

# МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 620.178.3

П.Ясній, докт.техн. наук; М.Галушак, канд.техн. наук;

С.Федак, канд.техн. наук

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

## КРИТЕРІЇ ЗРУШЕННЯ ТРІЩИНИ ЗА КОМБІНОВАНОГО РОЗТЯГУ І ДИНАМІЧНОЇ ПОВЗУЧОСТІ СПЛАВУ АМГ6

Проведено експериментальні дослідження з визначення характеристик тріщиностійкості сплаву АМГ6 за одновісного розтягу та за одновісного розтягу з накладанням циклічної складової. Досліджено можливість використання енергетичного, силового та деформаційного критеріїв для прогнозування старту тріщини в умовах розтягу та динамічної повзучості сплаву АМГ6. Виявлено, що для опису старту тріщини за одновісного розтягу та за одновісного розтягу з накладанням циклічної складової найбільш доцільним є використання деформаційного критерію.

### Умовні позначення

$t$	- час;
$J$	- інтеграл, обчислений по контуру, достатньо віддаленому від вершини тріщини;
$J_c$	- критичний $J$ -інтеграл за квазістатичного розтягу;
$J_{max}$	- критичний $J$ -інтеграл за динамічної повзучості з урахуванням попереднього розтягу;
$J_{cf}$	- граничне значення $J$ -інтегралу в умовах комбінованого розтягу;
$K$	- коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН);
$K_c$	- критичний КІН за квазістатичного розтягу в умовах плоского напруженого стану;
$K_{cr}$	- значення КІН в дослідгах на повзучість;
$K_{max}$	- найбільше значення КІН за цикл;
$\Delta K$	- розмах КІН;
$N$	- кількість циклів навантажування;
$N^*$	- кількість циклів до підростання тріщини;
$R$	- коефіцієнт асиметрії циклу навантажування;
$\delta$	- розкриття вершини тріщини (РВТ) нормального відриву, що включає пружну $\delta_e$ та пластичну $\delta_p$ складові;
$\delta_{cr}^*$	- критичне РВТ в умовах динамічної повзучості;
$\delta_{th}$	- максимальне порогове РВТ за асиметрії циклу $R=0,9$ ;
$\delta_p$	- РВТ за одновісного розтягу до ініціації динамічної повзучості;
$\delta_c$	- критичне РВТ за квазістатичного розтягу;
$\delta_{cf}$	- критичне РВТ за комбінованого розтягу;
$\delta_{max}$	- максимальне РВТ за цикл;
$\Delta\delta$	- РВТ за повзучості;
$\Delta\delta_{cr}^*$	- критичний приріст РВТ за динамічної повзучості;
$\Delta\delta_{cr}$	- приріст РВТ внаслідок динамічної повзучості.

Сплав АМГ6 широко використовується в авіа- та суднобудуванні для виготовлення несучих конструкцій, деталей та метизів. Він успішно конкурує зі сталями, титаном і його сплавами завдяки низькій питомій масі і високим показникам опору руйнуванню під дією статичних, циклічних та динамічних навантажень, хорошій корозійній стійкості і технологічності.

Метою даного дослідження було проведення аналізу енергетичного, силового та деформаційного критеріїв для тріщиностійкості в умовах одновісного розтягу за

квазістатичного навантажування та повзучості з накладанням додаткового циклічного навантажування.

### Матеріали і методика досліджень

Дослідження проводили на сервогідролінійній машині СТМ-100 з керуючим ПК типу ІВМ РС/АТ. Статична складова навантаження задавалася від комп'ютера за допомогою спеціальної прикладної програми "ПОШУК", а циклічна – від низькочастотного генератора стандартних електричних імпульсів типу ГЗ-112. Керування машиною здійснювалося зусиллям, що прикладалося вздовж осі зразків.

Деформації вимірювались тензометричними датчиками місткового типу. У дослідженнях використовувались зразки з боковою тріщиною (рис. 1), виготовлені з алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6 [2, 3].

Для визначення розкриття вістря тріщини  $\delta$  відпрацьовані сигнали реєструвалися комп'ютером за трьома каналами: зусилля  $P$ , розкриття берегів надрізу  $\Delta_2$  і розкриття тріщини біля її вістря  $\Delta_1$  (рис. 2).

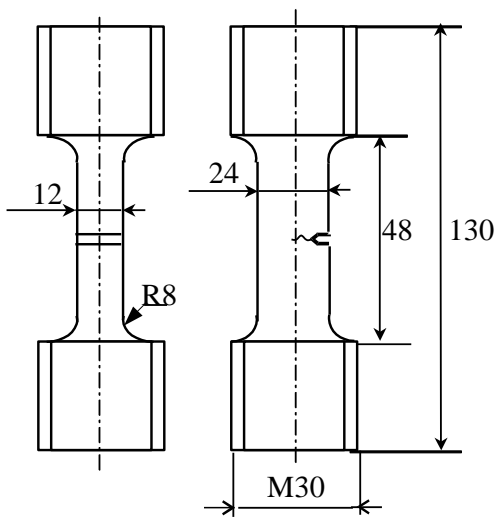


Рисунок 1 - Плоский зразок з бічною тріщиною зі сплаву АМг6

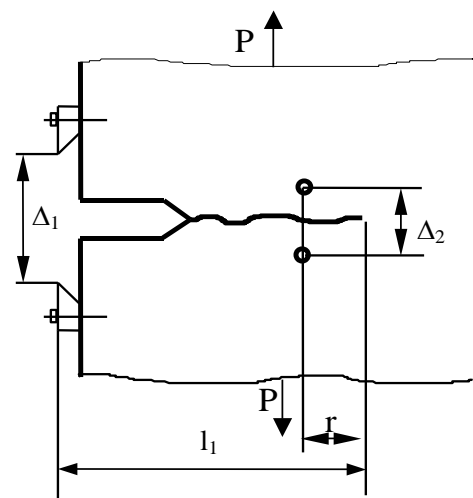


Рисунок 2 - Схема вимірювання розкриття тріщини  $\delta$

Розкриття вершини тріщини  $\delta$  визначалось перерахунком результатів вимірювань у відповідних точках зразка за формулою, що передбачає лінійні обриси берегів тріщини:

$$\delta = \Delta_1 \frac{(l_1 / r - \Delta_2 / \Delta_1)}{l_1 / r - 1},$$

де  $l_1$  і  $r$  – відповідно, відстань від вершини тріщини до площин вимірювання переміщення берегів надрізу та берегів тріщини.

Випробування проводили при частотах циклічного навантаження  $f=25$  Гц і розмаху КІН  $\Delta K=2,2$  МПа  $\sqrt{м}$  та  $4,0$  МПа  $\sqrt{м}$ .

Старт тріщини в умовах динамічної повзучості фіксувався як миттєвий приріст деформації біля її вістря та, відповідно, росту тріщини на бічній поверхні зразків. J-інтеграл визначався згідно з відомими методиками [1, 4].

Проведено дві серії досліджень:

- за короткотривалого навантажування розтягуванням (квазістатичного без накладання і з накладанням низькоамплітудної циклічної складової) (рис. 3);
- на повзучість за статичного і комбінованого (статичного з накладанням циклічної складової) навантаження (рис. 4).

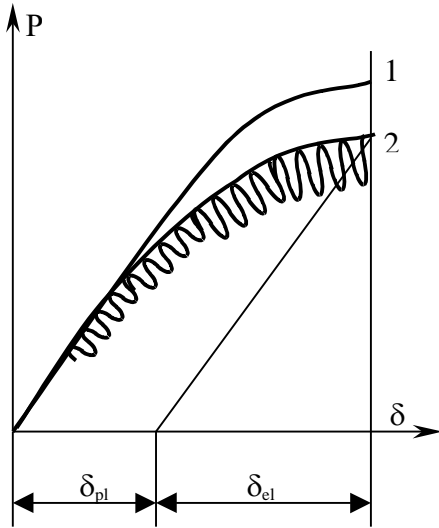


Рисунок 3 - Схема короткотривалого навантаження розтягуванням: 1 - квазістатичного; 2 - квазістатичного з накладанням низькоамплітудної циклічної складової

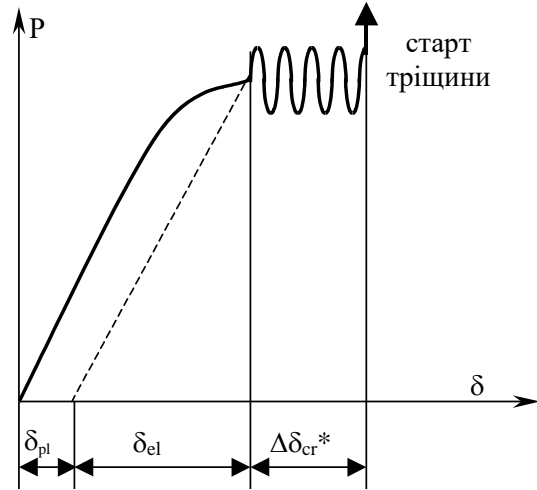


Рисунок 4 - Схема навантаження зразків в умовах динамічної повзучості

**Результати досліджень та їх обговорення**

Отриману залежність J-інтегралу від розкриття вершини тріщини  $\delta$  для квазістатичного та комбінованого навантажування розтягом подано на рис. 5.

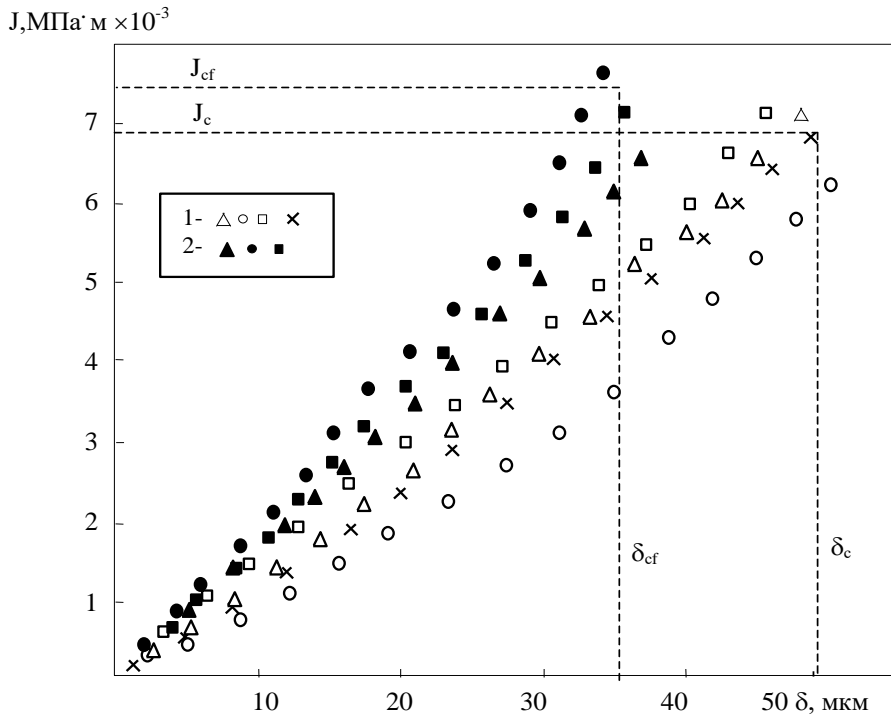


Рисунок 5 - Залежність J-інтегралу від РВТ  $\delta$  за квазістатичного (1) та комбінованого (2) деформування

Аналізуючи ці залежності, слід зауважити, що розкид граничних значень  $J_c$  та  $J_{cf}$  перевищує розкид  $\delta_c$  та  $\delta_{cf}$  відповідно.

Залежність розкриття вершини тріщини від КІН представлено на рис. 6. За комбінованого навантажування використовувались максимальні значення КІН циклу.

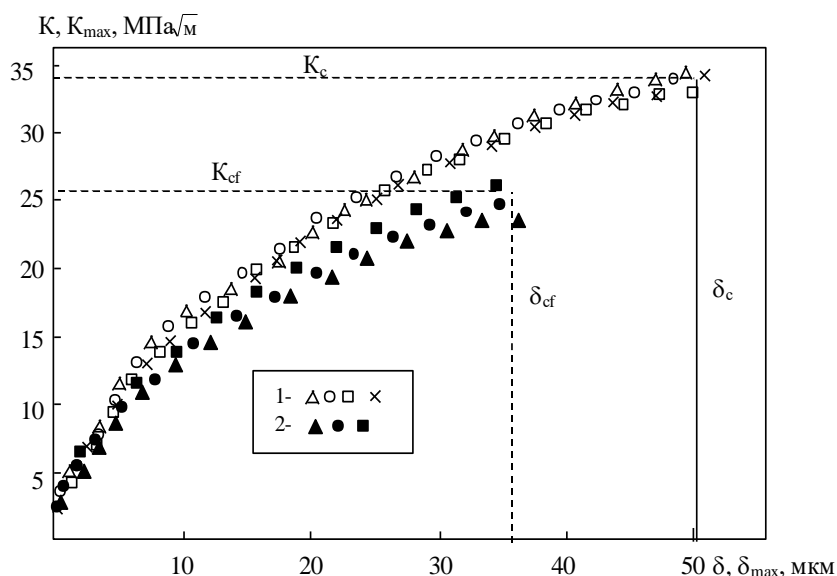


Рисунок 6 - Залежність КІН від РВТ для квазістатичного (1) та комбінованого (2) навантажувань

З порівняння залежностей J-інтегралу від РВТ (рис. 5) та КІН від РВТ (рис. 6) можна зробити висновок, що в координатах K-δ спостерігається менший розкид експериментальних даних, ніж у координатах J-δ. Цей висновок поширюється і на параметри тріщиностійкості, які представлені в таблиці. Їх аналіз свідчить, що критичний КІН  $K_{cf}$  та РВТ  $\delta_{cf}$  при комбінованому навантажуванні менші, порівняно з статичним навантажуванням.

Таблиця - Параметри тріщиностійкості сплаву АМг6

$K_c,$ МПа $\sqrt{м}$	$K_{cf},$ МПа $\sqrt{м}$	$\delta_c,$ мм	$\delta_{cf},$ мм	$J_c,$ МПа·м $\times 10^{-3}$	$J_{cf},$ МПа·м $\times 10^{-3}$
33,5±2,5	27,0±2,8	51±2,8	35±2,5	6,8±1,1	7,6±1,2

В проведених експериментах на статичну повзучість та дослідження старту тріщини в умовах динамічної повзучості максимальний рівень КІН було вибрано з умови відсутності підростання тріщини в ході попереднього навантажування. Для цього найбільше зусилля, прикладене до зразка, не перевищувало 5%-го відхилення від лінійної ділянки діаграми деформування.

Треба зазначити, що в експериментах на динамічну повзучість за умови  $K_{cf}=K_{max}$  виявлено більше, порівняно зі статичною повзучістю, поточне РВТ (рис. 7). У всіх дослідах на статичну повзучість (7 год.) не було зареєстровано підростання тріщини. За той же час у зразках, що були піддані випробуванням на динамічну повзучість, виявлено в'язке підростання тріщини. При цьому проявилась важлива особливість: критичне РВТ в умовах динамічної повзучості було менше, ніж розкриття вершини тріщини в умовах статичного навантажування.

Таким чином, циклічне навантажування, яке додатково накладається на статичне, призводить до збільшення повзучості сплаву АМг6 на ділянці біля вершини тріщини [5], проте зменшує час і граничне розкриття в'язкого підростання тріщини.

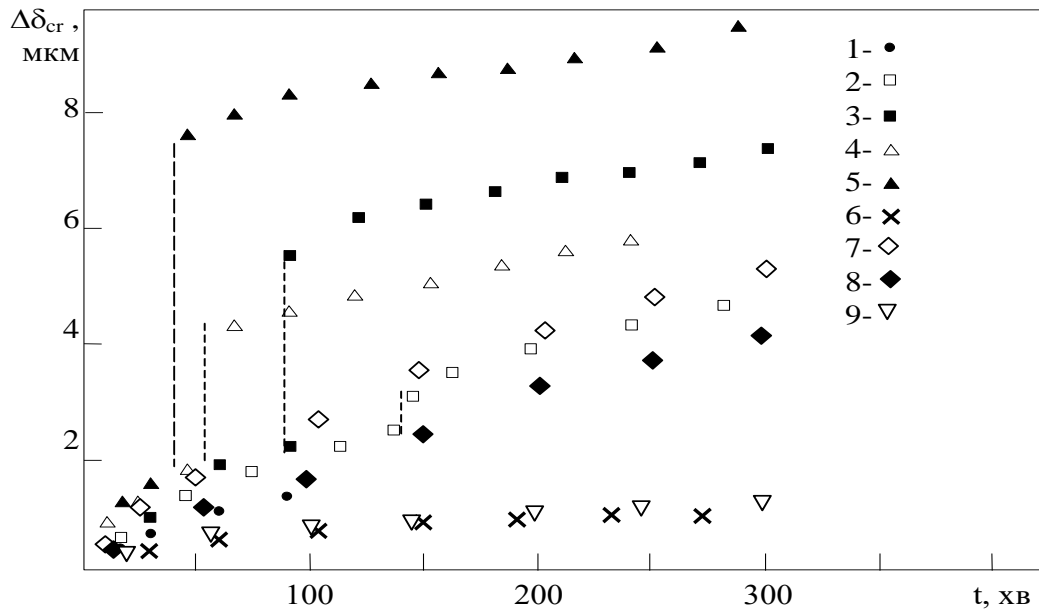


Рисунок 7 - Залежність РВТ від часу: за динамічної повзучості ( $\Delta K=1,1 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$ )  
 1-  $K_{\max}=21,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$ , 2-  $K_{\max}=26,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$ , 3-  $K_{\max}=27,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$ , 4-  $K_{\max}=30,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$ ,  
 5-  $K_{\max}=31,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$ , 6-  $K_{\max}=16,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$ ; за повзучості 7-  $K_{cr}=32,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$ ,  
 8-  $K_{cr}=29,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$ , 9-  $K_{cr}=21,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$

Результати експериментів, у яких зафіксоване в'язке підростання тріщини, були проаналізовані на основі деформаційних, силових та енергетичних параметрів механіки руйнування (рис. 8 - 11).

Проведено аналіз J-інтегралу з урахуванням попереднього розтягу. Залежність J-інтегралу від кількості циклів  $N^*$  до в'язкого старту тріщини в умовах динамічної повзучості має досить значний розкид (рис. 8). Проте на основі експериментальних результатів можна зробити висновок щодо зменшення кількості циклів до старту в'язкої тріщини із збільшенням J-інтегралу  $J_{\max}$  за сталої амплітуди навантажування. Збільшення розмаху циклічної складової від 2,2 до 4,0 МПа $\sqrt{\text{М}}$  значно зменшує кількість циклів до в'язкого зародження тріщини.

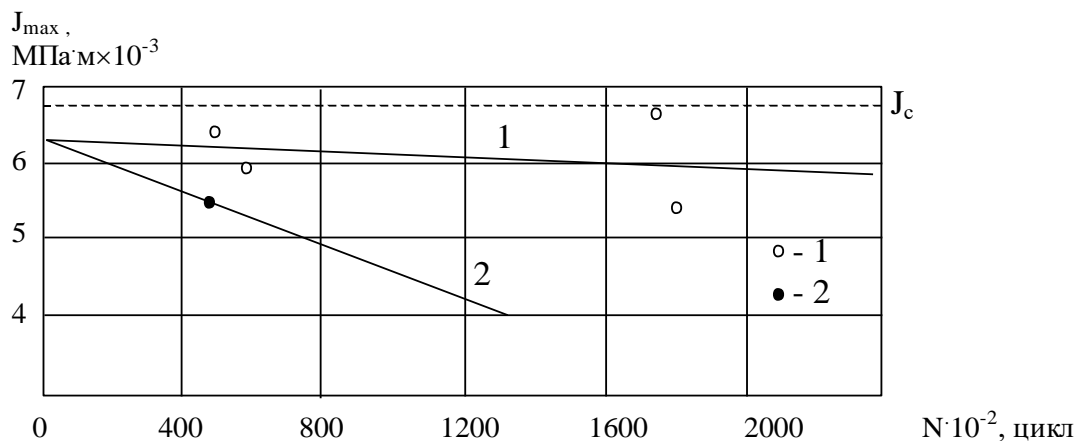


Рисунок 8 - Залежність J-інтегралу  $J_{\max}$  від кількості циклів до старту в'язкої тріщини в алюмінієвому сплаві АМгб: 1-  $\Delta K=2,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$ , 2-  $\Delta K=4,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$

Кращу за J-інтеграл збіжність результатів для опису старту тріщини дає використання КІН  $K_{\max}$  (рис.9).

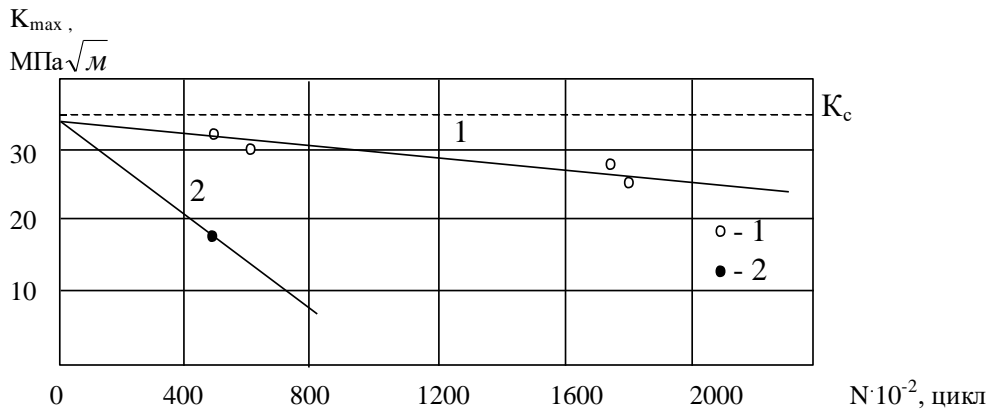


Рисунок 9 - Залежність кількості циклів  $N^*$  до в'язкого зрушення тріщини від  $K_{\max}$ :  
 1-  $\Delta K=2,2 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ , 2-  $\Delta K=4 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$

Аналіз залежності кількості циклів до в'язкого підростання тріщини від параметру КІН, як і у випадку з  $J$  – інтегралом, підтверджує тенденцію зменшення часу до зрушення тріщини із збільшенням  $K_{\max}$  та розмаху КІН  $\Delta K$ .

Методика експериментальних досліджень [2] дозволила з достатньою точністю вимірювати розкриття у вершині тріщини. Тому аналіз експериментальних результатів проводився з урахуванням приросту розкриття в умовах динамічної повзучості. На рис. 10 представлено графік залежності РВТ  $\delta_{cr}^*$  від кількості циклів до в'язкого підростання тріщини  $N^*$ . Експериментальні точки знаходяться в діапазоні значень, які обмежені зверху критичним розкриттям  $\delta_c$  за статичного розтягу, знизу – максимальним пороговим розкриттям тріщини  $\delta_{th}$  за асиметрії циклу  $R=0,9$ .

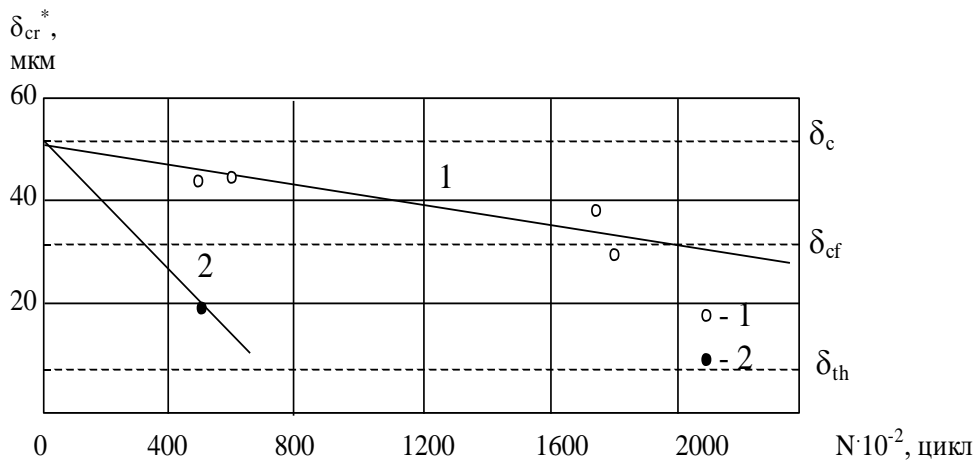


Рисунок 10 - Залежність критичного РВТ  $\delta_{cr}^*$  від кількості циклів до в'язкого зрушення тріщини за динамічної повзучості: 1-  $\Delta K=2,2 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ , 2-  $\Delta K=4 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$

Загальне РВТ в умовах динамічної повзучості складається з попереднього розкриття за одновісного розтягу  $\delta_p$  та приросту розкриття внаслідок повзучості  $\Delta\delta_{cr}$ . Аналіз залежності граничного приросту розкриття тріщини  $\Delta\delta_{cr}^* = \delta_{cr}^* - \delta_p$  в умовах динамічної повзучості від параметру приведенного розкриття вершини тріщини до початку повзучості  $\frac{\delta_p}{\delta_c}$  (рис. 11) показав, що зі збільшенням попереднього РВТ  $\delta_p$  приріст критичного розкриття  $\Delta\delta_{cr}^*$  в умовах динамічної повзучості, за якого відбувається зрушення тріщини, зменшується; і за умови  $\delta_p \rightarrow \delta_c$  прямує до нуля.

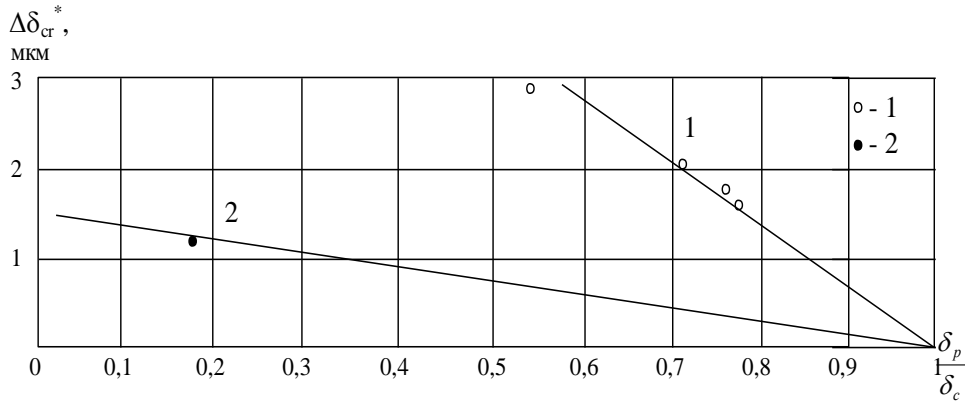


Рисунок 11 - Залежність критичного РВТ  $\Delta\delta_{cr}^*$  в умовах динамічної повзучості від безрозмірного критичного РВТ  $\frac{\delta_p}{\delta_c}$ : 1-  $\Delta K=2,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , 2-  $\Delta K=4 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$

**Висновки.** З вищенаведеного аналізу енергетичних, силових та деформаційних параметрів в умовах динамічної повзучості можна зробити висновок, що найбільш перспективним для оцінки в'язкого підростання тріщини є використання деформаційного критерію. Такий же висновок було отримано і для одновісного розтягу. Тож в цілому видається більш доцільним проводити аналіз старту тріщини та вводити параметри моделі в'язкого підростання за параметрами РВТ.

*The experiments about the features of Al-6%Mg alloy threshold fatigue at uniaxial and biaxial tension with cyclic component have been conducted. The possibility of energetic, power and deformation criteria use for prediction at strain and creep fatigue of Al-6%Mg alloy has been researched. It has been stated that for description of crack initiation at uniaxial and biaxial tension with cyclic component the most rational is to use the deformation criterion.*

### Література

1. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие: В 4-х т. / Под ред. В.В. Панасюка. - Т.3. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения. -К.: Наукова думка, 1988. -436с.
2. Ясній П.В., Галушак М.П., Федак С.І. Оцінка розкриття тріщини у сплаві АМг6 в умовах динамічної повзучості // машинознавство. - 2001. -№6. -С.10-12.
3. Ясній П.В., Галушак М.П. Вплив циклічного навантаження на розкриття вістря тріщини в сплаві АМг6 // Проблеми міцності. - 2001. - №1. -С. 92-97.
4. ASTM E399-83. Standard test method for plane strain fracture toughness of metallic materials // Annual Book of Standards. -Philadelphia: ASTM E399-83, 1985. -P.547-582.
5. Yasniy P., Halushchak M., Fedak S. Modeling of material damage process under tensile stress with stable loading rate and application of the additional high-frequency cyclic component.// Zeszyty naukowe politechniki Bialostockiej.- Nauki Techniczne. - №138. – Mechanika. – Zeszet 24. – Bialostok, 2001. – P. 477-481.

Одержано 17.02.2006 р.