

М. Г. ШУЛЬЖЕНКО, П. П. ГОНТАРОВСЬКИЙ, Н. Г. ГАРМАШ, І. І. МЕЛЕЖИК

ОЦІНКА РОЗВИТКУ ТРІЩИНИ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ПЛАСТИНЧАТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАМЕТРІВ РОЗСІЯНИХ ПОШКОДЖЕНЬ МАТЕРІАЛУ

АНОТАЦІЯ Описується методика розрахунку розвитку тріщини в пластинчатих та осесиметричних елементах конструкцій при циклічному навантаженні, що базується на концепції накопичення розсіяних пошкоджень у матеріалі. Оцінювання пошкодженості матеріалу проводиться за кривими малоциклової втоми на основі розмахів пружно-пластичних деформацій на шляху розвитку тріщини з використанням гіпотези лінійного підсумовування пошкоджень. Результати порівнюються з даними, отриманими з використанням рівняння Періса.

Ключові слова: кінетика тріщини, циклічне навантаження, розмахи пружно-пластичних деформацій, криві малоциклової втоми, метод скінченних елементів.

N. SHULZHENKO, P. GONTAROVSKIY, N. GARMASH. I. MELEZHUK

EVALUATION OF THE CRACK DEVELOPMENT AT A CYCLIC LOADING OF PLATE ELEMENTS USING THE PARAMETERS OF SCATTERED DAMAGES OF THE MATERIAL

ABSTRACT The purpose of these studies was to work out the methods for the computation of crack development in the plate and axisymmetric elements of structures at cyclic loading for the plasto-elastic arrangement using the conception of the accumulation of scattered damages in the material. The processes of sign-changing plasto-elastic deformation and crack resistance of the material were simulated at the crack tip using the smooth specimen fatigue test data. Thermal and stress-strain behaviors of the construction were determined in different loading modes using the method of final elements for several fixed crack depths. The material damage was estimated using the curves of low-cycle fatigue and those of the range of plasto-elastic deformations on the would-be way of the crack development resorting to the hypothesis of linear summation. When the damageability reaches a critical value at the crack tip its depth is increased nonuniformly by a value of the specified step. This scientific paper gives consideration to the kinetics of the surface crack in the region exposed to the action of zero-repetition cyclic loading. The results were compared with the data obtained using the Paris equations. A satisfactory agreement of the data is observed. This technique can be used for the evaluation of the service life of the elements of steam turbines.

Key words: crack kinetics, cyclic loading, the range of plasto-elastic deformations, low-cycle fatigue curves, and the method of final elements.

Вступ

Розрахункове оцінювання кінетики тріщин при циклічному навантаженні елементів конструкцій виконується здебільшого з використанням кінетичних діаграм втомного руйнування типу Періса [1]. Для визначення параметрів цих діаграм необхідні трудомісткі експериментальні випробування спеціальних зразків із тріщинами.

Запропонована методика розрахунку кінетики тріщини в пластинчатих та осесиметричних елементах на основі параметрів розсіяних пошкоджень з використанням розмахів пружно-пластичних деформацій і кривих малоциклової втоми для звичайних зразків. У даній роботі на відміну від [2], де розмах пружно-пластичних деформацій оцінювався згідно з принципом Нейбера [3] на основі розв'язання задачі теорії пружності, використовується пружно-пластична постановка з урахуванням історії деформування матеріалу і ефекту Баушингера [4] при реверсі навантаження.

Мета роботи

Метою роботи є розвиток методики розрахунку кінетики тріщини в пружно-пластичній по-

становці на основі використання параметрів розсіяних пошкоджень матеріалу, яка не вимагає експериментальних даних по тріщиностійкості матеріалу для зразків із тріщинами.

Методика розрахунку кінетики тріщин

Тепловий і напружено-деформований стан конструкції на різних режимах навантаження в пружно-пластичній постановці визначається за допомогою методу скінченних елементів для фіксованих глибин тріщини. Обчислення розмахів інтенсивності пружно-пластичних деформацій на шляху розвитку тріщини виконується за декількома скінченно-елементними розрахунковими схемами конструкції з тріщинами різної глибини. Використовується теорія пластичності з ізотропним зміцненням, що враховує ефект Баушингера і діаграму циклічного деформування матеріалу згідно з принципом Мазінга [4] для відповідної температури.

Скінченноелементна дискретизація в районі вершини тріщини для різних її глибин приймалася однаковою для завдання розподілів розмахів інтенсивності пружно-пластичних деформацій на шляху розвитку тріщини. Попередні дослідження

© М. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Н. Г. Гармаш, І. І. Мележик, 2017

збіжності результатів показали, що в вершині тріщини розміри скінченних елементів доцільно приймати 0,1–0,2 мм. Після розв’язання пружно-пластичних задач для розрахунку кінетики тріщини задаються розподіли розмахів інтенсивності деформацій для декількох тріщин різної глибини при всіх режимах циклічного навантаження.

В якості вихідних даних задавались величини: K_N – кількість режимів циклічного навантаження; d_{Nj} ($j = 1, 2, \dots, K_N$) – відносна доля циклів кожного режиму навантаження; T_j ($j = 1, 2, \dots, K_N$) – розрахункові температури матеріалу для кожного режиму навантаження; x_i ($i = 1, 2, \dots, k$) – відстані від вершини тріщини до центрів скінченних елементів; $\Delta \varepsilon_i^j(l_k, x_i)$ – епюри розмаху інтенсивності пружно-пластичних деформацій на шляху x_i розвитку тріщини глибиною l_k при j -тому режимі циклічного навантаження.

Вибраний напрям розвитку тріщини розбивається рівномірно на малі відрізки d_l – кроки стрибкоподібного підростання тріщини. Вводиться узагальнений цикл навантаження, який усереднює пошкодження від усіх режимів навантаження. Кожен j -тий режим характеризується розмахом пружно-пластичних деформацій, які визначаються в центрах x_i відрізків d_l шляхом квадратичної інтерполяції через їх значення, отримані в центрах скінченних елементів у напрямку розвитку тріщини. Число циклів до руйнування N_{pj} від j -того режиму навантаження визначається з кривих втоми при відповідній температурі.

Прирости пошкодженості від j -того режиму навантаження в узагальненому циклі знаходяться за формулою

$$\Delta \Pi_j(x_j) = \frac{1}{N_{pj}(x_i)} d_{Nj},$$

де $d_{Nj} = N_j/N$ – відносна частка циклів j -того режиму в узагальненому числі N циклів.

Прирошення пошкодженості за один узагальнений цикл від усіх режимів навантаження

$$\Delta \Pi(x_i) = \sum_{j=1}^{K_N} \Delta \Pi_j(x_i).$$

Число циклів до руйнування в елементі d_l , найближчому до вершини тріщини довжиною l , визначається за формулою

$$N_i = \frac{1 - \Pi(x_i)}{\Delta \Pi(x_i)},$$

де $\Pi(x_i)$ — накопичена пошкодженість у вершині тріщини за час її підростання до поточної глибини l . Кількість циклів, за які тріщина досягла глибини l , визначається так:

$$N(l) = \sum N_i.$$

Пошкодженість в інших точках x_i на шляху підростання тріщини після руйнування чергового елемента d_l визначається за формулою

$$\Pi(x_{i+1}) = \Pi(x_i) + \Delta \Pi(x_{i+1}) N_i.$$

Далі розрахунок повторюється для тріщини глибиною $l_i = l_i + d_l$ до наступного її підростання.

Результати досліджень

Оцінюється кінетика тріщини в пластині шириною 10 см і довжиною 24 см, що навантажена віднульовими циклами із максимальними розтягуючими напруженнями $\sigma_{max} = 120; 100; 60$ МПа. Тріщина з початковою довжиною 2 см розташована з одного боку пластини в її центрі (рис. 1).

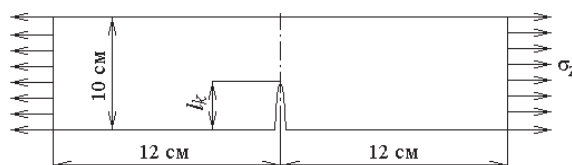


Рис. 1 – Схема пластины з тріщиною

Розмахи пружно-пластичних деформацій за цикл навантаження для тріщини глибиною l_k приводяться в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення розмахів інтенсивності деформацій

x_i , мм	Глибина тріщини l_k , мм				
	20	30	40	45	50
0,05	0,741	1,257	1,99	2,4978	2,856
0,15	0,2833	0,52	0,856	1,0993	1,189
0,25	0,1317	0,248	0,404	0,5302	0,558
0,3722	0,0905	0,146	0,222	0,2821	0,305
0,5456	0,068	0,103	0,154	0,187	0,211
0,7883	0,0535	0,082	0,122	0,1478	0,173
1,1281	0,043	0,067	0,099	0,1212	0,146
1,6039	0,0355	0,0545	0,082	0,0998	0,122
2,2699	0,0299	0,0445	0,068	0,0831	0,102
3,2023	0,0255	0,0365	0,0555	0,0688	0,084
4,5077	0,023	0,031	0,045	0,0559	0,065
6,3353	0,021	0,0265	0,0365	0,0446	0,055
8,8939	0,0195	0,023	0,0295	0,0349	0,0425
11,6887	0,019	0,021	0,0245	0,0277	0,0325
14,8932	0,0185	0,02	0,0215	0,0227	0,025

Розрахунки кінетики тріщини виконані для пластины зі сталі 25X1M1Ф при її температурі 535 °С. Отримані результати порівнюються зі швидкістю росту тріщини (в мм/цикл) за рівнянням Періса [5]

$$v = 7,67 \cdot 10^{-10} \Delta K^{3,846}, \quad (1)$$

де ΔK – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень, який для тріщини з глибиною 2; 3; 4; 5 см

відповідно дорівнює 34,24; 50,81; 74,73; 112,04 МПа $\sqrt{м}$. Параметри в рівнянні (1) приведені для сталі 25Х1М1Ф при температурі 535 °С.

Криві малоциклової втоми при різних температурах для сталі 25Х1М1Ф, які скореговані на деформації руйнування при одноразовому навантаженні, приведено на рис. 2. Оскільки криві малоциклової втоми отримували на зразках діаметром 10 мм, враховується масштабний фактор [1] шляхом пониження розмахів пружно-пластичних деформацій на 10 %.

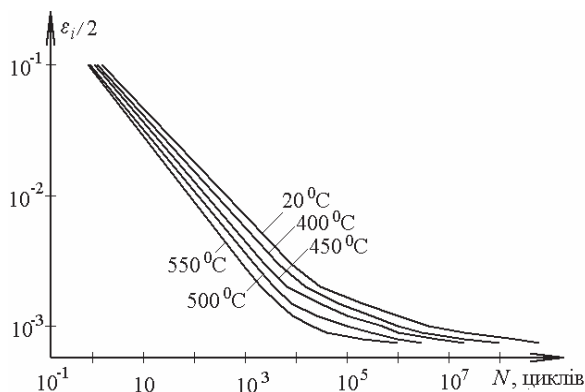


Рис. 2 – Криві малоциклової втоми для матеріалу 25Х1М1Ф

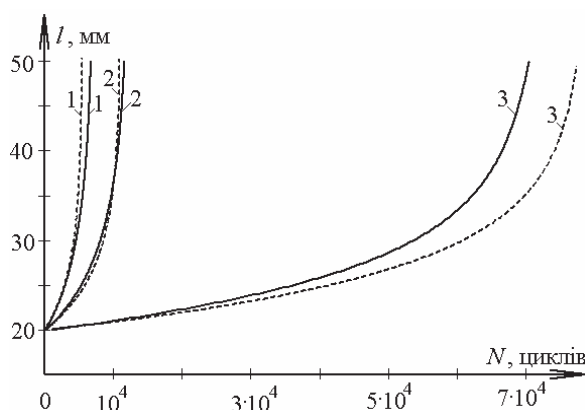


Рис. 3 – Порівняння швидкостей росту тріщини в пластині, отриманих за даною методикою і за рівнянням Періса: 1 – максимальні напруження в циклі 120 МПа; 2 – 100 МПа; 3 – 60 МПа

На рис. 3 приводяться швидкості росту тріщини в пластині, отримані за даною методикою (суцільні лінії) та рівнянням Періса (пунктирні лінії).

На рис. 3 цифрами 1, 2 та 3 позначені результати, отримані при максимальних напруженнях в циклі 120, 100 та 60 МПа, відповідно.

З ростом глибини тріщини зона пластичних деформацій у вершині тріщини збільшується. Швидкість росту тріщини уповільнюється у порівнянні з результатами за рівнянням Періса, де швидкість з глибиною тріщини зростає лінійно.

Висновки

Розроблена методика, в якій моделюється пружно-пластичне деформування матеріалу в районі вершини тріщини в пластинчатих і осесиметричних елементах конструкцій методом скінченних елементів і використовуються криві втомного руйнування звичайних циліндричних зразків.

Швидкості росту тріщини відповідають результатам за рівнянням Періса, які використовують експериментальні константи для зразків з тріщинами.

Методика може бути розповсюджена для оцінки кінетики тріщин в теплових канавках роторів парових турбін при пуско-зупинних режимах, в замкових з'єднаннях лопаток з верховою посадкою на гребені дисків і інших деталях.

Перелік літератури

- 1 **Романів, О.Н.** Механика разрушения и прочность материалов : справ. пособие в 4 т. Т 4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / **О. Н. Романів, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин, Н. А. Махутов, М. М. Стадник.** – Киев : Наук. думка, 1990. – 680 с.
- 2 **Шульженко, М.** Розрахункове оцінювання розвитку тріщини при циклічному навантаженні з використанням параметрів розсіяних пошкоджень / **М. Шульженко, П. Гонтаровський, Н. Гармаш, І. Мележик** // Вісн. Тернопіль. нац. техн. ун-ту. – 2013. – № 3(71). – С. 197–204. – ISSN 1727-7108.
- 3 **Поспишил, Б.** Прочность и долговечность элементов энергетического оборудования / **Б. Поспишил, А. Л. Квитка, Г. Н. Третьяченко.** – Киев : Наук. думка, 1987. – 216 с.
- 4 **Москвитин, В. В.** Пластичность при переменных нагружениях / **В. В. Москвитин.** – Москва : Изд-во московского университета, 1965. – 263 с.
- 5 **Когаев, В.П.** Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / **В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков.** – Москва : Машиностроение, 1985. – 234с.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Romaniv, O. N., Yarema, S. Ya., Nikiforchin, G. N., Mahutov, N. A. and Stadnik, M. M.** (1990), *Mechanika razrusheniya i prochnost` materialov. Ystalost` i ciklicheskaja treschinostojkost` konstrukcionnyh materialov [Fracture mechanics and strength of materials. Fatigue and cyclic crack resistance of structural materials]*, Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
- 2 **Shulzhenko, M., Gontarovsky, P., Garmash, N. and Melezhyk, I.** (2013), "Rozrahunkove ocinjuvannja rozvytku trischny pry cyklichnomu navantagenni z vukorustannjam parametriv rozsiyanuh pozhkodgen [Computation estimation of the crack development under cyclic loading using dissipated damages parameters]", *Visnyk Ternopil'skogo nacionalnogo universytetu [Scientific Journal of the Ternopil National Technical University]*, No. 3(71). pp. 197–204, ISSN 1727-7108.

- 3 **Pospishil, B., Kvitka, A. L. and Tretyachenko, G. N.** (1987), *Prochnost` i dolgovechnost` elementov energeticheskogo oborudovaniya [The strength and durability of the elements of power equipment]*, Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
- 4 **Moskvitin, V. V.** (1965), *Plastichnost` pri peremennykh nagruzheniyah [Plasticity at variable loadings]*, Izdatelstvo moskovskogo universiteta, Moscow, Russia.
- 5 **Kogaev, V. P., Mahutov, N. A. and Gusenkov, A. P.** (1985), *Raschety detaley mashin i konstruktsey na prochnost` i dolgovechnost` [The calculations of machine parts and structures for strength and durability]*, Mashynostroenie, Moscow, Russia.

Відомості про авторів (About authors)

Шульженко Микола Григорович – доктор технічних наук, професор, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України; провідний науковий співробітник відділу вібраційних та термоміцнісних досліджень, м. Харків, Україна; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua

Shulzhenko Nikolay Grigor'evich – Doctor of Technical Science, Professor, head of a department of vibration and termostrength researches, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine, Str. Pozharsky 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046.

Гонтаровський Павло Петрович кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу вібраційних та термоміцнісних досліджень, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України; м. Харків, Україна; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua

Gontarovskiy Pavel Petrovich – Candidate of Technical Science (Ph. D.), Senior Staff Scientist, Senior Staff Scientist of Department of Vibration and Termostrength Researches, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine; Str. Pozharsky 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046.

Гармаш Наталія Григоровна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу вібраційних та термоміцнісних досліджень, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України; м. Харків, Україна; e-mail: garm_n@mail.ru, ORCID 0000-0002-4890-8152.

Garmash Nataliya Grigor'evna – Candidate of Technical Science (Ph. D.), Senior Staff Scientist, Senior Staff Scientist of Department of Vibration and Termostrength Researches, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine; Str. Pozharsky 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046.

Мележик Ірина Іванівна – кандидат технічних наук, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, науковий співробітник відділу вібраційних та термоміцнісних досліджень, м. Харків, Україна; e-mail: melezhik@online.ua, ORCID 0000-0002-8968-5581.

Melezhik Irina Ivanovna – Candidate of Technical Science (Ph. D.), Staff Scientist of Department of Vibration and Termostrength researches, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine; Kharkov, Ukraine.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Шульженко, М. Г. Оцінка розвитку тріщини при циклічному навантаженні пластинчатих елементів із використанням параметрів розсіяних пошкоджень матеріалу / **М. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Н. Г. Гармаш, І. І. Мележик** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 41–44. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.06.

Please cite this article as:

Shulzhenko, M, Gontarovskiy, P, Garmash, N. and Melezhik, I. (2017), "Evaluation of the Crack Development at a Cyclic Loading of Plate Elements Using the Parameters of Scattered Damages of the Material", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp.41–44, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.06.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Шульженко, Н. Г. Оценка развития трещины при циклическом нагружении пластинчатых элементов с использованием параметров рассеянных повреждений материала / **Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Н. Г. Гармаш, И. И. Мележик** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 41–44. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.06.

АННОТАЦИЯ Описывается методика расчета развития трещины в пластинчатых и осесимметричных элементах конструкций при циклическом нагружении, основанная на концепции накопления рассеянных повреждений в материале. Оценка повреждаемости материала проводится по кривым малоциклового усталости на основе размахов упруго-пластических деформаций на пути развития трещины с использованием гипотезы линейного суммирования. Результаты сравнивались с данными, полученными с использованием уравнения Периса.

Ключевые слова: кинетика трещины, циклическое нагружение, размахи упруго-пластических деформаций, кривые малоциклового усталости, метод конечных элементов.

Надійшла (received) 27.02.2017