

МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 620.192.7

П.Ясній, докт. техн. наук; М.Галушак, С.Федак

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

МІКРОМЕХАНІЗМИ РУЙНУВАННЯ СПЛАВУ АМг6 В УМОВАХ ПОВЗУЧОСТІ І КОРОТКОТЕРМІНОВОГО РОЗТЯГУ

Досліджено вплив циклічної складової при квазістатичному розтягуванні сплаву АМг6 на мікромеханізми руйнування. Виявлено, що циклічна складова напруження, яка накладається на квазістатичне розтягування, стабілізує процес зародження і повільного розвитку тріщини відриву, видовжує форму ямок на поверхні руйнування, формувє стрічковий рельєф та сприяє утворенню мікротріщин на ділянці відриву.

Авторами на основі виконаних раніше досліджень встановлено, що накладення на постійне статичне або монотонно зростаюче навантажування зразків сплаву АМг6 незначної за амплітудою високочастотної циклічної складової істотно збільшує деформацію повзучості при однаковому найбільшому рівні напружень [1, 2]. З аналізу літературних джерел відомо, що згадане комбіноване навантажування може приводити до деяких специфічних структурних і мікроструктурних змін у матеріалах [3, 4]. Зокрема, за довготривалої повзучості у нікелі при накладенні циклічного навантажування відбувається рекристалізація зерен: середній розмір зерен зменшується до 4,5 раз порівняно з повзучістю, яка відбувалася за статичного навантажування [3]. Для широкого кола матеріалів (мідь, нікель, хромо-молібденові сталі) за тих же умов навантажування характерними є зміни в конфігураціях дислокацій [3, 4]. Проте ці дослідження в більшості випадків стосуються високотемпературної довготривалої повзучості. Мікромеханізми ж руйнування за умов короткотермінового навантажування при 293К досліджені недостатньо.

Основна мета даного дослідження - виявлення основних мікромеханізмів руйнування сплаву АМг6 в умовах повзучості і комбінованого навантажування (монотонного збільшення навантажування з накладенням низькоамплітудної циклічної складової). Досліджено три типи зламів, отриманих: при квазістатичному розтягуванні (далі умовно прийнято позначення КР), при квазістатичному розтягуванні з накладенням незначної циклічної складової (КРЦ) та при руйнуванні за умов повзучості (П).

Досліджували сплав АМг6 при 293К. Основні механічні властивості матеріалу в стані постачання: $\sigma_{0,2}=175$ МПа, $\sigma_B=360$ МПа, $\delta=18,2\%$, $\psi=34\%$. Зразки вирізались із прутка. Середній розмір зерен вздовж прокатки і у поперечному напрямку - 30 мкм. Методика отримання діаграм деформування та аналіз результатів викладені у роботах [1, 2, 5].

Діаграми деформування сплавів при вказаних умовах приведені на рис.1. Циклічне навантажування з частотою $f=25$ Гц і амплітудою напружень $\sigma_a=\pm 25$ МПа ($\pm 0,15\sigma_{0,2}$), накладене на квазістатичне розтягування ($\dot{\sigma}=1,6$ МПа/с) гладких зразків сплаву АМг6, приводить до зміщення вправо діаграми деформування (рис. 1.а). Це дало змогу зробити висновок про пришвидшення процесів повзучості за комбінованого навантажування. Третій тип зламу отримано при руйнуванні за наступною схемою: зразок навантажувався при тій же швидкості зростання статичного умовного напруження $\dot{\sigma}=1,6$ МПа/с до рівня $\sigma=355$ МПа ($\approx 0,98\sigma_B$) і витримувався при цьому

напруженні до моменту руйнування внаслідок повзучості. Детальний опис цих досліджень приведено у роботі [2]. Діаграма деформування за умов повзучості зображена на рис.1.б.

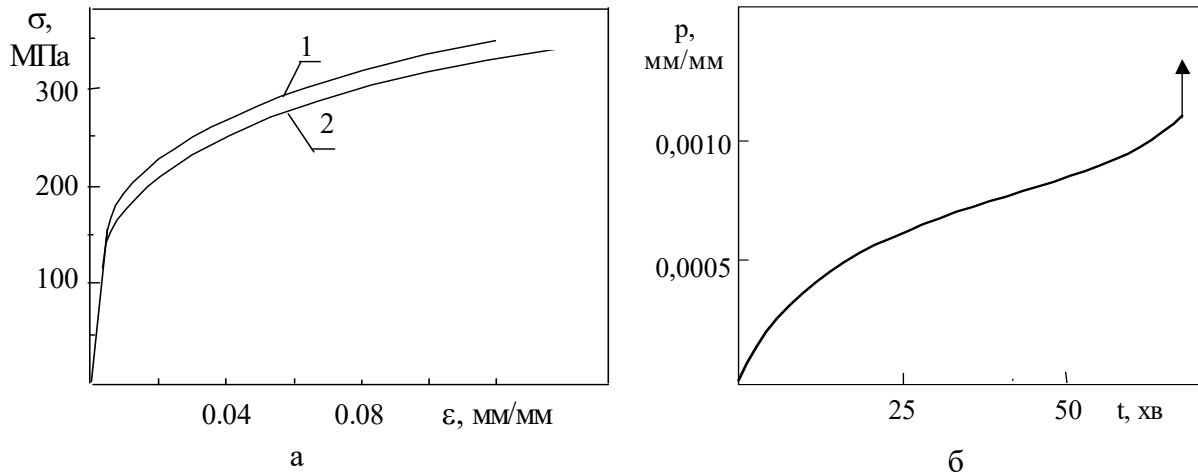


Рис.1 Діаграми деформування сплаву АМг6 при розтягуванні (а) та повзучості (б):

1 - статичне навантажування ($\dot{\sigma} = 1,6$ МПа/с); 2 - статичне ($\dot{\sigma} = 1,6$ МПа/с) і циклічне навантажування ($f=25$ Гц, $\sigma_a=\pm 25$ МПа).

Макрофрактографічні дослідження виконані за візуальним оглядом та з допомогою лупи і бінокулярного оптичного мікроскопа.

Якщо класифікувати отримані види зламів за ступенем пластичної деформації, яка протікає в процесі руйнування, то всіх їх можна віднести до в'язкого типу, оскільки відносне звуження площі поперечного перерізу перевищує 15% (див. таблицю).

Таблиця

Механічні властивості сплаву АМг6 при різних видах випробувань

Вид випробування	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа,	δ , %	ψ , %
КР	175	362	18,2	34,0
КРЦ	165	357	18,2	34,0
П	175	-	18,5	35,6

Як видно з таблиці, відносне видовження і звуження площі поперечного перерізу у всіх випадках практично однакове. Отже, присутність циклічної складової при квазістатичному розтягуванні не впливає на характеристики пластичності сплаву АМг6. Проте як показав подальший аналіз у зламах зразків, отриманих при різних видах випробувань, поруч з деякими спільними загальними механізмами спостерігаються різні мікроособливості деформування і руйнування.

Класифікуючи досліджувані злами в межах термінології, яка застосовується для опису макрорельєфу, всіх їх можна віднести до чашкового типу, але з деякими застереженнями. Якщо у більшості металів і сплавів при одновісному розтягові циліндричних зразків при кімнатній температурі чашкові злами формуються за типом чашечка-конус (рис. 2,а), то в нашому випадку розтягування зразків із сплаву АМг6

злами формуються за типом напівчашечка-напівконус (рис. 2, б). В отриманих зламах, як і в типових, поверхня руйнування містить центральну ділянку, розташовану перпендикулярно до напрямку розтягування (напрямку максимальної деформації) та нахилені під кутом $45-50^\circ$ відкоси (у типових зламах цей кут з гладкою і блискучою поверхнею змінюється в межах від 30° до 60°). Формування центральної (прямої) ділянки зламу пов'язане з об'ємністю напруженого стану в шийці у момент зародження тріщини: з певним наближенням для зразків малого перерізу можна вважати, що в цій зоні має місце напружений стан, близький до плоскої деформації. Утворення конічних (скошених) ділянок зламу пов'язане з іншим (більш м'яким) напруженим станом (умовно можна вважати, що в цій зоні має місце стан, близький до плоского напруженого).

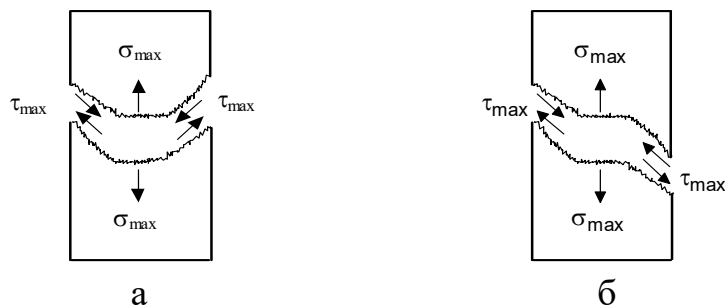


Рис. 2 Типи зламів при руйнуванні.

Крім цих ділянок (нормальної і конічної) в зламах сплаву АМгб спостерігається ще одна ділянка з дещо відмінною від згаданих вище орієнтацією, яка складається з двох невеликих і симетрично розташованих частин (пунктирна лінія на рис.3). Якщо центральна пряма ділянка пов'язана з моментом зародження тріщини (фокусом зламу) і процесом повільного розвитку тріщини відриву, а конічна ділянка - з завершальним процесом прискореного руйнування зразка макрорізом, то процес формування третьої складової ділянки пов'язаний, очевидно, з проявами ефекту локальної витяжки зразка.

На рис.3 показані у двох видах досліджені типи зламів з зазначенням розмірів основних ділянок.

Аналізуючи геометричні параметри основних ділянок - відриву і зрізу - можна відзначити наступне. У всіх зламах ділянка відриву має форму еліпса, тільки для зразка КРЦ (рис. 3.б), випробуваного при квазістатичному розтягуванні з накладенням циклічного навантажування, ця ділянка є дещо ближчою до круглої форми. Можна припустити, що накладення циклічної складової напруження сприяє стабілізації процесу зародження і розвитку макротріщини відриву, тобто робить цей процес більш однорідним. Дійсно, в зламі КРЦ на ділянці відриву макрорельєф більш гладкий і рівний, порівняно із ділянкою відриву зламу КР, для якого спостерігаються декілька досить крупних і глибоких пор (ямок). Глибина ж ямок, як відомо, добре корелює з рівнем локальної деформації [6]. Ділянка витяжки у зламі КРЦ мінімальна порівняно з аналогічними ділянками у зламах типу КР і П. Структура ж ділянки відриву та макрорельєф зламу П більш подібні до аналогічних характеристик зламу КР, ніж злам КРЦ. Тобто можна сказати, що накладення циклічної складової істотно змінює поверхню руйнування у порівнянні із статичним розтягуванням та повзучістю при $\sigma = 355 \text{ МПа}$.

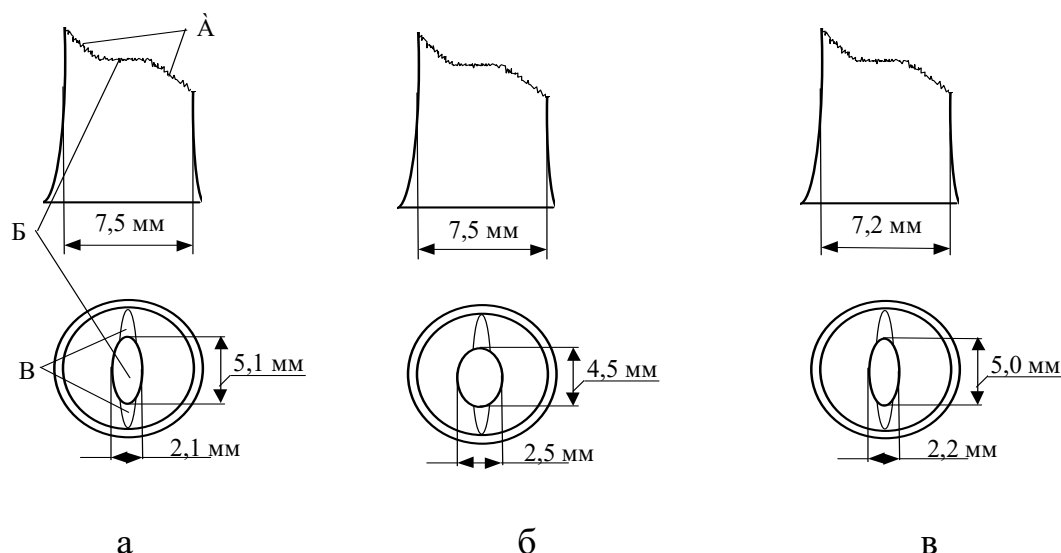


Рис 3 Розміри основних ділянок зламів зразків: КР (а), КРЦ (б) і П (в).

А - ділянка зрізу; Б - ділянка відриву; В- ділянка витяжки.

Мікрофрактографічні дослідження виконані на растровому електронному мікроскопі типу "Сомебах" в діапазоні збільшень від 750 до 2000 крат на двох основних ділянках (відриву та зрізу) для всіх трьох видів зламів.

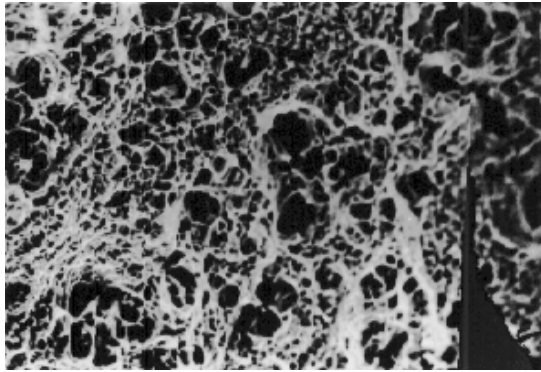
Аналізуючи результати мікрофрактографічних досліджень, можна відзначити наступне. На ділянці відриву зламу КР спостерігається накопичення крупних ямок, що розташовані на окремих фасетках, оточених дрібними ямками і слідами інтенсивної пластичної деформації у вигляді ліній ковзання. Розмір фасеток з крупними ямками співрозмірний з середнім діаметром зерна $d_{cp} \approx 30 \mu\text{м}$. Приклади таких фасеток можна спостерігати на рис. 4.а в центрі, в нижньому лівому кутку, внизу посередині та у верхньому правому кутку. Всі ямки - і крупні, і дрібні, мають круглу форму, тобто це типові ямки відриву при мікрів'язковому руйнуванні. Розмір крупних ямок змінюється в межах від 5 до 12 мкм, а дрібних - від 0,5 до 1,2 мкм.

На ділянці відриву зламу КРЦ (рис. 4.в) також є фасетки, покриті крупними ямками і оточені дрібними ямками. Ямки мають як круглу, так і дещо видовжену форму. Очевидно, на викривлення форми ямок впливає циклічна складова навантажування. З інших особливостей, можливо також пов'язаних з циклічною складовою, слід відзначити наявність стрічкового рельєфу, що спостерігається на окремих ділянках, співрозмірних з розміром зерна (на рис.4.в зліва трохи нижче верхнього кута, справа біля середини правого краю і в нижньому правому кутку). Ця стрічковість, можливо, пов'язана з формуванням втомних боріздов у зв'язку з присутністю в навантаженні циклічної складової і сприятливою орієнтацією окремих фасеток. Крок їх коливається від 1,8 мкм до 2,7 мкм.

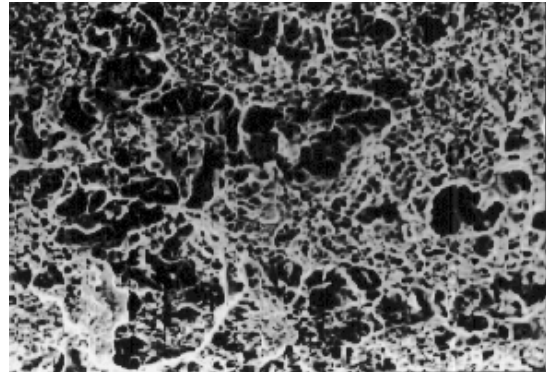
На цій же ділянці зламу КРЦ спостерігаються також окремі тонкі та протяжні вторинні мікротріщини, досить схожі на зернограничні (на рис.4.в у центрі одна така тріщина іде зверху-вниз, а внизу в лівій частині такі тріщини ідуть зліва-направо). Присутність цих вторинних мікротріщин, очевидно, пов'язана зі знеміцненням границь зерен під дією циклічної складової навантажування.

На ділянці відриву зламу П (рис. 4.д) також спостерігається в'язкий, ямковий механізм руйнування, як і в зламах КР та КРЦ. Тільки в цьому випадку крупні ямки в зоні відриву більш глибокі, а вздовж фасеток, на яких вони розташовані, видно сліди досить інтенсивної деформації ковзанням.

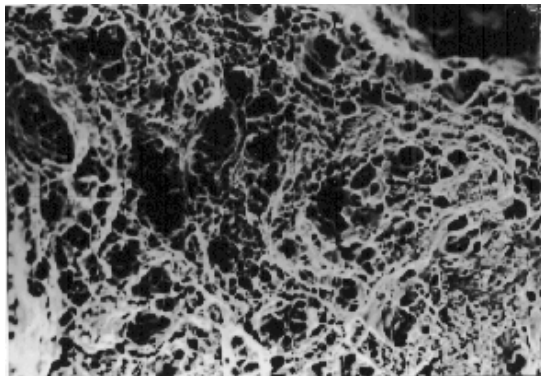
На ділянці зрізу зламу КР (рис.4.б) також є фасетки, співрозмірні з розміром зерна. Однак, крупні ямки в цих фасетках мають помітно видовжену форму, тобто це типові ямки зрізу (зсуву). Дрібні ямки також мають видовжену форму. Розмір ямок змінюється в тих же межах, що і на ділянці відриву- від 5 до 12 мкм крупних та від 0,5 до 1,2 мкм - дрібних.



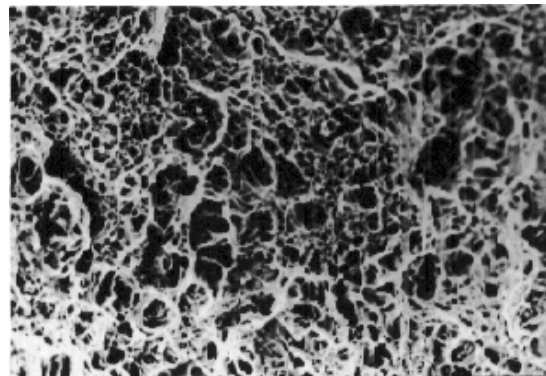
а



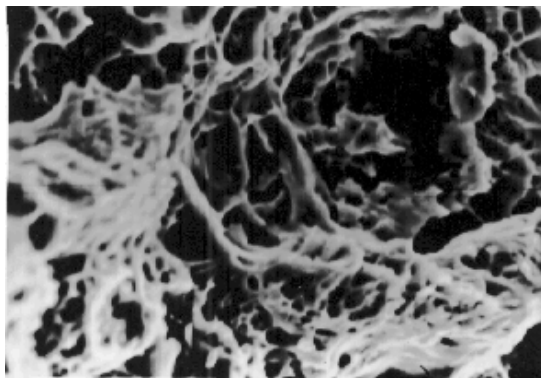
б



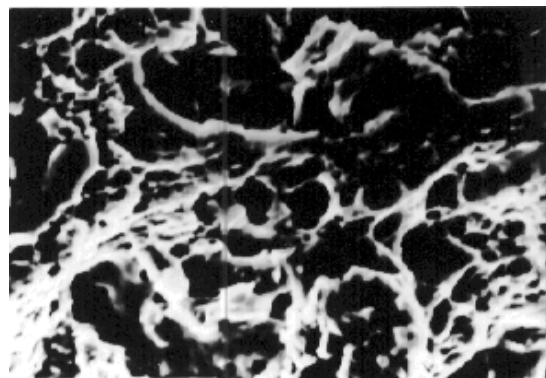
в



г



д



е

Рис. 4 Злами зразків сплаву АМг6, випробуваних при квазістатичному розтягуванні (а, б), при квазістатичному розтягуванні з накладенням циклічної складової (в, г) і при повзучості (д, е) на ділянках відриву (а, в, д) та зрізу (б, г, е) при $\times 750$ (а-г) і $\times 2000$ (д, е).

На ділянці зрізу зламу КРЦ, де руйнування йде значно інтенсивніше, ніж на ділянці відриву і внаслідок чого циклічне навантаження не встигає вплинути на

процес формування мікрорельєфу зламу, спостерігаються, як і для аналогічної ділянки зламу КР, такі ж крупні та дрібні витягнуті ямки (рис.4.г).

Порівнюючи ж особливості мікрорельєфу руйнування у різних точках ділянки зрізу (поблизу бічної поверхні зразка, тобто в області мінімальної стисливості деформації, і біля границі ділянки відриву, тобто в області максимальної стисливості деформації) можна відзначити менш пластичний і більш чітко виражений характер мікрорельєфу з дрібних та крупних видовжених ямок біля границі ділянки відриву у порівнянні з мікрорельєфом в точці біля бічної поверхні, де на ту ж картину з витягнутих ямок накладаються досить інтенсивні сліди пластичної деформації ковзанням.

На ділянці зрізу зламу П (рис. 4.е) мікрорельєф поверхні руйнування також більш грубий у порівнянні з аналогічними зонами зламів КР та КРЦ. Крім того, на цій ділянці зламу П помітно вищою є глибина та густина розподілу крупних ямок, в яких при повзучості навіть на завершальній стадії руйнування було більше часу для їх росту. Окремі крупні ямки та фасетки з крупними ямками оточені ланцюжками дрібних ямок і слідами значної пластичної деформації за рахунок ліній і смуг ковзання від зсувоутворення. Поряд з цим при значнішому збільшенні (рис. 4.е) спостерігаються також сліди в'язкого розриву перемичок вздовж контуру крупних та дрібних ямок.

Висновки

1. Накладення циклічної складової напруження на квазістатичний розтяг сплаву АМг6 приводить до певних змін у механізмах руйнування, зокрема стабілізує процес зародження і розвитку макротріщини відриву, в результаті чого формується більш гладкий і рівний макрорельєф зламу, та видовжує форму ямок на поверхні руйнування.
2. Найбільший вплив циклічної складової проявляється на ділянці відриву, де в результаті його дії в окремих місцях спостерігається стрічковий рельєф та тонкі і протяжні мікротріщини, які відсутні при квазістатичному розтягуванні, а також повзучості.
3. На розміри і густину крупних ямок впливає час навантажування. Ямки, сформовані за умов повзучості, мають значно більшу глибину і довкола них добре помітні сліди пластичної деформації.

The influence of static part of quasistatic tensile of AMg6 alloy on cracking micromechanisms is investigated. It is shown that cyclic part of quasistatic loading stabilizes the process of initiating and slow extension of of crack, elongates the voids on fracture surface and forms the ribbon-like structure and microcracks at fracture zone.

Література

1. Ясній П.В., Галушак М.П. Методика і деякі результати дослідження впливу циклічного навантажування на діаграми деформування сплаву АМг6 // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - Тернопіль: ТДТУ. - 1998. - Том 3, число 4. - С. 62-66.
2. Ясній П.В., Галушак М.П., Федак С.І. Вплив амплітуди циклічного навантажування на динамічну повзучість алюмінієвого сплаву // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. - Випуск 2. - Том 1. - Львів: Каменяр. - 1999. - С. 268-272.
3. Lukas P., Kunz L. and Sklenicka V. Interaction of High Cycle Fatigue with High Temperature Creep // Strength of Materials. - 1994. - P.17-24.
4. Lukas P., Kunz L. and Sklenicka V. Interaction of high cycle fatigue with high temperature creep in two creep-resistant steels // Materials Science of Engineering. №129. - 1990. - P.249-255.
5. Ясній П.В., Галушак М.П., Федак С.І., Корольок Р.І. Взаємозв'язок між діаграмами розтягування і динамічною повзучістю сплаву АМг6 // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - Тернопіль: ТДТУ. - 1999. - Том 4, число 4. -С. 23-28.

6. Разрушение алюминиевых сплавов при растягивающих напряжениях / М.Е. Дриц, А.М. Корольков, Ю.П. Гук, Л.П. и др. -М.: Наука, 1973. - 215 с.

Одержано 03.03.2000 р.