

УДК 539.43: 620.191.33

П.Ясній, докт.техн.наук, Ю.Пиндус

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

О.Семенець, канд.техн.наук

АНТК "Антонов", м.Київ

ВПЛИВ ПЕРЕВАНТАЖУВАННЯ НА ПОШИРЕННЯ ВТОМНИХ ТРІЩИН ЗА РІЗНИХ АСИМЕТРИЙ ЦИКЛУ НАВАНТАЖЕННЯ В СПЛАВІ Д16ЧТ

Досліджено закономірності впливу перевантажень на затримку швидкості росту втомних тріщин (РВТ) в сплаві Д16ЧТ, за різних асиметрій циклу навантаження. Запропоновані методика і модель для визначення мінімальної швидкості затримки РВТ після перевантажень.

В наукових працях детально досліджено виникнення та поширення пошкоджень в матеріалах при регулярних навантаженнях. Проте більшість машин та механізмів працюють в умовах нерегулярних в часі і випадкових навантажень, коли мають місце суттєві перевантаження. Найбільш ефективними і простими для інженерного використання є методи поциклового підрахунку РВТ в процесі циклічного навантаження, що базуються на методах лінійної механіки руйнування. Але задача визначення швидкості РВТ на нестабілізованій тріщині (після перевантаження) залишається відкритою. Визначення швидкості росту втомної тріщини в будь-який момент після перевантаження, тобто врахування історії навантаження, є вирішальним при розробці найбільш коректних методів поциклового прогнозування росту втомних тріщин. Метою даної роботи є виявлення основних закономірностей поширення втомних тріщин після одноразових перевантажень, а також визначення мінімальної швидкості РВТ після перевантаження, з урахуванням впливу асиметрії циклу навантаження. Для аналізу

зміни швидкості росту втомних тріщин (РВТ) після одноразових перевантажень за різних асиметрій циклу навантаження були проведені експериментальні дослідження на електрогідравлічній випробувальній машині СТМ-100, що керується ПЕОМ типу ІВМ РС АТ 286. Для випробувань використовувались плоскі прямокутні зразки з центральним наскрізним отвором виготовлені з алюмінієвого сплаву Д16ЧТ [1] згідно ГОСТ 25.506-85 [2]. Для розмітки зразків використовували спеціальне тарувально-розміточне пристосування [3]. Для передачі зусиль від машини до зразка використовувались захоплювачі [1]. На зразках в обох напрямках росту тріщин робили гострі надрізи (концентратори) (рис.1) і зароджували тріщини згідно з вимогами [4]. За моментом появи і ростом тріщини спостерігали за її виходом на поверхню, використовуючи систему змонтовану на базі промислової телевізійної установки ПТУ-44 [3]. Експерименти проводили в режимі м'якого навантаження при частоті $f = 10 \text{ Гц}$, форма циклу навантаження - синусоїдальна.

Випробування проводили в діапазоні середньоамплітудної ділянки кінетичної діа-грами втомного руйнування (КДВР) при асиметриях циклу навантаження $R = K_{min} / K_{max} = 0; 0,3; 0,5; 0,7$, де K_{max} і K_{min} - максимальне і мінімальне значення

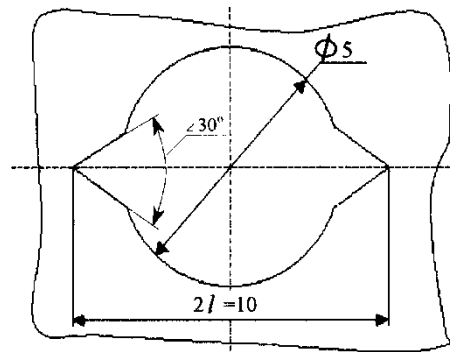


Рис.1. Наскрізний отвір в зразку, з гострими надрізами (концентраторами).

коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН). За результатами експериментальних досліджень були побудовані КДВР при різних R [1] за залежністю Періса:

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

де V - швидкість РВТ; C_R, n – експериментально визначені сталі.

Максимальний КІН визначали за формулою [5]:

$$K_{max} = \left[1 - 0,025 \left(\frac{l}{W/2} \right) + 0,06 \left(\frac{l}{W/2} \right)^4 \right] \sigma_{max} \sqrt{\pi l} \sqrt{\sec \frac{\pi l}{W}} \quad (2)$$

де l – половина довжини тріщини; W – ширина зразка; σ_{max} – максимальне напруження циклу навантаження.

Значення сталих C_R і n для залежності Періса при різних R приведені в табл.1

Таблиця 1

R	$C_R,$ $\frac{м/цикл}{(МПа\sqrt{м})^n}$	n
0	$1,10 \cdot 10^{-11}$	3,58
0,3	$2,06 \cdot 10^{-11}$	3,58
0,5	$3,02 \cdot 10^{-11}$	3,58
0,7	$4,87 \cdot 10^{-11}$	3,58

Сімейство КДВР при різних R за залежністю Періса в логарифмічних координатах $V \sim K_{max}$ зображено на рис.2.

Перевантажування проводили згідно схеми, зображеної на рис.3. Перевантажування характеризується коефіцієнтом перевантажування Q_{ol} :

$$Q_{ol} = P_{ol} / P_{max} \quad (3)$$

де P_{ol} - зусилля перевантажування і P_{max} - максимальне зусилля циклу до і після перевантажування. Або:

$$Q_{ol} = K_{ol} / K_0 \quad (4)$$

де K_{ol} - КІН перевантажування і K_0 - максимальне значення КІН, що безпосередньо передє перевантажуванню.

Після перевантажування, в процесі стабілізації швидкості РВТ, проводили заміри приросту тріщин в обидвох напрямках її росту від кількості циклів навантаження. При цьому машину плавно виводили в середнє навантаження $P_m = (P_{max} + P_{min}) / 2$. Причому, на першому етапі [6] стрибкоподібного прискорення і різкого спаду швидкості РВТ, а також в період максимальної затримки швидкості РВТ після перевантажування, заміри проводили при підростанні тріщини на (0,01 ÷ 0,03) мм. На другому етапі дискретність замірів збільшували до підростання тріщини на 0,1 мм. Заміри проводили, пророшуючи тріщину на розрахункову ширину пластичної зони Z_{ol} перевантажування [7]:

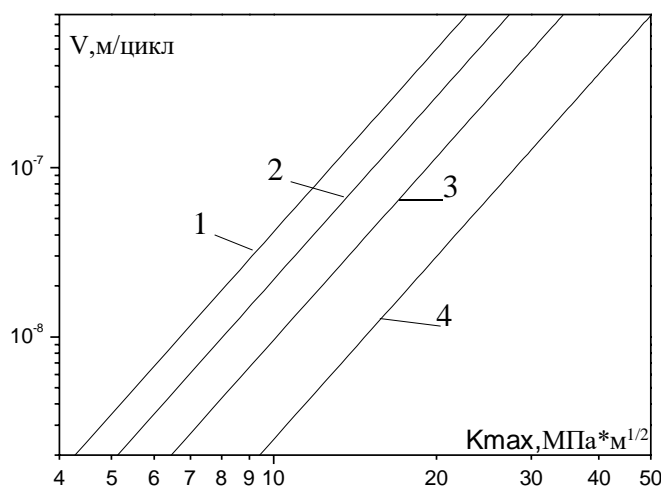


Рис.2. КДВР сплаву Д16чТ: 1 - при $R = 0$; 2 - при $R = 0,3$; 3 - при $R = 0,5$; 4 - при $R = 0,7$.

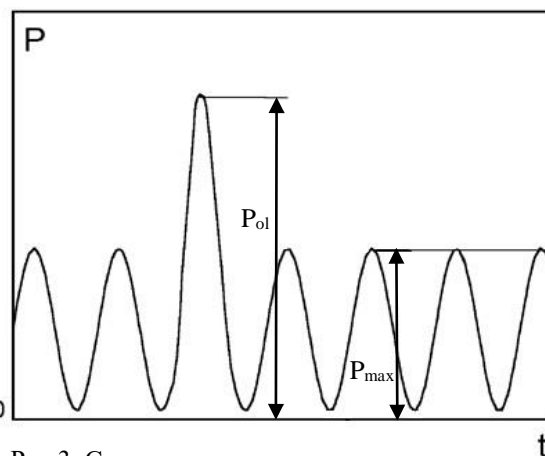


Рис.3. Схема проведення перевантажувань.

$$Z_{ol} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{ol}}{\sigma_{0.2}} \right)^2 \quad (5)$$

де $\sigma_{0.2} = 300$ МПа - умовна межа текучості сплаву Д16чТ.

Перед проведенням наступного перевантажування швидкість РВТ стабілізували, тобто тріщину пророщували при постійному значенні максимального зусилля P_{max} до тих пір, поки K_{max} не досягало необхідного (наперед визначеного для проведення запланованого перевантажування) значення K_0 . Причому, швидкість РВТ при K_0 повинна дорівнювати значенню швидкості на КДВР.

Для подальших розрахунків використовували усереднене значення приростів тріщин в обидвох напрямках за відповідну кількість циклів.

Експериментальні дані затримки швидкості РВТ після перевантажувань з $Q_{ol} = 1,4$, $Q_{ol} = 1,7$, $Q_{ol} = 2$ при асиметриях $R = 0$, $R = 0,3$, $R = 0,5$, $R = 0,7$, отримані в результаті випробувань, зображені на рис.4-7. Для порівняння на рисунках зображені КДВР за залежністю Періса.

Як видно з рис.4-7, при зростанні коефіцієнта перевантажування Q_{ol} зменшується мінімальна швидкість затримки РВТ (V_{min}) після перевантажування. Ця закономірність зберігається при зростанні асиметрії циклу навантажування від $R = 0$ до $R = 0,7$. Причому із зростанням асиметрії при деякому $Q_{ol} = \text{const}$ і $K_{max} = \text{const}$ значення V_{min} зменшується. Тобто ефект затримки швидкості РВТ після перевантажування при $K_{max} = \text{const}$ і $Q_{ol} = \text{const}$ збільшується із зростанням асиметрії циклу навантаження R .

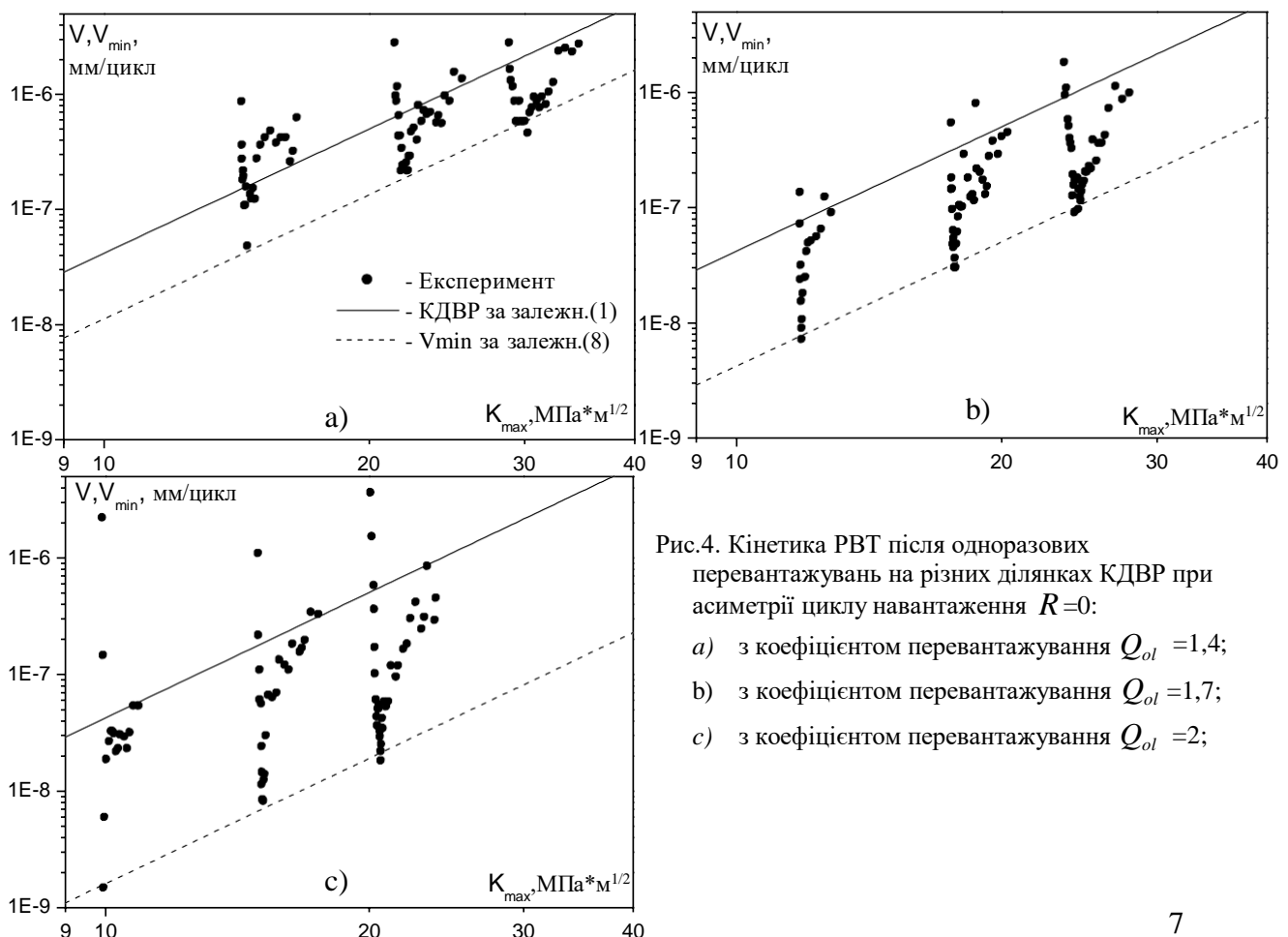


Рис.4. Кінетика РВТ після одноразових перевантажувань на різних ділянках КДВР при асиметрії циклу навантаження $R = 0$:

- a) з коефіцієнтом перевантажування $Q_{ol} = 1,4$;
- b) з коефіцієнтом перевантажування $Q_{ol} = 1,7$;
- c) з коефіцієнтом перевантажування $Q_{ol} = 2$;

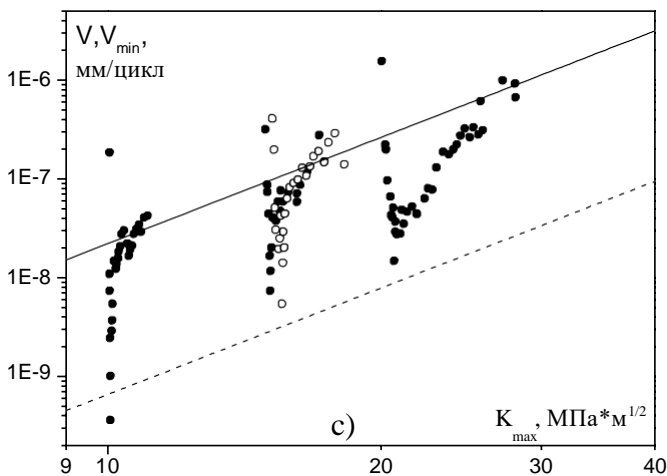
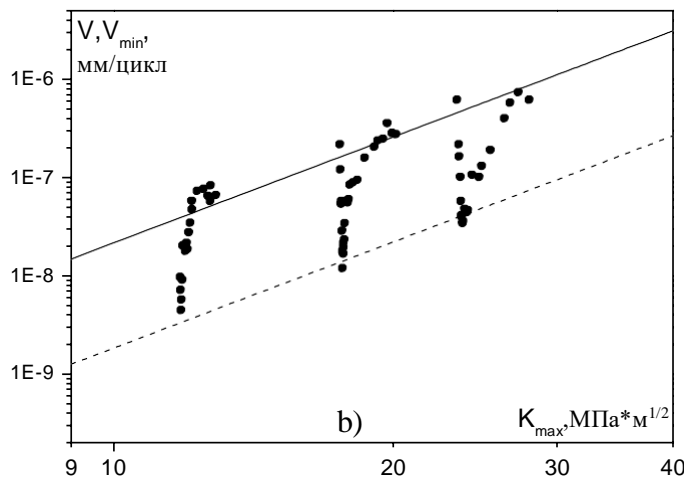
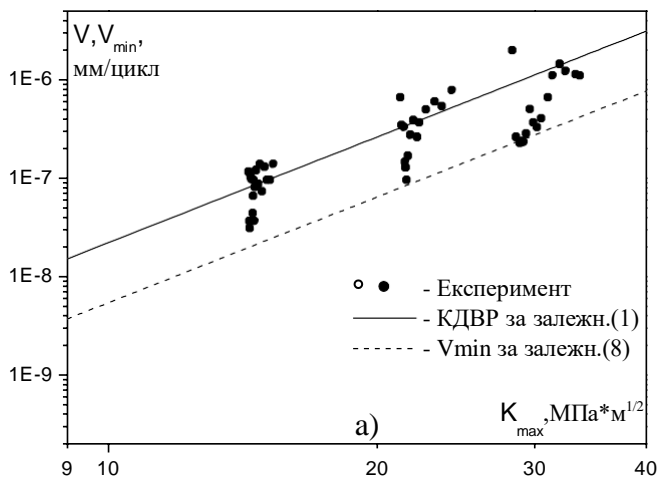


Рис.5. Кінетика РВТ після одноразових перевантажень на різних ділянках КДВР при асиметрії циклу навантаження $R=0.3$:
 а) з коефіцієнтом перевантажування $Q_{ol} = 1,4$;
 б) з коефіцієнтом перевантажування $Q_{ol} = 1,7$;
 в) з коефіцієнтом перевантажування $Q_{ol} = 2$;

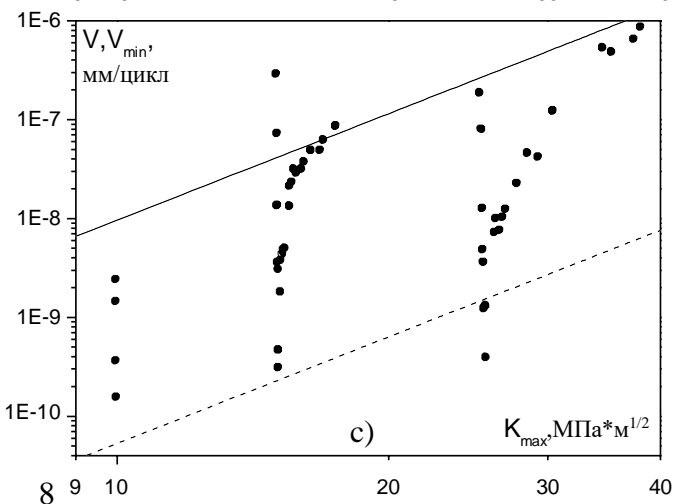
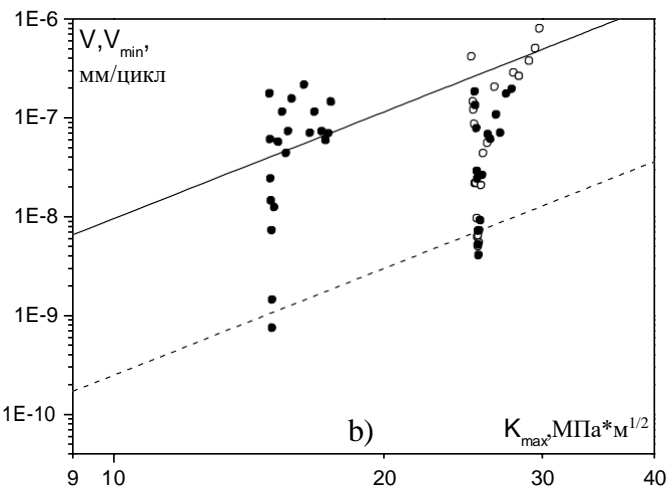
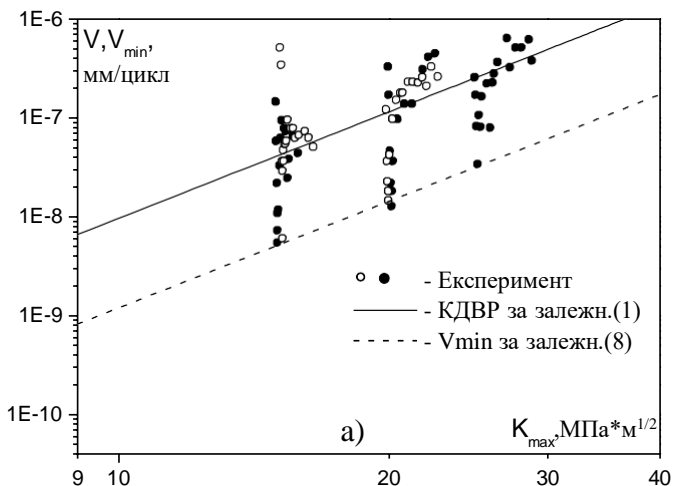


Рис.6. Кінетика РВТ після одноразових перевантажень на різних ділянках КДВР при асиметрії циклу навантаження $R=0.5$:
 а) з коефіцієнтом перевантажування $Q_{ol} = 1,4$;
 б) з коефіцієнтом перевантажування $Q_{ol} = 1,7$;
 в) з коефіцієнтом перевантажування $Q_{ol} = 2$;

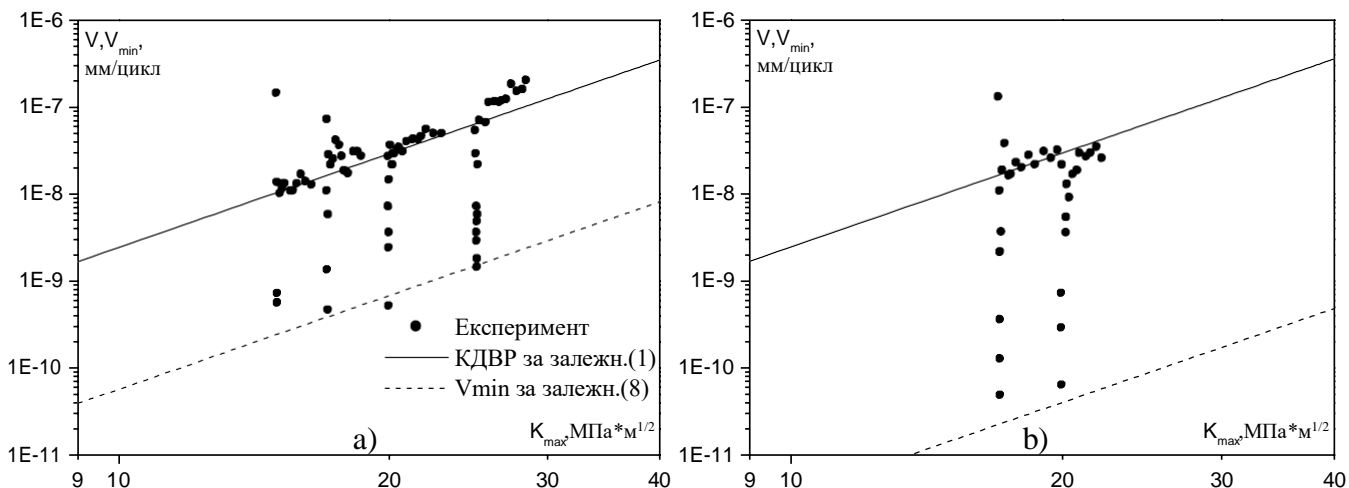


Рис.7. Кінетика РВТ після одноразових перевантажень на різних ділянках КДВР при асиметрії циклу навантаження $R=0.7$: а) з коефіцієнтом перевантажування $Q_{ol} = 1,4$; б) з коефіцієнтом перевантажування $Q_{ol} = 1,7$.

Для визначення мінімальної швидкості затримки РВТ в кожному випадку перевантажування визначали абсолютний розмах спаду швидкості РВТ від значення, що безпосередньо передує перевантаженню V_0 , до його мінімального значення [6]:

$$\Delta V = V_0 - V_{min} \tag{6}$$

Аналізуючи результати значень визначених точок абсолютної зміни швидкості РВТ (ΔV) після одноразового перевантажування при асиметрії $R=0$ із $Q_{ol}=1,4; 1,7; 2$ (рис.8), видно, що вони добре описуються степеневою функцією, аналогічною залежності Періса (1), якщо залежну змінну V в ньому замінити на ΔV , а K_{max} на K_0 . залежність набуде вигляду [6]:

$$\Delta V = C_{ol} (K_0)^n \tag{7}$$

де C_{ol} - стала абсолютної зміни швидкості. З рис.8 видно, що із зростанням коефіцієнта перевантажування Q_{ol} крива ΔV наближається до КДВР. Характер цієї зміни визначається зростанням C_{ol} , що поступово наближається до C_R із зростанням Q_{ol} . Це означає (див.(6)), що із зростанням Q_{ol} відбувається зменшення V_{min} . Сталу C_{ol} при $Q_{ol}=1,4; 1,7; 2$ визначали апроксимуючи дані $\Delta V \sim K_0$ залежністю (7) методом ітерацій. Ці дані приведені в табл.2.

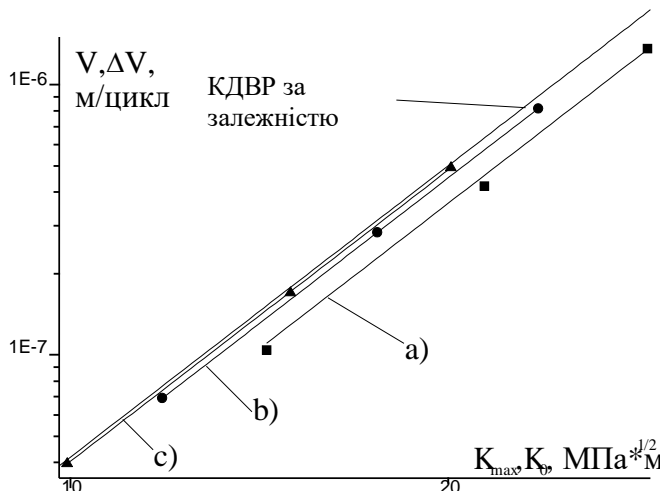


Рис.8. Абсолютна зміна швидкості РВТ після перевантажування із $Q_{ol}=1,4$ – (а); $1,7$ – (б); 2 – (с), при асиметрії $R=0$

Аналогічні результати і закономірності були отримані при обробці даних, отриманих при асиметриях $R=0,3, R=0,5, R=0,7$. Результати приведені в табл.2.

Таблиця 2

R	0			0,3			0,5			0,7	
Q_{ol}	1,4	1,7	2	1,4	1,7	2	1,4	1,7	2	1,4	1,7
C_{ol}	$7,99 \cdot 10^{-12}$	$9,92 \cdot 10^{-12}$	$1,06 \cdot 10^{-11}$	$1,54 \cdot 10^{-11}$	$1,91 \cdot 10^{-11}$	$1,95 \cdot 10^{-11}$	$2,63 \cdot 10^{-11}$	$2,97 \cdot 10^{-11}$	$3,015 \cdot 10^{-11}$	$4,76 \cdot 10^{-11}$	$4,86 \cdot 10^{-11}$
C_R	$1,1 \cdot 10^{-11}$			$2,06 \cdot 10^{-11}$			$3,02 \cdot 10^{-11}$			$4,87 \cdot 10^{-11}$	

Коефіцієнт n в залежності (7) при апроксимації змінювався несуттєво $3.56 \leq n \leq 3.61$. Це добре видно з рис.8, де криві значень $\Delta V \sim K_0$ паралельні залежності $V \sim K_{max}$ в логарифмічних координатах. Тому його для всіх випадків залишили рівним $n=3,58$, як і для залежності Періса (1). Із табл.2 видно, що C_{ol} із зростанням Q_{ol} прямує до значення C_R для залежності Періса (1) для кожного R .

Треба зауважити, що аналогічні результати і закономірності були отримані для алюмінієвого сплаву Д16Т, який за своїми механічними характеристиками і характеристиками циклічної тріщинозміцності суттєво відрізняється від сплаву Д16чТ [8].

Закономірності зростання коефіцієнта C_{ol} , який фактично визначає зміну ΔV в залежності від коефіцієнта перевантажування Q_{ol} при різних асиметриях циклу навантаження, зображено на рис.9.

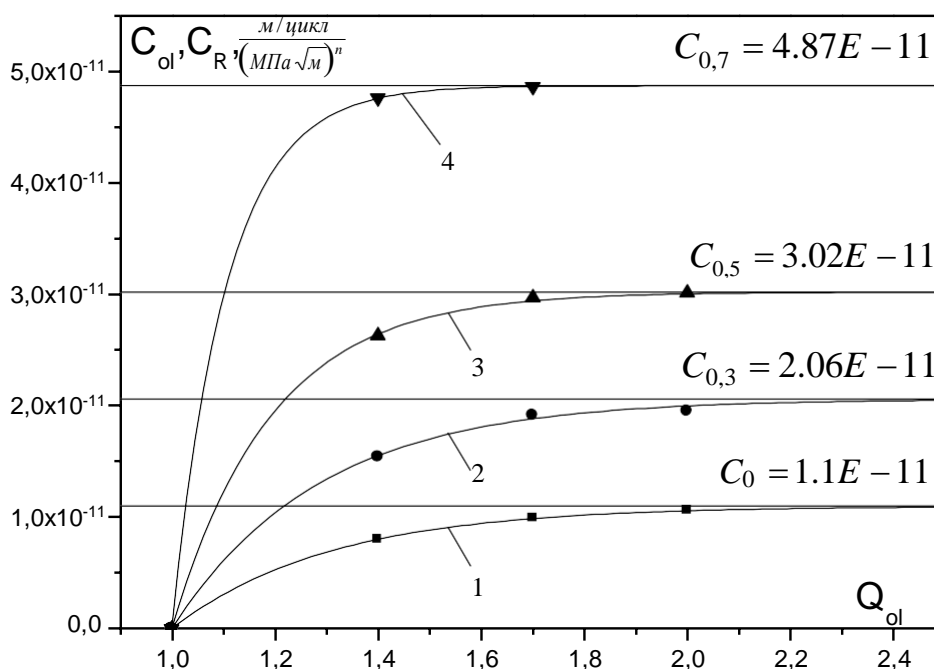


Рис.9. Залежності зростання коефіцієнта C_{ol} від зростання коефіцієнта перевантажування Q_{ol} при асиметриях циклу навантаження: 1- $R=0,2$; 2- $R=0,3$; 3- $R=0,5$; 4- $R=0,7$;

Із рис.9 видно, що із зростанням коефіцієнта Q_{ol} криві зміни C_{ol} асимптотично наближаються до значення C_R для кожної асиметрії циклу навантаження (горизонтальні прямі). При зменшенні коефіцієнта перевантажування до $Q_{ol}=1$ (перевантажування відсутнє), коефіцієнт C_{ol} буде зменшуватись до нуля при кожній асиметрії. Для апроксимації експериментальних даних (рис.9) була використана залежність [6]:

$$C_{ol} = C_R (1 - g_R^{(Q_{ol}-1)}), \quad (7)$$

де g_R - параметричний коефіцієнт. Значення коефіцієнта g_R для перевантажувань при асиметриях $R=0; 0,3; 0,5; 0,7$ були визначені методом ітерацій (табл.3).

Очевидно (рис.9), що із збільшенням коефіцієнта асиметрії

Таблиця 3.

R	0	0,3	0,5	0,7
g_R	0,038	0,03	0,0055	0,00008

циклу навантаження вплив однакових перевантажень на спад швидкості РВТ після перевантажування зростає. Це виражається через зменшення g_R із зростанням R . А саме коефіцієнт g_R в залежності (7) визначає інтенсивність зростання C_{ol} із збільшенням Q_{ol} (рис.8).

Запишемо залежність (6) у наступному вигляді:

$$V_{min} = V_0 - \Delta V,$$

замість V_0 і ΔV підставимо залежності (1) і (7), попередньо замінивши V_0 на V і K_0 на K_{max} , оскільки перевантажування може бути прикладене в будь-якій точці КДВР:

$$V_{min} = C_R K_{max}^n - C_{ol} (K_{max})^n,$$

замість C_{ol} підставимо залежність (7) і після простих математичних перетворень отримаємо:

$$V_{min} = C_R K_{max}^n g_R^{(Q_{ol}-1)} \quad (8)$$

Отже, тепер за відомими коефіцієнтами C_R , n , g_R з використанням залежності (8) можна визначати мінімальну швидкість РВТ після перевантажування з різними значеннями Q_{ol} в будь-якій точці середньоамплітудної ділянки КДВР при $R=0; 0,3; 0,5; 0,7$. Як видно із рис.4-6 результати використання залежності (8) для визначення мінімальної швидкості затримки РВТ після одноразових перевантажувань добре узгоджуються із експериментальними даними.

Висновки:

1. Підвищення асиметрії циклу навантаження R від 0 до 0,7 приводить до істотного зменшення швидкості РВТ в сплаві Д16чТ в координатах $V \sim K_{max}$ і не впливає на показник n в залежності Періса (1).
2. Досліджено вплив одноразових перевантажувань на закономірності поширення втомних тріщин в сплаві Д16чТ за різних асиметрій циклу навантаження. Виявлено, що із збільшенням коефіцієнта перевантажування Q_{ol} зростає різниця ΔV між швидкістю РВТ, визначеною за КДВР, і мінімальною швидкістю V_{min} після перевантажування.
3. При постійних значеннях коефіцієнта перевантажування Q_{ol} і КІН K_{max} із зростанням R збільшується різниця швидкостей ΔV .
4. Отримано залежності, які описують вплив перевантажувань за різних асиметрій циклу навантаження на швидкість РВТ, виявлено основні закономірності зміни параметрів цих залежностей від коефіцієнтів Q_{ol} і R .

The influencing of overloads on fatigue crack growth (FCG) retardation at different stress ratios were investigated. The technique and model for definition of minimum rate of FCG delay after overloads were offered.

Література

1. Пиндус Ю. Вплив асиметрії циклу навантаження на циклічну тріщиностійкість алюмінієвого сплаву Д16чТ// Вісник Тернопільського державного технічного університету.-Тернопіль: ТДТУ.-2001.-Т.6.-№3.-С.18-22.
2. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т./Под общей ред. В.В.Панасюка. – Киев: Наук. думка.- 1988-1990.-Т.4. – 680 с.
3. Ковальчук Я. Вплив попередньої пластичної деформації на циклічну тріщиностійкість алюмінієвого сплаву// Рукопис дисертації на здобуття ступеня канд.техн.наук.-Тернопіль:ТДТУ.-1999.
4. РД-50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкость, разрушения) при циклическом нагружении.-М.: Изд-во стандартов.-1983.-95с.
5. Tada H. The Stress Analysis of Cracks Handbook/Del Research Corporation, Hellertown, Pa.-1973.

6. Ясній П.В., Пиндус Ю.І. Кінетика росту втомної тріщини після одноразового перевантажування в сплаві Д16Т// Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні: Тези допов. міжнародної науково-технічної конференції/ Під ред. В.Т. Троценка і А.П. Зіньковського.-Київ:Ін-т проблем міцності НАН України,2001.-С157-158.
7. W.S. Johnson, Multi-Parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth //Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading.-ASTM STP 748.-1981.-P.85-102.
8. Пиндус Ю. Аналіз процесу стабілізації швидкості росту втомної тріщини після одноразового перевантажування// Матеріали п'ятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету ім. І.Пулля.-Тернопіль:ТДТУ.-2001.-С.105.

Одержано 10.07.2001 р.