

Вплив циклічного навантаження на розкриття вістря тріщини в сплаві АМгб

П. В. Ясній, М. П. Галушак

Тернопільський державний технічний університет ім. Івана Пулюя, Тернопіль, Україна

Досліджено вплив циклічного навантаження з амплітудою, співмірною з пороговим коефіцієнтом інтенсивності напружень, на діаграму статичного розтягу і повзучість зразків із тріщинами зі сплаву АМгб. Проаналізовано вплив частоти і розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень на величину розкриття вістря тріщини, зумовлену повзучістю.

У процесі експлуатації високонавантажені елементи конструкцій (трубопроводи, посудини високого тиску, мостові конструкції, авіатехніка) поряд із довготривалими статичними напруженнями можуть зизнавати дії низькоамплітудних циклічних. Циклічна складова істотно впливає на тривалу міцність матеріалів. Пояснити вплив циклічної складової на деформаційні процеси можна на основі взаємодії процесів повзучості та втоми [1].

Інтенсифікація процесів повзучості має як негативний, так і позитивний вплив на несучу здатність та довговічність елементів конструкцій, особливо за наявності тріщиноподібних дефектів. Наприклад, підсумовування накопичення квазістатичних пошкоджень і пошкоджень при повзучості приводить до зменшення довговічності елементів конструкцій за відсутності тріщиноподібних дефектів. Однак за наявності тріщин спільна дія циклічного і статичного навантаження при реалізації попереднього теплового перевантаження за умови відсутності підростання тріщин зумовлює підвищення опору крихкому руйнуванню металу [2].

Незважаючи на важливість цієї проблеми, в літературних джерелах недостатньо висвітлено питання впливу комбінованого (статичного і циклічного) навантаження на напружено-деформований стан і повзучість матеріалів за наявності тріщин. Основні дослідження, зокрема [3–6], відносяться до випадку, коли взаємодія процесів повзучості та втоми приводить до прискорення розвитку тріщин. Майже відсутні праці, в яких досліджується спільна дія квазістатичного і низькоамплітудного циклічного навантаження на напружено-деформований стан тіл із тріщинами, зокрема на розкриття вістря тріщини.

Метою даної роботи є дослідження впливу комбінованого навантаження на поведінку зразків із тріщинами у випадку, коли розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) співмірний з пороговою тріщиностійкістю, тобто за умови відсутності підростання тріщини.

Методика та результати досліджень. Дослідження проводили на сервогідравлічній випробувальній 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.

Для визначення розкриття вістря тріщини відпрацьовані сигнали реєструвалися комп'ютером за трьома каналами: зусилля, розкриття берегів надрізу Δ_1 і розкриття тріщини біля її вістря Δ_2 . Схема вимірювання розкриття тріщини і берегів надрізу подана на рис. 1. Деформації вимірювалися тензометричними датчиками місткового типу з похибкою вимірювання $4 \cdot 10^{-5}$ мм/мм. Крім запису результатів на магнітний носій двокоординатним потенціометром-самописцем типу Н 307/1 реєструвалася залежність деформації від часу.

Початкові втомні тріщини вирощували у відповідності з рекомендаціями [7]. На кінцевій ділянці середня швидкість росту втомних тріщин була не більше $2 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл.

Для експериментів використовували зразки, виготовлені з алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6 (рис. 2). Основні механічні властивості матеріалу у стані поставки: $\sigma_{0,2} = 175$ МПа; $\sigma_B = 360$ МПа; $\delta = 18,2\%$; $\psi = 34\%$. Порогові коефіцієнти інтенсивності напружень $\Delta K_{th} = 4,9$ МПа $\sqrt{м}$ при $R = 0,1$ і $\Delta K_{th} = 3,3$ МПа $\sqrt{м}$ при $R = 0,7$. Експерименти проводили за температури 293 К.

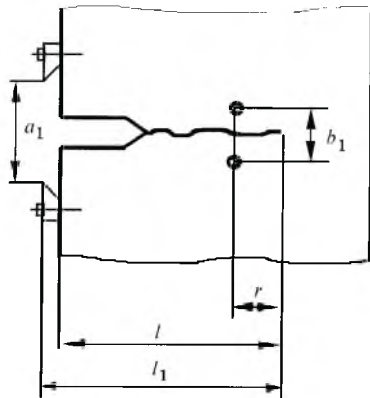


Рис. 1. Схема вимірювання розкриття тріщини.

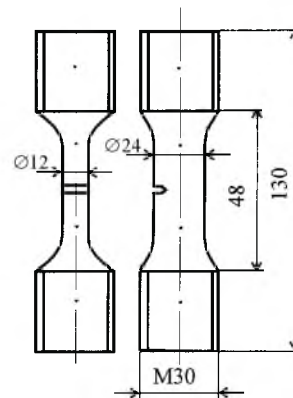


Рис. 2. Зразки для випробувань.

У першій серії експериментів досліджували розкриття вістря тріщини для двох типів короткочасного навантаження розтягуванням: чисто статичного і статичного з накладанням незначної циклічної складової (рис. 3,а). Швидкість зростання статичного навантаження у всіх експериментах складала $dK / dt = 0,2$ МПа $\sqrt{м}$ с $^{-1}$ (K – коефіцієнт інтенсивності напружень; t – час).

Випробування проводили при частотах циклічного навантаження $f = 25$ і 50 Гц та амплітудах коефіцієнту інтенсивності напружень $K_a = \pm 1,6$ і $\pm 2,9$ МПа $\sqrt{м}$:

$$K_a = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{2}, \quad (1)$$

де K_{\min} і K_{\max} – відповідно найменше і найбільше значення коефіцієнту інтенсивності напружень.

Коефіцієнт інтенсивності напружень обчислювався за формулою [8]

$$K = \frac{PY}{cb} \sqrt{\pi l}, \quad (2)$$

де $Y = 1,12 - 0,231(l/b) + 10,55(l/b)^2 - 21,72(l/b)^3 + 30,90(l/b)^4$; P – максимальне зусилля циклу; c – товщина зразка; b – ширина зразка; l – довжина тріщини (рис. 1).

Розкриття вістря тріщини визначалося за формулою [9]

$$\delta = \Delta_1 \frac{l_1/r - \Delta_2/\Delta_1}{l_1/r - 1}, \quad (3)$$

де l_1 і r – відповідно відстань від вістря тріщини до площин вимірювання переміщення берегів надрізу і берегів тріщини; Δ_1 – переміщення берегів надрізу на відстані l_1 від вістря тріщини; Δ_2 – переміщення берегів тріщини на відстані r від її вістря (рис. 1).

Оскільки фронт тріщин у більшості випадків був криволінійний, їх середню довжину обчислювали згідно з рекомендаціями [7].

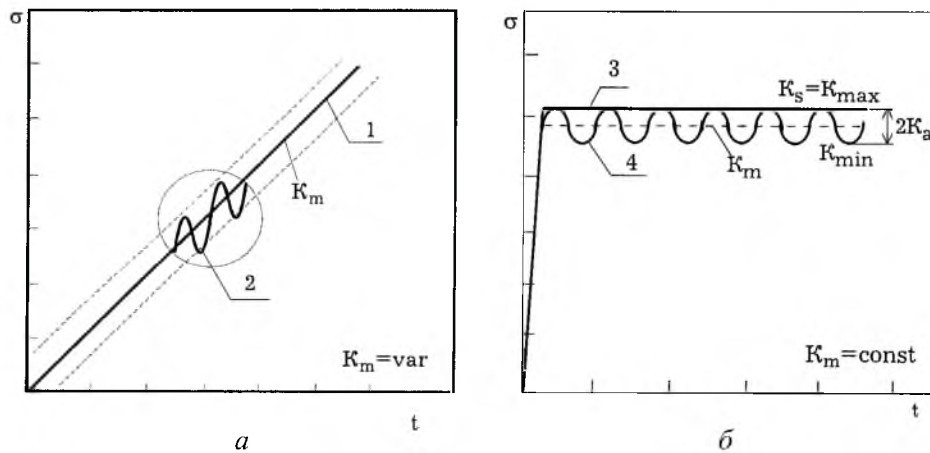


Рис. 3. Схеми навантаження при випробуваннях на короточасний розтяг (а) і повзучість (б): 1 – квазістатичне; 2, 4 – комбіноване; 3 – статичне.

Залежність розкриття вістря тріщини δ від K і K_{\max} відповідно при статичному і комбінованому навантаженні ілюструє рис. 4. У всіх експериментах ріст тріщини був відсутній.

Необхідно відзначити, що при статичному навантаженні зразків із різною довжиною тріщин (від 11,4 до 12,6 мм) характер залежності δ від K залишається незмінним. Разом із тим розкриття вістря тріщини при комбінованому навантаженні більше порівняно з статичним у всіх випадках.

Максимальний ефект досягається при амплітуді циклічного навантаження $K_a = \pm 1,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ з частотою 25 Гц. Таким чином, спільна дія циклічного і статичного навантаження, навіть за умови $K_a < \Delta K_{th}$, приводить до збільшення повзучості сплаву АМг6 на ділянці біля вістря тріщини.

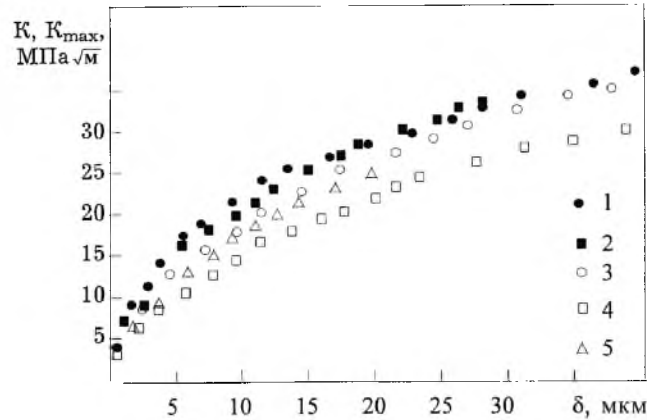


Рис. 4. Залежність розкриття вістря тріщини δ від K при статичному (1, 2) і від K_{\max} при комбінованому (3 – $f = 25$ Гц, $K_a = \pm 2,9 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; 4 – $f = 25$ Гц, $K_a = \pm 1,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; 5 – $f = 50$ Гц, $K_a = \pm 1,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$) навантаженні.

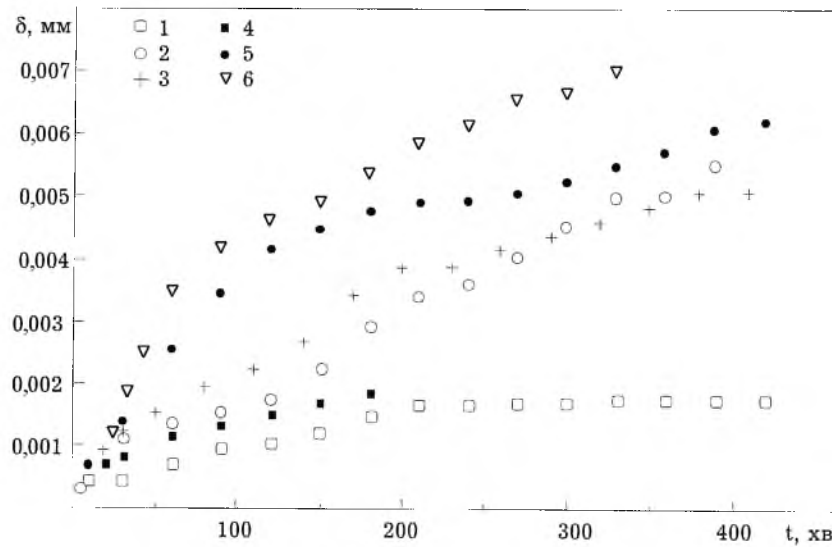


Рис. 5. Залежність розкриття вістря тріщини δ від часу t при статичному (1 3) та комбінованому (4 6) навантаженні: 1 $K_S = 21 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; 2 $K_S = 29 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; 3 $K_S = 32 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; 4 – $K_{\max} = 21 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; 5 – $K_{\max} = 26 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; 6 – $K_{\max} = 31 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Отримані дані якісно співпадають з результатами досліджень циліндричних гладких зразків, для яких додаткове до статичного низькоамплітудне циклічне навантаження зумовлює зростання загальної деформації [10].

З метою детального дослідження процесів повзучості у вістрі тріщини при статичному і комбінованому навантаженні проводили другу серію експериментів. Схема навантажень зображена на рис. 3,б. При статичних випробуваннях зразки навантажувалися зі швидкістю $\dot{K} = 0,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} \text{ с}^{-1}$ до заданого рівня напружень K_S . При комбінованому навантаженні до зразка прикладали зусилля, яке зростало в часі з тією ж швидкістю ($\dot{K} = 0,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} \text{ с}^{-1}$) до величини K_m , після чого зразок циклічно навантажували з амплітудою $K_a = \pm 1,1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ і частотою $f = 25 \text{ Гц}$. Щоб запобігти підростанню тріщини, величину амплітуди K_a вибирали нижчою за порогове значення КІН.

Аналіз експериментальних результатів (рис. 5) дозволяє стверджувати, що незалежно від часу випробувань у діапазоні $K_S = 21 \dots 32 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ розкриття вістря тріщини внаслідок повзучості при комбінованому навантаженні за умови $K_{\text{max}} \approx K_S$ значно більше, ніж при статичному.

Висновки

1. Для сплаву АМгб циклічне навантаження, яке накладається додатково до статичного розтягу зразка з тріщиною, збільшує розкриття її вістря порівняно з статичним розтягом.

2. Циклічне навантаження, яке накладається додатково до статичного, за умови $K_a < \Delta K_{th}$ приводить до збільшення розкриття вістря тріщини внаслідок повзучості незалежно від стадії повзучості (усталеної чи неусталеної).

Резюме

Исследовано влияние циклического нагружения с амплитудой, соразмерной с пороговым коэффициентом интенсивности напряжений, на диаграмму статического растяжения и ползучести образцов с трещинами из сплава АМгб. Проанализировано влияние частоты и размаха коэффициента интенсивности напряжений на величину раскрытия вершины трещины, обусловленную ползучестью.

1. *Lukas P., Kunz L., Sklenicka V.* Interaction of High Cycle Fatigue with High Temperature Creep // *Strength of Materials. Japan Institute of Metals.* – 1994. – P. 17 – 24.
2. *Пат. № 23231А, МКВ F16L57/00.* Україна. Спосіб підвищення стійкості елементу конструкції до поширення тріщин / П. В. Ясній, В. Ю. Подкользін, Я. О. Ковальчук. – Опубл. 19. 05. 98.
3. *Grover P., Saxena A.* Developments in creep-fatigue growth testing and data analysis // *Proc. of the 10th Biennial European Conference on Fracture.* – Berlin, 1994. – 1. – P. 3 – 23.
4. *Галатенко Г., Каминский А.* Исследование роста усталостных трещин в материалах с упрочнением при ползучести // *Прикл. механика.* – 1985. – 21, № 4. – С. 50 – 56.

5. Туляков Г., Скоробогатых В., Гриневский В. Закономерности роста трещин ползучести и усталости в стали // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1991. – № 5. – С. 78 – 84.
6. Laiarinandrasana L., Piques R., Drubay B. Comparison of crack-tip stress evaluation methods in elastic-plastic and creep conditions CT specimens // Proc. of the 10th Biennial European Conference on Fracture. – Berlin, 1994. – 1. – P. 193 – 202.
7. РД 50-345-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М: Изд-во стандартов. – 1983. – 96 с.
8. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2 т. / Под ред. Ю. Мураками. – М: Мир, 1990. – Т. 1. – 446 с.
9. Механика разрушения и прочность материалов: В 4 т. / Под ред. В. В. Панасюка. – Т. 3. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения. – Киев: Наук. думка, 1988. – 435 с.
10. Ясній П. В., Галушак М. П., Федак С. І. Вплив амплітуди циклічного навантажування на динамічну повзучість алюмінієвого сплаву // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. – Львів: Каменяр, 1999. – 1, вип. 2. – С. 268 – 272.

Поступила 09. 12. 99