

Ю.І. Пиндус, аспір.
П.В. Ясній, д.т.н., проф.

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

МОДЕЛЬ РОСТУ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ ПІСЛЯ ОДНОРАЗОВОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАННЯ

На основі експериментальних досліджень росту втомної тріщини (РВТ) після одноразових перевантажень розроблено модель РВТ, що базується на визначенні ефективного значення напруження і відповідно ефективного значення коефіцієнта інтенсивності напружень.

Вступ

В умовах нерегулярного чи випадкового циклічного навантаження важко зробити аналітичний прогноз втомної довговічності елементів конструкції. Це зумовлено складністю оцінки впливу перехідних процесів на поширення пошкоджень, що мають місце при чергуванні циклів різної амплітуди (взаємовплив навантажень) в процесі циклічного навантаження і порушують динамічну рівновагу в околі вершини тріщини на етапі росту втомної тріщини (РВТ). Одним із основних чинників дестабілізації швидкості РВТ є перевантажування, що викликають затримку швидкості РВТ. В роботі розглядаються одні з найпростіших випадків перевантаження – одноразові. Вивчення і оцінка впливу одноразових перевантажень на кінетику РВТ, аналітичне відтворення швидкості РВТ після перевантажування мають ключове значення для розробки моделей РВТ в умовах нерегулярного навантаження.

Вплив одноразового перевантажування на швидкість РВТ

Швидкість РВТ досліджували при гармонічному навантажуванні і після одноразових перевантажень [1, 2] в умовах одновісного розтягу з використанням плоских прямокутних зразків, з центральною тріщиною, виготовлених згідно з ГОСТ 25.506-85[3], на електрогідравлічній випробувальній машині СТМ-100, що керується ПК з контрольованим розмахом зусилля. Частота навантаження $f = 10$ Гц, форма $P = f(t)$ – синусоїда. Температура випробувань – 293К. Розглядаються одноразові перевантажування, і закономірності їх впливу на швидкість РВТ при гармонічному навантаженні за різних асиметрій циклу навантаження $R = K_{min} / K_{max} = 0; 0,3; 0,5$, де K_{min} і K_{max} – мінімальний і максимальний коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН). На рис. 1, в логарифмічних координатах, зображені експериментальні точки і розрахункова крива швидкості РВТ після одноразового перевантажування із коефіцієнтом перевантажування $Q_{ol} = K_{ol} / K_{max} = 2,0$, де $K_{ol} = 30 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ – КІН перевантажування.

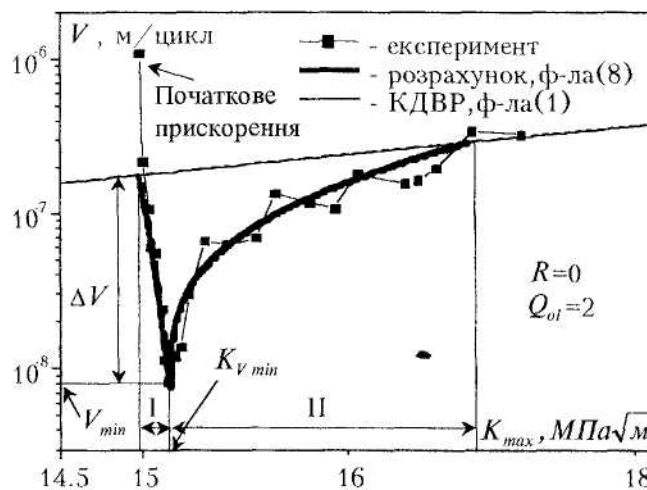


Рис. 1. Кінетика РВТ після одноразового перевантажування

Як видно з рисунка, після одноразового перевантажування спочатку (ділянка-І) відбувається стрибкоподібне зростання швидкості РВТ, а потім її різкий спад до деякого мінімального значення V_{min} . Цей етап також називають запізненням затримки швидкості РВТ, і його тривалість

може досягати 15 % довжини зони затримки швидкості РВТ. На другій ділянці (II) швидкість РВТ зростає від значення V_{\min} до перетину з КДВР при гармонічному навантажуванні. На основі припущення про основну роль залишкових напружень, що виникають у вершині тріщини після перевантажування, у затримці РВТ [3, 4, 5, 6], в роботі розроблена модель, запропоновані залежності для опису кінетики РВТ як на ділянці запізнення затримки РВТ, так і на другій ділянці стабілізації швидкості РВТ.

Швидкість РВТ при гармонічному навантаженні

Для побудови кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР) згідно з експериментальними даними швидкості РВТ при гармонічному навантаженні (рис. 2) [1] була використана модифікована залежність Уокера [7], записана у наступному вигляді:

$$V = C_R \Delta K^n, \tag{1}$$

$$C_R = C_0 \frac{1}{(1-R)^{(1-m)n}},$$

де $C_0 = 1,1 \cdot 10^{-11} \frac{м / цикл}{(МПа\sqrt{м})^n}$, $n = 3,58$ – сталі швидкості РВТ визначені при $R = 0$; $m = 0,6$ – коефіцієнт урізання рівня асиметрії (Уокера), визначений на базі експериментальних даних швидкості РВТ при $R = 0; 0,3; 0,5$; C_R – коефіцієнт, який залежить від асиметрії циклу навантаження R .

Розмах КІІ визначали за залежністю:

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi l} \times Y, \tag{2}$$

де $Y = \left[1 - 0,025 \left(\frac{l}{W/2} \right)^2 + 0,06 \left(\frac{l}{W/2} \right)^4 \right] \sqrt{\sec \frac{\pi l}{W}}$ – поправочна функція [8]; l – половина довжини тріщини; W – ширина зразка; $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ – розмах напруження; $\sigma_{\max} = \frac{P_{\max}}{F}$ і $\sigma_{\min} = \frac{P_{\min}}{F}$ – максимальне і мінімальне напруження циклу, тут P_{\max} і P_{\min} – максимальне і мінімальне зусилля циклу навантаження, F – площа поперечного перерізу зразка.

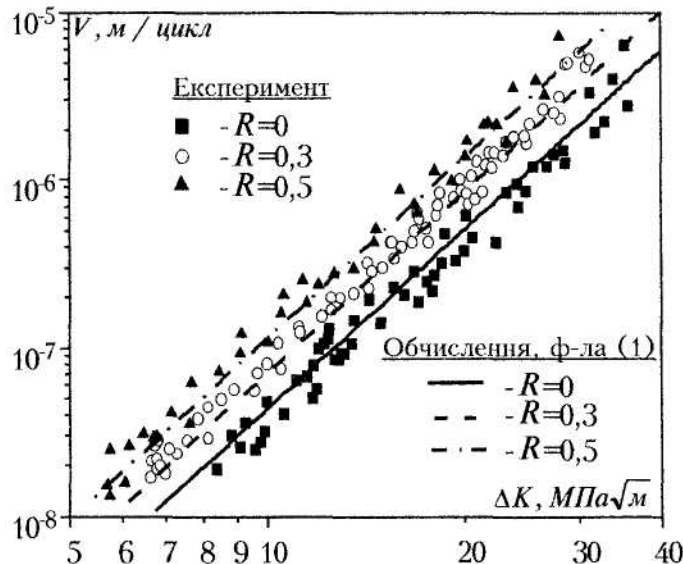


Рис. 2. Експериментальні дані швидкості РВТ та їх аналітичне представлення за формулою Уокера (1), за різних R , алюмінієвого сплаву Д16сТ

Визначення мінімальної швидкості РВТ після одноразового перевантажування

Зразки перевантажували за схемою, зображеною на рис. 3, із коефіцієнтами перевантажування $Q_{ol} = P_{ol} / P_{\max} = 1,4; 1,7; 2,0$, де P_{ol} – зусилля перевантажування; P_{\max} – максимальне зусилля циклу до і після перевантажування [2].

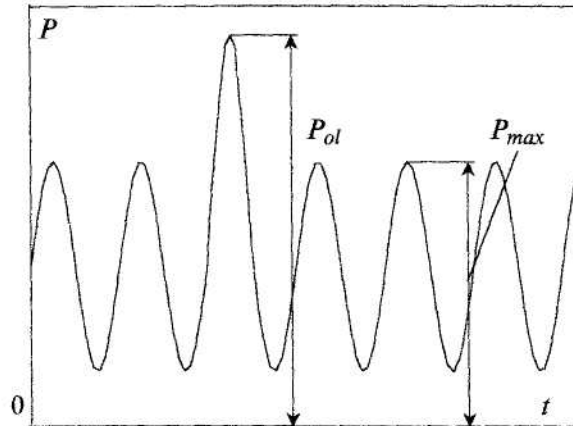


Рис. 3. Схема проведення перевантажень

Для прикладу, на рис. 4 в логарифмічних координатах показані експериментальні дані швидкості РВТ після одноразових перевантажень із коефіцієнтом перевантажування $Q_{ol} = 1,7$ і $Q_{ol} = 2,0$, проведених при $R = 0$, визначені за методикою [2], в координатах $V - K_{max}$. Для порівняння, суцільною лінією на рисунку зображена КДВР, побудована за залежністю (1).

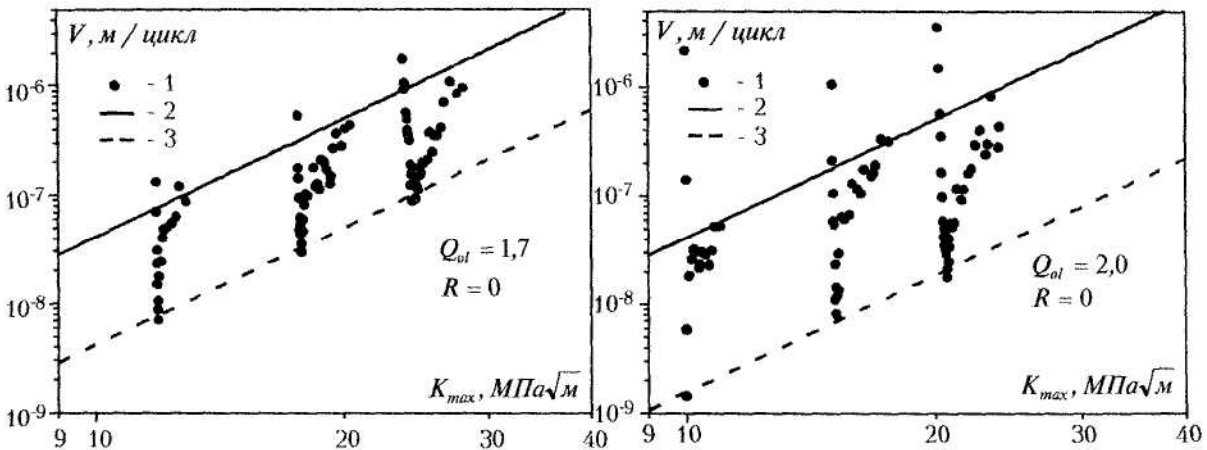


Рис. 4. Кінетика після одноразових перевантажень:

- 1 – експериментальні значення швидкості РВТ після одноразових перевантажень;
- 2 – КДВР за залежністю (1);
- 3 – мінімальна швидкість РВТ V_{min} за залежністю (7)

Для кожного випадку перевантажування визначали абсолютну зміну швидкості РВТ ΔV (рис. 1) як різницю між швидкістю РВТ V , що безпосередньо передуює перевантаженню, визначеною за залежністю (1) і експериментально визначеною мінімальною швидкістю РВТ V_{min} [2]:

$$\Delta V = V - V_{min} \tag{3}$$

На рис. 5 показані криві $\Delta V - K_{max}$ після одноразових перевантажень, при асиметрії $R = 0$ із $Q_{ol} = 1,4; 1,7; 2,0$. З рисунка видно, що вони добре описуються степеневою функцією, аналогічною залежності (1) $\Delta V - K_{max}$:

$$\Delta V = C_{ol} (K_{max} (1 - R))^n \tag{4}$$

де C_{ol} – стала абсолютної зміни швидкості; $n = 3,58$.

З рис. 5 видно, що із зростанням коефіцієнта перевантажування Q_{ol} крива ΔV наближається до КДВР, причому вона залишається паралельною КДВР в логарифмічних координатах. При апроксимації даних $\Delta V - K_{max}$ залежністю (4) стала n , для різних Q_{ol} , змінювалась в межах $3,56 \leq n \leq 3,61$ і тому її прийняли рівною $n = 3,58$, як і для залежності (1). Отже, наближення кривої $\Delta V - K_{max}$ до КДВР із зростанням Q_{ol} визначається лише зростанням коефіцієнта C_{ol} в

залежності (4), який наближається до значення C_R . Сталу C_{ol} при $Q_{ol} = 1,4; 1,7; 2,0$ визначали, апроксимуючи дані $\Delta V \sim K_{max}$ залежністю (4) методом ітерацій, при $n = 3,58$.

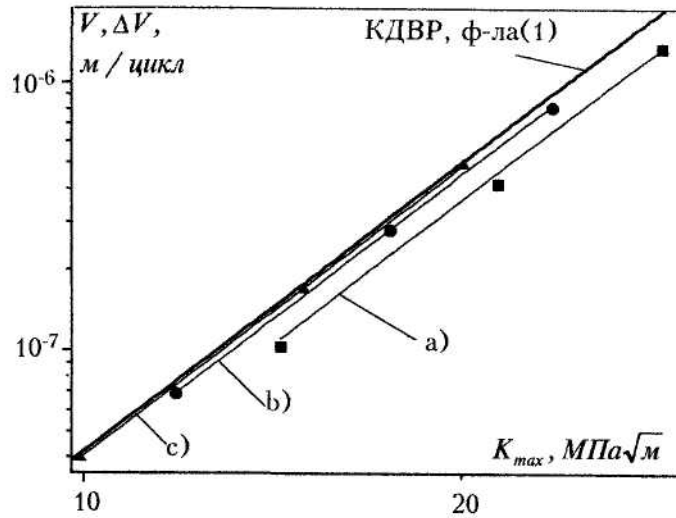


Рис. 5. Абсолютна зміна швидкості РВТ після перевантажування із $Q_{ol} = 1,4 - (a); 1,7 - (b); 2 - (c)$, при асиметрії $R = 0$

Аналогічні (наведені на рис. 4, 5) закономірності були отримані для асиметрій $R = 0,3; R = 0,5$ [2]. Результати зміни C_{ol} від коефіцієнта перевантажування Q_{ol} при коефіцієнтах асиметрії $R = 0; 0,3; 0,5$ показані на рис. 6.

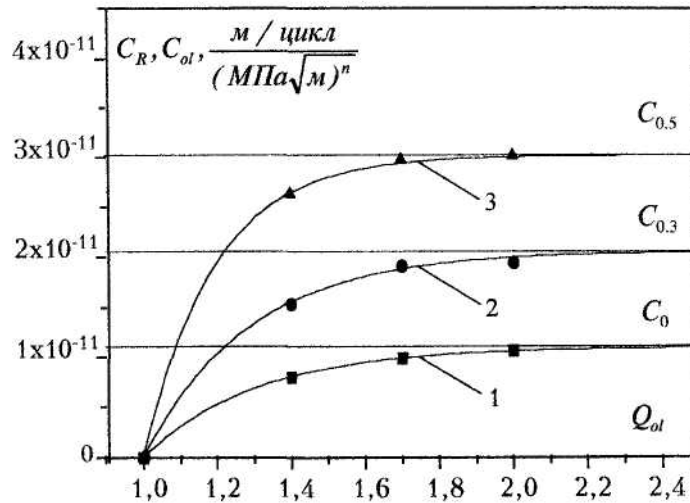


Рис. 6. Залежності коефіцієнта C_{ol} від коефіцієнта перевантажування Q_{ol} для асиметрій циклу навантаження: 1 - $R = 0$; 2 - $R = 0,3$; 3 - $R = 0,5$

Із рис. 6 видно, що із зростанням коефіцієнта Q_{ol} значення C_{ol} для кожної асиметрії циклу навантаження асимптотично наближаються до величини C_R (горизонтальні прямі). При зменшенні коефіцієнта перевантажування до $Q_{ol} = 1$ (перевантажування відсутнє) коефіцієнт C_{ol} буде зменшуватись до нуля. Для апроксимації експериментальних даних (рис. 6) була використана залежність [2]:

$$C_{ol} = C_R(1 - g_R^{(Q_{ol}-1)}), \tag{5}$$

де g_R - параметричний коефіцієнт, значення якого при асиметриях $R = 0; 0,3; 0,5$ були визначені методом ітерацій. Із зростанням асиметрії циклу навантаження R коефіцієнт g_R зменшувався. Ця закономірність описується залежністю:

$$g_R = g_0(1 - R^k)^p, \tag{6}$$

де $g_0 = 0,03$ - коефіцієнт g_R визначений при асиметрії $R = 0$; $k = 4,06$, $p = 31,17$ - коефіцієнти,

що визначають зміну g_R із зростанням R . Використовуючи залежності (5) і (6), можна екстраполювати значення коефіцієнта C_{ol} для будь-яких Q_{ol} , за асиметрій циклу навантаження $R = 0 \dots 0,5$ і визначати абсолютну зміну швидкості РВТ ΔV за залежністю (4).

Із збільшенням коефіцієнта асиметрії циклу навантаження, за однакових перевантажувань $Q_{ol} = \text{const}$, $K_{\text{max}} = \text{const}$, мінімальна швидкість РВТ після перевантажування зменшується.

Запишемо вираз (3) у наступному вигляді:

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

з урахуванням залежностей (1) і (4):

$$V_{\text{min}} = C_R (K_{\text{max}} (1 - R))^n - C_{ol} (K_{\text{max}} (1 - R))^n,$$

враховуючи залежність (5), після простих математичних перетворень отримаємо:

$$V_{\text{min}} = C_R (K_{\text{max}} (1 - R))^n g_R^{(Q_{ol}-1)}. \tag{7}$$

Використовуючи залежність (7), можна прогнозувати мінімальну швидкість РВТ для асиметрій циклу навантаження $R = 0 \dots 0,5$ після перевантажування з різними значеннями Q_{ol} , в будь-якій точці КДВР. На рис. 4 пунктирною лінією показані криві мінімальної швидкості РВТ, обчислені формулою (7) при $R = 0$, які добре узгоджуються з експериментальними даними. Добре узгодження розрахункових кривих мінімальних швидкостей РВТ з експериментальними даними, при різних Q_{ol} , отримане при $R = 0; 0,3; 0,5$.

Методика визначення залишкових напружень у вершині тріщини за швидкістю РВТ після одноразового перевантажування

Для визначення залишкових напружень, що виникають у вершині втомної тріщини після перевантажування за експериментальними даними $V - K_{\text{max}}$, використовували схему, зображену на рис. 7, яка запропонована у праці [4].

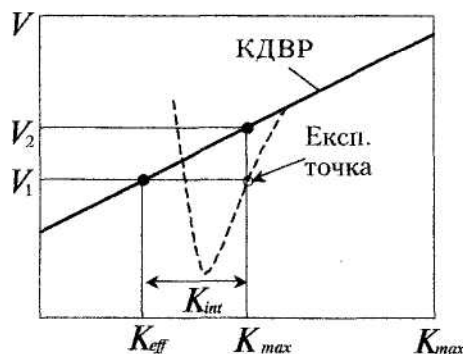


Рис. 7. Схема вивчення залишкових напружень із експериментальних даних $V - K_{\text{max}}$

В основу методу покладено припущення про зменшення швидкості РВТ внаслідок виникнення залишкових напружень у вершині тріщини після перевантажування, які можуть бути описані через КІН K_{int} :

$$K_{\text{int}} = K_{\text{max}} - K_{\text{eff}}, \tag{8}$$

де K_{max} – визначається за залежністю (2), якщо в ній розмах напружень $\Delta\sigma$ замінити на максимальне значення напруження σ_{max} . K_{max} відповідає швидкості РВТ V_2 на КДВР і V_1 після перевантажування. K_{eff} – максимальне ефективне значення КІН, що відповідає швидкості РВТ V_1 .

Значення K_{int} , що спричинює зменшення швидкості РВТ від V_2 до V_1 , згідно з припущенням про основну роль залишкових напружень у затримці РВТ, визначається деяким залишковим напруженням σ_{int} :

$$\sigma_{\text{int}} = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{eff}}, \tag{9}$$

де σ_{eff} – ефективне напруження циклу навантаження. Для визначення σ_{eff} запишемо залежності (1) і (2) у наступному вигляді:

$$V_1 = C_R (K_{\text{eff}} (1 - R))^n, \tag{10}$$

$$K_{eff} = \sigma_{eff} \sqrt{\pi l} \times Y \quad (11)$$

Підставимо (11) в (10) і після нескладних математичних перетворень отримаємо:

$$\sigma_{eff} = \frac{\sqrt[n]{V_1/C_R}}{\sqrt{\pi l Y (1-R)}} \quad (12)$$

Підставивши у вираз (9) замість σ_{eff} залежність (12), отримаємо:

$$\sigma_{int} = \sigma_{max} \frac{\sqrt[n]{V_1/C_R}}{\sqrt{\pi l Y (1-R)}} \quad (13)$$

Таким чином, використовуючи формулу (13), за відомими значеннями швидкості РВТ V_1 після перевантажування можна визначати залишкові напруження (рис. 8), що спричинюють затримку РВТ.

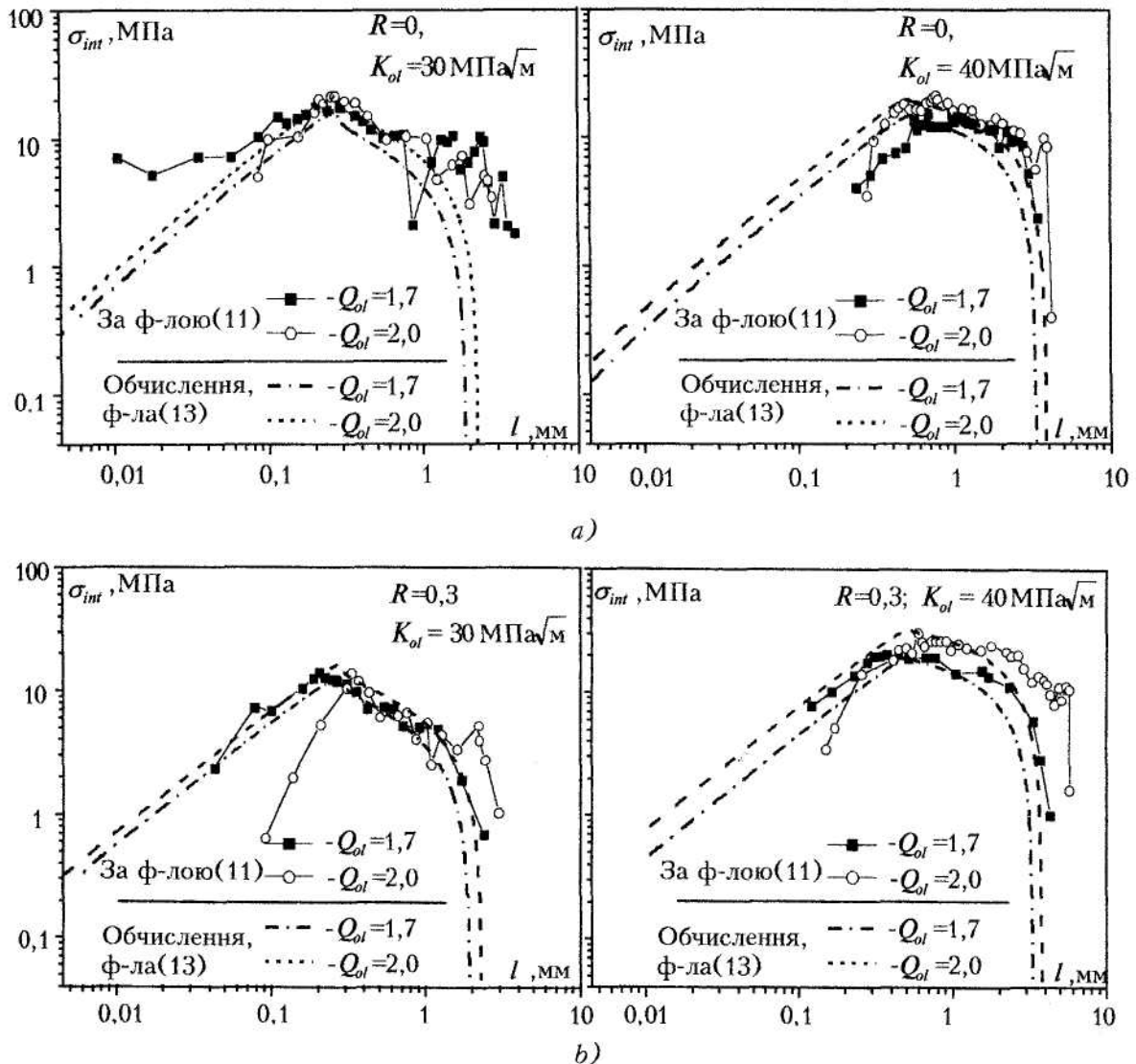


Рис. 8. Розподіл залишкових напружень у вершині втомної тріщини після одноразових перевантажувань із $K_{ol} = 30, 40 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ і $Q_{ol} = 1,7; 2,0$ за асиметрій циклу навантаження а) $R = 0$, б) $R = 0,3$

На рис. 8 в логарифмічних координатах представлені результати обчислення залишкових напружень σ_{int} у вершині тріщини після перевантажування за формулою (13), при $K_{ol} = 30, 40 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ і $Q_{ol} = 1,7; 2,0$.

Модель РВТ після одноразового перевантажування

За основу моделі (рис. 9) взяте припущення про основну роль залишкових напружень у затримці РВТ після перевантажування. Початковим прискоренням швидкості РВТ після перевантажування нехтується.

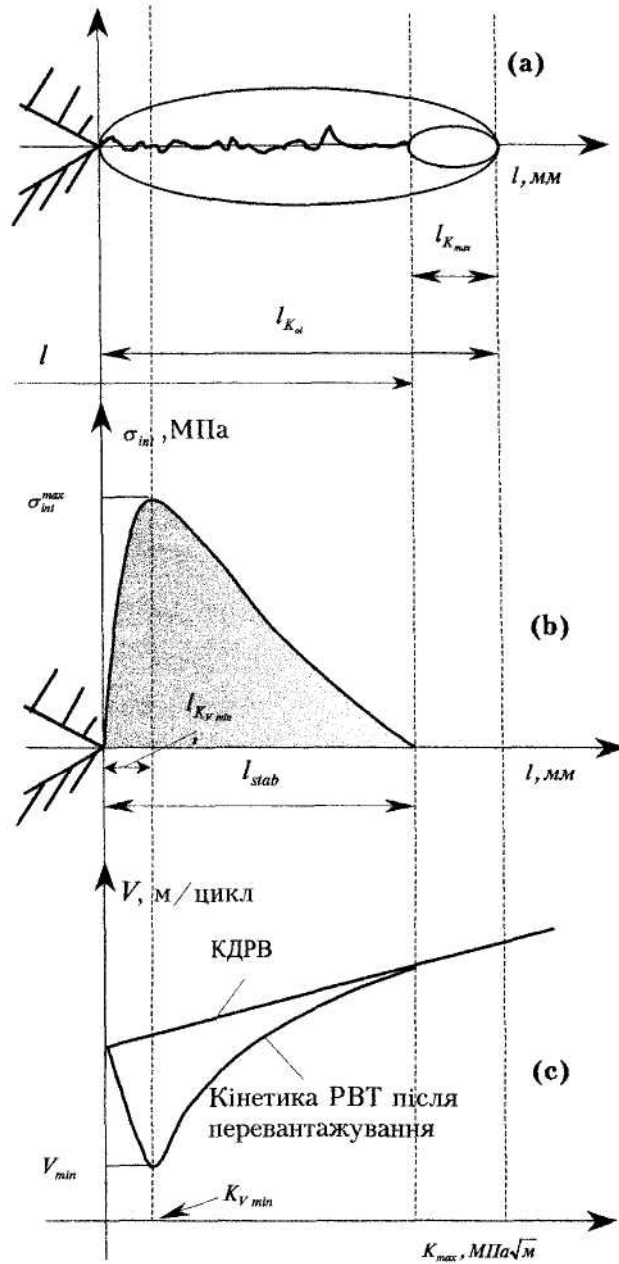


Рис. 9. Модель РВТ після одноразового перевантажування

Швидкість РВТ після перевантажування визначається формулою (1), де замість K_{max} використовується ефективне значення SIF – K_{max}^{eff} :

$$V = C_R (K_{max}^{eff} (1 - R))^n, \tag{14}$$

$$K_{max}^{eff} = Y \times \sigma_{max}^{eff} \sqrt{\pi l}, \quad \sigma_{max}^{eff} = \sigma_{max} - \sigma_{int}.$$

Для визначення залишкових напружень σ_{int} (рис.9, b) запропонована залежність:

$$\begin{cases} \sigma_{int} = \sigma_{int}^{max} - \frac{\sigma_{int}^{max}}{(l_{K_{v\ min}})^{\alpha_1}} \cdot (l_{K_{v\ min}} - l)^{\alpha_1}, & l < l_{K_{v\ min}} \\ \sigma_{int} = \sigma_{int}^{max} - \frac{\sigma_{int}^{max}}{(l_{stab})^{\alpha_2}} \cdot (l - l_{stab})^{\alpha_2}, & l > l_{K_{v\ min}} \end{cases} \tag{15}$$

де σ_{int}^{max} – максимальне залишкове напруження, що визначається за формулою (13), відносно мінімальної швидкості РВТ після перевантажування V_{min} (7):

$$\sigma_{int}^{max} = \sigma_{max} - \frac{\sqrt{V_{min} / C_R}}{\sqrt{\pi l} \times Y}; \tag{16}$$

l_{stab} – довжина зони дії залишкових напружень (рис. 9, a, b):

$$l_{stab} = l_{Kol} - l_{K_{max}}, \tag{17}$$

де l_{Kol} – довжина пластичної зони (ПЗ), створеної циклом перевантажування; $l_{K_{max}}$ – довжина ПЗ створеної циклом навантаження постійної амплітуди, коли виконується умова $l + l_{K_{max}} \geq l_{Kol}$. Довжина пластичної зони (l_{PZ}) в обох випадках визначається за формулою: $l_{PZ} = 1/\pi \cdot (K_{APL} / \sigma_{0,2})^2$ [9], де K_{APL} – КІН: K_{max} чи K_{ol} , $\sigma_{0,2} = 300$ МПа – умовна межа текучості матеріалу;

$l_{K_{v_{min}}} = \beta l_{Kol}$ – віддаль від точки перевантажування до точки, в якій швидкість РВТ мінімальна, $\beta = 0,087$ – усереднене експериментальне значення для всіх випадків перевантажування.

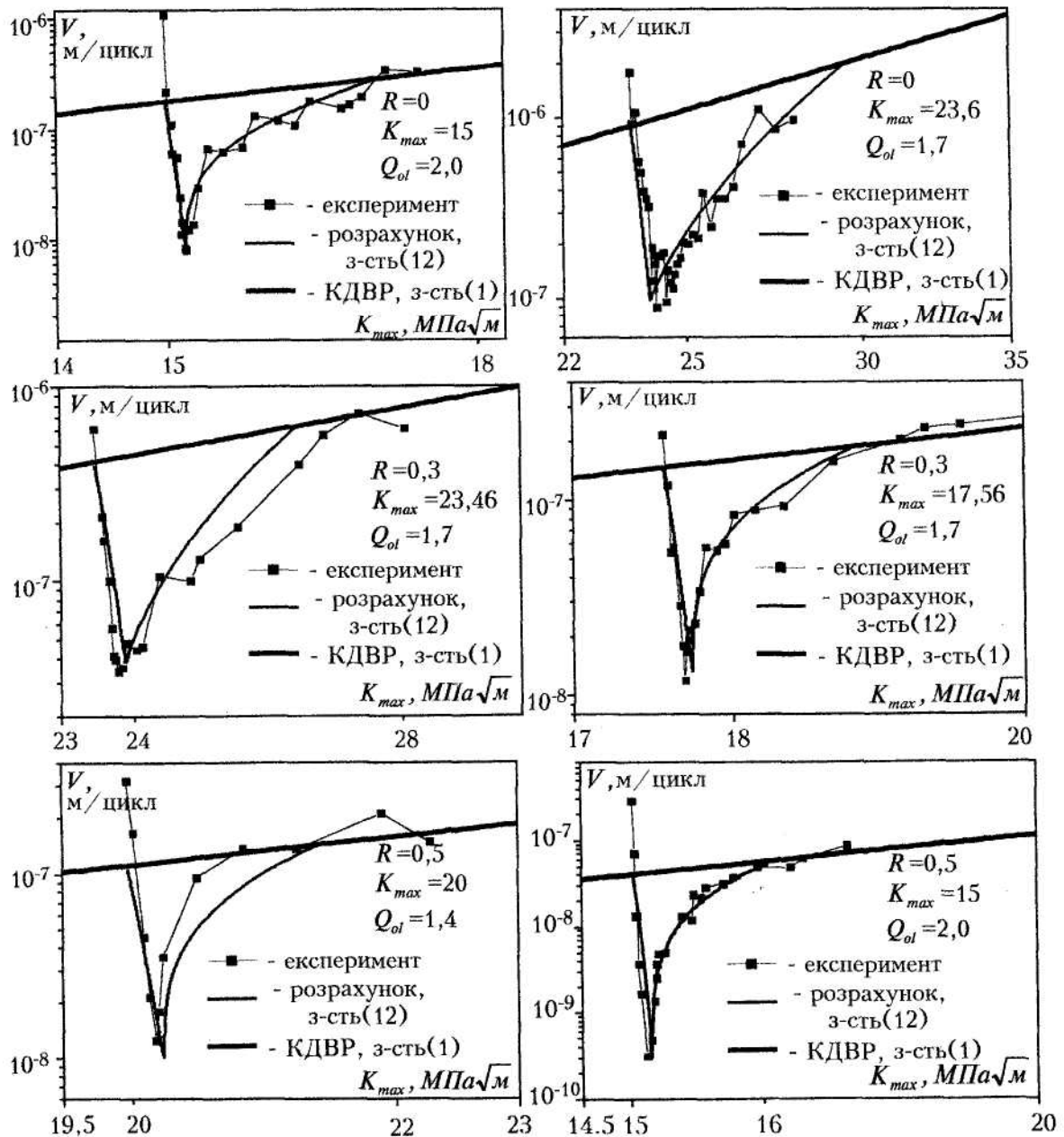


Рис. 10. Кінетика РВТ після одноразових перевантажувань, за різних умов перевантажування

Коефіцієнти α_1 і α_2 в залежності (15), яка є параболою з вершиною в точці $(I_{K_{r_{\text{ндо}}}}, \sigma_{\text{int}}^{\text{max}})$, визначають закономірність зміни σ_{int} за довжиною зони дії залишкових напружень. Вони були отримані апроксимацією даних $\sigma_{\text{int}}-l$, визначених із експериментальних значень швидкості РВТ (рис. 8) після перевантажування. Усереднене значення $\alpha_1 = 1,2$ для всіх перевантажувань. Значення α_2 визначається поліномом:

$$\alpha_2 = 2,2205 \cdot 10^{-16} + 0,0487K_{ol} - 0,0027K_{ol}^2 + 4,8333K_{ol}^3. \quad (18)$$

На рис. 8 представлені криві розподілу залишкових напружень за довжиною пластичної зони після перевантажування, обчислені за залежністю (15).

На рис. 1 і рис. 10 показані криві $V-K_{\text{max}}$ після одноразових перевантажувань, обчислені за формулою (14), які задовільно узгоджуються з даними експерименту.

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. Ясній П., Пиндус Ю., Семенець О. Вплив перевантажування на поширення втомних тріщин за різних асиметрій циклу навантаження в сплаві Д16чТ // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль: ТДТУ. – 2001. – Т. 6. – № 4. – С. 5–12.
3. 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.
4. K. Sadananda, A.K. Vasudevan, R.L. Holtz, E.U. Lee. Analysis of overload effects and related phenomena // International Journal of Fatigue. – 1999. – 21. – P. 233–246.
5. Злочевский А.Б., Шувалов А.Н. Факторы, тормозящие рост усталостных трещин после перегрузок // Физ.-хим. механика материалов. – 1985. – № 2. – С. 41–46.
6. Bray GH. Fatigue crack retardation in PM aluminum alloys AA8022 and AA5091. Phd. Dissertation, University of Virginia, 1993.
7. Walker K. Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life.-Philadelphia (Pa): Amer.Soc.Test.Mater. – 1970. – P. 1–14.(ASTM STP 462).
8. Tada H. The Stress Analysis of Cracks Handbook.-Del Research Corporation. – Hellertown. – Pa. – 1973.
9. Johnson W.S. 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.

ПИНДУС Юрій Іванович – аспірант кафедри матеріалознавства Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування, прогнозування живучості елементів конструкцій.

Ел. пошта: kaf_vm@tu.edu.te.ua.

ЯСНІЙ Петро Володимирович – доктор технічних наук, професор Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування, проблеми міцності та руйнування металів.

Тел./факс: 8-(0352)- 25-36-74.

Ел. пошта: Yasniy@tu.edu.te.ua.