

УДК 539.43

**П. Ясній, докт. техн. наук; Ю. Пиндус, канд. техн. наук;
В. Фостик; Т. Пиндус**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

МОДЕЛЮВАННЯ РОСТУ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ ПІСЛЯ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ РОЗТЯГУВАННЯМ-СТИСКОМ В АЛЮМІНІЄВОМУ СПЛАВІ Д16Т

Резюме. Проведено експериментальні дослідження й встановлено основні закономірності росту втомних тріщин (РВТ) за умов одноразового перевантаження та комплексного перевантаження розтягуванням-стиском у сплаві Д16Т. Отримано функціональну залежність для оцінювання мінімальної швидкості РВТ після перевантаження розтягуванням та розтягуванням-стиском. Запропоновано модель РВТ для умов комплексного перевантаження розтягуванням-стиском й отримано задовільне узгодження експериментальних і розрахункових даних РВТ в сплаві Д16Т.

Ключові слова: перевантаження розтягуванням, перевантаження стиском, втомна тріщина, ріст втомної тріщини.

P. Yasniy, Y. Pyndus, V. Fostyk, T. Pyndus

MODELING OF THE FATIGUE CRACK GROWTH AFTER OVERLOAD-UNDERLOAD IN ALUMINUM ALLOY D16T

Summary. Experimental investigations have been carried out and the main regularities of the fatigue crack growth (FCG) have been determined under single overload and complex overload – underload in the alloy D16T. It was found that the FCG stabilization area length after complex overload – underload is approximately equal to that after single tension overload of the same amplitude. It is caused by the fact, that on the crack edges plastic shrinkages are formed after tension overload, which decrease the crack opening range even after plastic area cracking.

As a result, the crack growth rate after reaching the calculated plastic area did not exceed completely the value of the FCG rate under stable load amplitude sufficient increase of the minimum FCG rate was determined, when the stress overload force was increased under the stable tension overload factor, load cycle asymmetry and constant amplitude loading. To predict the minimum FCG rate after overload – underload the Paris equation factor CV_{min} which changes depending on the overload – underload factors, was used.

Functional relationship of the underload factor effect on the minimum FCG rate after preliminary tension overload has been obtained, which is based on finding the factor CV_{min} . This equation is the basis of the known prediction model of the FCG rate after single tension overload in the case of the overload – underload.

The proposed equation allows to predict the minimal FCG rate at various stress ratios and taking into account the change of overload-underload factor. This relationship includes Walker equation and requires only one parametric coefficient to be determined and simple for engineering usage.

The proposed modified FCG model after overload – underload satisfies the description of the FCG experimental data in the alloy D16T. The FCG model in question does not take into account initial acceleration of the fatigue crack growth, which is not durable and does not affect sufficiently the FCG rate after the complex overload.

Key words: fatigue crack growth, overload, underload, fatigue life prediction.

Вступ та аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість елементів конструкцій (зокрема коренева частина крила літака) під час експлуатації працюють за комбінованого навантаження розтягуванням-стиском. Очевидними недоліками більшості моделей РВТ за нерегулярного навантаження є те, що вони не враховують

вплив ефектів перевантаження стиском на швидкість РВТ [1,2,3], припускаючи, що напруження, які виникають у зразку під час стиску, розподіляються рівномірно по всьому перерізу зразка. Тому важливо дослідити вплив перевантаження розтягуванням-стиском на швидкість РВТ.

Для прогнозування РВТ за умов перевантажень розтягуванням використовується модифікована модель Уілера [4]. Проте дана модель не враховує ділянки сповільнення швидкості РВТ після перевантаження розтягуванням до мінімальної швидкості затримки тріщини V_{\min} , що знижує достовірність прогнозування РВТ.

Також відома модифікована узагальнена модель Уіленборга, запропонована NASGRO [5]. Ця модель розширює узагальнений підхід Уіленборга на випадок зменшення пластичної зони після перевантаження стиском, під час подолання якої відбувається затримка швидкості РВТ. Недоліками цієї моделі є багато параметричних коефіцієнтів, що не мають фізичного змісту, та необхідність проведення великої кількості експериментів.

Було запропоновано методику прогнозування швидкості РВТ після одноразового перевантаження розтягуванням [2,6,7], засновану на визначенні мінімальної швидкості V_{\min} після одноразового перевантаження розтягуванням. Обчислено коефіцієнт максимального зменшення швидкості РВТ C_{01} як основної характеристики, що визначає V_{\min} після перевантаження розтягуванням. Проте відсутні дані щодо росту втомних тріщин за умови комплексного перевантаження розтягуванням-стиском.

Метою даної роботи є розроблення аналітично-експериментальної методики прогнозування РВТ в умовах перевантаження розтягуванням-стиском.

Експериментальні дослідження. Для дослідження взаємовпливу перевантажень розтягуванням-стиском використовували плоскі прямокутні зразки з центральною тріщиною, виготовлені з алюмінієвого сплаву Д16Т згідно з ГОСТом 25.506-85. Зразки моделюють панель обшивки крила транспортного літака з отвором під заклепку [8]. Креслення зразка, механічні властивості та хімічний склад металу наведено в праці [9]. Для вимірювання швидкості РВТ на робочій ділянці зразка по обидва боки від концентратора наносили розмітку у вигляді координатної сітки методом електрохімічного контурного травлення [10,11].

Зразки випробовували на сервогидравлічній машині СТМ-100 з керуючим ПК. Температура випробувань 293 К, частота навантаження 10 Hz, коефіцієнт асиметрії циклу за сталої амплітуди навантаження $R=P_{\min}/P_{\max}=0$, де P_{\min} , P_{\max} – найменше й найбільше зусилля циклу навантаження. Форма циклу навантаження – синусоїдна.

Зародження та підростання тріщини вимірювали за методикою [9], з використанням мікроскопа МБС-10. Для попередження випучування плоских зразків використовували захисний кожух [9].

До прикладання перевантажень швидкість РВТ стабілізували згідно з кінетичною діаграмою втомного руйнування (КДВР) матеріалу. Після перевантаження машину програмно переводили в режим регулярного циклічного навантаження з фіксованим розмахом коефіцієнта інтенсивності напруження (КІН) та коефіцієнтом R . Для забезпечення необхідної точності експерименту, відпрацьовані машиною зусилля перевантажень записували на жорсткий диск. На ділянці стрибкоподібного прискорення, подальшого зменшення швидкості тріщини і максимальної затримки тріщини після перевантажень приріст тріщини замірювали через (0,02–0,03 мм). Зі збільшенням (стабілізацією) швидкості РВТ дискретність замірів була прийнятною 0,1 мм. Приріст тріщини вимірювали до досягнення нею розмірів розрахункової пластичної зони l_{pz} циклу перевантаження розтягуванням:

$$l_{PZ} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{\max OL}}{\sigma_{0.2}} \right)^2, \quad (1)$$

де $K_{\max OL}$ – КІН перевантаження; $\sigma_{0.2}=318$ МПа – межа текучості матеріалу.
Коефіцієнт перевантаження розтягуванням визначали за формулою

$$Q_{ol} = \sigma_{ol} / \sigma_{\max}, \quad (2)$$

де σ_{ol} – максимальне напруження циклу перевантаження розтягуванням;

σ_{\max} – максимальне напруження циклу за сталої амплітуди навантаження.

Перевантаження стиском характеризували коефіцієнтом перевантаження стиском Q_{ul}

$$Q_{ul} = \sigma_{ul} / \sigma_{ol}, \quad (3)$$

де σ_{ul} – напруження перевантаження стиском.

Зразки перевантажували за схемами, що передбачали по чергове перевантаження розтягуванням, стиском та подальше навантаження зі сталою амплітудою. Значення напружень бруто за різних схем перевантажень наведено в табл.1.

Таблиця 1
Напруження бруто за перевантаження розтягуванням – стиском

σ_{ol} , МПа	σ_{ul} , МПа	Q_{ul}	σ_{ol} , МПа	σ_{ul} , МПа	Q_{ul}	σ_{ol} , МПа	σ_{ul} , МПа	Q_{ul}
124	0	0	145	0	0	167	0	0
	-75	-0,6		-85	-0,6		-102	-0,6
	-125	-1,0		-145	-1,0		-169	-1,0
	-179	-1,4		-203	-1,4		-230	-1,4

Швидкість РВТ після перевантажень розтягуванням-стиском досліджували в межах середньоамплітудної ділянки КДВР, за $Q_{ol}=1,4; 1,7; 2$ та $Q_{ul}= - 0,6; -1; -1,4$.

Результати досліджень та їх обговорення. Перевантаження розтягуванням-стиском спочатку істотно збільшують швидкість РВТ (рис.1) порівняно з одноразовим перевантаженням розтягуванням. Короткотривале зростання швидкості триває упродовж 20–170 циклів. Після періоду пришвидшення швидкість РВТ стрімко зменшується до V_{\min} . Потім, в міру подолання тріщиною сформованої перевантаженням пластичної зони, поступово зростає швидкість РВТ до значень швидкості за сталої амплітуди навантаження.

Слід зазначити, що довжина ділянки стабілізації після комплексних перевантажень розтягуванням-стиском приблизно дорівнювала ділянці після одноразового перевантаження розтягуванням тієї ж амплітуди. Це пов'язано з тим, що

на берегах тріщини після перевантаження розтягуванням формуються пластичні утяжки, які зменшують розмах відкриття тріщини навіть після проходження пластичної зони [12]. В результаті цього швидкість росту тріщини після подолання розрахункової пластичної зони повністю не досягала значення швидкості РВТ за сталої амплітуди навантаження. Встановлено суттєве збільшення швидкості V_{min} зі зменшенням коефіцієнта перевантаження стиском Q_{ul} (рис. 1).

Для оцінювання швидкості РВТ після перевантаження розтягуванням-стиском використовували коефіцієнт рівняння Періса $C_{V_{min}}$, який характеризує зменшення швидкості РВТ при $Q_{ol} = \text{const}$ і $Q_{ul} = \text{const}$ [13]. Параметр $C_{V_{min}}$ є аналогом коефіцієнта C_{ol} [2], що визначає максимальне зменшення швидкості РВТ після перевантаження розтягуванням. Залежності $C_{V_{min}}$ від Q_{ul} за сталих значень $Q_{ol} = 1,4; 1,7; 2$ зображено на рис.2. Виявлено, що при параметрах перевантаження розтягуванням $Q_{ol} = 2; Q_{ul} = 0$, коефіцієнт $C_{V_{min}}$ найменший, що свідчить про найбільшу затримку РВТ у випадку $C_{V_{min}} = C_{ol}$. Зменшення коефіцієнта перевантаження стиском Q_{ul} від 0 до -1,4 за сталого $Q_{ol} = 2$ призводить до поступового зростання $C_{V_{min}}$ до значення C_R , де C_R – коефіцієнт рівняння Періса, який залежить від R . Така закономірність зберігається при зміні Q_{ul} за $Q_{ol} = 1,7; 1,4$. При зменшенні Q_{ol} криві $Q_{ul} \sim C_{V_{min}}$ зміщуються вгору в бік C_R визначеного при $R = 0$ (рис.2, криві 2, 3). В таблиці 2 наведено залежності $C_{V_{min}}$ від параметрів перевантаження Q_{ol}, Q_{ul} .

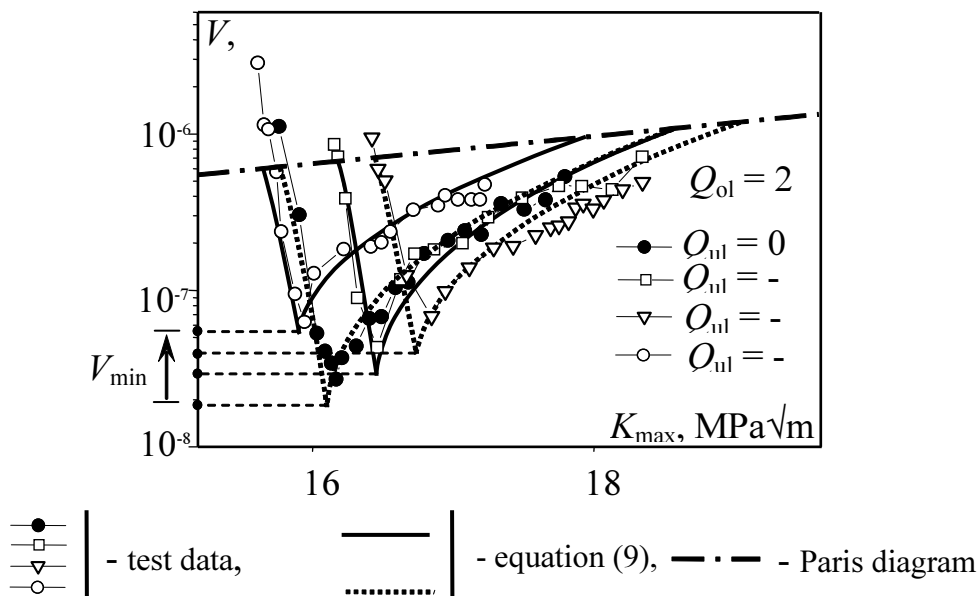


Рисунок 1. Швидкість РВТ у сплаві Д16Т після перевантажень розтягуванням-стиском

Figure 1. FCG rate in D16T alloy after tensile compression overload

Отже, $C_{V_{\min}}$ характеризує мінімальну швидкість РВТ V_{\min} залежно від Q_{ol} та Q_{ul} і дає можливість визначити V_{\min} після перевантаження розтягуванням, розтягуванням-стиском та за нерегулярного навантаження.

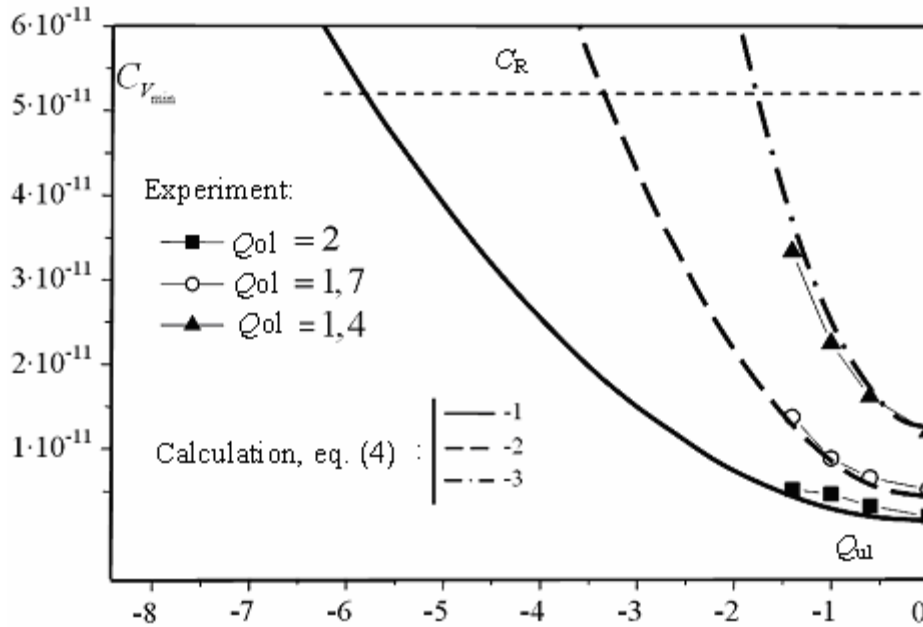


Рисунок 2. Залежність коефіцієнта CV_{\min} від Q_{ul} для сплаву Д16Т

Figure 2. Dependence of CV_{\min} factor on Q_{ul} for D16T alloy

Для описування отриманих експериментальних даних (рис. 2) запропоновано формулу

$$C_{V_{\min}} = C_{C_{V_{\min}}}^{ol} (1 + Q_{ul}^2), \quad (4)$$

де $C_{C_{V_{\min}}}^{ol}$ – параметр, що визначає мінімальну швидкість РВТ після перевантаження розтягуванням при $Q_{ul} = 0$, який аналогічний C_{ol} [2] та визначається за формулою

$$C_{C_{V_{\min}}}^{ol} = C_R - C_{ol}, \quad (5)$$

де C_{ol} визначається з рівняння

$$C_{ol} = C_R (1 - g_R^{(Q_{ol}-1)}), \quad (6)$$

де $g_R = 0,029$ – параметричний коефіцієнт.

Таблиця 2

Значення C_{Vmin} для різних параметрів перевантаження Q_{ol} , Q_{ul}

C_R ($R = \text{const}$)	Q_{ol}	C_{Vmin}				n
		($Q_{ul} = 0$)	($Q_{ul} = -0,6$)	($Q_{ul} = -1$)	($Q_{ul} = -1,4$)	
$5,21 \cdot 10^{-11}$	1,4	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$	$2,2 \cdot 10^{-11}$	$3,3 \cdot 10^{-11}$	3,40
	1,7	$5,2 \cdot 10^{-12}$	$6,6 \cdot 10^{-12}$	$8,9 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	
	2,0	$2,0 \cdot 10^{-12}$	$3,2 \cdot 10^{-12}$	$4,7 \cdot 10^{-12}$	$5,2 \cdot 10^{-12}$	

Залежність C_{ol} від Q_{ol} відображена на рис.3.

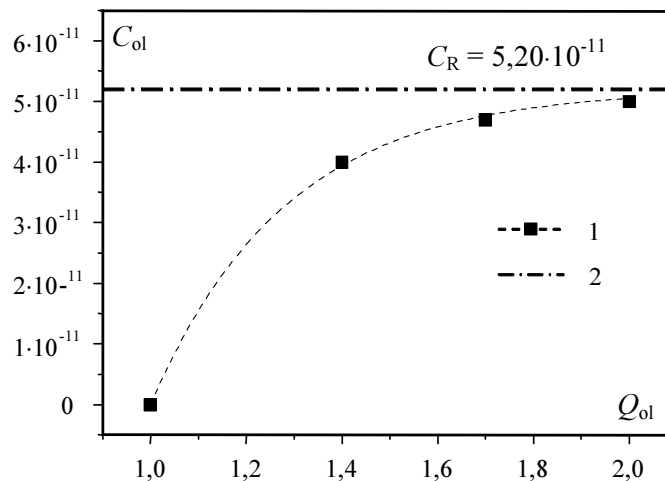


Рисунок 3. Залежність C_{ol} (1) та C_R (2) сплаву Д16Т від Q_{ol}

Figure 3. Dependence of C_{ol} (1) and C_R (2) of D16T alloy on Q_{ol}

Підставивши формули (5) і (6) у формулу (4), отримаємо

$$C_{Vmin} = C_R \cdot g_R^{(Q_{ol}-1)} (1 - Q_{ul}^2). \tag{7}$$

Цю залежність можна використовувати для знаходження мінімальної швидкості РВТ після перевантаження розтягуванням та розтягуванням-стиском за формулою

$$V_{min} = C_{Vmin} (K_{max} (1 - R))^n. \tag{8}$$

Опис експериментальних даних $Q_{ul} \sim C_{Vmin}$ формулою (7) наведено на рис.2. Формула 7 дає можливість визначити C_{Vmin} і в проміжних значеннях Q_{ol} та Q_{ul} , при яких експериментальні дослідження не проводились.

На рис.4 відображені експериментальні дані та розрахункові криві РВТ після перевантаження розтягуванням-стиском у зразках з алюмінієвого сплаву Д16Т при $Q_{ol} = 2$ та зміні Q_{ul} від 0 до -1.4.

Розрахункові криві (рис.4) отримані за методикою [2], в основу якої покладена залежність

$$V = C_R (K_{\max}^{eff} (1 - R))^n, \quad (9)$$

де K_{\max}^{eff} – максимальний ефективний КІН, який визначається за формулою

$$K_{\max}^{eff} = \sigma_{eff} \sqrt{\pi l} \times Y, \quad (10)$$

де σ_{eff} – ефективне напруження циклу за сталої амплітуди навантаження [2]; l – половина довжини тріщини; Y – поправкова функція, визначена за формулою [14].

Для врахування ефектів перевантаження стиском, $C_{V_{\min}}$ визначали за формулою (7). Отримані криві задовільно узгоджуються з експериментальними даними швидкості РВТ після комплексного перевантаження. Запропонована модель швидкості РВТ не враховує ефекту короткотривалого пришвидшення втомної тріщини, який суттєво не впливає на швидкість РВТ після комплексного перевантаження. Отримані залежності задовільно описують експериментальні дані при зменшенні швидкості РВТ до V_{\min} та подальшому поступовому зростанні швидкості за сталої амплітуди навантаження.

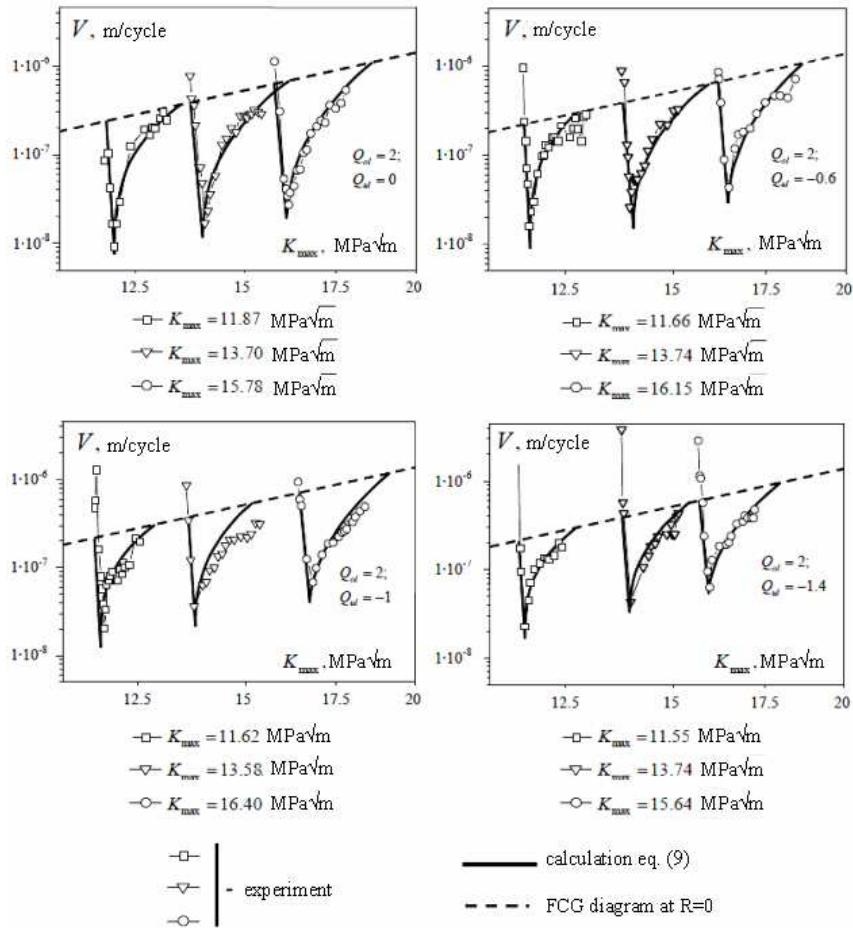


Рисунок 4. Залежності швидкості РВТ у сплаві Д16Т від K_{max} після перевантаження розтягуванням-стиском

Figure 4. Dependence of FCG rate in D16T alloy on K_{max} after tension-compression overload

Висновки. Досліджено основні закономірності РВТ в сплаві Д16Т після комплексного перевантаження розтягуванням-стиском. Отримано залежність $Q_{ul} = f(C_{Vmin})$ для сплаву Д16Т, яка дозволяє оцінити мінімальну швидкість РВТ після перевантаження розтягуванням та розтягуванням-стиском. Модифіковано відому модель оцінювання швидкості РВТ після перевантаження розтягуванням на випадок перевантаження розтягуванням-стиском. Отримані з використанням модифікованої моделі РВТ криві задовільно узгоджуються з експериментальними даними швидкості РВТ в сплаві Д16Т.

Conclusions. The basic laws of fatigue crack growth rate in D16T aluminum alloy after complex tension-compression overload were investigated. Functional dependence $Q_{ul} = f(C_{Vmin})$, which allows to evaluate the minimum fatigue crack growth after tension and tension-compression overload was obtained for D16T aluminum alloy. Available model of FCG rate prediction after tension overload was modified for the case of tension-compression overload. Obtained using the modified model FCG curves are in satisfactory agreement with the experimental FCG rate data for D16T aluminum alloy.

Список використаної літератури

1. Wheeler, O.E. Spectrum loading and crack growth [Text] / O.E. Wheeler // Journal of basic engineering. – ASME. – 1972. – P.181–186.

2. Пиндус, Ю.І. Модель росту втомної тріщини після одноразового перевантаження [Текст] / Ю.І. Пиндус, П.В. Ясній // Вісник Житомирського технічного інституту. – 2002. – № 1. – С.28–36.
3. Macha, D.E. Effects of Gas turbine engines load spectrum variables on crack propagation. Effect of load spectrum variables on fatigue crack initiation and propagation [Text] / D.E. Macha., A.F. Grandt., B.J. Wicks // ASTM STP. – 1980. – №714. – P.108–127.
4. Philip, A. Prediction of crack growth in 350 WT steel subjected to constant amplitude with over- and under-loads using a modified wheeler approach [Text] / P.A. Rushton., F. Taheri // Marine Structures. – 2003. – №16. – С.517–539.
5. NASGRO Reference Manual, Version 4.02, Southwest Research Institute, 2003.
6. Ясній, П.В. Вплив одноразового перевантажування на ріст втомної тріщини в сплаві Д16Т [Текст] / П.В. Ясній, Ю.І. Пиндус. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – №2. – С.57–60.
7. Пиндус, Ю.І. Прогнозування швидкості росту втомної тріщини при нерегулярному навантаженні в алюмінієвому сплаві Д16Т [Текст] / Ю.І. Пиндус // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2002. – Т.7, №1. – С.11–19.
8. РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 95 с.
9. Ясній, П. Вплив асиметрії циклу навантаження на характеристики циклічної тріщиностійкості алюмінієвого сплаву Д16Т [Текст] / П. Ясній, Ю. Пиндус, В. Фостик // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2007 – Т.12, №1 – С.7–12.
10. Пат. 25367 України. МПК G 01 B 11/16. Спосіб нанесення на поверхню гладких зразків ділильних сіток [Текст] / П.В. Ясній, Ю.І. Пиндус, В.Б. Фостик. Заявник та патентокористувач – Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя. – №200702400; заяв. 05.03.2007; опубл. 10.08.07, Бюл. №12.
11. Пат. 33067 України. МПК G 01 N 1/00. Спосіб розмічування поверхонь металевих плоских зразків [Текст] / П.В. Ясній, Ю.І. Пиндус, П.О. Марущак, В.Б. Фостик. Заявник та патентокористувач – Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя. – №200801367; заяв. 04.02.2008; опубл. 10.06.08, Бюл. №11.
12. Makabe, C. Effects of surface deformation and crack closure on fatigue crack propagation after overloading and unloading [Text] / C. Makabe, A. Purnowidodo, A.J. McEvily // International Journal of Fatigue. – 2004. – Vol.26. – P.1341–1348.
13. Ясній, П. Оцінка мінімальної швидкості росту втомної тріщини після комбінованих перевантажень розтягуванням-стиском в алюмінієвому сплаві Д16Т [Текст] / П. Ясній, Ю. Пиндус, В. Фостик // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2009. – Т.14, №2. – С.7–14.
14. Johnson, W.S. Multi-Parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth [Text] / W.S. Johnson // Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading. – Philadelphia(Pa). – ASTM STP. – 1981. – №748. – P.85–102.

Отримано 15.01.2015