порівняльна оцінка небезпеки одиничних напівеліптичних тріщин від отвору в плиті скінченних розмірів під дією напружень розтягу (див. рис. 2, співвідношення (2)) для $W = 4t$; $r = 0{,}1W$: *1* — a/c = 0,275; *2* — a/c = 0,3; *3* — a/c = 0,325

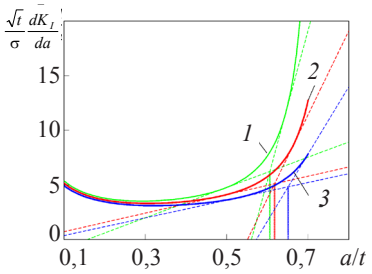

Рис. 6. Порівняльна оцінка небезпеки двох чвертьеліптичних тріщин від отвору в плиті скінченних розмірів під дією напружень розтягу див. рис. 3, співвідношення (3) для $W = 4t$; $r = 0{,}1W$: *1* — $a/c = 0{,}275$; *2* — $a/c = 0{,}3$; *3* – $a/c = 0{,}325$

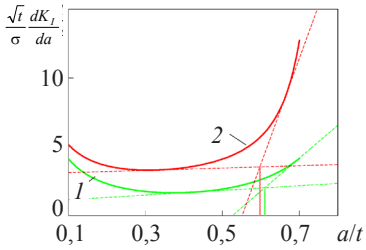

Рис. 7. Порівняльна оцінка небезпеки різних за формою тріщиноподібних дефектів у плиті скінченних розмірів з отвором під дією напружень розтягу для випадку $W = 4t$; $r = 0{,}1W$; $a/c = 0{,}3$: *1* — напівеліптична тріщина (див. рис. 2); *2* — дві чвертьеліптичні тріщини (див. рис. 3)

Таблиця 1. Характеристичні значення параметра $(a/t)^*$ для плити з одиничною тріщиною біля отвору під дією напружень розтягу (див. рис. 1)

Характеристика елемента конструкції	
Одинична тріщина від отвору в плиті скінченних розмірів під дією напружень розтягу	
R_h/t	$(a/t)^*$
0,10	0,324
0,15	0,292
0,20	0,262

Таблиця 2. Характеристичні значення параметра $(a/t)^*$ для плити скінчених розмірів з отвором та напівеліптичною тріщиною біля нього (див. рис. 2)

Характеристика елемента конструкції	
Одинична напівеліптична тріщина від отвору в плиті скінченних розмірів під дією напружень розтягу	
a/c	$(a/t)^*$
0,275	0,649
0,300	0,665
0,325	0,679

Таблиця 3. Характеристичні значення параметра $(a/t)^*$ для плити скінченних розмірів з отвором та двома чвертьеліптичними тріщинами біля нього

Характеристика елемента конструкції	
Дві чвертьеліптичні тріщини від отвору в плиті скінченних розмірів під дією напружень розтягу	
a/c	$(a/t)^*$
0,275	0,606
0,300	0,618
0,325	0,651

Таблиця 4. Характеристичні значення параметра $(a/t)^*$ для плити скінченних розмірів з отвором та тріщинами біля нього під дією напружень розтягу

Характеристика елемента конструкції
Одинична напівеліптична тріщина від отвору в плиті скінченних розмірів під дією напружень розтягу $(a/t)^* = 0{,}665$
Дві чвертьеліптичні тріщини від отвору в плиті скінченних розмірів під дією напружень розтягу $(a/t)^* = 0{,}618$

Аналогічна тенденція спостерігається і для двох чвертьеліптичних тріщин від отвору в плиті скінченних розмірів під дією напружень розтягу (рис. 6, табл. 3).

Порівняння розглянутих вище двох випадків показує (рис. 7, табл. 4), що дві чвертьеліптичні тріщини від отвору в плиті скінченних розмірів є більш небезпечним випадком порівняно з одиничною напівеліптичною тріщиною.

ВИСНОВКИ

Викладені дані щодо порівняльної оцінки небезпеки дефектів та ризику руйнування елементів конструкцій можуть бути безпосередньо застосовані при проведенні практичних розрахунків міцності та залишкової довговічності відповідальних об'єктів тривалої експлуатації, а також використані при інтерпретації результатів їх технічної діагностики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] **Дмитрах, І. М.** Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень [Текст] / І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк. — Л. : Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 1999. — 341 с.

[2] Механіка руйнування і міцність матеріалів [Текст] : довідковий посіб. / І. М. Дмитрах, А. Б. Вайнман, М. Г. Стащук [та ін.] ; за заг. ред. В. В. Панасюка. — Т. 7 : Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / за ред. І. М. Дмитраха. — К. : Академперіодика, 2005. — 378 с.

[3] Механіка руйнування і міцність матеріалів [Текст] : довідковий посіб. / І. М. Дмитрах, Л. Тот, О. Л. Білий [та ін.] ; за заг. ред. В. В. Панасюка. — Т. 13 : Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень. — Л. : Сполом, 2012. — 316 с.

[4] **Панасюк, В.В.** Механика квазихрупкого разрушения материалов [Текст] / В.В. Панасюк. — К. : Наук. думка, 1991. — 416 с.

[5] Проблеми міцності матеріалів для систем транспортування водню [Текст] / І.М. Дмитрах, Г.М. Никифорчин, А.М. Сиротюк [та ін.] // Фундаментальні проблеми водневої енергетики ; за ред. В.Д. Походенка, В.В. Скорохода, Ю.М. Солоніна. — К. : КІМ, 2010. — С. 309–323.

[6] Характеристики корозійної тріщиностійкості матеріалів та їх значення в проблемі забезпечення експлуатаційної надійності теплоенергетичного обладнання. Ч. І [Текст] / В.В. Панасюк, І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман [та ін.] // Енергетика та електрифікація. — 1998. — №6. — С. 29–35.

[7] Цільова комплексна програма наукових досліджень НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» [Текст] // Зб. наук. ст. за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. / за заг. ред. Б.Є. Патона. — К. : Ін-т електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2006. — 589 с.

[8] Цільова комплексна програма наукових досліджень НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» [Текст] // Зб. наук. ст. за результатами, отриманими в 2007–2009 рр. / за заг. ред. Б.Є. Патона. — К. : Ін-т електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2009. — 709 с.

[9] Fatigue Crack Growth Computer Program «NASA/FLAGRO». — NASA, 1987.

[10] **Newman, J.C.** Stress Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies [Text] / J.C. Newman, I.S. Raju // Fracture Mechanics: Fourteenth Symposium. — Vol. I: Theory and Analysis (STP 791); ed. by J.C. Lewis, G. Sines. — ASTM, 1983. — P. 238–265.

[11] **Paris, P.** A critical analysis of crack propagation laws [Text] / P. Paris, F. Erdogan // Trans. ASME: J. Basic Eng. — 1963. — 15, nr 4. — P. 528–534.

[12] **Paris, P.O.** A rational analytic theory of fatigue [Text] / P.O. Paris, M.P. Gomez, W.E. Anderson // The Trend in Eng. — 1961. — 13, nr 1. — P. 9–14.

© О.Л. Білий

Надійшла до редколегії 28.11.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. *Л.І. Коростильов*

Статтю розміщено у Віснику НУК №5, 2012