

УДК 539.3

**П. Ясній, докт. техн. наук; В. Гладь, канд. техн. наук;
С. Федак, канд. техн. наук; І. Шульган, канд. техн. наук**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ВПЛИВ ВКЛЮЧЕНЬ НА ГРАНИЧНИЙ СТАН АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АМГ6 В УМОВАХ РОЗТЯГУ І ПОВЗУЧОСТІ

Резюме. Створено розрахункову скінченно-елементну модель для дослідження впливу руйнування крихких включень у матеріалі на пошкоджуваність у вершині тріщини в умовах розтягу, комбінованого розтягу, повзучості та динамічної повзучості з урахуванням параметрів структурної неоднорідності. Виявлено, що критична пошкоджуваність не залежить від виду та схеми навантаження і для алюмінієвого сплаву АМГ6 дорівнює 4%. Запропоновано методіку оцінювання впливу параметрів включень на тріщиностійкість алюмінієвого сплаву. Запропоновано розрахункові залежності критичного розкриття та часу до зрушення тріщини у сплаві АМГ6 від параметрів навантаження.

Ключові слова: пошкоджуваність, граничний стан, моделювання гетерогенного матеріалу.

P. Yasniy, V. Hlado, S. Fedak, I. Shulhan

INFLUENCE OF INCLUSIONS ON LIMIT STATE OF Al-6%Mg ALLOY IN THE CONDITIONS OF STRETCH AND CREEP

The summary. Finite-element computation model is created for investigation the influence of brittle inclusions destruction in the material for damage in the crack tip with stretch, combined stretch, creep and dynamic creep with taking into account structural heterogeneousness parameters. It is investigated that critic damage does not depend on type and scheme of load and for Al-6%Mg alloy is equal 4%. The methods of estimation the influence of inclusions parameters on threshold of aluminium alloy. Computation reliance of critic opening and time before the crack initiation in Al-6%Mg alloy on the load parameters is recommended.

Key words: damage, limit state, modeling of heterogeneous material.

Постановка проблеми. Циклічна складова навантаження істотно впливає не тільки на деформацію, але й на граничний стан матеріалу. Суттєва відмінність у визначенні силових, деформаційних та енергетичних критеріїв за наявності статичного і циклічного навантаження вимагає використовувати багатокомпонентні параметри руйнування або різноманітні поправочні коефіцієнти в існуючих моделях [1–3]. Однак єдиної характеристики, яка описує граничний стан матеріалу за комплексної дії кількох видів навантаження, не існує, що вимагає створення уніфікованого критерію руйнування матеріалу. Однією з характеристик, що встановлює такий зв'язок, є пошкоджуваність, яка виникає від кожного з видів навантаження та за їхньої сумісної дії, і може слугувати за уніфікований параметр руйнування матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пошкоджуваність у матеріалі істотно залежить від мікроструктури, наявності неоднорідності та включень [3–5]. При деформації гетерогенної структури в компонентах (включеннях або матриці) досягається граничний стан, внаслідок чого вони руйнуються, що викликає перерозподіл напружень і деформацій [6, 7]. Такі мікроструктурні зміни мають значний вплив на кінетику пластичної деформації та на граничний стан у матеріалі.

Методом скінченних елементів (МСЕ) досліджено вплив розподілу включень на пошкоджуваність алюмінієвого сплаву, утворення пор і мікротріщин виконано в [6, 7]. Показано, що скупчення включень до трьох разів збільшує ймовірність пошкодження матеріалу [6]. Моделювання МСЕ впливу включень на траєкторію росту тріщини в композиті з алюмінієвою матрицею виконано в працях [8, 9].

У працях [10–12] чисельними методами досліджено вплив розмірів і механічних властивостей включень на ріст тріщин. Показано, що руйнування включень істотно впливає на її траєкторію. Істотний вплив мають також наявність пор та орієнтація витягнутих включень [11]. Тому моделювання МСЕ сумісної дії статичної і циклічної складових навантаження на пошкоджуваність матеріалу вимагає враховувати структурну неоднорідність.

Мета роботи. Стаття присвячена дослідженню МСЕ впливу руйнування крихких включень у сплаві АМг6 на пошкоджуваність та розкриття вершини тріщини в умовах одновісного розтягу, повзучості, комбінованого розтягу та динамічної повзучості з урахуванням параметрів структурної неоднорідності.

Методика досліджень. Для дослідження впливу структурної неоднорідності на параметри тріщиностійкості сплаву АМг6 в умовах розтягу, комбінованого розтягу, повзучості та динамічної повзучості була створена двовимірна скінчено-елементна модель з тріщиною (рис. 1, 2).

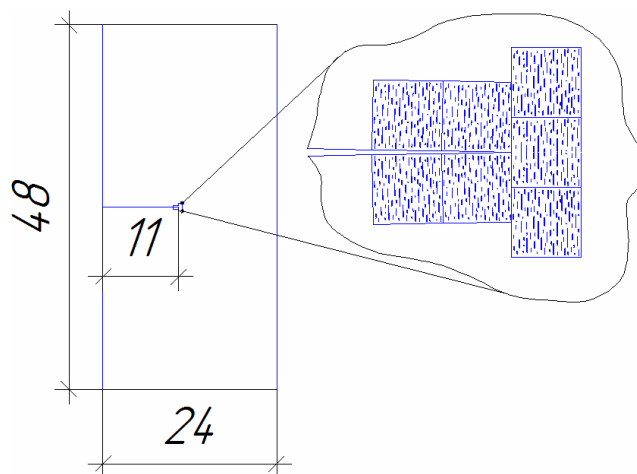


Рисунок 1. Розрахункова модель сплаву АМг6 з тріщиною

Вершина тріщини оточена блоками структурно-неоднорідного матеріалу, характеристики якого ідентичні АМг6. Геометричні розміри моделі й довжина тріщини відповідають параметрам досліджуваного зразка (рис. 1).

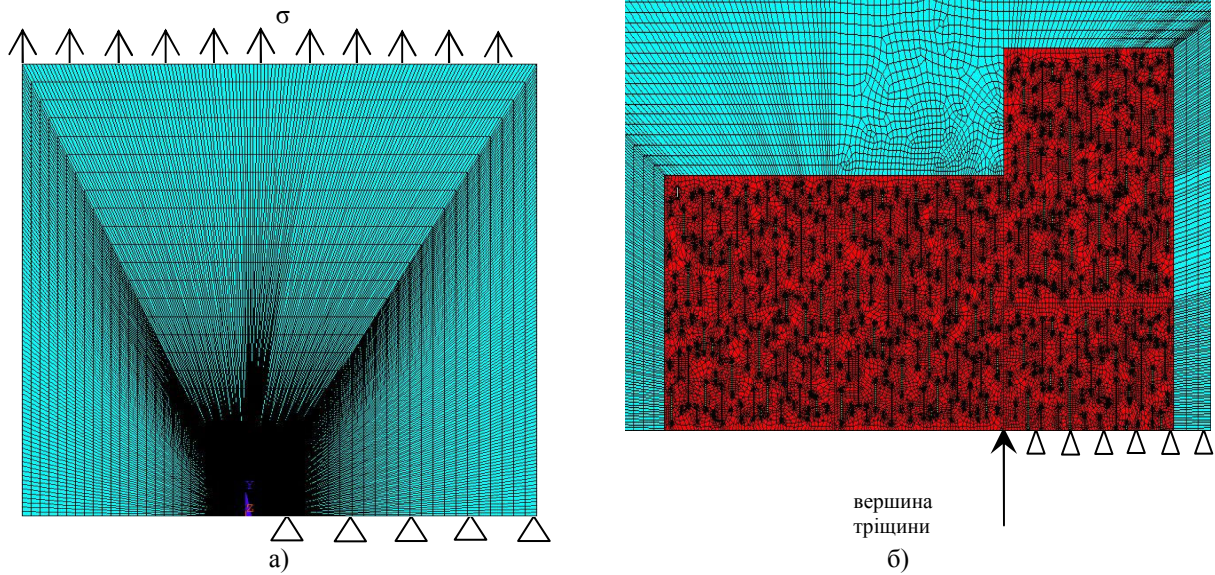


Рисунок 2. Скінчено-елементна модель алюмінієвого сплаву АМг6 з тріщиною:
 а – загальний вигляд моделі і схема прикладання зусиль;
 б – ділянка в околі вершини тріщини моделі

Вважали, що включення деформуються тільки пружно і мають модуль пружності I-го роду більший, ніж матриці (рис. 3). Сумарні механічні характеристики взаємодії матриці (крива 2) і включень (крива 1) відповідають діаграмі деформування матеріалу (крива 3). Механічні характеристики структурних складових моделей дорівнювали аналогічним характеристикам сплаву АМг6. Механічні характеристики включень подано в [13], механічні характеристики сплаву АМг6 – в [14]. Механічні характеристики матриці сплаву АМг6 без урахування включень визначали шляхом ітераційних розрахунків із використанням алгоритму з визначення деформаційних характеристик матриці за відомими деформаціями включень та сумарного гетерогенного матеріалу. В даному алгоритмі параметром оцінювання є відповідність сумарної деформації матеріалу, який представлено скінчено-елементною моделлю, експериментальним даним [15].

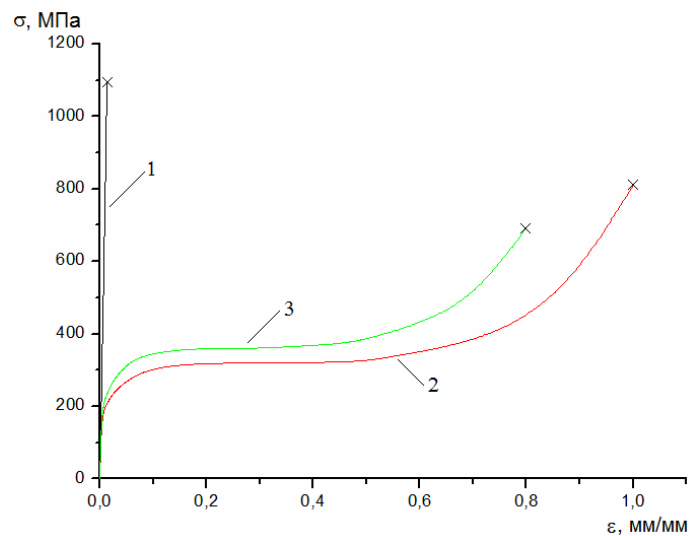


Рисунок 3. Діаграми деформування включень (1), матриці (2) та сумарна діаграма (3) деформування матеріалу

Зусилля прикладали до верхньої горизонтальної лінії моделі, а нижню лінію фіксували й обмежували її вертикальне переміщення (рис. 2). Скінчено-елементна сітка для моделей створена за допомогою двовимірного елемента plane82. Елемент має властивість квадратичного представлення переміщень і використовується при моделюванні з нерегулярною сіткою скінчених елементів. Елемент визначають вісім вузлів, які мають два ступені вільності в кожному вузлі. Елемент має властивості пластичності, гіперпружності, повзучості, збільшення жорсткості при великих навантаженнях, переміщеннях і деформаціях. Елемент може набувати чотирикутної та трикутної форм. Для розрахунків активізували опцію руйнування матриці та включень у моделі.

Розрахунки проводили у пружно-пластичній постановці, розглядали плоско-деформований стан. З метою економії ресурсів ПК та спрощення розрахункової задачі для обчислення використовували половину моделі (симетрично лінії тріщини). На модель накладали обмеження з урахуванням її іншої половини – симетричні граничні обмеження (рис 2). Напруження прикладали до верхньої лінії моделі (рис 2а) ітераційно в діапазоні від 0 до 70 МПа з кроком ітерації – 0,1 МПа. На кожному кроці навантаження перевіряли умову руйнування включень і матриці й деактивували елементи, які відповідали цим умовам ($\sigma_f^{matrix} = 825\text{МПа}$, $\sigma_f^{particles} = 1100\text{МПа}$).

З метою автоматизації отримання й опрацювання результатів розрахунку були створені постпроцесорні макроси, які дозволяють визначати значення КІН K_I , J -інтеграла, розкриття тріщини на кожному ітераційному кроці навантаження. КІН визначали за допомогою вбудованої у програмному комплексі ANSYS функції $KCALC$. J -інтеграл обчислювали по контуру, який охоплював блок структурно-неоднорідного матеріалу у вершині тріщини.

Для визначення геометрії берегів тріщини МСЕ обчислювали переміщення кожного вузла (в тому числі й проміжних вузлів) елементів, що знаходяться на лінії тріщини. Розкриття тріщини визначали на відстані r_1 від її вершини. Ця відстань визначається закінченням заокруглення вершини тріщини і початком лінійної ділянки її берегів. Для даної моделі $r_1 = 0,290 \cdot 10^{-3}$ м.

При моделюванні МСЕ основним показником руйнування матеріалу є його пошкоджуваність на мікроструктурному рівні. Пошкоджуваність ω у вершині тріщини (рис. 4) визначали як відношення площі утворених внаслідок деформування пор на ділянці напружень руйнування включення до площі цієї ділянки.

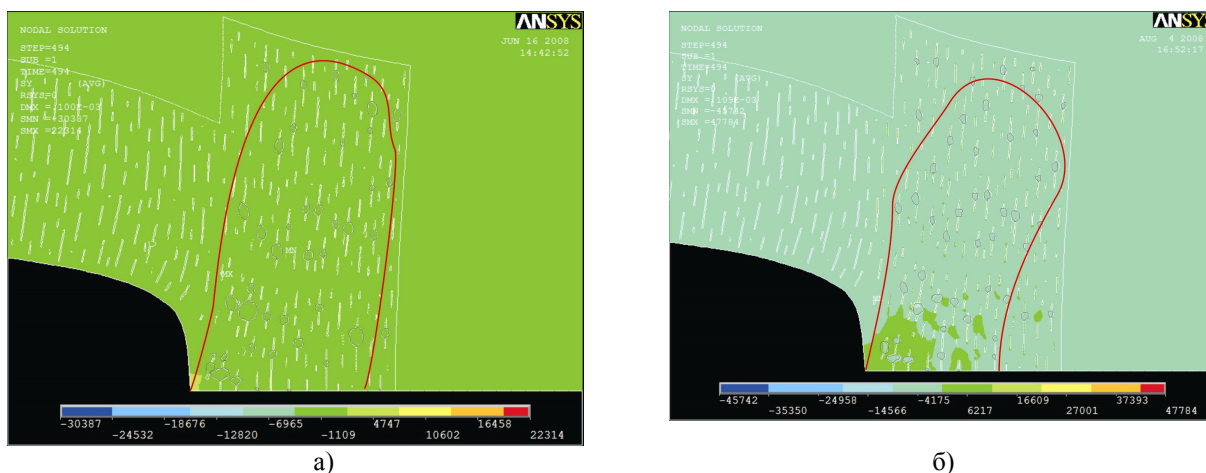


Рисунок 4. Пошкоджуваність матеріалу у вершині тріщини:

а) – розтяг, $K_C = 33\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$; б) – комбінований розтяг, $K_{fC} = 27,3\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$

Результати досліджень та їх обговорення. У процесі розрахунків проведено якісний та кількісний аналіз модельного матеріалу.

Для сплаву АМг6 критичне значення КІН за статичного навантаження відоме з експериментальних досліджень і становить $K_C = 33,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ [5]. При досягненні критичного значення КІН аналізували пошкоджуваність у вершині тріщини. Вважаємо, що пошкоджуваність матеріалу при критичному значенні КІН визначає його граничний стан (рис. 4а). Пошкоджуваність у вершині тріщини становить $\omega = 0,03997$ (~4%). При деформуванні комбінованим розтягом з амплітудою $\Delta K = 2,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ та частотою $f = 25 \text{ Гц}$ на кожному ітераційному кроці обчислювали пошкоджуваність матеріалу. Коли рівень пошкоджуваності сягнув значення, виміряного за статичного навантаження $K_C = 33,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, вважали, що досягли граничного стану (рис. 4б). При цьому рівні пошкоджуваності для комбінованого розтягу розрахунковий критичний КІН $K_{fC} = 27,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Для порівняння, експериментальне значення $K_{fC \text{ exp}} = 27,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ [5].

За однакової пошкоджуваності матеріалу кількість і розміри пори суттєво відрізняються залежно від виду навантаження (рис. 4). При статичному навантаженні пори характеризуються великими геометричними розмірами (особливо в околі вершини тріщини) та відносно невеликою кількістю. При циклічному навантаженні спостерігається обернена ситуація – пори мають невеликі розміри, однак їх кількість більша.

Досліджували пошкоджуваність у вершині тріщини, отриману внаслідок повзучості та динамічної повзучості. Пошкоджуваність матеріалу у вершині тріщини можна умовно поділити на пошкоджуваність, отриману за попереднього розтягу, та пошкоджуваність матеріалу, спричинену повзучістю за постійного максимального рівня КІН (рис. 5).

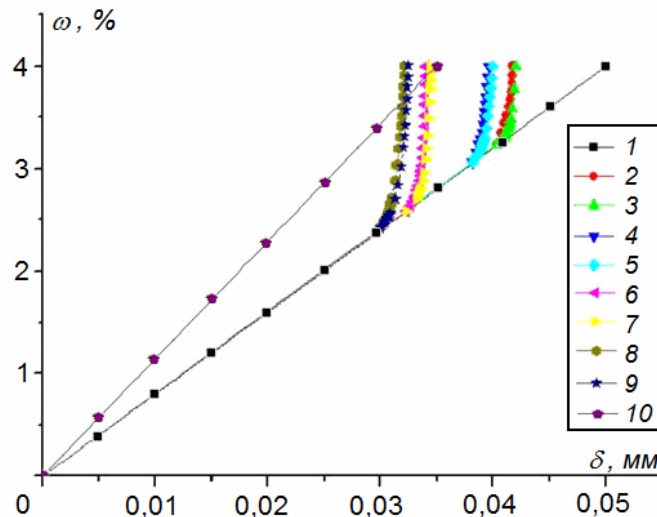


Рисунок 5. Залежність пошкоджуваності матеріалу від розкриття тріщини за розтягу (1), комбінованого розтягу (10), повзучості (3, 5, 7, 9) та динамічної повзучості (2, 4, 6, 8):

$$1 - K = K_{\max} = 33,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}; 2, 3 - K = K_{\max} = 31,1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}};$$

$$4, 5 - K = K_{\max} = 30,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}; 6, 7 - K = K_{\max} = 27,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}};$$

$$8, 9 - K = K_{\max} = 26,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}; 10 - K = K_{\max} = 27,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$$

Пошкоджуваність за одновісного розтягу представлена на рисунку 5 кривою 1 і має лінійну залежність від розкриття у вершині тріщини:

$$\omega_p = C \cdot \delta_p, \quad (1)$$

де $C = 0,8 \left(\frac{1}{\text{мм}} \right)$ – стала.

Залежність приросту пошкоджуваності від приросту розкриття вершини тріщини за повзучості та динамічної повзучості представлена на рисунку 6.

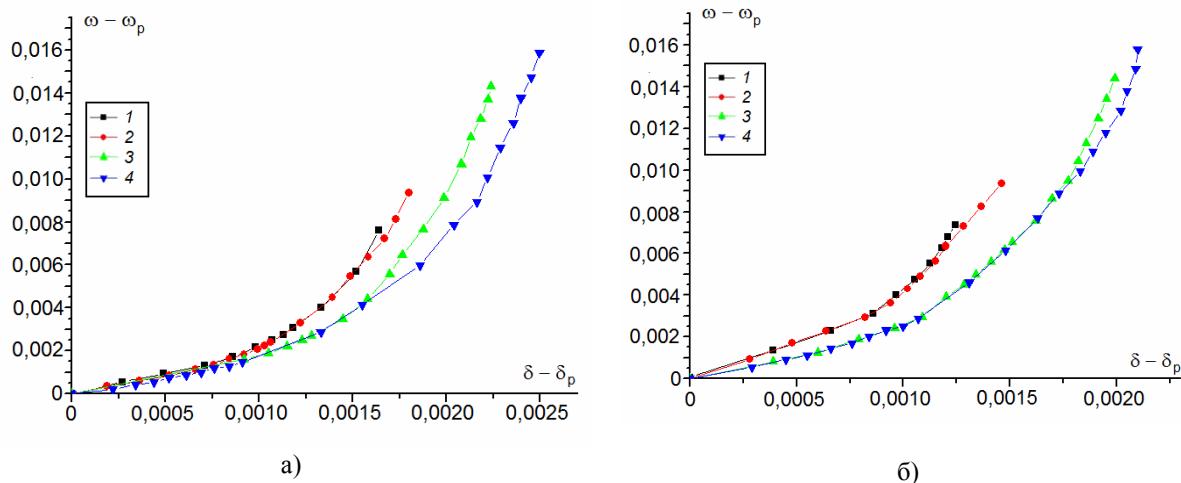


Рисунок 6. Залежність приросту пошкоджуваності матеріалу від приросту розкриття тріщини за повзучості (а) та динамічної повзучості (б):

$$1 - K = K_{\max} = 31,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}; 2 - K = K_{\max} = 30,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}};$$

$$3 - K = K_{\max} = 27,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}; 4 - K = K_{\max} = 26,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$$

Дана залежність має може бути описана таким рівнянням:

$$(\omega - \omega_p) = \left(\frac{A + B \cdot \delta_p}{\delta_p^2} \right) \cdot (\delta - \delta_p)^2, \quad (2)$$

де A, B – сталі: за повзучості $A = -3,949$, $B = 0,1998 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{\text{мм}} \right)$, за динамічної

повзучості $A = -0,1112 \cdot 10^2$, $B = 0,4574 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{\text{мм}} \right)$; δ_p – розкриття вершини тріщини за попереднього навантаження одновісним розтягом

Треба зазначити, що залежно від попереднього навантаження одновісним розтягом матеріал буде містити різну кількість пор, утворених внаслідок деформування матеріалу. Зі збільшенням попереднього навантаження одновісним розтягом збільшується попередня пошкоджуваність.

Критична пошкоджуваність характеризується пошкоджуваністю матеріалу у вершині тріщини в момент її старту (граничний стан матеріалу). Виявлено, що критичне значення пошкоджуваності для сплаву АМг6 становить 4% (рис. 5). Пошкоджуваність можна розглядати як критерій тріщиностійкості, оскільки розрахунки показали, що незалежно від виду (розтяг, повзучість) та схеми навантаження (розтяг, комбінований розтяг, розтяг + повзучість, розтяг + динамічна повзучість), граничний стан досягається при пошкоджуваності у вершині тріщини, що дорівнює критичній.

Чим вище попереднє навантаження за одновісного розтягу, тим швидше досягається критична пошкоджуваність, а, отже, і граничний стан матеріалу. На рисунку 7 наведено залежність приросту пошкоджуваності від часу навантаження за повзучості та динамічної повзучості до досягнення критичної пошкоджуваності.

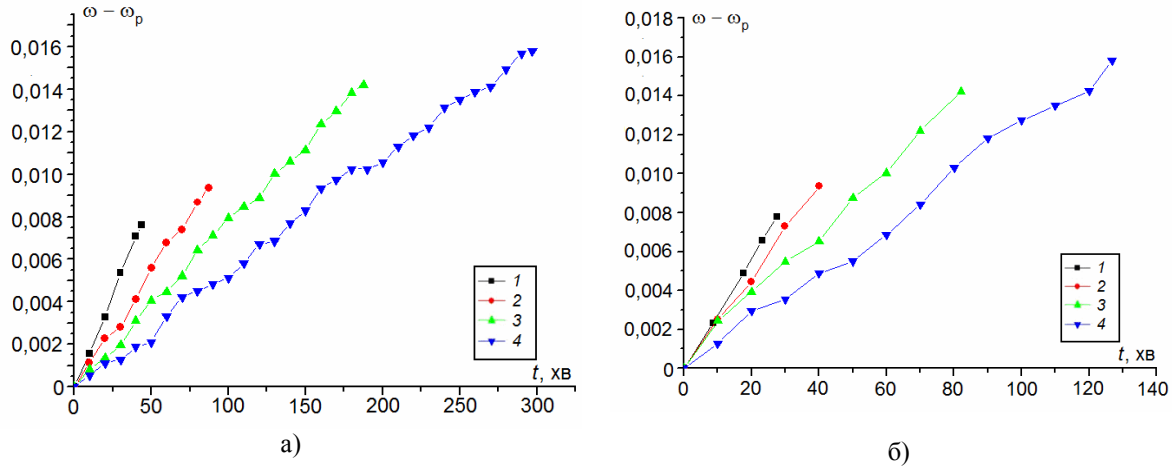


Рисунок 7. Залежність приросту пошкоджуваності матеріалу від тривалості навантаження за статичної (а) та динамічної (б) повзучості:

$$1 - K = K_{\max} = 31,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}; 2 - K = K_{\max} = 30,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}};$$

$$3 - K = K_{\max} = 27,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}; 4 - K = K_{\max} = 26,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$$

Приріст пошкоджуваності та час навантаження за повзучості та динамічної повзучості описують залежністю

$$(\omega - \omega_p) = A_1 \cdot \left(\frac{\delta_c - \delta_p}{\delta_c} \right)^n \cdot t, \quad (3)$$

де A_1 , n – сталі: за повзучості $A_1 = 0,128 \cdot 10^{-4}$, $n = -1,6488$, за динамічної повзучості $A_1 = -0,431 \cdot 10^{-4}$, $n = -1,21265$; δ_c – критичне розкриття вершини тріщини за одновісного розтягу (для сплаву АМг6 $\delta_c = 0,05 \text{ мм}$).

З урахуванням (1) та (2) отримали залежність критичного розкриття δ^* вершини тріщини сплаву АМг6 від попереднього розкриття δ_p за статичної та динамічної повзучості

$$\delta^* = \delta_p \left(1 + \sqrt{\frac{\omega^* - C \delta_p}{A + B \delta_p}} \right), \quad (4)$$

де ω^* – критична пошкоджуваність матеріалу у вершині тріщини (=4%).

Як впливає з даної залежності, величина критичного розкриття у вершині тріщини залежить від попереднього розкриття за одновісного розтягу (від рівня попереднього навантаження). Більше значення напружень за попереднього навантаження характеризується більшим значенням критичного розкриття у вершині тріщини. Вид навантаження за повзучості характеризується коефіцієнтами A та B залежності (2).

Важливим показником при оцінюванні граничного стану є час до його настання. Враховуючи (1) та (3), отримане рівняння для розрахунку часу до старту тріщини t^* в сплаві АМг6 за повзучості та динамічної повзучості

$$t^* = \frac{\omega^* - \omega_p}{A_1} \left(1 - \frac{C^{-1} \omega_p}{\delta_c} \right)^{-n} \quad (5)$$

Час до старту тріщини залежить від попередньої пошкодженості матеріалу за одновісного розтягу ω_p (від рівня попереднього навантаження). Зі збільшенням рівня попереднього навантаження довговічність в умовах повзучості (динамічної повзучості) зменшується. Вид навантаження характеризується коефіцієнтами A_1 та n рівняння (3).

Для здійснення подальших досліджень потрібно провести моделювання впливу частоти та амплітуди навантажування на критерії зрушення тріщини.

Висновки. Створено двовимірну двокомпонентну розрахункову скінчено-елементну модель алюмінієвого сплаву АМг6, що складається з пластичної матриці та пружних крихких включень, які орієнтовані в одному напрямі. Модель дає можливість описувати механічну поведінку сплаву у пружно-пластичній постановці з урахуванням руйнування структурних складових матеріалу. З'ясовано, що критична пошкодженість не залежить від виду та схеми навантаження і для алюмінієвого сплаву АМг6 дорівнює 4%. Запропоновано методику оцінювання впливу параметрів включень на тріщиностійкість алюмінієвого сплаву, яка ґрунтується на аналізі НДС, пошкодженості та критичній пошкодженості матеріалу у вершині тріщини. Запропоновано розрахункові залежності критичного розкриття та часу до старту тріщини у сплаві АМг6 від параметрів навантаження. Виявлено, що критичне розкриття вершини тріщини залежить від попереднього розкриття за одновісного розтягу, а час до старту тріщини характеризується попередньою пошкодженістю матеріалу у вершині тріщини.

Література

1. Troshchenko V.T., Lebedev A.A., Strizhalo V.A. et al. Mechanical behavior of materials under different types of loading [in Russian], Kiev, Logos Publ., 2000.
2. Strizhalo V.A. Cyclic strength and creep of metals under low-cycle loading at low and elevated temperatures [in Russian], Kiev, Naukova Dumka 1978.
3. P. V. Yasnii, V. B. Glad'o. Effect of the Cyclic Tensile Component of Loading on the Dislocation Structure of AMg6 Alloy // Materials Science. – 2002. – Vol. 38, No 3. – P.388–393.
4. P. V. Yasnii, S. I. Fedak, V. B. Glad'o, M. P. Galushchak. Jumpslike Deformation in AMg6 Aluminum Alloy in Tension // Strength of Materials. – 2004. – Vol. 36, No 2. – P.113–118.
5. P.V. Yasniy, M.P. Halushchak, S.I. Fedak, V.Yu. Pikol'zin. Cyclic creep of AMG6 alloy / Materials Science. – 2000. – 36, N 1. – P. 48–53.
6. L. Mishnaevsky Jr., K. Derrien, D. Baptiste Effect of microstructure of particle reinforced composites on the damage evolution: probabilistic and numerical analysis // Composites Science and Technology 64 (2004). – P. 1805–1818.
7. Моделювання розкриття тріщини повзучості з урахуванням структурної неоднорідності [Текст] / П.В. Ясній, В.Б. Глад'ю, С.І. Федак, І.В. Шульган // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: збірник наукових праць за загальною редакцією Й.Й. Лучка. Випуск 8. – Львів: Каменяр. 2009. – С. 344–353.
8. Grabowski, Z. Pedzich. Residual stresses in particulate composites with alumina and zirconia matrices // Journal of the European Ceramic Society 27 (2007) P. 1287–1292.
9. R.J. Moon, M. Hoffman, J. Rodel, S. Tochino, G. Pezzotti. Evaluation of crack-tip stress fields on microstructural-scale fracture in Al–Al₂O₃ interpenetrating network composites // Acta Materialia 57 (2009) P. 570–581.

10. L. Mishnaevsky Jr., U. Weber, S. Schmauder Numerical analysis of the effect of microstructures of particle-reinforced metallic materials on the crack growth and fracture resistance // *International Journal of Fracture* 125 (2004) P. 33–50.
11. A. Chakraborty, S. Rahman. A parametric study on probabilistic fracture of functionally graded composites by a concurrent multiscale method // *Probabilistic Engineering Mechanics* 24 (2009). – P. 438–451.
12. A. Ayyar, N. Chawla. Microstructure-based modeling of the influence of particle spatial distribution and fracture on crack growth in particle-reinforced composites // *Acta Materialia* 55 (2007). – P. 6064–6073.
13. Somnath Ghosh, Kyunghoon Lee, Prasanna Raghavan. A multi-level computational model for multi-scale damage analysis in composite and porous materials. *International Journal of Solids and Structures*, 38 (2001) 2335–2385.
14. Yasnii P.V. and Galushchak M.P., Procedure and some results of the investigation on the influence of cyclic loading on the stress-strain curve of alloy AMg6 [in Ukrainian] *Proceedings of the Ternopil State Technical University*. 1998, Vol. 3, P. 4. pp. 62–66.
15. Materials of the XII-th Scientific Conference, TSTU, (Ternopil, May, 14–15, 2008), Ministry of Education and Science of Ukraine, I.Puluj Ternopil State Technical University, 2008. 370 ps.