

УДК 539.43

ОЦІНКА МІНІМАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ РОСТУ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ ПІСЛЯ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ РОЗТЯГУВАННЯМ-СТИСКОМ З УРАХУВАННЯМ АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ НАВАНТАЖЕННЯ

П.В. Ясній¹

д-р техн. наук,

Ю.І. Пиндус¹

канд. техн. наук,

В.Б. Фостик¹¹*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

На основі експериментальних досліджень встановлено закономірності росту втомних тріщин за умов комплексних перевантажень розтягуванням-стиском в сплаві Д16Т. Отримано функціональну залежність для оцінки мінімальної швидкості росту втомних тріщин після перевантаження розтягуванням та розтягуванням-стиском, яка враховує асиметрію циклу навантаження.

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

Вступ та аналіз останніх досліджень. 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.

Відомі моделі, зокрема модифікована модель Уїлера [4], які описують швидкість РВТ в умовах комбінування перевантажень стиском та розтягуванням. Проте дана модель не враховує ділянки сповільнення швидкості РВТ після перевантаження розтягуванням до мінімальної швидкості затримки тріщини V_{\min} , що знижує достовірність прогнозування РВТ.

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

Мінімальна швидкість після одноразового перевантаження V_{\min} набула застосування в запропонованих [6, 7] модифікаціях моделей РВТ після

одноразових перевантажень, які базуються на концепції взаємодії пластичних зон. Автори [6] вказують на складність оцінки V_{\min} .

V_{\min} суттєво впливає на кількість циклів затримки РВТ, оскільки може набувати на порядки меншого значення (сягаючи порогових значень) у порівнянні з отриманою за сталої амплітуди навантаження швидкістю РВТ. Тому, достовірна оцінка V_{\min} дасть змогу підвищити точність та вдосконалити підходи щодо прогнозування РВТ після одноразових перевантажень розтягом.

Постановка задачі та мета досліджень. У працях [8, 9, 10] запропоновано методику прогнозування швидкості РВТ після одноразового перевантаження розтягуванням, яка заснована на визначенні мінімальної швидкості V_{\min} після одноразового перевантаження розтягуванням, і обчисленні коефіцієнта максимального зменшення швидкості РВТ C_{ol} , як основної характеристики, що визначає V_{\min} після перевантаження розтягуванням. Проте, задача достовірної оцінки швидкості РВТ за умови комплексних перевантажень розтягуванням-стиском не є вирішеною і вимагає подальших досліджень.

Метою даної роботи є розроблення аналітично - експериментальної методики оцінки мінімальної швидкості затримки РВТ V_{\min} після перевантажень розтягуванням та розтягуванням-стиском з урахуванням асиметрії циклу сталоамплітудного навантаження у сплаві Д16Т.

Експериментальні дослідження. Для дослідження швидкості РВТ за циклічного навантаження сталої амплітуди та з урахуванням перевантажень розтягуванням-стиском використовували плоскі прямокутні зразки з центральною тріщиною, виготовлені з алюмінієвого сплаву Д16Т, згідно ГОСТ 25.506-85. Зразки моделюють панель обшивки крила транспортного літака з отвором під заклепку [11]. Креслення зразка, механічні властивості та хімічний склад металу наведені в праці [12]. Для вимірювання швидкості РВТ на робочій ділянці зразка по обидва боки від концентратора, наносили розмітку у вигляді координатної сітки методом електрохімічного контурного травлення [13, 14].

Зразки випробовували на сервогідролінійній машині СТМ-100 з керуючим ПК. Температура випробувань 20°C , частота навантаження 10 Гц, коефіцієнт асиметрії циклу за сталої амплітуди навантаження $R = P_{\min}/P_{\max} = 0; 0,2; 0,4; 0,6$, де P_{\min} , P_{\max} - найменше і найбільше зусилля циклу навантаження. Форма циклу навантаження - синусоїдна.

Зародження та підростання тріщини вимірювали за методикою [12], з використанням мікроскопа МБС-10. Для попередження випучування плоских зразків при перевантаженнях стиском використовували захисний кожух [15].

До прикладання перевантажень швидкість РВТ стабілізували до значень, що відповідають кінетичній діаграмі втомного руйнування (КДВР) матеріалу. Після перевантаження машину програмно переводили в режим

циклічного навантаження сталюї амплітуди з фіксованим розмахом коефіцієнта інтенсивності напруження (КІН) та коефіцієнтом асиметрії R . Для забезпечення необхідної точності експерименту, відпрацьовані машиною зусилля перевантажень записували на жорсткий диск ПК. На ділянці стрибкоподібного прискорення, подальшого зменшення швидкості тріщини і максимальної затримки тріщини після перевантажень, приріст тріщини заміряли через (0,02 - 0,03 мм). Із збільшенням (стабілізацією) швидкості РВТ дискретність замірів збільшували до 0,1 мм. Прирости тріщини після перевантажень вимірювали до досягнення нею розмірів розрахункової пластичної зони l_{pz} циклу перевантаження розтягуванням за умов плоского напруженого стану:

$$l_{pz} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{ol}}{\sigma_{0,2}} \right)^2, \quad (1)$$

де K_{ol} – максимальне значення КІН циклу перевантаження; $\sigma_{0,2}=318$ МПа - межа текучості досліджуваного сплаву.

Коефіцієнт перевантаження розтягуванням визначали за формулою:

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

де σ_{ol} - максимальне напруження циклу перевантаження розтягуванням; σ_{max} - максимальне напруження циклу за сталюї амплітуди навантаження.

Перевантаження стиском характеризували коефіцієнтом перевантаження стиском Q_{ul} :

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

де σ_{ul} - напруження перевантаження стиском.

Зразки перевантажували за схемами, що передбачали почергове перевантаження розтягуванням, стиском та подальше навантаження із сталюю амплітудою. Значення напружень бруто за різних схем перевантажень подано у таблиці 1.

Таблиця 1

Напруження бруто перевантажень 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 середньоамплітудних ділянок КДВР, при $Q_{01} = 1,4; 1,7; 2$ та $Q_{ul} = -0,6; -1; -1,4$.

Результати досліджень та їх обговорення. Експериментальні дані швидкості РВТ за циклічного навантаження сталої амплітуди у подвійних логарифмічних координатах подано на рис. 1. Для опису експериментальних даних використовували рівняння Уокера [16], записане у вигляді:

$$V = C_R \cdot K_{\max}^n, \quad (4)$$

де C_R - коефіцієнт, який залежить від асиметрії циклу навантаження і визначається як:

$$C_R = C_{R=0} \cdot (1-R)^{m \cdot n}, \quad (5)$$

де $C_{R=0} = 5,2 \cdot 10^{-11}$ і $n = 3,4$ стали рівняння (4), які визначали при $R = 0$; $m = 0,6$ - параметр рівняння Уокера, який визначає вплив асиметрії циклу навантаження на швидкість РВТ у сплаві Д16Т.

Перевантаження розтягуванням-стиском спочатку істотно збільшують швидкість РВТ (рис. 2), як і випадку одноразового перевантаження розтягуванням. Короткотривале зростання швидкості триває упродовж 20-170 циклів. Після періоду пришвидшення швидкість РВТ стрімко зменшується до деякого значення V_{\min} . Потім, по мірі подолання тріщиною сформованої перевантаженням пластичної зони, поступово зростає

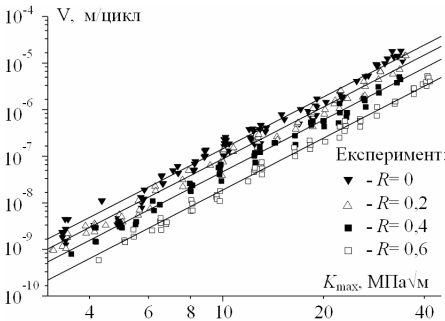


Рис. 1. КДВР сплаву Д16Т за додатніх асиметрій циклу навантаження та їх апроксимація рівнянням Уокера (4)

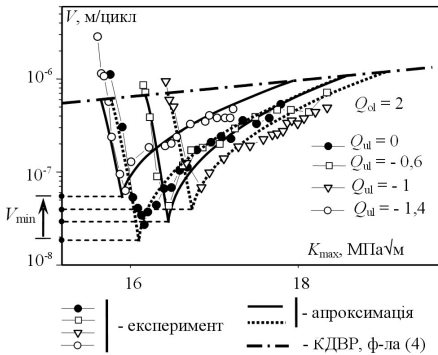


Рис. 2. Швидкість РВТ у сплаві Д16Т після перевантажень розтягуванням-стиском за асиметрії циклу навантаження $R=0$

швидкість РВТ до значень, що відповідають КДВР за сталої амплітуди навантаження.

Слід зазначити, що довжина ділянки затримки РВТ після комплексних перевантажень розтягуванням-стиском, приблизно дорівнювала ділянці

після одноразового перевантаження розтяганням тієї ж амплітуди. Це пов'язано із тим, що на берегах тріщини, після перевантаження розтяганням формуються пластичні утяжки, які зменшують розмах розкриття тріщини навіть після проходження пластичної зони [17]. В результаті цього, швидкість росту тріщини після подолання розрахункової пластичної зони повністю не досягає значення швидкості РВТ за сталої амплітуди навантаження.

Експериментально встановлено, що мінімальна швидкість РВТ V_{\min} суттєво збільшується із зростанням абсолютного значення коефіцієнта перевантаження стиском Q_{ul} (рис. 2).

Дослідження методом скінчених елементів напружено-деформованого стану спереду вістря тріщини [15] у пружно-пластичній постановці свідчать, що цей ефект збільшення V_{\min} спричинений зворотною пластичною деформацією матеріалу спереду вістря тріщини при перевантаженні стиском та зменшенням залишкових стискальних напружень, які були спричинені первинним перевантаженням розтягом (рис. 3 г, е).

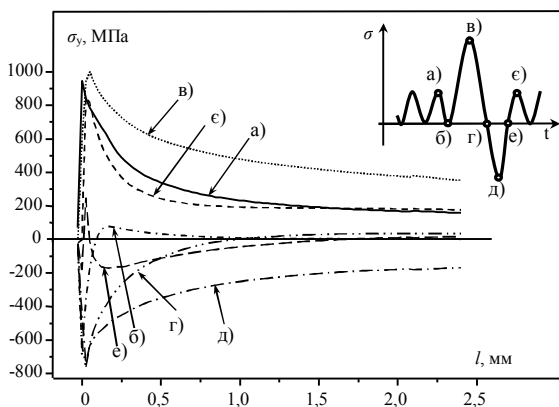


Рис. 3. Розподіл нормальних напружень спереду вістря тріщини до та після перевантажень розтягом-стиском при максимумі (а) і мінімумі (б) циклу сталоамплітудного навантаження до перевантаження розтягом; перевантаженні розтягом (в); розвантаженні після перевантаження розтягом (г); перевантаженні стиском (д); розвантаженні після перевантаження стиском (е); максимумі циклу сталоамплітудного навантаження після перевантаження стиском (е)

Для оцінки мінімальної швидкості РВТ після перевантаження розтяганням-стиском у рівнянні (4) застосували коефіцієнт $C_{V_{\min}}$, який характеризує зменшення швидкості РВТ при $Q_{ol} = \text{const}$ і $Q_{ul} = \text{const}$ [15]:

$$V_{\min} = C_{V_{\min}} \cdot K_{\max}^n \quad (6)$$

Слід відмітити, що у залежності (6) коефіцієнт n залишається сталим, тобто, отримані з її використанням криві (при $Q_{ol} = \text{const}$ і $Q_{ul} = \text{const}$) залишаються паралельними середньоамплітудній ділянці КДВР побудованій за рівнянням Уокера (4). Такий підхід базується на експериментально отриманих закономірностях впливу перевантажень на мінімальну швидкість РВТ [8, 10, 15] у сплавах Д16Т та Д16ЧТ.

Графічно залежності $C_{V_{\min}}$ від Q_{ul} за сталих значень $Q_{ol} = 1,4; 1,7; 2$ зображено на рис 4. Виявлено, що за відсутності наступного перевантаження стиском, наприклад при $Q_{ol} = 2$ і $Q_{ul} = 0$ коефіцієнт $C_{V_{\min}}$ найменший (рис. 4), що свідчить про найбільшу затримку РВТ у цьому випадку. Збільшення абсолютного значення коефіцієнту 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 (горизонтальна пунктирна лінія (рис. 4)). Така закономірність зберігається при зміні Q_{ul} за $Q_{ol} = 1,7; 1,4$. Зменшення коефіцієнта перевантаження розтягом Q_{ol} призводить до зміщення кривих $Q_{ul} \sim C_{V_{\min}}$ угору (рис. 4, криві 2, 3), наближаючись до коефіцієнта C_R рівняння Уокера, що свідчить про послаблення ефекту затримки РВТ.

Описані закономірності впливу перевантажень на швидкість РВТ зберігаються також за асиметрій циклу навантаження $R = 0,2; 0,4; 0,6$.

В таблиці 2 подано значення $C_{V_{\min}}$ у залежності від коефіцієнтів перевантаження Q_{ol} та Q_{ul} .

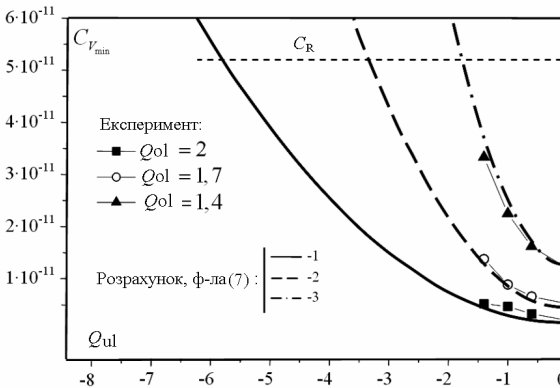


Рис. 4. Залежність коефіцієнта $C_{V_{\min}}$ від коефіцієнтів перевантаження розтягом Q_{ol} та стиском Q_{ul} за асиметрії циклу навантаження $R=0$

Таким чином, $C_{V_{\min}}$ є параметром, який характеризує мінімальну швидкість РВТ V_{\min} залежно від Q_{ol} та Q_{ul} і дає змогу визначати V_{\min} після перевантажень розтягуванням та розтягуванням-стиском.

Таблиця 2

Значення $C_{V\min}$ для різних коефіцієнтів перевантаження Q_{ol} , Q_{ul}
за асиметрії $R=0$

$C_{R=0}$	Q_{ol}	$C_{V\min}$				n
		$(Q_{ul}=0)$	$(Q_{ul}=-0,6)$	$(Q_{ul}=-1)$	$(Q_{ul}=-1,4)$	
$5,2 \cdot 10^{-11}$	1,4	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$	$2,2 \cdot 10^{-11}$	$3,3 \cdot 10^{-11}$	3,4
	1,7	$5,2 \cdot 10^{-12}$	$6,6 \cdot 10^{-12}$	$8,9 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	
	2,0	$2,0 \cdot 10^{-12}$	$3,2 \cdot 10^{-12}$	$4,7 \cdot 10^{-12}$	$5,2 \cdot 10^{-12}$	

Для опису отриманих експериментальних даних (рис. 4) запропоновано формулу:

$$C_{V\min} = C_{V\min}^{ol} \left(1 + (Q_{ul} / (1 - R))^2 \right), \quad (7)$$

де $C_{V\min}^{ol}$ – значення, яке приймає $C_{V\min}$ після перевантаження розтягуванням та за відсутності перевантаження стиском $Q_{ul} = 0$:

$$C_{V\min}^{ol} = C_R - C_{ol}, \quad (8)$$

де C_{ol} - коефіцієнт, який визначає зменшення швидкості РВТ після одно-разового перевантаження розтягом до мінімального значення з урахуванням асиметрії циклу навантаження [10]:

$$C_{ol} = C_R \left(1 - (g_0 (1 - R))^{(Q_{ol}-1)} \right), \quad (9)$$

де $g_0 = 0,038$ - параметричний коефіцієнт за асиметрії $R = 0$ для сплаву Д16Т та Д16чТ.

Підставивши (8) і (9) у формулу (7) отримаємо:

$$C_{V\min} = C_R \cdot (g_0 (1 - R))^{(Q_{ol}-1)} \cdot \left(1 + (Q_{ul} / (1 - R))^2 \right). \quad (10)$$

З урахуванням (5) і (10) у залежності (6) можна записати:

$$V_{\min} = C_0 (K_{\max} (1 - R)^m)^n \cdot (g_0 (1 - R))^{(Q_{ol}-1)} \cdot \left(1 + (Q_{ul} / (1 - R))^2 \right). \quad (11)$$

Слід відмітити, що отримана залежність (11) містить рівняння Уокера, а також враховує коефіцієнти перевантаження розтягом, стиском та асиметрію циклу навантаження сталої амплітуди при якій здійснюються перевантаження. Окрім параметрів рівняння Уокера залежність (11) містить лише один параметричний коефіцієнт g_0 , методика визначення якого подана у працях [9, 10].

Отриману залежність використали для знаходження мінімальної швидкості РВТ після перевантажень та розтягуванням-стиском. Деякі із результатів розрахунків V_{\min} зображені на рис. 5 та рис. 6.

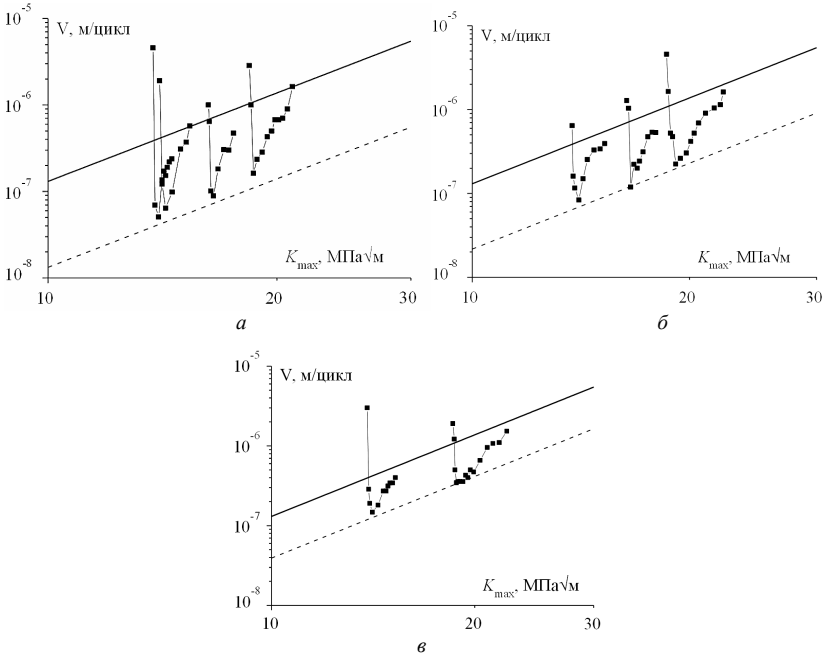


Рис. 5. Швидкість РВТ після перевантажень розтягуванням-стиском із $Q_{ol} = 1,7$ та: а) $Q_{ul} = 0$; б) $Q_{ul} = -0,6$; $Q_{ul} = -1,4$ в межах середньоамплітудної ділянки КДВР за асиметрії циклу навантаження $R = 0$ —■— - експериментальні дані; --- - мінімальна швидкість V_{min} (11); — - КДВР (4)

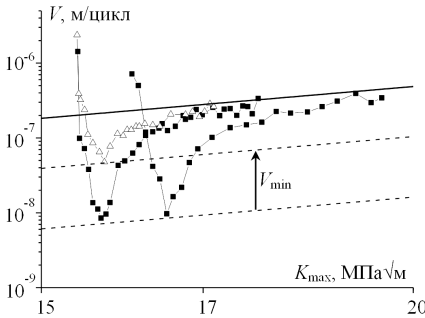


Рис. 6. Швидкість РВТ після перевантажень розтягуванням та розтягуванням-стиском в межах середньоамплітудної ділянки КДВР за асиметрії циклу навантаження $R = 0,4$ —■— - швидкість РВТ після перевантаження розтягуванням із $Q_{ol} = 2$; —△— - швидкість РВТ після перевантаження розтягуванням-стиском із $Q_{ol} = 2$ та $Q_{ul} = -1,4$; --- - мінімальна швидкість V_{min} (11); — - КДВР (4)

З рис. 5 (б, в) та рис. 6 видно, що розрахункові криві V_{\min} (11) зміщуються вгору із збільшенням абсолютного значення коефіцієнта перевантаження стиском Q_{ul} , що задовільно узгоджується з експериментальними даними. Це свідчить про можливість застосування залежності (11) у моделях РВТ після перевантажень розтягуванням та розтягуванням-стиском, для оцінки необхідного рівня перевантаження розтягуванням для зупинки росту тріщини чи досягнення нею порогових значень швидкості РВТ, а також для оцінки необхідного рівня перевантаження стискуванням для усунення ефекту затримки РВТ після перевантаження розтягуванням.

Разом з тим, попри зростання мінімальної швидкості РВТ із збільшенням абсолютного значення коефіцієнта перевантаження стиском, тривалість затримки РВТ не зменшується (рис. 6). Це свідчить про те, що перевантаження стиском зменшують залишкові стискальні напруження (рис. 3 г, е) і не впливають на довжину зони затримки РВТ (довжину зони пластичних деформацій) спереду вістря тріщини.

Висновки. Досліджено основні закономірності впливу комплексних перевантажень розтягуванням-стиском на мінімальну швидкість РВТ в сплаві Д16Т. Виявлено, що перевантаження стиском, які здійснюються після перевантажень розтягом призводять до збільшення мінімальної швидкості РВТ внаслідок часткового усунення залишкових стискальних напружень спереду вістря тріщини, але не зменшують довжини зони затримки (пластичної зони спереду вістря тріщини).

Отримано функціональну залежність, яка дозволяє оцінити мінімальну швидкість РВТ у сплаві Д16Т після перевантажень розтягуванням та розтягуванням-стиском і враховує коефіцієнти перевантаження розтягом, стиском та асиметрію циклу навантаження.

У перспективі планується використання отриманої залежності для розробки моделі РВТ після перевантажень розтягом, розтягуванням-стискуванням та за випадкового знакомінного циклічного навантаження

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *O.E. Wheeler.* Spectrum loading and crack growth/ O.E. Wheeler // Journal of basic engineering. – ASME. – 1972. – P. 181-186.
2. *Johnson W. S.* Multi-Parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth // Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading. - Philadelphia(Pa). - ASTM STP. – 1981. - № 748. - P. 85-102.
3. *D.E. Macha., A.F. Grandt., B.J. Wicks.* Effects of Gas turbine engines load spectrum variables on crack propagation // Effect of load spectrum variables on fatigue crack initiation and propagation. - ASTM STP. – 1980. – № 714. - P. 108–127.
4. *Rushton P.A., Taheri F.* Prediction of crack growth in 350 WT steel subjected to constant amplitude with over- and under-loads using a modified wheeler approach // Marine Structures. – 2003. - № 16. – С. 517-539.
5. NASGRO Reference Manual, Version 4.02, Southwest Research Institute, 2003.

6. *Ph. Darcis, N. Recho.* Fatigue Reliability Analysis of Overload effects in Welded Joints Including Crack Initiation and Plastic Zone as Random Variables // Fatigue Testing and Analysis Under Variable Amplitude Loading Conditions, ASTM STP, West Conshocken, PA. - Vol. 1439. – 2005. – P. 492-505.
7. *Kim J.-K., Shim D.-S.* A statistical approach for predicting the crack retardation due to a single tensile overload // International Journal of Fatigue. – 2003. – Vol. 25. – No.4. - p. 335–342.
8. *П.В. Ясній, Ю.І. Пиндус.* Вплив одноразового перевантаження на ріст втомної тріщини в сплаві Д16Т // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – №2. – С. 57–60.
9. *Пиндус Ю.І.* Прогнозування швидкості росту втомної тріщини при нерегулярному навантаженні в алюмінієвому сплаві Д16Т // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - 2002. - Т.7. - №1. - С.11-19.
10. *Пиндус Ю.І, Ясній О.П., Фостик В.Б., Пиндус Т.Б.* Прогнозування мінімальної швидкості росту втомних тріщин після одноразових перевантажень розтягом // Автомобільний транспорт. – ХНАДУ, 2015. - № 35. – С 41-47.
11. 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.
12. *П. Ясній, Ю. Пиндус, В. Фостик.* Вплив асиметрії циклу навантаження на характеристики циклічної трещиностійкості алюмінієвого сплаву Д16Т // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - 2007 - Т.12 - №1 - С. 7-12.
13. Пат. 25367 України. МПК G 01 B 11/16. Спосіб нанесення на поверхню гладких зразків ділільних сіток / *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.
14. Пат. 33067 України. МПК G 01 N 1/00. Спосіб розмічування поверхонь металевих плоских зразків / *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.
15. *Ясній П., Пиндус Ю., Фостик В., Галуцак О.* Оцінка мінімальної швидкості росту втомної тріщини після комбінованих перевантажень розтягом-стиском // Вісник ТНТУ. — 2011. — Спецвипуск — частина 2. — С.184-195. — (механіка та матеріалознавство).
16. *K. Walker.* The Effect of Stress Ratio During Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum // Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life. - ASTM STP 462. – 1970. - P. 1-14.
17. *C. Makabe, A. Purnowidodo, A.J. McEvily.* Effects of surface deformation and crack closure on fatigue crack propagation after overloading and underloading // International Journal of Fatigue. – 2004. – Vol.26. – P. 1341-1348.

REFERENCES

1. *O.E. Wheeler.* Spectrum loading and crack growth/ O.E. Wheeler // Journal of basic engineering. – ASME. – 1972. – P. 181-186.
2. *Johnson W. S.* Multi-Parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth // Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading.- Philadelphia(Pa). - ASTM STP. – 1981. - № 748. - P. 85-102.
3. *D.E. Macha., A.F. Grandt., B.J. Wicks.* Effects of Gas turbine engines load spectrum variables on crack propagation // Effect of load spectrum variables on fatigue crack initiation and propagation. - ASTM STP. – 1980. – № 714. - P. 108–127.
4. *Rushton P.A., Taheri F.* Prediction of crack growth in 350 WT steel subjected to constant amplitude with over- and under-loads using a modified wheeler approach // Marine Structures. – 2003. - № 16. – С. 517-539.
5. NASGRO Reference Manual, Version 4.02, Southwest Research Institute, 2003.

6. *Ph. Darcis, N. Recho.* Fatigue Reliability Analysis of Overload effects in Welded Joints Including Crack Initiation and Plastic Zone as Random Variables // *Fatigue Testing and Analysis Under Variable Amplitude Loading Conditions*, ASTM STP, West Conshocken, PA. - Vol. 1439. – 2005. – P. 492-505.
7. *Kim J.-K., Shim D.-S.* A statistical approach for predicting the crack retardation due to a single tensile overload // *International Journal of Fatigue*. – 2003. – Vol. 25. – No.4. - p. 335–342.
8. *P.V. Yasniy, Yu.I. Pyndus.* Vplyv odnorazovogo perevantazhuvannya na rist vtomnoyi trishchyny v splavi D16T (Effect of single overload on fatigue crack growth in D16T alloy) // *Fiz.–him. mehanika materialiv*. – 2002. – No2. – P. 57–60.
9. *Pyndus Yu.I.* Prohnozuvannya shvydkosti rostu vtomnoi trishchyny pry nerekulirnomu navantazhenni v aluminiiievomu splavi D16T (Prediction of fatigue crack growth rate at variable amplitude loading in aluminum alloy D16T) // *Visnyk Ternopil'skoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu*. - 2002. - Vol.7. – No.1. - P.11-19.
10. *Pyndus Yu.I, Yasni O.P., Fostyk V.B., Pyndus T.B.* Prohnozuvannya minimalnoi shvydkosti rostu vtomnykh trishchyn pislia odnorazovykh perevantazhen roztiatom (Prediction of minimal fatigue crack growth rate after a single overload by tension) // *Avtomobilnyi transport*. – KhNADU, 2015. – No. 35. – P. 41-47.
11. RD 50-345-82. Metodicheskiye ukazaniya. Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody mekhanicheskikh ispytany metallov. Opredeleniye kharakteristik treshchinostoykosti (vyazkosti razrusheniya) pri tsiklicheskom nagruzhenni. (Methodical instructions. Calculations and tests on strength. Methods of mechanical testing of metals. Determination of crack resistance properties (fracture toughness) under cyclic loading.) – M.: Izd-vo standartov, 1983. – 95 pp.
12. *P. Yasni, Yu. Pyndus, V. Fostyk.* Vplyv asymetrii tsykladu navantazhenni na kharakterystyky tsyklichnoi trishchynostiivosti aluminiiievoho splavu D16T (Effect of load ratio on fatigue crack growth resistance properties of aluminum alloy D16T) // *Visnyk Ternopil'skoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu*. - 2007 - Vol.12 – No.1 - P. 7-12.
13. Pat. 25367 Ukrainy. MPK G 01 B 11/16. Sposib nanesenni na poverkhniiu hladkykh zrazkiv dilylnykh sitok (The method of separating grids etching on the surface of specimens) / P.V. Yasni, Yu.I. Pyndus, V.B. Fostyk, zaiavnyk ta patentokorystuvach Ternopil'skyi derzhavnyi tekhnichnyi universytet imeni Ivana Puliuia. - № 200702400; zaiav. 05.03.2007; opubl. 10.08.07, Biul. №12.
14. Patent 33067 Ukrainy. MPK G 01 N 1/00. Sposib rozmichuvannya poverkhon metalovykh ploskykh zrazkiv (The method of marking of metal specimen's flat surfaces) / P.V. Yasni, Yu.I. Pyndus, P.O. Marushchak, V.B. Fostyk, zaiavnyk ta patentokorystuvach Ternopil'skyi derzhavnyi tekhnichnyi universytet imeni Ivana Puliuia. - № 200801367; zaiav. 04.02.2008; opubl. 10.06.08, Biul. №11.
15. *Yasni P., Pyndus Yu., Fostyk V., Halushchak O.* Otsinka minimalnoi shvydkosti rostu vtomnoi trishchyny pislia kombinovanykh perevantazhen roztiatom-styskom (Assessment of minimal fatigue crack growth rate after overload-underload) // *Visnyk TNTU*. — 2011. — Spetsvyпуск — chastyna 2. — P.184-195. — (mekhanika ta materialoznavstvo).
16. *K. Walker.* The Effect of Stress Ratio During Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum // *Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life*. - ASTM STP 462. – 1970. - P. 1-14.
17. *C. Makabe, A. Purnowidodo, A.J. McEvily.* Effects of surface deformation and crack closure on fatigue crack propagation after overloading and underloading // *International Journal of Fatigue*. – 2004. – Vol.26. – P. 1341-1348.

Yasniy P.V., Pyndus Yu.I., Fostyk V.B.

ESTIMATION OF MINIMAL FATIGUE CRACK GROWTH RATE AFTER OVERLOAD-UNDERLOAD AT DIFFERENT STRESS RATIOS

Basing on experimental investigations the main regularities of the fatigue crack growth (FCG) under single overload and complex overload - underload in the alloy D16T have been determined. Functional relationship of the underload factor effect on the minimum FCG rate after preliminary tension overload has been obtained. The proposed equation allows to predict the minimal FCG rate at various stress ratios and taking into account the change of overload-underload factor.

Keywords: overload, underload, fatigue crack, fatigue crack growth, crack growth retardation.

Ясний П.В., Пындус Ю.И., Фостык В.Б.

ОЦЕНКА МИНИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ПОСЛЕ ПЕРЕГРУЗОК РАСТЯЖЕНИЕМ-СЖАТИЕМ С УЧЕТОМ АСИММЕТРИИ ЦИКЛОВ НАГРУЖЕНИЯ

Основываясь на экспериментальных исследованиях установлены закономерности роста усталостных трещин в условиях комплексных перегрузок растяжением-сжатием в сплаве Д16Т. Получено функциональную зависимость для оценки минимальной скорости роста трещин после перегрузки растяжением и растяжением-сжатием, которая учитывает асимметрию цикла нагружения.

Ключевые слова: перегрузка растяжением, перегрузка сжатием, усталостная трещина, рост усталостной трещины, задержка роста трещины.

Інформація для реферативного журналу:

Ясний П.В., Пындус Ю.И., Фостык В.Б. **Оцінка мінімальної швидкості росту втомної тріщини після перевантажень розтягуванням-стиском з урахуванням асиметрії циклу навантаження // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2015. – Вип. 94. – С. 231 – 243.**

На основі експериментальних досліджень встановлено закономірності росту втомних тріщин за умов комплексних перевантажень розтягуванням-стиском в сплав Д16Т. Отримано функціональну залежність для оцінки мінімальної швидкості росту втомних тріщин після перевантаження розтягуванням та розтягуванням-стиском, яка враховує асиметрію циклу навантаження

Табл. 2. Іл. 6. Бібліогр. 17 назв.

Ясний П.В., Пындус Ю.И., Фостык В.Б. **Оценка минимальной скорости роста усталостных трещин после перегрузок растяжением-сжатием с учетом асимметрии циклов нагружения // Сопrotивление материалов и теория сооружений. – 2015. – Вып. 94. – С. 231 – 243.**

Основываясь на экспериментальных исследованиях установлены закономерности роста усталостных трещин в условиях комплексных перегрузок растяжением-сжатием в сплаве Д16Т. Получено функциональную зависимость для оценки минимальной скорости роста трещин после перегрузки растяжением и растяжением-сжатием, которая учитывает асимметрию цикла нагружения

Табл. 2. Илл. 6. Библиогр. 17 назв.

Yasniy P.V., Pyndus Yu.I., Fostyk V.B. **Estimation of minimal fatigue crack growth rate after overload-underload at different stress ratios // Strength of materials and the theory of structures. – 2015. – Issue. 94. – С. 231 – 243. – Ukr.**

Basing on experimental investigations the main regularities of the fatigue crack growth (FCG) under single overload and complex overload - underload in the alloy D16T have been determined.

Functional relationship of the underload factor effect on the minimum FCG rate after preliminary tension overload has been obtained. The proposed equation allows to predict the minimal FCG rate at various stress ratios and taking into account the change of overload-underload factor.

Tables. 2. Figs. 6. Ref. 17 names.

Авторська довідка

Доктор технічних наук, професор, ректор Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

ЯСНІЙ Петро Володимирович.

Адреса: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ТНТУ ім. І. Пулюя, ЯСНІО П.В.

Роб. тел. +38 0352 524181

Моб. тел. +38 067 6734909

Ел. пошта yasniy@networkacad.net

Пиндус Юрій Іванович, к.т.н., докторант ТНТУ

Моб. тел. +38 067 7792530

Ел. пошта yurpndus@gmail.com

Фостик Василь Богданович, асистент кафедри зварювання ТНТУ

Моб. тел. +38 097 8825497

Ел. пошта vasyl.fostyk@gmail.com