

Обґрунтовано критеріальні значення глибини потенційних тріщиноподібних дефектів профільних елементів стріли буртоукладника. Використана концепція «опірності конструкційного елемента росту тріщини», яка характеризується швидкістю зміни коефіцієнта інтенсивності напружень у вершині тріщини. Враховано результати експериментальних досліджень тріщиностійкості матеріалу в різних середовищах. Сформульовано інженерні рекомендації щодо прогнозування розвитку тріщиноподібних дефектів

Ключові слова: стріла буртоукладника, профільний елемент, тріщиноподібний дефект, опірність росту тріщини

Обоснованы критериальные значения глубины потенциальных трещинообразных дефектов профильных элементов стрелы буртоукладчика. Использована концепция «сопротивляемости конструкционного элемента роста трещины», которая характеризуется скоростью изменения коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещин. Учтены результаты экспериментальных исследований трещиностойкости материала в различных средах. Сформулированы инженерные рекомендации по прогнозированию развития трещинообразных дефектов

Ключевые слова: стрела буртоукладчика, профильный элемент, трещинообразный дефект, сопротивляемость росту трещины

1. Вступ

У нинішній час для багатьох країн Європи і світу надзвичайно актуальною є проблема забезпечення надійності та безпеки функціонування інженерних конструкцій тривалої експлуатації [1]. Це пояснюється тим, що плановий ресурс багатьох технологічних комплексів та інженерних споруд поступово вичерпується, у їхніх елементах виявляється все більше пошкоджень різноманітного характеру [2]. Як відомо, проектування елементів конструкцій з урахуванням дії експлуатаційних навантажень проводиться на основі підходів механіки суцільного середовища. Однак кожен конструктивний елемент містить певні дефекти, що утворюються як на стадії його виготовлення, так і на стадії експлуатації [1]. У зв'язку з цим, для забезпечення надійної та безаварійної роботи обладнання і споруд необхідно розробляти кількісні підходи до оцінювання ступеня небезпеки виявлених тріщиноподібних дефектів. Постає потреба в методах експрес-аналізу, які на основі результатів неруйнівного контролю або відомостей про стан поверхні матеріалу могли б дати оцінку тому чи іншому дефекту та визначити залишковий ресурс конструктивного елемента чи конструкції у цілому [3, 4].

Зі збільшенням потужності виробництва зростає вплив різноманітних чинників на експлуатаційні харак-

теристики елементів конструкцій та на ймовірність небезпечних наслідків прояву такого впливу (поломок, аварій тощо). Результати технічної діагностики технологічного обладнання [1, 2] засвідчують, що в елементах конструкцій зростає число так званих нетрадиційних пошкоджень, які неможливо спрогнозувати за допомогою нормативних положень та документів. Вони виникають внаслідок тривалої роботи устаткування, або різноманітних відхилень параметрів експлуатаційних режимів від їхніх розрахункових значень. Такі пошкодження, здебільшого, мають корозійно-механічну природу і утворюються, в першу чергу, в місцях підвищеної концентрації напружень, що спричиняється конструктивними особливостями або технологією виготовлення деталей [4].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На залишкову міцність і залишкову довговічність інженерних конструкцій істотно впливають корозійні та корозійно-механічні дефекти, що виникають на поверхнях їхніх елементів. Отже, важливим чинником забезпечення працездатності технологічного обладнання і споруд є моніторинг утворення і розвитку дефектів зазначеного типу та аналіз можливості подальшої експлуатації таких систем. Не дивлячись на доволі різноманітну

УДК 620.191.33

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85502

ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ТРІЩИНОПОДІБНИХ ДЕФЕКТІВ У РОФІЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТАХ СТРИЛИ БУРТОУКЛАДНИКА

Л. К. Поліщук

Кандидат технічних наук, професор
Кафедра галузевого машинобудування
Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021
E-mail: leo.polishchuk@gmail.com

О. Л. Білий

Кандидат технічних наук*
E-mail: bilorestl@gmail.com

Є. В. Харченко

Доктор технічних наук, професор*
E-mail: kharchen@wp.pl

*Кафедра опору матеріалів та будівельної механіки
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

фізичну природу походження множини дефектів, можна стверджувати, що для їх більшості характерною є одночасна локалізація фізико-механічних і фізико-хімічних процесів руйнування матеріалів. Тому корозійно-механічну пошкоджуваність і руйнування матеріалу можна оцінювати на основі спільного методологічного підходу. Науковим інструментарієм для аналізу пошкоджень є механіка руйнування матеріалів і конструкцій. Вона вивчає закономірності зародження і розвитку неоднорідностей і дефектів структури матеріалу типу тріщин в умовах дії циклічних навантажень [2]. Методи механіки руйнування у поєднанні з неруйнівними методами моніторингу об'єктів застосовують для прогнозування розвитку тріщин з урахуванням форми і розмірів дефектів.

У праці [5] проведено аналіз корозійно-циклічної тріщиностійкості профільної сталі Ст. 3 кутника $45 \times 45 \times 5$ мм стріли експлуатованого буртоукладника моделі БУМ-65М2Б3-К. Однак у цих дослідженнях не наводиться оцінок залишкової довговічності елементів конструкції. Для такого оцінювання необхідно застосувати аналітичні співвідношення для КІН (коефіцієнт інтенсивності напружень) K_I та для швидкості їх зміни dK_I/da у плити, якою моделюється досліджувана профільна сталь буртоукладника.

У роботі [3] розглянуто 6 випадків потенційно можливих тріщиноподібних дефектів. Для кожного з них за визначеними значеннями КІН K_I розраховано межові значення циклів навантажень, після дії яких відбувається руйнування матеріалу.

На основі експериментальних досліджень, поданих у [6], можна визначити критеріальні значення a_{fc} характерного розміру тріщини, тобто такі значення, по досягненню або за перевищення яких ($a \geq a_{fc}$) стає можливим спонтанне зростання тріщини, що призводить до крихкого руйнування досліджуваного об'єкта.

Поряд з визначенням критичної глибини тріщини слід розглянути аналітичну базу для оцінювання довговічності конструктивних елементів з тріщиноподібними дефектами за показником «опірності елемента конструкції росту тріщини» [7], який є характеристикою швидкості зміни КІН K_I біля вершини тріщини довжиною a в процесі її росту. Концепцію «опірності елемента конструкції росту тріщини» і її придатність для інженерних потреб подано у праці [8]. Її вважають ефективним інструментом для оцінки надійності конструктивного елемента, що містить тріщиноподібні дефекти [9].

Дослідження структурної цілісності інженерних компонентів безпосередньо пов'язане з вивченням процесу пошкодження матеріалу. При цьому враховуються умови експлуатації конструкції з наявними дефектами та вплив цих дефектів на напружено-деформований стан, температурні та нейтронно-магнітні поля [10]. Для встановлення рівня безпеки експлуатації конструкції у тому чи іншому випадку можна керуватися різними методами, однак насамперед необхідно відповісти на наступні питання [11]: як процес руйнування може бути проконтрольований наявним обладнанням? В якій частині конструкції відбувається пошкодження? Які методи контролю можуть його виявити?

Слід відзначити, що поняття надійності конструкцій може бути засноване на засадах механіки руйнування. Надійність елементів конструкцій залежить від таких основних параметрів: геометрія, розташування і розподіл дефектів, напружено-деформований стан за різних експлуатаційних умов, поширення тріщини на різних етапах експлуатації об'єктів [12].

У наш час дослідження тріщиноутворень досягли високого рівня. Кінцевими результатами цих досліджень є рекомендації щодо остаточного руйнування елемента конструкції [13]. Застосовуючи поєднання різноманітних методів математичного моделювання, підходів механіки руйнування та сучасного програмного забезпечення, переважно отримують відповідь на питання, коли необхідно оглянути чи замінити той чи інший об'єкт дослідження [14].

Однак ці твердження не завжди достовірно оцінюють ситуацію в вершині тріщини, оскільки існує певна ймовірність різкого стрибка досліджуваних критеріальних параметрів [15]. Також можна стверджувати, що незважаючи на те, що з урахуванням різної форми конструкцій показано негативний вплив тих чи інших факторів, тут також залишається місце для уточнення зони передруйнування [16]. Це саме стосується і досліджень зміни форми тріщиноподібних дефектів, за якої спостерігається пришвидшення перебігу процесу руйнування конструкцій [17].

Таким чином, концепція «опірності елемента конструкції росту тріщини» може бути використана як окремий інваріантний параметр механіки руйнування, хоча для конкретного реального конструктивного елемента цей параметр залежить тільки від геометрії тріщини, в той час як коефіцієнт інтенсивності напружень (або інші параметри механіки руйнування) залежить від типу конструктивних елементів, умов навантаження та геометричних параметрів тріщиноподібних дефектів. Отже, «опірність елемента конструкції росту тріщини» можна розглядати як важливе доповнення до результатів аналізу ризику руйнування елементів конструкції.

Однак для оцінки зони передруйнування з метою запобігання аварійно-небезпечних випадків, що спостерігаються за раптового зростання розмірів дефектів до критичних значень, важливим є визначення показника чутливості поширення тріщини [1]. Важливо за допомогою зазначених напрямків досліджень тріщиноутворень в матеріалі розробити інженерні рекомендації щодо покращення моніторингу технічного стану стріли буртоукладника під час довготривалої експлуатації. Розв'язок цієї задачі розглядається нижче.

Однак для оцінки зони передруйнування з метою запобігання аварійно-небезпечних випадків, що спостерігаються за раптового зростання розмірів дефектів до критичних значень, важливим є визначення показника чутливості поширення тріщини [1]. Важливо за допомогою зазначених напрямків досліджень тріщиноутворень в матеріалі розробити інженерні рекомендації щодо покращення моніторингу технічного стану стріли буртоукладника під час довготривалої експлуатації. Розв'язок цієї задачі розглядається нижче.

3. Ціль і задачі дослідження

Метою дослідження є розробка інженерних рекомендацій щодо прогнозування росту тріщин в профільній сталі за допомогою аналізу визначених критеріальних і характеристичних значень довжини тріщиноподібних дефектів, базуючись на експериментальних даних, одержаних для різних систем «матеріал – середовище», а також на основі теоретичних розрахунків.

Для досягнення поставленої мети у роботі розв'язувалися такі задачі.

1. З урахуванням відомих результатів з механіки руйнування матеріалів і конструкцій встановлювалися аналітичні залежності КІН K_I і похідної dK_I/da від безрозмірного параметра a/t (a , t – характерні розміри тріщини і плити) для модельних випадків тріщиноподібних дефектів:

- розтягу плити з центральною поздовжньою тріщиною;
- розтягу плити з зовнішньою крайовою тріщиною;
- розтягу плити з двома зовнішніми крайовими тріщинами;

- розтягу плити з пів еліптичною крайовою тріщиною;
- розтягу плити зі чверть еліптичною кутовою тріщиною;
- розтягу плити з внутрішньою еліптичною центральною тріщиною.

2. На основі аналізу залежностей $K_I(a/t)$ і $dK_I(a/t)/da$ для зазначених випадків встановлювалися теоретичні значення глибин тріщин, які можуть передувати руйнуванню профільних елементів стріли буртоукладника.

3. Визначалися критеріальні значення глибини тріщини у профільних елементах стріли буртоукладника на основі результатів експериментальних досліджень поведінки систем «матеріал – середовище».

4. Матеріали та методи досліджень рами буртоукладника

Досліджували профільну сталь Ст. 3 кутника – 45×45×5 мм рами експлуатованого буртоукладника типу БУМ-65М2Б3-К та неексплуатовану сталь тієї самої марки. Шляхом аналізу співвідношень для КІН з урахуванням геометричних параметрів дефектів різної форми визначали критичне значення глибини тріщиноподібного дефекту. Взявши похідну КІН по глибині тріщини і звівши одержаний вираз до функції безрозмірної величини a/t , одержали схему визначення глибини тріщини, яка може передувати руйнуванню конструкції.

Всього розглянуто шість модельних випадків тріщиноподібних дефектів.

Схема I. Розтяг плити з центральною поздовжньою тріщиною (рис. 1). Для визначення КІН застосовуємо залежність [18]:

$$K_I = \frac{1 - 0,025 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 0,06 \left(\frac{a}{t}\right)^4}{\sqrt{\cos\left(\frac{\pi a}{2t}\right)}} \sigma \sqrt{\pi a}. \tag{1}$$

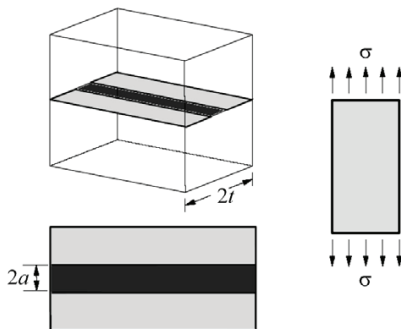


Рис. 1. Навантажена плита з центральною поздовжньою тріщиною: 2t – ширина плити; 2a – довжина тріщини; σ – прикладені зусилля

Швидкість зміни КІН у даному випадку має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dK_I}{da} = & \frac{0,24 \frac{a^3}{t^4} - 0,05 \frac{a}{t^2}}{\sqrt{\cos\left(\frac{\pi a}{2t}\right)}} \sigma \sqrt{\pi a} + \frac{1 - 0,025 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 0,06 \left(\frac{a}{t}\right)^4}{2\sqrt{a} \sqrt{\cos\left(\frac{\pi a}{2t}\right)}} \sigma \sqrt{\pi} + \\ & + \frac{1 - 0,025 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 0,06 \left(\frac{a}{t}\right)^4}{4t \sqrt{\cos\left(\frac{\pi a}{2t}\right)}} \sigma \sqrt{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{2t}\right). \end{aligned} \tag{2}$$

Схема II. Розтяг плити з зовнішньою крайовою тріщиною (рис. 2). Для визначення КІН застосовуємо співвідношення [19]:

$$K_I = Y \sigma \sqrt{a}, \tag{3}$$

де

$$Y = 1,99 - 0,41 \left(\frac{a}{t}\right) + 18,7 \left(\frac{a}{t}\right)^2 - 38,48 \left(\frac{a}{t}\right)^3 + 53,85 \left(\frac{a}{t}\right)^4.$$

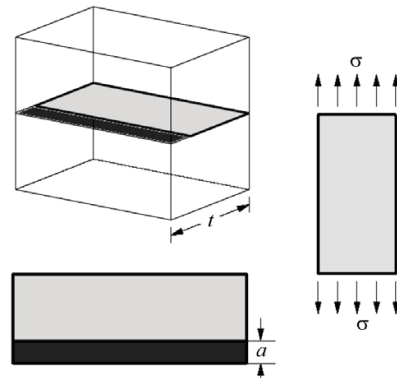


Рис. 2. Навантажена плита із зовнішньою крайовою тріщиною: t – ширина плити; a – довжина тріщини; σ – прикладені зусилля

Швидкість зміни КІН обчислюємо як

$$\frac{dK_I}{da} = \frac{dY}{da} \sigma \sqrt{a} + \frac{1}{2} Y \sigma \frac{1}{\sqrt{a}}, \tag{4}$$

де

$$\frac{dY}{da} = -0,41 \frac{1}{t} + 37,4 \frac{a}{t^2} - 115,44 \frac{a^2}{t^3} + 215,4 \frac{a^3}{t^4}.$$

Схема III. Розтяг плити з двома зовнішніми крайовими тріщинами (рис. 3). Для визначення КІН застосовуємо співвідношення (3) [18], де

$$Y = \frac{1,122 - 0,561 \left(\frac{a}{t}\right) - 0,015 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 0,091 \left(\frac{a}{t}\right)^3}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}}.$$

Швидкість зміни КІН у даному випадку обчислюємо за формулою (4), де

$$\begin{aligned} \frac{dY}{da} = & \frac{-0,561 \frac{1}{t} - 0,03 \frac{a}{t^2} + 0,273 \frac{a^2}{t^3}}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}} + \\ & + \frac{1,122 - 0,561 \left(\frac{a}{t}\right) - 0,015 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 0,091 \left(\frac{a}{t}\right)^3}{2t \left(1 - \frac{a}{t}\right)^{\frac{3}{2}}}. \end{aligned}$$

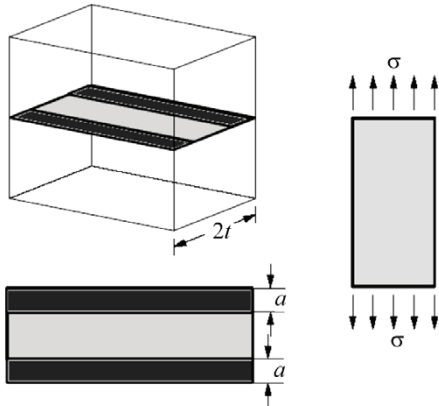


Рис. 3. Навантажена плита з двома зовнішніми крайовими тріщинами: $2t$ – ширина плити; a – довжина тріщини; σ – прикладені зусилля

$$\frac{dF_w}{da} = \pi c \sin \left(\frac{\pi c \sqrt{a}}{2W} \right) \left[8Wt \cos \left(\frac{\pi c \sqrt{a}}{2W} \right)^2 \sqrt{\frac{a}{t}} \sqrt{\frac{1}{\cos \left(\frac{\pi c \sqrt{a}}{2W} \right)}} \right]^{-1};$$

$$\frac{dQ}{da} = 2,4156 \frac{a^{0,65}}{c^{1,65}}; \quad \frac{dM_1}{da} = -0,09 \frac{1}{c};$$

$$\frac{dM_2}{da} = -\frac{0,89}{c \left(0,2 + \frac{a}{c} \right)^2};$$

$$\frac{dM_3}{da} = \frac{1}{c \left(0,65 + \frac{a}{c} \right)^2} - 336 \frac{1}{c} \left(1 - \frac{a}{c} \right)^{23}.$$

Схема IV. Розтяг плити з півеліптично крайовою тріщиною (рис. 4). Для визначення КІН застосуємо співвідношення [20]

$$K_I = \sigma F \sqrt{\pi a}, \quad (5)$$

де

$$F = \frac{M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t} \right)^4}{\sqrt{Q}} F_w; \quad F_w = \sqrt{\frac{1}{\cos \left(\frac{\pi c \sqrt{a}}{2W} \sqrt{\frac{a}{t}} \right)}};$$

$$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65}; \quad M_1 = 1,13 - 0,09 \left(\frac{a}{c} \right);$$

$$M_2 = -0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \frac{a}{c}};$$

$$M_3 = 0,5 - \frac{1}{0,65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c} \right)^{24}; \quad K_{Ia} = K_0;$$

$$K_{Ic} = K_0 \left(1,1 + 0,35 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right) \sqrt{\frac{a}{c}}.$$

Швидкість зміни КІН в даному випадку обчислюємо таким чином:

$$\frac{dK_I}{da} = \sigma \frac{dF}{da} \sqrt{\pi a} + \frac{1}{2} \sigma F \sqrt{\frac{\pi}{a}}, \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} \frac{dF}{da} = & \frac{\frac{dM_1}{da} + \frac{dM_2}{da} \left(\frac{a}{t} \right)^2 + 2M_2 \frac{a}{t^2} + \frac{dM_3}{da} \left(\frac{a}{t} \right)^4 + 4M_3 \frac{a^3}{t^4}}{\sqrt{Q}} F_w - \\ & - \frac{\frac{1}{2} \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right] \frac{dQ}{da}}{Q \sqrt{Q}} F_w + \\ & + \frac{M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t} \right)^4}{\sqrt{Q}} \frac{dF_w}{da}; \end{aligned}$$

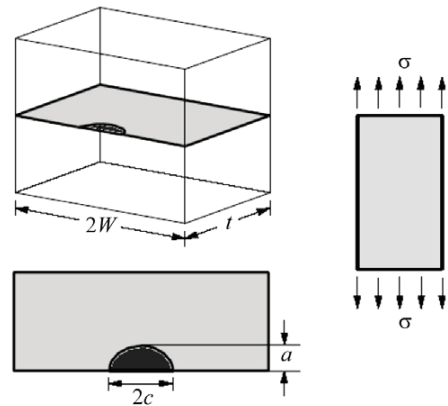


Рис. 4. Навантажена плита з півеліптично крайовою тріщиною: $2W$ – довжина плити; t – її ширина; a – довжина тріщини; $2c$ – її ширина; σ – прикладені зусилля

Схема V. Розтяг плити з чвертьеліптичною кутовою тріщиною (рис. 5). Для визначення КІН застосуємо співвідношення [20]:

$$K_{Ia} = K_\varphi (\varphi = \pi / 2), \quad (7)$$

де

$$K_\varphi = \sigma F \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}; \quad F = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right] g_1 g_2 f_\varphi;$$

$$f_\varphi = \left[\left(\frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \right]^{\frac{1}{4}}; \quad M_1 = 1,08 - 0,03 \frac{a}{c};$$

$$M_2 = -0,44 + \frac{1,06}{0,3 + a/c};$$

$$M_3 = -0,5 + 0,25 \frac{a}{c} + 14,8 \left(1 - \frac{a}{c} \right)^{15}; \quad Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65};$$

$$g_1 = 1 + \left[0,08 + 0,4 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right] (1 - \sin \varphi)^3;$$

$$g_2 = 1 + \left[0,08 + 0,15 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right] (1 - \cos \varphi)^3.$$

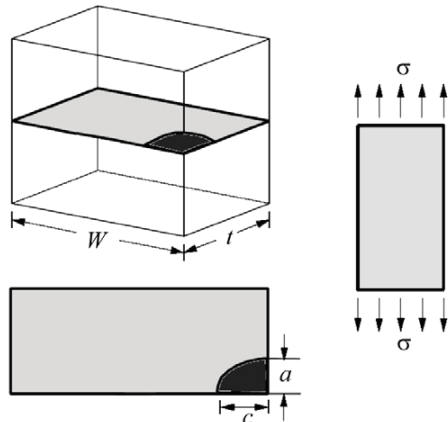


Рис. 5. Навантажена плита зі чверть еліптичною кутовою тріщиною: W – довжина плити; t – її ширина; a – довжина тріщини; c – її ширина; σ – прикладені зусилля

$$K_{Ia} = FF_w \sigma \sqrt{\pi a}, \tag{9}$$

причому,

$$F = \frac{M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4}{\sqrt{Q}}; F_w = \frac{1}{\sqrt{\cos\left(\frac{\pi c}{2W} \sqrt{\frac{a}{t}}\right)}}$$

де

$$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1,65}; M_1 = 1; M_2 = \frac{0,05}{0,11 + \left(\frac{a}{c}\right)^2}; M_3 = \frac{0,29}{0,23 + \left(\frac{a}{c}\right)^2}.$$

Швидкість зміни КІН обчислюємо за формулою

$$\frac{dK_{Ia}}{da} = \frac{dK_{\varphi}}{da} (\varphi = \pi/2), \tag{8}$$

де

$$\frac{dK_{\varphi}}{da} = \sigma \cdot \sqrt{\pi} \cdot \frac{Q \cdot \left(2 \frac{dF}{da} \cdot a + F\right) - \frac{dQ}{da} \cdot F \cdot a}{2Q \cdot \sqrt{a} \cdot Q},$$

причому,

$$\frac{dF}{da} = \left[\frac{dM_1}{da} + \frac{dM_2}{da} \left(\frac{a}{t}\right)^2 + \frac{2}{t} M_2 \left(\frac{a}{t}\right) + \frac{dM_3}{da} \left(\frac{a}{t}\right)^4 + \frac{4}{t} M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^3 \right] g_1 g_2 f_{\varphi} +$$

$$+ \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \frac{dg_1}{da} g_2 f_{\varphi} +$$

$$+ \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] g_1 \frac{dg_2}{da} f_{\varphi} +$$

$$+ \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] g_1 g_2 \frac{df_{\varphi}}{da};$$

$$\frac{df_{\varphi}}{da} = \frac{a \cos^2 \varphi}{2c^2 \left[\left(\frac{a}{c}\right)^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \right]^{3/4}}; \frac{dM_1}{da} = -\frac{0,03}{c};$$

$$\frac{dM_2}{da} = -\frac{1,06}{c \left(0,3 + \frac{a}{c}\right)^2};$$

$$\frac{dM_3}{da} = \frac{0,25}{c} - \frac{222}{c} \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{14}; \frac{dQ}{da} = 2,4156 \frac{1}{c} \left(\frac{a}{c}\right)^{0,65};$$

$$\frac{dg_1}{da} = -\frac{0,8a(\sin \varphi - 1)^3}{t^2}; \frac{dg_2}{da} = \frac{0,3a(1 - \cos \varphi)^3}{t^2}.$$

Схема VI. Розтяг плити з внутрішньою еліптичною центральною тріщиною (рис. 6). Для визначення КІН застосуємо співвідношення [20]:

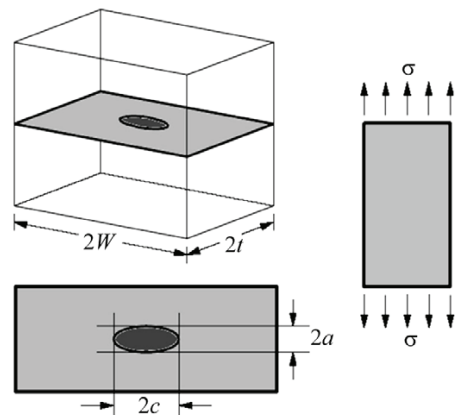


Рис. 6. Навантажена плита з внутрішньою еліптичною центральною тріщиною: 2W – довжина плити; 2t – її ширина; 2a – довжина тріщини; 2c – її ширина; σ – прикладені зусилля

Швидкість зміни КІН обчислюємо як

$$\frac{dK_{Ia}}{da} = \frac{dF}{da} F_w \sigma \sqrt{\pi a} + F \frac{dF_w}{da} \sigma \sqrt{\pi a} + \frac{1}{2} F F_w \sigma \sqrt{\frac{\pi}{a}}, \tag{10}$$

де

$$\frac{dF}{da} = \frac{\left[\frac{dM_1}{da} + \frac{dM_2}{da} \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 2M_2 \frac{a}{t^2} + \frac{dM_3}{da} \left(\frac{a}{t}\right)^4 + 4M_3 \frac{a^3}{t^4} \right] Q}{Q \sqrt{Q}} - \frac{\frac{1}{2} \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \frac{dQ}{da}}{Q \sqrt{Q}};$$

$$\frac{dF_w}{da} = \pi c \sin \left(\frac{\pi c \sqrt{\frac{a}{t}}}{2W} \right) \left[8Wt \cos \left(\frac{\pi c \sqrt{\frac{a}{t}}}{2W} \right)^2 \sqrt{\frac{a}{t}} \sqrt{\frac{1}{\cos \left(\frac{\pi c \sqrt{\frac{a}{t}}}{2W} \right)}} \right]^{-1},$$

причому,

$$\frac{dQ}{da} = 2,4156 \frac{a^{0,65}}{c^{1,65}}; \quad \frac{dM_1}{da} = 0;$$

$$\frac{dM_2}{da} = -\frac{0,075\sqrt{a}}{c^{\frac{3}{2}} \left(0,11 + \left(\frac{a}{c} \right)^{\frac{3}{2}} \right)^2}; \quad \frac{dM_3}{da} = -\frac{0,435\sqrt{a}}{c^{\frac{3}{2}} \left(0,23 + \left(\frac{a}{c} \right)^{\frac{3}{2}} \right)^2}.$$

Вирази похідних КІН за характерними розмірами тріщини a використовуємо для побудови залежностей зазначених похідних від безрозмірних величин a/t з урахуванням співвідношення

$$(\sqrt{t}/\sigma) \cdot (dK_I/da) = F(a/t), \quad (11)$$

де t – розмір конструктивного елемента в напрямі поширення тріщини; σ – прикладене навантаження, a – глибина тріщини, яка є змінною величиною у порівняно з розміром t , який є постійним. Для подальшого розгляду результатів роботи введемо змінний параметр $(a/t)^*$, який характеризує ефективний розмір дефекту.

Відзначимо, що характерною особливістю досліджуваних залежностей є те, що на їх графіках добре проявляється певне значення параметра $(a/t)^*$, починаючи з якого має місце різке зростання швидкості зміни коефіцієнта інтенсивності напружень K_I . Це значення $(a/t)^*$ приймаємо за характеристичне для оцінювання міцності та надійності елементів конструкцій з тріщиноподібними дефектами.

5. Результати досліджень критеріальних глибин тріщиноподібних дефектів профільних конструкцій стріли буртоукладника

Для визначення характеристичних значень довжини тріщини в досліджуваних елементах конструкцій використовуємо раніше створену експериментальну базу [5] та аналітичне співвідношення у вигляді степеневі залежності типу Періса [21]:

$$da/dN = C \cdot (\Delta K)^n, \quad (12)$$

де C і n – константи, що характеризують систему «матеріал – середовище». Такі константи, а також граничні значеннями КІН для різних систем «матеріал – середовище» наведені у табл. 1.

Із застосуванням описаної у праці [2] методики визначення критеріальних глибин тріщиноподібних дефектів на одну координатну площину були нанесені всі експериментальні точки для кожної конкретної системи «матеріал – середовище». Таким чином було одержано 4 масиви точок для опису процесу поширення тріщини в експлуатованому та неексплуатованому матеріалі без урахування та з урахуванням дії корозивних чинників. На основі цих результатів побудовано 4 рівняння типу (12), за якими визначали критеріальні значення КІН (табл. 1).

Ці значення покладені в основу визначення критичних значень КІН ΔK_{fc} для кожної

розглядуваної системи «матеріал – середовище» які, в свою чергу, використано для знаходження критичних довжин тріщиноподібних дефектів у профільних елементах конструкції за розглядуваними вище модельними схемами.

Поряд з цими значеннями, одержаними шляхом обробки експериментальних даних, розраховували значення a^* , що відповідають характеристичній величині $(a/t)^*$, за методикою [22], що ґрунтується на застосуванні аналітичних співвідношень для похідних КІН. Відмітимо, що під час досліджень процесів поширення тріщиноподібних дефектів у кутнику стріли буртоукладника $45 \times 45 \times 5$ мм брали до уваги, що найбільш вразливим параметром до розвитку тріщини є товщина стінки кутника (5 мм), тому усі результати розрахунків наведені для випадку, коли тріщина поширюється перпендикулярно до подовжньої осі кутника уздовж поперечного перерізу полочки.

Для кожного випадку були знайдені характеристичні значення $(a/t)^*$, за якими визначали розрахункову глибину тріщини a^* , яку з великою ймовірністю можна вважати такою, що передує руйнуванню конструкції, а тому, поряд зі значенням a_{fc} , може бути використана як критеріальна глибина тріщини під час планового чи позачергового моніторингу експлуатованої конструкції.

На рис. 7 наведені схеми визначення a^* для всіх розглядуваних модельних випадків. Тут за запропонованим у [22] алгоритмом проводиться дві дотичні на графіку функції від похідної КІН; На кожному із графіків існує деяке значення розміру дефекту $(a/t)^*$, починаючи з якого різко зростає швидкість зміни КІН. Значення параметру $(a/t)^*$ визначали за такою числовою процедурою. З кроком $a/t = 0,01$ підраховували поточні значення $dK_I/da = F(a/t)$. При цьому встановлювали три характерні точки, з аргументами $(a/t)_1$, $(a/t)_2$, $(a/t)_3$. Після цього у точках з аргументами $0,5[(a/t)_1 + (a/t)_2]$ та $0,5[(a/t)_2 + (a/t)_3]$ проводили дотичні до графічної залежності. За координатами точок перетину цих дотичних відшукуємо характеристичне значення співвідношення $(a/t)^*$ (рис. 7).

Можемо стверджувати, що для схеми I небезпечним є характеристичне значення $(a/t)^* 0,35760$; для схеми II – $0,38497$; для схеми III – $0,48637$. Стосовно схем IV–VI, то, керуючись результатами, наведеними у праці [3], можемо стверджувати, що найбільш несприятливими для експлуатації є такі форми тріщиноподібних дефектів: для схеми IV – $a/c = 0,15$; для схем V і VI – $a/c = 0,10$. Для одержаних значень безрозмірних параметрів $(a/t)^*$ та a/c необхідно проводити моніторинг технічного стану профільних конструкцій.

Таблиця 1

Степеневі залежності швидкості поширення тріщин для систем матеріал – середовище та критеріальні значення КІН

Система матеріал – середовище	Залежність Паріса для відповідної системи	Значення ΔK_{fc} , МПа $\sqrt{м}$
Новий – Повітря	$da/dN = 3,96 \cdot 10^{-11} (\Delta K)^{2,06}$	44,834
Експлуатований – Повітря	$da/dN = 7,3 \cdot 10^{-11} (\Delta K)^{1,92}$	43,022
Новий – Корозія	$da/dN = 1,7 \cdot 10^{-21} (\Delta K)^{9,43}$	28,853
Експлуатований – Корозія	$da/dN = 2,06 \cdot 10^{-10} (\Delta K)^{2,21}$	22,089

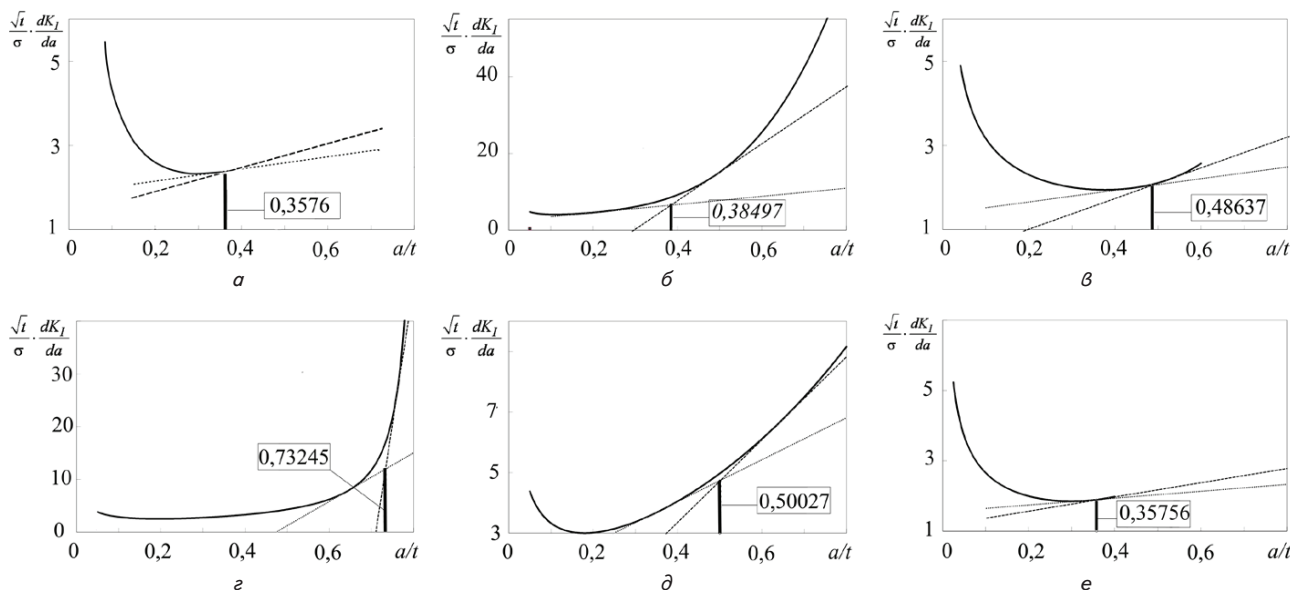


Рис. 7. Визначення характеристичних значень (a/t)* для випадків поширення тріщиноподібних дефектів за розтягу плити: а – з центральною поздовжньою тріщиною; б – із зовнішньою крайовою тріщиною; в – з двома зовнішніми крайовими тріщинами; г – з півеліптичною крайовою тріщиною; д – з чвертьеліптичною кутовою тріщиною; е – з внутрішньою еліптичною центральною тріщиною

6. Обговорення результатів досліджень з покращення моніторингу профільних конструкцій

Таблиця 2

Характеристичні та критеріальні значення глибин тріщини в розглядуваних системах «матеріал – середовище» для кутника 45×45×5 мм рами буртоукладника з дефектами різної форми

Наступним кроком діагностики технічного стану профільної конструкції буде одержання значень критичної глибини тріщини для досліджуваних випадків та порівняння їх зі знайденими характеристичними значеннями. Менше з цих двох значень для інженерних розрахунків можна вважати таким, що передуює потенційній небезпеці експлуатації конструкції, а отже є свідченням необхідності посиленого контролю за даним об'єктом.

У табл. 2 наведені розрахункові значення a_{fc}, одержані за допомогою співвідношень (1), (3), (5), (7), (9) та степеневих залежностей (табл. 1) для кожної розглядуваної системи «матеріал – середовище».

Слід зазначити, що значення a* залежить від геометрії конструктивного елемента, способу його навантаження, форми та розташування тріщиноподібного дефекту, а a_{fc} – від тих самих чинників та від матеріалу й умов його випробування. Тому під час розгляду конкретних конструктивних елементів, виготовлених із заданого матеріалу і експлуатованих у визначених умовах (тобто, для конкретної системи «матеріал – середовище»), значення параметра a* може формально бути меншим або більшим від критичного розміру дефекту a_{fc}.

З результатів, наведених у табл. 2, видно, що корозійне середовище суттєво впливає на розміри критичної глибини тріщини, однак посилений контроль за об'єктом досліджень необхідно вже розпочинати за досягнення a* у всіх випадках, окрім IV, причому це особливо стосується системи, «метал – корозійне середовище». Як бачимо з одержаних результатів, лише в IV випадку доцільно обійтися класичним підходом для моніторингу стану конструктивного елемента.

Система матеріал – середовище	a*, мм	a _{fc} , мм
Випадок I		
Новий – Повітря	1,79	2,455
Експлуатований – Повітря		2,455
Новий – Корозія		2,4
Експлуатований – Корозія		2,34
Випадок II		
Новий – Повітря	1,92	2,9
Експлуатований – Повітря		2,85
Новий – Корозія		2,4
Експлуатований – Корозія		2,07
Випадок III		
Новий – Повітря	2,43	2,435
Експлуатований – Повітря		2,43
Новий – Корозія		2,35
Експлуатований – Корозія		2,24
Випадок IV		
Новий – Повітря	3,66	3,35
Експлуатований – Повітря		3,32
Новий – Корозія		2,93
Експлуатований – Корозія		2,59
Випадок V		
Новий – Повітря	2,50	3,62
Експлуатований – Повітря		3,56
Новий – Корозія		2,94
Експлуатований – Корозія		2,52
Випадок VI		
Новий – Повітря	1,79	2,15
Експлуатований – Повітря		2,135
Новий – Корозія		1,995
Експлуатований – Корозія		1,865

Слід зауважити, що кожен окремий випадок поширення тріщини вимагає відслідковування цього процесу за глибиною тріщини, адже порівнявши деяке значення параметра a^* з відповідним значенням цього параметра для найбільш небезпечної системи «експлуатований матеріал – корозійне середовище», можна зробити висновок, що строго визначеної залежності рівня безпеки експлуатації конструкції від вказаного параметра немає (рис. 8). А отже для обґрунтування інженерних рекомендацій необхідно піддавати моніторингу кожен систему та кожен дефект лише за притаманною для них схемою.

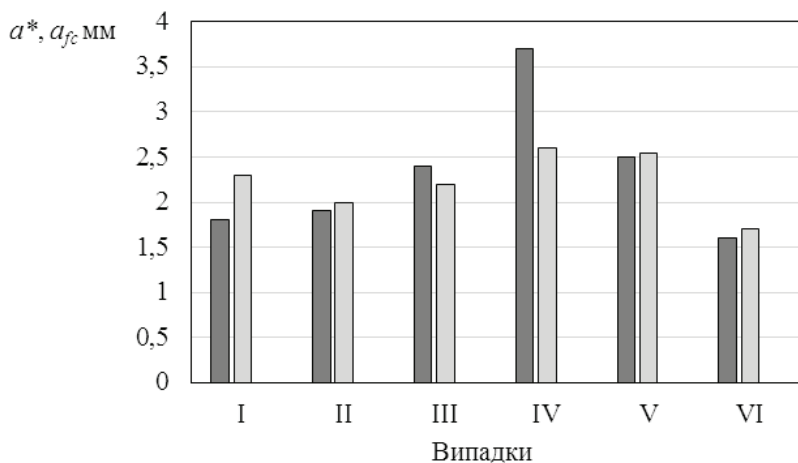


Рис. 8. Порівняння характеристичних значень a (на сірому фоні) та критеріальних значень a_{fc} для системи «експлуатований матеріал – корозійне середовище»

7. Висновки

1. На основі результатів експериментальних досліджень визначено критеріальні значення КІН для сталі Ст. 3, з якої виготовлено кутник стріли буртоукладника $45 \times 45 \times 5$ мм. За аналітичними співвідношеннями для КІН розраховано критеріальні значення a^* , що засновані на дослідженні похідної КІН, та характеристичні значення a_{fc} , котрі засновані на безпосередньому дослідженні КІН, довжини тріщиноподібних дефектів, що можуть мати місце у профільній конструкції.

2. Обґрунтовано інженерні рекомендації щодо моніторингу даного об'єкту з тріщиноподібними дефектами різної форми. Визначено значення довжин тріщиноподібних дефектів, за якими необхідно проводити подальші спостереження технічного стану конструкційних елементів стріли буртоукладника.

3. Виявлено, що кожен випадок поширення тріщини потребує окремого дослідження, оскільки витривалість конструкції істотно залежить як від геометричних, так і від фізико-механічних параметрів системи. Підтверджена можливість оцінки технічного стану елементів стріли буртоукладника на основі систематичного експрес-аналізу матеріалу у корозійних середовищах, а також моніторингу глибини тріщиноподібних дефектів.

Література

1. Дмитрах, І. М. Механіка руйнування і міцність матеріалів. Т. 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування [Текст] / І. М. Дмитрах, А. Б. Вайнман, М. Г. Стащук та ін.; за заг. ред. В. В. Панасюка; за ред. І. М. Дмитраха. – К.: Академперіодика, 2005. – 378 с.
2. Дмитрах, І. М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень [Текст] / І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 1999. – 341 с.
3. Polishchuk, L. Life time assessment of clamp-forming machine boom durability [Text] / L. Polishchuk, O. Bilyy, Y. Kharchenko // Diagnostyka. – 2015. – Vol. 16, Issue 4. – P. 71–76.
4. Цільова комплексна програма наукових досліджень НАН України „Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин” [Текст]: зб. наук. ст. / за заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2009. – 709 с.
5. Polishchuk, L. K. Corrosion-Fatigue Crack-Growth Resistance of Steel of the Boom of a Clamp-Forming Machine [Text] / L. K. Polishchuk, E. V. Kharchenko, O. I. Zvirko // Materials Science. – 2014. – Vol. 51, Issue 2. – P. 229–234. doi: 10.1007/s11003-015-9834-8
6. Kharchenko, E. V. Estimation of the In-service Degradation of Steel Shapes for the Boom of a Clamp-Forming Machine [Text] / E. V. Kharchenko, L. K. Polishchuk, O. I. Zvirko // Materials Science. – 2014. – Vol. 49, Issue 4. – P. 501–507. doi: 10.1007/s11003-014-9642-6
7. Дмитрах, І. М. Механіка руйнування і міцність матеріалів. Т. 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень [Текст]: довідн. пос. / І. М. Дмитрах, Л. Тот, О. Л. Білий та ін.; за заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: Сполом, 2012. – 316 с.
8. Toth, L. Brief History of Fracture Mechanics and Material Testing [Text] / L. Toth, P. Rossmannith. – Miscolz, 1999. – 163 p.
9. Toth, L. Reliability assessment of cracked structural elements under cyclic loading [Text] / L. Toth. – Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures, 1994. – P. 1643–1683. doi: 10.1016/b978-0-444-81645-0.50024-x
10. Toth, L. A computer aided assessment system of reliability cyclic loaded construction elements having flaws [Text] / L. Toth; M. H. Aliabadi, C. A. Brebbia, D. J. Carlwright (Eds.) // Computer-Aided Assessment and Control of Localized Damage, 1990. – P. 39–53.
11. Toth, L. Describing the fatigue crack growth circumstances by damage process [Text] / L. Toth // GEP. – 1981. – Vol. 33. – P. 257–262.

12. Toth, L. Crack propagation sensitivity index as the tool to promote the fracture mechanics concepts [Text] / L. Toth // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – № 2. – С. 63–68.
13. Zhang, W. Mode I crack propagation under high cyclic loading in 316L stainless steel [Text] / W. Zhang, S. Pommier, F. Curtit, G. Léopold, S. Courtinc // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 3. – P. 1197–1203. doi: 10.1016/j.mspro.2014.06.195
14. Fremy, F. A scaling approach to model history effects in fatigue crack growth under mixed mode I+II+III loading conditions for a 316L stainless steel [Text] / F. Fremy // International Journal of Fatigue. – 2012. – Vol. 42. – P. 207–216. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2011.10.013
15. Wang, B. L. Effect of surface residual stress on the fracture of double cantilever beam fracture toughness specimen [Text] / B. L. Wang, K. F. Wang // Journal of Applied Physics. – 2013. – Vol. 113, Issue 15. – P. 153502. doi: 10.1063/1.4801875
16. Pluvinage, G. A review of fracture toughness transferability with constraint and stress gradient [Text] / G. Pluvinage, J. Capelle, M. Hadj Méliani // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2014. – Vol. 37, Issue 11. – P. 1165–1185. doi: 10.1111/ffe.12232
17. Jin, Z. Weight functions for the determination of stress intensity factor and T-stress for semi-elliptical cracks in finite thickness plate [Text] / Z. Jin, X. Wang // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2013. – Vol. 36, Issue 10. – P. 1051–1066. doi: 10.1111/ffe.12070
18. Tada, H. The Stress Analysis of Cracks Handbook [Text] / H. Tada, P. C. Paris, G. R. Irwin. – Del Research Corporation (Hellertown), 1973. – 677 p.
19. Bruchmechanische Bewertung von Fehlern in Schweißverbindungen. Merkblatt DVS 2401 [Text]. – Deutscher Verband für Schweißtechnik, 2004. – 271 p.
20. 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 – Volume I: Theory and Analysis. – 1983. – P. I-238–I-238-28. doi: 10.1520/stp37074s
21. Paris, P. Closure to «Discussions of ‘A Critical Analysis of Crack Propagation Laws’» (1963, ASME J. Basic Eng., 85, pp. 533–534) // Journal of Basic Engineering. – 1963. – Vol. 85, Issue 4. – P. 534. doi: 10.1115/1.3656903
22. Panasyuk, V. V. A method for the Assessment of the Serviceability and Fracture Hazard for Structural Elements with Crack-like Defects [Text] / V. V. Panasyuk, I. M. Dmytrakh, L. Toth, O. L. Bilyi, A. M. Syrotyuk // Materials Science. – 2014. – Vol. 49, Issue 5. – P. 565–576. doi: 10.1007/s11003-014-9650-6