

## ОЦІНКА НЕБЕЗПЕКИ ФОРМУВАННЯ ТРІЩИН РІЗНОЇ ФОРМИ У СФЕРИЧНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

**Білий О.Л.**

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

*У роботі проаналізовано критерії оцінки міцності та довговічності деяких сферичних конструкційних елементів, що містять тріщиноподібні дефекти. Базуючись на концепції «опірності конструкційного елемента росту тріщини», яка характеризується швидкістю зміни коефіцієнта інтенсивності напружень у вершині тріщини у процесі її розвитку в конкретному конструкційному елементі, запропоновано критерій оцінки міцності та надійності сферичних елементів конструкцій з тріщиноподібними дефектами.*

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

**Вступ і постановка завдань роботи.** Інженерний досвід експлуатації різноманітних промислових конструкцій вказує на необхідність швидкого реагування на виявлені засобами неруйнівного контролю тріщиноподібні дефекти, що містяться в елементах конструкцій [1]. Враховуючи існуючий стан промислового обладнання, такі пошкодження погано прогножуються нормативними інструкціями та документами, оскільки вони виникають внаслідок тривалої експлуатації та неочікуваних відхилень від експлуатаційних режимів. Їх корозійно-механічна природа [2] зумовлена утворенням у місцях концентрації напружень. Однак тут також слід враховувати фізико-хімічні чинники локальної взаємодії напруженого металу з реальним робочим середовищем, що може змінити кінетику пошкоджуваності матеріалу та суттєво пришвидшити руйнування конструкційного елемента чи об'єкта в цілому. Крім того, незважаючи на певну різноплановість походження руйнуючих факторів, тут має місце локалізація фізико-хімічних та фізико-механічних процесів руйнування матеріалів [2]. Тому для оцінки ступеня пошкоженості елементів конструкцій слід застосовувати підходи механіки руйнування, що в поєднанні з сучасними неруйнівними методами досліджень дозволяє зробити комплексну експрес-оцінку того чи іншого пошкодженого об'єкту. У зв'язку з цим, мета даної роботи спрямована на визначення та розробку нових критеріальних характеристик величини існуючих тріщиноподібних дефектів у конструкційних елементах.

Однією з найважливіших характеристик опору матеріалу поширенню втомної тріщини є діаграма циклічної тріщиностійкості матеріалу, тобто залежність швидкості росту тріщини  $da/dN$  від коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН)  $K_I$  або  $\Delta K_I$  [3]. Такі діаграми розміщені між двома граничними значеннями: нижнім пороговим значенням  $\Delta K_{th}$ , яке відповідає значенню  $\Delta K_I$ , за якого не відбувається ріст корозійно-втомної тріщини, і верхнім  $\Delta K_{fc}$ , яке відповідає значенню  $\Delta K_I$ , коли настає спонтанний (катастрофічний) ріст тріщини. 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, за якого кожна з характерних ділянок діаграми описується степеневою залежністю типу Паріса [4]:

$$dc/dN = C_i \cdot (\Delta K)^{n_i}, \quad (1)$$

де  $C$  і  $n$  – константи, що характеризують систему «матеріал – середовище»;  $i$  – порядковий номер ділянки. Крім того, основою для оцінювання міцності та надійності конструкцій із тріщиноподібними дефектами за показником «опірності елемента конструкції росту тріщини» [2, 5] є швидкість зміни КІН  $K_I$  біля вершини тріщини глибиною  $a$  під час її росту в певному конструктивному елементі.

Для конструктивного елемента з тріщиноподібним дефектом заданої форми та заданого розташування запропоновано залежності типу:

$$\frac{\sqrt{t}}{p} \cdot \frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right), \quad (2)$$

де  $t$  – розмір конструктивного елемента в напрямку поширення тріщини;  $p$  – внутрішній тиск,  $a$  – глибина тріщини, яка є змінною величиною порівняно з  $t$ , який є постійним. Тому в подальшому розгляді результатів роботи введемо змінний параметр  $(a/t)^*$ , який характеризує ефективний розмір дефекту.

Слід відзначити, що характерною особливістю таких залежностей є те, що на них завжди спостерігається певне значення параметра  $(a/t)^*$ , починаючи з якого має місце різке зростання швидкості зміни коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$ . Це значення  $(a/t)^*$  розглядалось як характеристичне для оцінювання міцності та надійності елементів конструкцій з тріщиноподібними дефектами. Дефект, для якого значення цього параметру є найменшим, вважається найбільш небезпечним з точки зору ризику руйнування досліджуваних конструктивних елементів.

Для перевірки цього припущення в роботі вибрано сферичні конструктивні елементи, що містять різноманітні тріщиноподібні дефекти, а саме: отвори, біля яких, в свою чергу, розвивається тріщина, що може слугувати моделлю дефектності при виготовленні чи зварюванні виробів. Розглядали два випадки впливу внутрішнього тиску – це півеліптична тріщина на внутрішній поверхні сферичної оболонки (рис. 1а) та еліптична тріщина в стінці сферичної оболонки (рис. 1б).

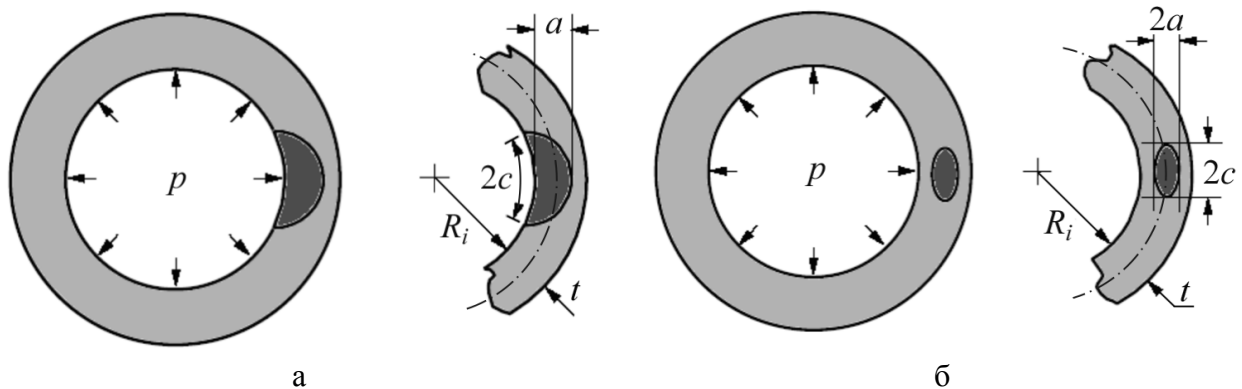


Рисунок 1 – Сферична оболонка під дією внутрішнього тиску з півеліптичною тріщиною на внутрішній поверхні (а) та з внутрішньою еліптичною тріщиною (центрованою) (б):  $a$  – глибина тріщини;  $2c$  – її ширина;  $R_i$  – внутрішній радіус;  $t$  – товщина стінки сфери;  $p$  – внутрішній тиск

У першому випадку (рис. 1а) КІН обчислювали за формулами [6]:

$$K_{Ia} = \sigma \left( 1 + \left( \left( \frac{R_a}{R_i} \right)^2 - 1 \right) \right) Y_a \sqrt{a}; \quad (3)$$

де

$$R_a = R_i + a; \quad \sigma = \frac{pR_i}{2t}; \quad Y_a = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{a}{t}}}(Y_1 + Y_2 + Y_3);$$

$$Y_1 = 1,6561 - 0,3944\left(\frac{a}{c}\right) - 0,46115\left(\frac{a}{c}\right)^2 + 0,33664\left(\frac{a}{c}\right)^3 +$$

$$+ \frac{a}{t} \left[ -0,78383 - 0,4868\left(\frac{a}{c}\right) - 0,57149\left(\frac{a}{c}\right)^2 + 1,1149\left(\frac{a}{c}\right)^3 \right];$$

$$Y_2 = \left(\frac{a}{t}\right)^2 \left[ 0,04206 + 13,568\left(\frac{a}{c}\right) - 23,844\left(\frac{a}{c}\right)^2 + 11,147\left(\frac{a}{c}\right)^3 \right];$$

$$Y_3 = \left(\frac{a}{t}\right)^3 \left[ 0,48946 - 18,201\left(\frac{a}{c}\right) + 33,969\left(\frac{a}{c}\right)^2 - 17,301\left(\frac{a}{c}\right)^3 \right].$$

а для схеми, показаної на рис. 1б КІН розраховували за методикою [7]:

$$K_{Ia} = F \frac{\sigma R_i}{R_a} \sqrt{\pi a} 0,97 \left( \frac{R_a^2 + R_i^2}{R_a^2 - R_i^2} + 0,5 \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \frac{t}{R_i}; \quad (4)$$

де

$$R_a = R_i + \frac{t}{2}; \quad \sigma = \frac{pR_i}{2t}; \quad F = \frac{M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4}{\sqrt{Q}}; \quad Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1,65};$$

$$M_1 = 1; \quad M_2 = \frac{0,05}{0,11 + \left(\frac{a}{c}\right)^{\frac{3}{2}}}; \quad M_3 = \frac{0,29}{0,23 + \left(\frac{a}{c}\right)^{\frac{3}{2}}}.$$

**Результати досліджень та їх обговорення.** Для кожного з розглянутих у вступі випадків було побудовано функцію  $F(a/t)$  (2). На основі проведених у роботі розрахунків оцінено ступінь небезпеки вищеписаних тріщиноподібних дефектів  $(a/t)^*$  у сферичних оболонках вказаних параметрів (рис. 1). Для цих об'єктів проводили моделювання геометричних параметрів сферичної оболонки зміною співвідношення  $R/t$ , а геометричних параметрів тріщиноподібного дефекту – зміною співвідношення  $a/c$ .

Для сферичної оболонки, що знаходиться під дією внутрішнього тиску ступінь небезпеки внутрішніх півеліптичних тріщин (рис. 2, табл. 1) залежить від їх розмірів і підвищується зі зростанням відношення  $R/t$ , причому найбільш небезпечними є тріщиноподібні дефекти з найбільшими значеннями  $R/t$  та найбільшим значенням  $a/c$ .

Також слід відзначити, що порівняльне оцінювання півеліптичних тріщиноподібних дефектів різної форми  $a/c$  на внутрішній поверхні сферичної оболонки під дією внутрішнього тиску свідчить (рис. 2, табл. 2), що зі зростанням відношення  $a/c$ , (форма тріщини прямує до кільцевої), тріщини стають небезпечніші щодо ризику руйнування, оскільки значення  $(a/t)^*$  за  $a/c = 0,3$  є меншим, ніж за  $a/c = 0,1$ .

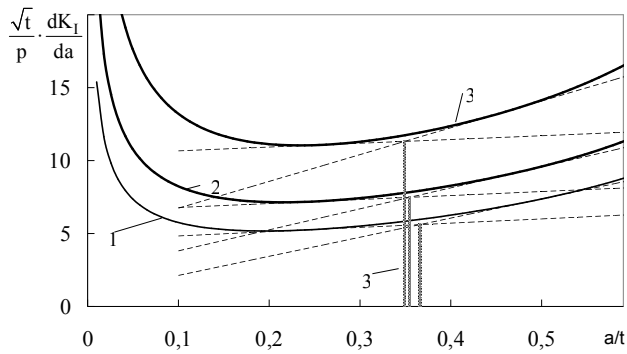


Рисунок 2 – Вплив розмірів сферичної оболонки під дією внутрішнього тиску на небезпеку внутрішніх півеліптичних тріщин (рис. 1) з параметром  $a/c = 0,1$ : 1 –  $R/t = 4$ ; 2 –  $R/t = 6$ ; 3 –  $R/t = 10$

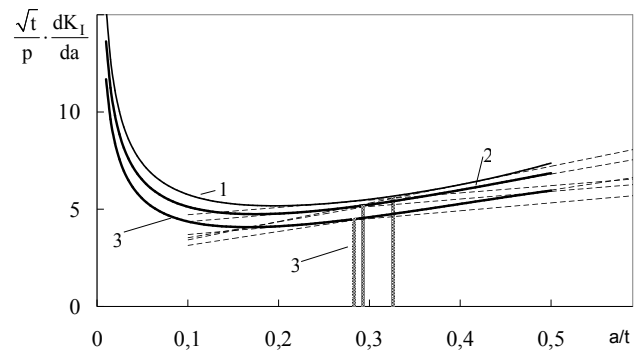


Рисунок 3 – Порівняльне оцінювання небезпеки півеліптичних тріщиноподібних дефектів різної форми  $a/c$  на внутрішній поверхні сферичної оболонки (рис. 1) зі співвідношенням  $R/t = 4$  під дією внутрішнього тиску: 1 –  $a/c = 0,1$ ; 2 –  $a/c = 0,2$ ; 3 –  $a/c = 0,3$

Розвиток еліптичних тріщиноподібних дефектів у стінці сферичної оболонки під дією внутрішнього тиску відчутно залежить від розмірів оболонки, тобто зі зростанням відношення  $R/t$  небезпека тріщиноподібних дефектів підвищується (рис. 4, табл. 1).

За сталого співвідношення  $R/t$  більш видовжені (з меншим значенням  $a/c = 0,2$ ) еліптичні тріщиноподібні дефекти в стінці сферичної оболонки, під дією внутрішнього тиску є суттєво небезпечніші, від менш видовжених ( $a/c = 0,8$ ) (рис. 5, табл. 2).

Таблиця 1 – Характеристичні значення параметра  $(a/t)^*$  для сферичної оболонки з внутрішньою півеліптичною тріщиною з параметрами  $a/c = 0,1$  та для сферичної оболонки з еліптичною тріщиною в її стінці з параметрами  $a/c = 0,5$  під дією внутрішнього тиску за різних значень  $R/t$

| Конструктивний елемент з дефектом                                         | $R/t$ | $(a/t)^*$ |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|-----------|
| Півеліптична тріщина на внутрішній поверхні сферичної оболонки            | 4     | 0,366     |
|                                                                           | 6     | 0,354     |
|                                                                           | 10    | 0,349     |
| Еліптична тріщина у стінці сферичної оболонки під дією внутрішнього тиску | 4     | 0,566     |
|                                                                           | 6     | 0,542     |
|                                                                           | 10    | 0,518     |

Таблиця 2 – Характеристичні значення параметра  $(a/t)^*$  для сферичної оболонки з параметрами  $R/t = 4$  під дією внутрішнього тиску з різними півеліптичними тріщинами на внутрішній поверхні та з різними еліптичними тріщинами в її стінці під дією внутрішнього тиску

| Конструктивний елемент з дефектом                                         | $a/c$ | $(a/t)^*$ |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|-----------|
| Півеліптична тріщина на внутрішній поверхні сферичної оболонки            | 0,1   | 0,326     |
|                                                                           | 0,2   | 0,293     |
|                                                                           | 0,3   | 0,283     |
| Еліптична тріщина у стінці сферичної оболонки під дією внутрішнього тиску | 0,2   | 0,492     |
|                                                                           | 0,5   | 0,566     |
|                                                                           | 0,8   | 0,630     |

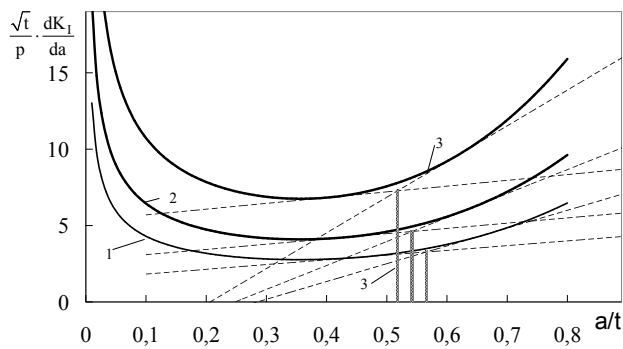


Рисунок 4 – Вплив зміни розмірів сферичної оболонки під дією внутрішнього тиску на небезпеку еліптичних тріщин в її стінці (рис. 1) з параметром  $a/c = 0,5$ : 1 –  $R/t = 4$ ; 2 –  $R/t = 6$ ; 3 –  $R/t = 10$

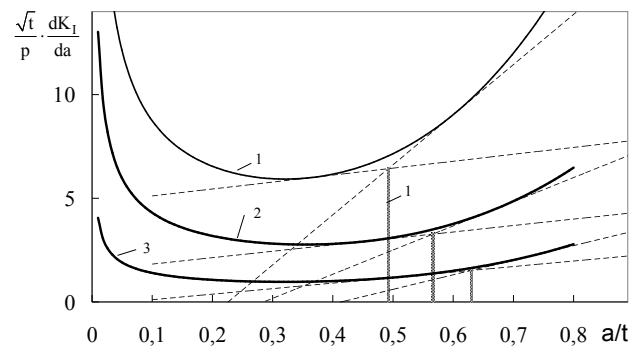


Рисунок 5 – Порівняльне оцінювання небезпеки еліптичних тріщиноподібних дефектів різної форми  $a/c$  у стінці сферичної оболонки (рис. 1) зі співвідношенням  $R/t = 4$  під дією внутрішнього тиску: 1 –  $a/c = 0,2$ ; 2 –  $a/c = 0,5$ ; 3 –  $a/c = 0,8$

**Висновки.** Вперше запропоновано метод оцінювання небезпеки від різних тріщиноподібних дефектів, що містяться в сферичних елементах конструкцій на основі показника «опірності елемента конструкції росту тріщини», який є характеристикою швидкості зміни коефіцієнта інтенсивності напружень з розвитком тріщини  $\frac{\sqrt{t}}{p} \cdot \frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right)$ . Здійснено апробацію запропонованого методу для таких об'єктів та встановлено характерні значення розміру дефекту  $(a/t)^*$ , починаючи з якого має місце різке зростання швидкості зміни коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$ , а відтак, і ризику руйнування конструктивного елемента. Оцінено небезпеку появи тріщиноподібних дефектів різної геометрії та розміщення, що містяться в сферичних конструкціях.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Цільова комплексна програма наукових досліджень НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» // Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2007–2009 рр. / За заг. ред. Б. Є. Патона. – К. : Ін-т електроварювання ім. Є. О. Патона, 2009. – 709 с.
2. Дмитрах І. М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / Дмитрах І. М., Панасюк В. В. – Львів : Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 1999. – 341 с.
3. Панасюк В. В. Характеристики корозійної тріщиностійкості матеріалів та їх значення в проблемі забезпечення експлуатаційної надійності теплоенергетичного обладнання. Ч. I / Панасюк В. В., Дмитрах І. М., Вайнман А. Б. [та ін.] // Енергетика та електрифікація. – 1998. – № 6. – С. 29-35.
4. Paris P. A critical analysis of crack propagation laws[текст] / Paris P., Erdogan F. // Trans. ASME : J. Basic Eng. – 1963. – 15, № 4. – P. 528-534.
5. Дмитрах І. М. Механіка руйнування і міцність матеріалів // Дмитрах І. М., Вайнман А. Б., Стащук М. Г. [та ін.]; довідн. пос. 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.
6. Lim E.Y., Dedhia D. D., Harris D. O. Approximate Influence Functions for Part-Circumferential Interior Surface Cracks in Pipes // Fracture Mechanics: Fourteenth Symposium: Volume I: Theory and Analysis (STP 791) / Ed. by J. C. Lewis, G. Sines. – ASTM, 1983. – P. 281-296.

7. Newman J. C., Raju I. S. Stress Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies // Fracture Mechanics: Fourteenth Symposium: Volume I: Theory and Analysis (STP 791) / Ed. by J. C. Lewis, G. Sines. – ASTM, 1983. – P. 238-265.

## REFERENCES

1. Ciljova kompleksna programa naukovikh doslidzhenj NAN Ukraïni «Problemi resursu i bezpeki eksploatacii konstrukciyj, sporud ta mashin» // Zb. nauk. statej za rezul'tatami, otrimanimi v 2007–2009 rr. / Za zag. red. B. С. Patona. – K. : In-t elektrozvaryuvannya im. С. O. Patona, 2009. – 709 с.

2. Dmitrakh I. M. Vpliv korozivnykh seredovith na lokaljne ruyjnuvannya metaliv bilya konzentroriv napruzhenj / Dmitrakh I. M., Panasyuk V. V. – Ljviv : Fiz.-mekh. in-t im. G. V. Karpenka, 1999. – 341 s.

3. Panasyuk V. V. Kharakteristiki korozivnoï trithinostijskosti materialiv ta ìkh znachennya v problemi zabezpechennya eksploataciyjnoï nadiijnosti teploenergetichnogo obladnannya. Ch. I / Panasyuk V. V., Dmitrakh I. M., Vaynman A. B. [ta in.] // Energetika ta elektrifikaciya. – 1998. – № 6. – S. 29-35.

4. Paris P. A critical analysis of crack propagation laws [tekst] / Paris P., Erdogan F. // Trans. ASME : J. Basic Eng. – 1963. – 15, № 4. – P. 528-534.

5. Dmitrakh I. M. Mekhanika ruyjnuvannya i micnistj materialiv // Dmitrakh I. M., Vaynman A. B., Stathuk M. G. [ta in.]; dovidn. pos. za zag. red. V. V. Panasyuka. T. 7: Nadiijnistj ta dovgovichnistj elementiv konstrukciyj teploenergetichnogo ustatkuvannya / Za red. I. M. Dmitrakha. – K. : Akadempriodika, 2005. – 378 s.

6. Lim E.Y., Dedhia D. D., Harris D. O. Approximate Influence Functions for Part-Circumferential Interior Surface Cracks in Pipes // Fracture Mechanics: Fourteenth Symposium: Volume I: Theory and Analysis (STP 791) / Ed. by J. C. Lewis, G. Sines. – ASTM, 1983. – P. 281-296.

7. Newman J. C., Raju I. S. Stress Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies // Fracture Mechanics: Fourteenth Symposium: Volume I: Theory and Analysis (STP 791) / Ed. by J. C. Lewis, G. Sines. – ASTM, 1983. – P. 238-265.

### **Білий О.Л.** ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕЩИН РАЗНОЙ ФОРМЫ В СФЕРИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

*В работе проанализированы критерии оценки прочности и долговечности сферических конструктивных элементов, содержащих трещиноподобные дефекты. Основываясь на концепции «сопротивляемости конструкционного элемента роста трещины», которая характеризуется скоростью изменения коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины в процессе ее развития в конкретном конструкционном элементе, применен критерий оценки прочности и надежности сферических элементов конструкций, содержащих трещиноподобные дефекты.*

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

### **Bilyu O.L.** ASSESSMENT OF DANGER OF CRACKS FORMING VARIOUS FORM IN A SPHERICAL STRUCTURAL ELEMENT

*The work is analyzed evaluation criteria of strength and durability spherical structural elements containing crack defects. Based on the concept of «resistance to crack growth structural element» this is characterized by the rate of change stress intensity factor at the crack tip in the process of development in a particular structural element. Here is proposed criterion for assessing the strength and reliability of structural elements with spherical crack-like defects.*

**Keywords:** crack growth rate; spherical structural elements; stress intensity factor; rate of crack growth resistance material.

© Білий О.Л.

Статтю прийнято  
до редакції 16.06.15