

УДК 539.3

МОДЕЛЮВАННЯ МНОЖИННОГО РОЗТРИСКУВАННЯ ЗА ДІЇ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ВТОМИ

Г. Т. СУЛИМ¹, О. П. ЯСНІЙ², Я. М. ПАСТЕРНАК³

¹ Львівський національний університет імені Івана Франка;

² Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя;

³ Луцький національний технічний університет

Запропоновано модель множинного розтріскування зразків за сумісної дії теплових та механічних циклічних навантажень. З огляду на складність обчислювань під час розв'язування задач взаємодії стохастично розташованих тріщин запропоновано вважати їх подвійно періодичними системами розгалужених тріщин, що моделюють міжзеренне пошкодження та між- і трансристалітне руйнування. Для встановлення головного напрямку поширення руйнування у модель ввели хрестовидні тріщиноподібні дефекти, які можуть поширюватися у двох перпендикулярних напрямках відповідно до прикладених термосилових навантажень. Обчислено залежності виникнення пошкодженості, довжини мікротріщин і віддалі між ними від кількості циклів та параметрів термосилового навантаження.

Ключові слова: множинне розтріскування, моделювання, подвійно періодична система тріщин, термічне та механічне навантаження, сталь 25Х1М1Ф.

Одним із фундаментальних чинників, який істотно впливає на міцність елементів конструкцій є термовтома матеріалів. Її врахування залишається важливим для багатьох галузей інженерії, таких, як авіабудування [1–3], електроніка [4, 5], машинобудування [6, 7], тепла та атомна енергетики [8–18] тощо.

Термічна втома спричиняє розтріскування елементів конструкцій, внаслідок якого виникає мережа поверхневих тріщин навіть за відносно невеликих коливань температури. Відомо, що зі зниженням температури, а отже, й теплових напружень, ріст тріщин термовтоми за досягнення певної глибини гальмується. Проте, якщо в околі мережі таких тріщин діють додаткові механічні напруження розтягу, то підростання цих тріщин триватиме. Це часто спостерігають за тривалої експлуатації елементів конструкцій електростанцій [8, 9] і підтверджено експериментально [15] за контрольованих умов.

Тому і з теоретичного боку, і з огляду на можливість практичного застосування важливою залишається проблема моделювання множинного поверхневого розтріскування елементів конструкцій за сумісної дії термомеханічних циклічних навантажень, оскільки це явище має стохастичну природу.

Ріст мережі тріщин термічної втоми досліджували експериментально і моделювали числово [8, 19]. З'ясовано, що сповільнення їх росту на певній глибині, а також те, з якою швидкістю відбувається таке сповільнення, залежить від розмаху і частоти коливань температури, а також від коефіцієнта теплопровідності металу [19, 20]. Однак вплив інших важливих чинників на термовтому і механізми її розвитку все ще недостатньо вивчені [21]. Зазначимо, що здебільшого одночасний вплив температури і силових чинників не брали до уваги, а підходи до оцінювання термовтоми переважно були повністю детермінованими, і, таким чином,

не давали змоги врахувати ймовірнісну природу зародження тріщин і їх подальший розвиток.

Чинні галузеві стандарти враховують цю невизначеність на етапі проектування за допомогою емпіричних коефіцієнтів запасу, які роблять проектування консервативним, не вказуючи, як його коректно покращити. Такий підхід унеможливує також кількісне оцінювання ризиків, пов'язаних із проєктованими рішеннями. Тому важливо розробити і ввести у практику проектування ймовірнісні чи наближені до них моделі, і на їх основі доповнити чинні правила та норми належними методами.

Певні позитивні результати застосування ймовірнісних підходів до моделювання магістрального [22] та множинного поверхневого розтріскування елементів конструкцій за втоми та термовтоми засвідчили потребу поглиблення досліджень цієї проблеми. Тому мета роботи – створити математичну модель накопичення міжзеренних пошкоджень, спричинених термовтомою, на етапі зародження мікротріщин і подальшого розвитку сформованої мережі між- і транскристалітних тріщин на основі підходів лінійної механіки руйнування з використанням коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН), отриманих із розв'язку задачі для подвійно періодичної системи тріщин. Запропонована модель дає можливість використання різних критеріальних умов та законів розвитку тріщини [23]; врахування різноманітних способів взаємодії берегів мікротріщин [24]; зміни кількості, орієнтації та довжини ланок тріщин; вибору ймовірнісного характеру їхніх параметрів.

Модель множинного розтріскування. Під впливом теплових циклічних навантажень матеріал деградує. Цей процес можна пов'язати із накопиченням пошкоджень, зокрема у вигляді мікротріщин. Через ймовірнісну природу зародження цих мікродефектів і велику їх кількість вважали, що вони рівномірно розподіляються у поверхневому шарі матеріалу після кожного нового циклу термовтоми.

Для опису множинного розтріскування використали логарифмічну залежність:

$$\lg N_0 = (A - S_0) / B. \quad (1)$$

Тут N_0 – кількість циклів до зародження мережі макротріщин, коли мікротріщини за певної довжини почали би зливатися в макротріщини; $S_0 = \Delta S$ – розмах теплових напружень; A, B – параметри, які визначають експериментально.

Оскільки руйнування внаслідок термовтоми зумовлене накопиченням у матеріалі дефектів, то пошкодженість D ($0 < D < 1$) задали (з огляду на її випадковий характер) нормальним розподілом ймовірностей їх виникнення у вигляді

$$D(N) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[(N - N_0) / (\sqrt{2}s) \right], \quad (2)$$

де N – кількість термоциклів; s – середньоквадратичне відхилення.

Пошкодженість D матеріалу пов'язали з густиною дефектів, утворених унаслідок термоциклічного навантаження. При цьому вважали, що середня віддаль між ядрами дефектів, тобто між центрами перетинів сусідніх дефектів у тріщинуватій структурі, обернено пропорційна до пошкодженості та досягає свого граничного значення за максимального значення останньої. Якщо припустити, що внаслідок теплового навантаження утворюються дефекти завдовжки $2a_0$ (лінійні чи хрестовидні), то середню віддаль $d(N)$ між ними обчислювали так:

$$d(N) = 2a_0 / D(N). \quad (3)$$

Дія циклічних термонапружень та додаткового механічного циклічного навантаження зумовлює підростання дефектів, тобто матеріал може зруйнуватися значно раніше, ніж передбачає залежність (1). Для урахування цих впливів нижче побудовано модель множинного розтріскування зразків за сумісної дії теплового і силового навантажень.

Розглянули подвійно періодичну систему хрестовидних тріщин, перетини яких розташовані один від одного на віддальх d_x, d_y у двох взаємно перпендикулярних напрямках (рис. 1). Така система тріщин попри високу міру детермінованості доволі добре описує множинний характер тріщин (їх взаємодію), а також те, що вони переважно не є суто прямолінійними, а формують ламані (ланцюжкові чи променисті) підструктури. Внаслідок циклічної дії теплових напружень із розмахом $\Delta S_0 = S_{\max} - S_{\min}$ та заданих механічних напружень із розмахом Δp_x і Δp_y уздовж відповідних осей координат наявні дефекти ростуть. Тут S_{\max} та S_{\min} – максимальні та мінімальні значення механічних напружень від тепловмін. Цей процес моделювали на основі рівнянь Періса [23]:

$$\frac{da_x}{dN} = C (\Delta K_{I_x})^n, \quad \frac{da_y}{dN} = C (\Delta K_{I_y})^n. \quad (4)$$

Розмахи КІН $\Delta K_{I_x}, \Delta K_{I_y}$ для подвійно періодичної системи тріщин модельної задачі обчислювали для заданої хрестовидної геометрії тріщин залежно від параметрів $\Delta S_0, \Delta p_x, \Delta p_y$ навантаження на основі методу граничних елементів [24].

Результати та їх обговорення. Для прикладу дослідили сумісну дію термомеханічної втоми на сталь 25X1M1Ф за розмахів теплових $\Delta S_0 = 100$ МПа та механічних $\Delta p_x = 0$ МПа, $\Delta p_y = 100$ МПа навантажень ($S_{\min} = p_x^{\min} = p_y^{\min} = 0$ МПа). Механічне навантаження пропорційне тепловому. Вказану сталь використовують для виготовлення елементів металургійного обладнання, зокрема, роликів машин безперервного лиття заготовок, на поверхню яких під час експлуатації діють циклічні термомеханічні напруження. Внаслідок цього їхня поверхня розтріскується і на ній утворюється мережа тріщин термовтоми, більшість яких орієнтована вздовж і впоперек осі ролика [25]. Для прогнозування зародження мережі мікротріщин використали експериментальні результати праці [26], де досліджено термовтому сталі 25X1M1Ф за термоциклу трикутної форми (від кімнатної до 550°C). Апроксимувавши за допомогою методу найменших квадратів експериментальну криву термовтоми функцією (1), отримали параметри рівняння (1): $A = 777,16$ МПа, $B = -114,29$ МПа. При цьому, відповідно до залежності (1), визначили кількість термоциклів до руйнування зразків $N_0 = 8,41 \cdot 10^5$. Однак за додаткового впливу циклічного механічного навантаження цей показник може істотно знизитися.

Згідно з працею [27], ріст втомних тріщин у сталі 25X1M1Ф за температури 600°C описують такі параметри формули Періса (4): $C = 6,6 \cdot 10^{-12}$ (m/cycle) \times (MPa \sqrt{m}) $^{1-n}$, $n = 3,26$ при ΔK_I (MPa \sqrt{m}). Частота трикутних за формою циклів навантаження 0,1 Hz, а коефіцієнт асиметрії циклу навантаження $R = 0$.

Внаслідок термовтоми в матеріалі формується густа мережа достатньо довгих мікротріщин (у середньому завдовжки $2a_{x0} = 2a_{y0} = 1$ mm, сумірний розмір 20...30 зерен). Числове інтегрування залежностей (4) засвідчило, що дія додаткового механічного циклічного навантаження Δp_y спричиняє інтенсивне підростання горизонтальних (у напрямі осі Ox) і дуже незначне, але все ж не нульове

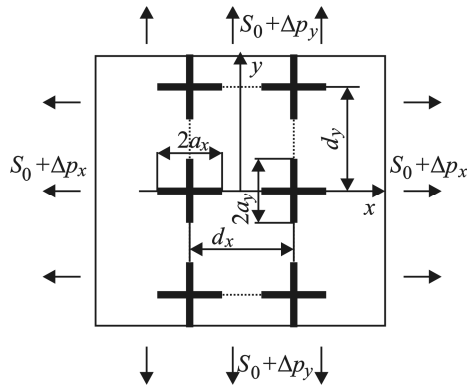


Рис. 1. Схема моделювання множинного розтріскування.

Fig. 1. The scheme of multiple cracking modelling.

через додатковий вплив температурних чинників, вертикальних відгалужень тріщин (рис. 2). Отже, з огляду на віддалі між перехрестями тріщин, яку обчислюють за формулою (3), практично на порядок зменшується кількість циклів до утворення магістральних тріщин на поверхні матеріалу (об'єднання декількох мікротріщин у макротріщину). Тому врахування сумісної дії теплових та силових циклічних навантажень, а також підростання дефектів від механічної втоми істотно знижує кількість циклів до руйнування, аніж за впливу кожного з цих чинників окремо. Таким чином, запропонований підхід дає можливість у простій інженерній формі описати сумісну дію обох чинників втоми та оцінити як середні розміри дефектів, так і ресурс відповідного виробу.

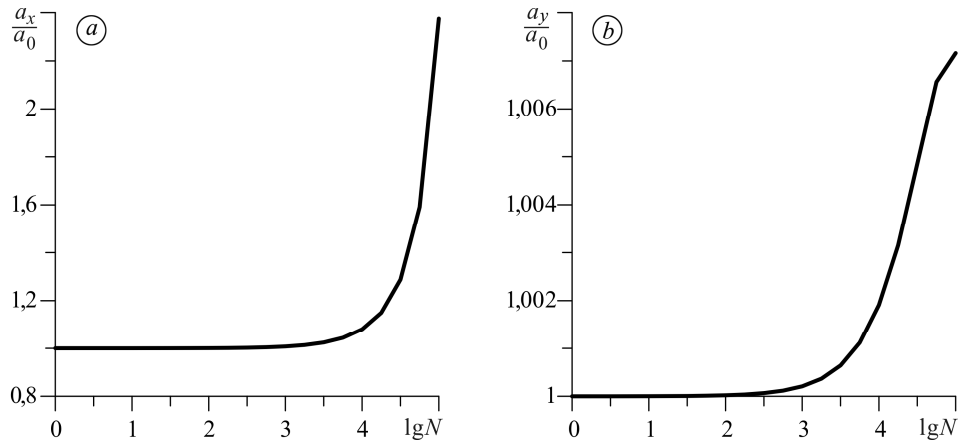


Рис. 2. Зміна відносної середньої довжини відгалужень хрестовидних тріщин у напрямі Ox (a) і Oy (b), спричинена впливом додаткових механічних напружень, залежно від кількості циклів навантаження.

Fig. 2. Change of relative average length of cross-like cracks branches along the Ox (a) and Oy (b) axes, caused by the influence of additional mechanical loading, depending on the number of loading cycles.

За головне відгалуження серед масиву тріщин прийняли тріщину максимальної довжини серед усіх наявних. Виявили (рис. 3), що при $S_0 = 100$ МПа з підвищенням механічного навантаження Δp_y від 200 до 300 МПа за однакового значення N максимальний КІН у вершині головного відгалуження хрестовидних тріщин збільшується у декілька разів, спричинюючи його інтенсивний ріст в напрямі Ox . За достатньо малих значень Δp_y , скажімо $\Delta p_y = 100$ МПа, КІН майже не змінюється, найповільніше – зі збільшенням кількості циклів навантаження при $\Delta p_y = 0$.

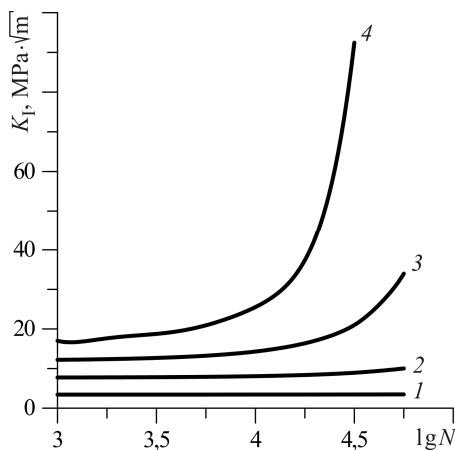


Рис. 3. Максимальні значення КІН у вершині головного відгалуження хрестовидних тріщин залежно від десяткового логарифма кількості циклів навантаження: 1 – $\Delta p_y = 0$; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 300 МПа.

Fig. 3. Maximum SIF of the main branch of a cross-like crack versus the decimal logarithm of the number of loading cycles: 1 – $\Delta p_y = 0$; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 300 МПа.

За лінійного зростання механічного циклічного навантаження Δp_y (обчислювали для $\Delta p_y = 0; 100; 200$ та 300 МПа) та незмінного $S_0 = 100$ МПа кількість циклів до руйнування зразка $\lg N$ зменшується практично лінійно (рис. 4а) (вважали, що руйнування відбувається, коли середня віддаль між перехрестями тріщин дорівнюватиме середній довжині їх відгалужень у напрямі Ox). Тобто лінійна зміна додаткового силового навантаження зменшує кількість циклів до руйнування. Залежності, розраховані для $\Delta p_y = 200$ та 300 МПа, завершуються виходом майже на вертикальну асимптоту. Важливо враховувати, що збільшення розмаху механічного навантаження в певному напрямі зменшує інтенсивність підростання тріщин у цьому напрямі, натомість збільшує швидкість їх підростання у перпендикулярному напрямку.

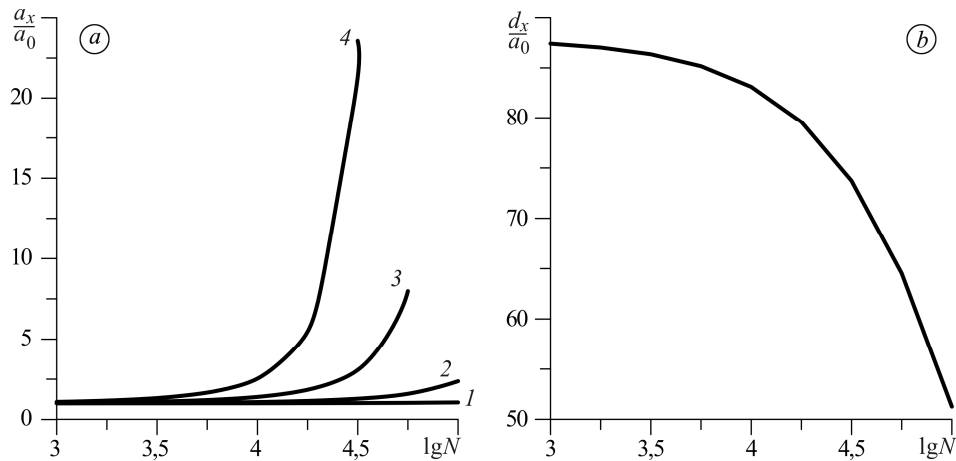


Рис. 4. Зміна відносної довжини a_x/a_0 головного відгалуження хрестовидних тріщин за дії різних $\Delta p_y = 0$ (1), 100 (2), 200 (3), 300 (4) МПа (а) та відносної віддалі d_x/d_0 до найближчого з них (б) у напрямі Ox залежно від кількості циклів механічного навантаження.

Fig. 4. Change of relative length a_x/a_0 of the main branch of cross-like cracks under effect of different $\Delta p_y = 0$ (1), 100 (2), 200 (3), 300 (4) МПа (a) and the relative distance d_x/d_0 to the closest of them along the Ox axis (b) versus the number of loading cycles.

За використаних розмахів напружень основний приріст пошкодженості D як функції кількості циклів навантаження відбувається у вузькому діапазоні зміни $\lg N$ від п'яти до шести (рис. 5).

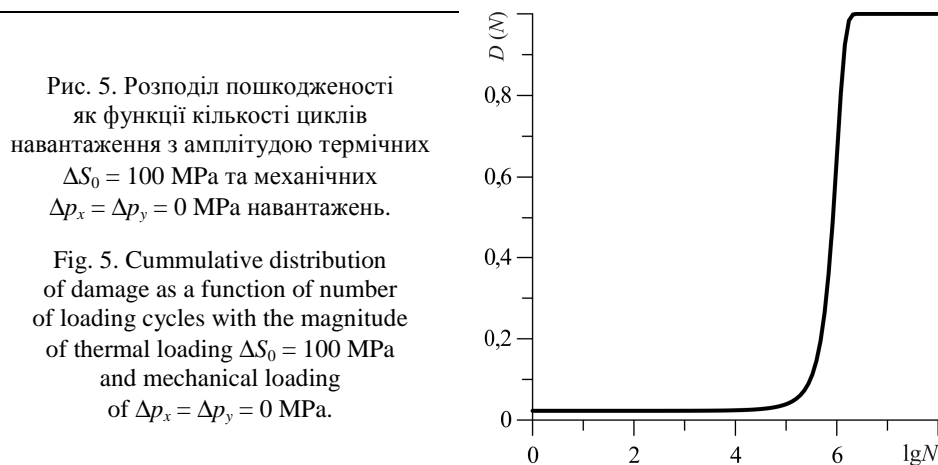


Рис. 5. Розподіл пошкодженості як функції кількості циклів навантаження з амплітудою термічних $\Delta S_0 = 100$ МПа та механічних $\Delta p_x = \Delta p_y = 0$ МПа навантажень.

Fig. 5. Cumulative distribution of damage as a function of number of loading cycles with the magnitude of thermal loading $\Delta S_0 = 100$ МПа and mechanical loading of $\Delta p_x = \Delta p_y = 0$ МПа.

Для обчислень прийняли такі значення параметрів рівняння (1): $N_0 = 8,41 \cdot 10^5$, $s = N_0/2$. Вибране значення параметра s забезпечує коефіцієнт варіації на рівні 50%.

ВИСНОВКИ

Запропоновано метод інженерних розрахунків для врахування сумісного впливу механічного та теплового чинників на втомне руйнування матеріалу, в якому розвиток мікрodefektів зумовлюють відомі механізми зародження та розвитку тріщин термовтоми, доповнених урахуванням коефіцієнтів інтенсивності напружень у вершинах тріщин від механічної складової циклічних навантажень нескінченної пластини з подвійно періодичною мережею хрестовидних тріщин у межах задачі теорії пружності. Відстані між тріщинами визначено на основі залежностей, отриманих з діаграм термовтоми, а розміри тріщиноподібних дефектів розраховано за формулою Періса. Такий підхід дає змогу ефективно моделювати сумісну дію теплових та механічних напружень на втомну довговічність матеріалів. Обчислено залежності пошкодженості, довжини мікротріщин і відстаней між ними від кількості термоциклів для сталі 25X1M1Ф за теплових та додаткових механічних напружень. З'ясовано, що врахування додаткового підростання тріщин унаслідок механічної втоми, які зародилися у результаті лише теплових навантажень, може істотно зменшити прогнозований ресурс елементів конструкцій.

РЕЗЮМЕ. Предложена модель множественного растрескивания образцов при совместном действии термических и механических циклических нагрузок. Учитывая сложности вычислений при решении задач взаимодействия стохастически расположенных трещин, предложено считать их двухпериодическими системами разветвленных трещин, моделирующих межзеренные повреждения и меж- и транскристаллическое разрушение. Для определения главного направления распространения разрушения в модель введено крестообразные трещиноподобные дефекты, которые могут расти в двух взаимно перпендикулярных направлениях, соосных с приложенной термосиловой нагрузкой. Рассчитаны зависимости поврежденности, длины микротрещин и расстояний между ними от количества циклов и параметров нагрузки.

SUMMARY. The model of multiple cracking of specimens under the combined action of cyclic thermal and mechanical loading is proposed. Due to the computational complexity of solving the problems of stochastically distributed cracks interaction, it is proposed to consider them as two-periodical systems, which model the intergranular damage and inter-crystal and trans-crystal fracture. To determine the general direction of fracture propagation the cross-like defects, which can grow in two mutually perpendicular directions, coaxial with the applied thermal and mechanical loadings, are introduced into the model. The dependences of damage, length of microcracks and distances between them on the number of cycles and the parameters of thermal mechanical loading are obtained.

1. *Mansoor M., Islam I., and Tauqir A.* Restricted life of after burner manifold assemblies due to stress raisers // *Eng. Fail. Anal.* – 2007. – **14**. – P. 1280–1285.
2. *Effects of microstructure in high temperature fatigue: Lifetime to crack initiation of a single crystal superalloy in high temperature low cycle fatigue / L. Rémy, M. Geuffrard, A. Alam, A. Köster, E. Fleury // Int. J. Fatigue, Fatigue and Microstructure: A special issue on recent advances.* – 2013. – **57**. – P. 37–49.
3. *Growth of small cracks and prediction of lifetime in high-temperature alloys / L. Rémy, A. Alam, N. Haddar, A. Köster, N. Marchal // Mater. Sci. Eng. A, The McEvily Symposium: Fatigue and Fracture of Traditional and Advanced Materials, TMS 2006.* – 2007. – **468–470**. – P. 40–50.
4. *Liu X. W. and Plumbridge W. J.* Damage produced in solder alloys during thermal cycling // *J. Electron. Mater.* – 2007. – **36**. – P. 1111–1120.
5. *Ubachs R. L. J. M., Schreurs P. J. G., and Geers M. G. D.* Elasto-viscoplastic nonlocal damage modelling of thermal fatigue in anisotropic lead-free solder // *Mech. Mater.* – 2007. – **39**. – P. 685–701.
6. *Damage mechanisms of cast Al–Si–Mg alloys under superimposed thermal-mechanical fatigue and high-cycle fatigue loading / T. Beck, D. Löhe, J. Luft, I. Henne // Mater. Sci. Eng. A.* – 2007. – **468–470**. – P. 184–192.

7. *Effect of microstructural constituents on the thermal fatigue life of A319 aluminum alloy* / V. Firouzdar, M. Rajabi, E. Nejati, F. Khomamizadeh // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2007. – **454–455**. – P. 528–535.
8. *Taheri S.* Some advances on understanding of high cycle thermal fatigue crazing // *J. Press. Vessel Technol.* – 2007. – **129**. – P. 400–410.
9. *Оцінка* пошкоджень колектора водяного економайзера тріщинами термічної втоми / Р. Я. Косаревич, О. З. Студент, Я. Д. Онищак, А. Д. Марков, І. В. Ріпей, Б. П. Русин, Г. М. Никифорчин // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2004. – **40**, № 1. – С. 109–114.
(*Estimation of Damage to the Collector of a Water Economizer by Thermal Fatigue Cracks* / R. Ya. Kosarevych, O. Z. Student, Ya. D. Onyshchak, A. D. Markov, I. V. Ripei, B. P. Rusyn, H. M. Nykyforchyn // *Materials Science.* – 2004. – **40**, № 1. – P. 132–138.)
10. *Crack initiation under thermal fatigue: An overview of CEA experience. Part I: Thermal fatigue appears to be more damaging than uniaxial isothermal fatigue* / A. Fissolo, S. Amiable, O. Ancelet, F. Mermaz, J. M. Stelmaszyk, A. Constantinescu, C. Robertson, L. Vincent, V. Maillot, F. Bouchet // *Int. J. Fatigue.* – 2009. – **31**. – P. 587–600.
11. *Development of a test for the analysis of the harmfulness of a 3D thermal fatigue loading in tubes* / O. Ancelet, S. Chapuliot, G. Henaff, S. Marie // *Int. J. Fatigue.* – 2007. – **29**. – P. 549–564.
12. *Two scale damage model and related numerical issues for thermo-mechanical high cycle fatigue* / R. Desmorat, A. Kane, M. Seyedi, J. P. Sermage // *Eur. J. Mech. – A/Solids.* – 2007. – **26**. – P. 909–935.
13. *Ahmadi A. and Zenner H.* Simulation of microcrack growth for different load sequences and comparison with experimental results // *Int. J. Fatigue, Cumulative Fatigue Damage Conf., University of Seville, 2003.* – 2005. – **27**. – P. 853–861.
14. *Damage evaluation under thermal fatigue of a vertical target full scale component for the ITER divertor* / M. Missirlian, F. Escourbiac, M. Merola, A. Durocher, I. Bobin-Vastra, B. Schedler // *J. Nucl. Mater., Proceedings of the Twelfth Int. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-12).* – 2007. – 367–370, Part B. – P. 1330–1336.
15. *Thermal fatigue crack networks parameters and stability: an experimental study* / V. Maillot, A. Fissolo, G. Degallaix, S. Degallaix // *Int. J. Solids Struct., Micromechanics of Materials.* – 2005. – **42**. – P. 759–769.
16. *Kamaya M. and Taheri S.* A study on the evolution of crack networks under thermal fatigue loading // *Nucl. Eng. Des.* – 2008. – **238**. – P. 2147–2154.
17. *Malésys N., Vincent L., and Hild F.* A probabilistic model to predict the formation and propagation of crack networks in thermal fatigue // *Int. J. Fatigue.* – 2009. – **31**. – P. 565–574.
18. *Monte Carlo simulation of stress corrosion cracking on a smooth surface of sensitized stainless steel type 304* / K. Tohgo, H. Suzuki, Y. Shimamura, G. Nakayama, T. Hirano // *Corr. Sci.* – 2009. – **51**. – P. 2208–2217.
19. *Haddar N. and Fissolo A.* 2D simulation of the initiation and propagation of crack array under thermal fatigue // *Nucl. Eng. Des.* – 2005. – **235**. – P. 945–964.
20. *Haddar N., Fissolo A., and Maillot V.* Thermal fatigue crack networks: an computational study // *Int. J. Solids Struct., Micromechanics of Materials.* – 2005. – **42**. – P. 771–788.
21. *Kasahara N., Takasho H., and Yacumpai A.* Structural response function approach for evaluation of thermal striping phenomena // *Nucl. Eng. Des.* – 2002. – **212**. – P. 281–292.
22. *Assessment of lifetime of railway axle* / O. Yasniy, Y. Lapusta, Y. Pyndus, A. Soroachak, V. Yasniy // *Int. J. Fatigue, Recent Progress in the Understanding of Fatigue Crack Propagation.* – 2013. – **50**. – P. 40–46.
23. *Paris P. and Erdogan F.* A critical analysis of crack propagation laws // *J. Fluids Eng.* – 1963. – **85**. – P. 528–533.
24. *Pasternak I.* Doubly periodic arrays of cracks and thin inhomogeneities in an infinite magneto-electroelastic medium // *Eng. Anal. Bound. Elem.* – 2012. – **36**. – P. 799–811.
25. *Diagnostics of thermal fatigue cracks on continuous caster rolls surface* / P. Yasniy, P. Maruschak, I. Konovalenko, R. Bishchak // *Mechanika.* – 2011. – **17** (3). – P. 251–254.
26. *Klypachevs'kii V. V., Teslyuk M. M.* Graphic programming in thermal fatigue and fatigue strength tests // *Strength Mater.* – 2011. – **43**. – P. 101–108.
27. *Yasniy O., Maruschak P., Lapusta Y.* Probabilistic modeling of surface crack growth in a roll of continuous casting machine // *Int. J. Fract.* – 2011. – **172**. – P. 113–120.