

УДК. 620.192.45

В.Гладь

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

## РОЛЬ КРИХКИХ ВКЛЮЧЕНЬ В МІКРОМЕХАНІЗМАХ РУЙНУВАННЯ СПЛАВУ АМГ6

*Досліджено мікромеханізми зародження і росту пор в умовах розтягу і повзучості зразків із сплаву АМг6. Показано, що при деформації матеріалу відбувається розтріскування крихких включень другої фази. При розтріскуванні включень утворюються пори, які беруть основну участь в процесах руйнування шляхом подальшого росту й об'єднання. Проведено статистичний аналіз кількості включень другої фази в поперечному перерізі зразків і кількості ямок на ділянці відриву. Визначено, що густина включень задовільно узгоджується з густиною ямок відриву. В умовах комбінованого розтягу, на відміну від квазістатичного розтягу і повзучості, в матеріалі на ділянці зрізу виникають поздовжні тріщини розширення. Утворення тріщин розширення пов'язане з інтенсифікацією структурних змін в матеріалі за наявності циклічної складової.*

Виявлено, що руйнування зразків із сплаву АМг6 в умовах одновісного квазістатичного і комбінованого розтягу, а також повзучості є в'язким, з утворенням шийки за типом “напівчашка-напівконус” [1]. Основним механізмом руйнування сплаву АМг6 за вказаних варіантів навантажень є зародження і розвиток мікропор [2]. В той же час мікромеханізми руйнування в умовах статичних і комбінованих навантажень мають певні відмінності. Проведені раніше дослідження впливу циклічної складової напруження на квазістатичний розтяг сплаву АМг6 [1] вказують на стабілізацію процесу зародження і розвитку макротріщини відриву, в результаті чого формується більш гладкий і рівний макрорельєф зламу. Найбільший вплив циклічної складової проявляється на ділянці відриву, де спостерігається стрічковий рельєф та тонкі і протяжні мікротріщини, які відсутні при квазістатичному розтягуванні, а також повзучості. На ділянках відриву і зрізу спостерігається ямковий механізм руйнування шляхом зародження і злиття пор.

Найбільш важливим моментом в'язкого руйнування шляхом злиття пор є їх зародження. Як відомо [3], запропоновані механізми зародження пор так чи інакше пов'язані з включеннями, а також механізми зародження пор на границях структурних елементів, таких, як: границі зерен, границі дислокаційних комірок, потрійні стики зерен. У більшості промислових алюмінієвих сплавів пори виникають спочатку біля масивних включень, збагачених залізом і кремнієм: при подальшому деформуванні ці великі пори об'єднуються через дрібніші, які утворюються біля дисперсоїдів [4]. Дослідження процесів руйнування нержавкої сталі показало, що середня густина пор в 100 разів більша середньої густини частинок, отже, основну участь у формуванні пор в нержавкій сталі беруть вакансії, а не включення [5].

Метою даної роботи є дослідження процесів руйнування зразків із сплаву АМг6 в умовах квазістатичного та комбінованого розтягу і короткотривалої повзучості для визначення мікромеханізмів зародження і об'єднання пор і тріщин, а також дослідження впливу циклічної складової на мікромеханізми руйнування.

Досліджували методом електронної просвічувальної мікроскопії мікроструктуру гладких циліндричних зразків з алюмінієвого сплаву АМг6 після випробування на розтяг і повзучість. Зразки діаметром 10 мм виточувались з прутків в стані поставки, додатковій термообробці не піддавались. Випробування розтягом проводились за двома схемами [1]. В першому випадку здійснювали квазістатичний розтяг зразків до руйнування з швидкістю зростання умовного статичного напруження  $\sigma = 1,6$  МПа/с. За другою схемою на розтяг з швидкістю  $\sigma = 1,6$  МПа/с накладалось циклічне синусоїдальне навантаження частотою  $f = 25$  Гц і амплітудою  $\sigma_a = \pm 25$  МПа (комбіноване навантаження). Випробування на короткотривалу повзучість

здійснювали при сталому  $\sigma = 355$  МПа до моменту руйнування. Дослідження проводились при температурі 293 К. У всіх випадках відбувалось в'язке руйнування з утворенням шийкиза типом "напівчашка-напівконус" [1].

Об'єкти для електронно-мікроскопічного дослідження методом тонких фольг вирізались в поздовжньому і поперечному напрямках з шийок зруйнованих зразків. Об'єкти для дослідження мікроструктури з максимальною пластичною деформацією вирізались у поздовжньому напрямку з ділянок зрізу, а в поперечному напрямку з ділянок відриву на відстані 0,2 мм від поверхні руйнування. Фольги для дослідження в електронному просвічувальному мікроскопі ПЕМ-125К готувались за методикою [6].

Електронно-мікроскопічні дослідження фольги на просвіт виявили в матриці  $\alpha$  твердого розчину включення частинок другої фази двох класів – масивні частинки і дисперсоїди [7]. За рахунок різної проникаючої здатності матриці і включень утворюється добре помітний контраст зображення (темні включення на фоні світлої матриці). Частинки другої фази рівномірно розподілені в об'ємі зерен. Переважного розташування частинок на границях зерен не виявлено.

В поздовжньому напрямку зразків після випробування на розтяг і повзучість виявлено розтріскування масивних частинок (рис. 1а, б) і дисперсоїдів (рис. 1в). Між фрагментами розтрісканих частинок утворювались пори, розмір яких зростає із збільшенням величини пластичної деформації. Максимальний розмір пор спостерігається безпосередньо біля ділянки руйнування (рис. 1б). Утворення пор відшаруванням частинок від матриці спостерігається рідко, в основному при значних пластичних деформаціях. Очевидно, напруження руйнування крихких частинок менше від напруження, необхідного для відшарування частинки від матриці, і тому при зростанні напруження спочатку відбувається руйнування частинок.

Напрямок дії навантаження для рис. 1, 4.

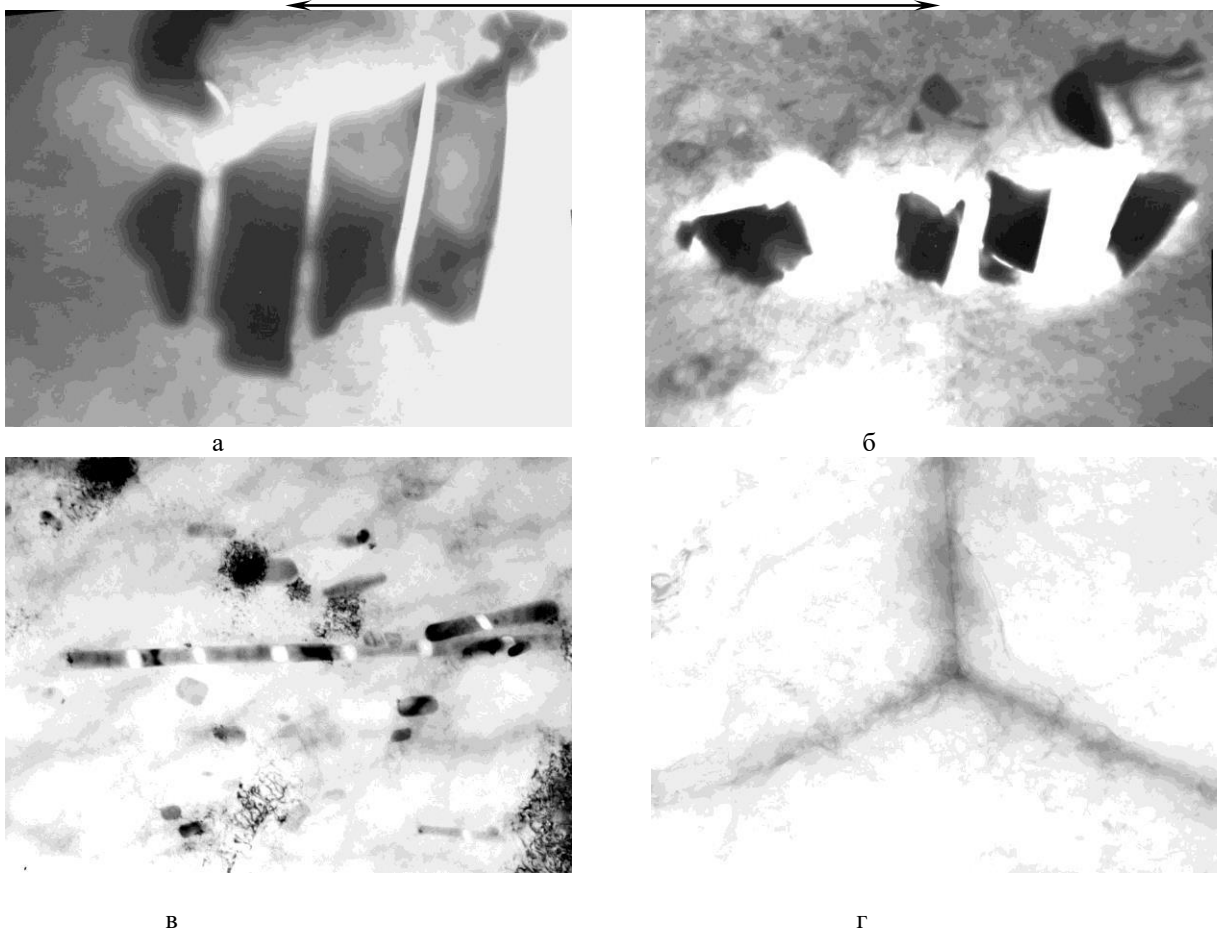


Рис. 1. Розтріскані масивні частинки (а, б), дисперсоїди (в), і потрійний стик зерен (г) сплаву АМг6 (а, б -  $\times 5000$ ; в, г -  $\times 30000$ ).

Зародження пор за рахунок вакансій на границях структурних елементів, таких, як: границі зерен, границі дислокаційних комірок (рис. 1б), потрійні стики зерен (рис. 1г), - не виявлено. Лише у випадку, коли включення розташовані на границях структурних елементів, на них зароджуються пори, але не за рахунок вакансій, а через руйнування включень. Таким чином, основним механізмом зародження пор в сплаві АМг6 при розтягу і повзучості є розтріскування крихких включень другої фази.

Для підтвердження основної ролі включень у зародженні пор проведено статистичний аналіз кількості включень (рис. 2а) розмірами 5-10 мкм і 1-2 мкм в поперечному перерізі зразків, а також кількості ямок (рис. 2б) з такими розмірами на ділянці відриву (див. табл.). Оскільки на ділянці відриву відбулась значна поперечна деформація, кількість включень на одиницю площі перераховано, зважаючи на поперечне звуження зразків. Порівняння кількості включень і ямок на одиницю площі вказує на близькі значення густин, проте є деяке зростання густини ямок порівняно з густиною включень, більш помітне для ямок розміром 5-10 мкм. Зростання густини ямок пов'язане, очевидно, з тим, що пори на включеннях, які об'єднуються під час росту макротріщини, не знаходяться в одній площині, перпендикулярній до дії навантаження, а підрахунок включень проводиться в одній площині (див. рис. 3а), тому не всі включення, які брали участь у поширенні макротріщини, виявляються на поперечному перерізі (рис. 2а).

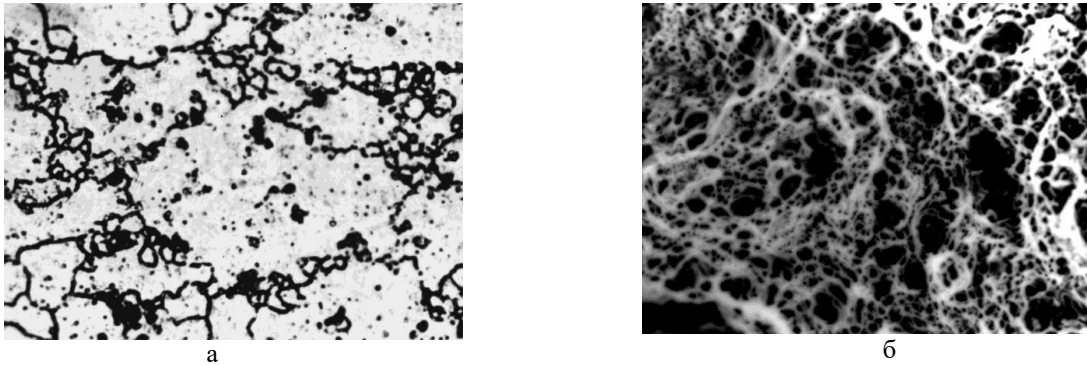


Рис.2. Мікроструктура зразка в поперечному перерізі (а)  $\times 400$  [2] і поверхня руйнування ділянки відриву сплаву АМг6 (б)  $\times 750$  [1].

Таблиця

Порівняння кількості включень і ямок відриву в сплаві АМг6

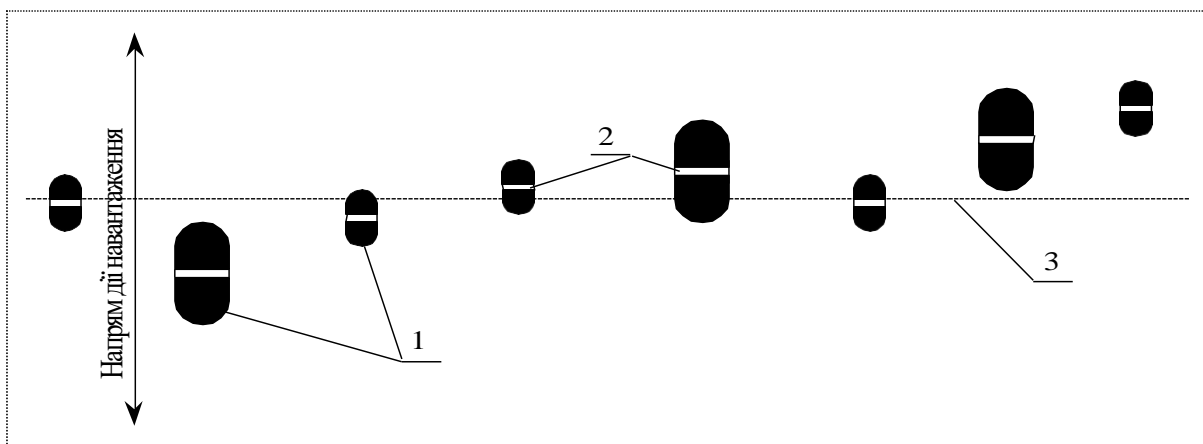
Ділянка дослідження	Кількість включень (ямок) на $0,01 \text{ мм}^2$ , середнім розміром:	
	5-10 мкм	1-2 мкм
Поперечний переріз (включення)	22	445
Ділянка відриву (ямки)	28	520
$\Delta$ , %	21,4	14,4

При розтріскуванні масивних частинок утворюються великі пори (рис. 3а), які беруть основну участь в руйнуванні сплаву АМг6 при розтягу і повзучості. Пори, які утворюються внаслідок руйнування дисперсоїдів (рис. 1в), значно менші за розміром. Руйнування матеріалу відбувається шляхом підростання великих пор (рис. 3б), локалізації деформації в смугах ковзання по перетинках і руйнування перетинок внаслідок вичерпування пластичності матеріалу. При руйнуванні перетинок беруть участь пори, утворені внаслідок розтріскування дисперсоїдів. Як видно з рис. 4а (поздовжній переріз), тріщина виникає між порами, утвореними при розтріскуванні

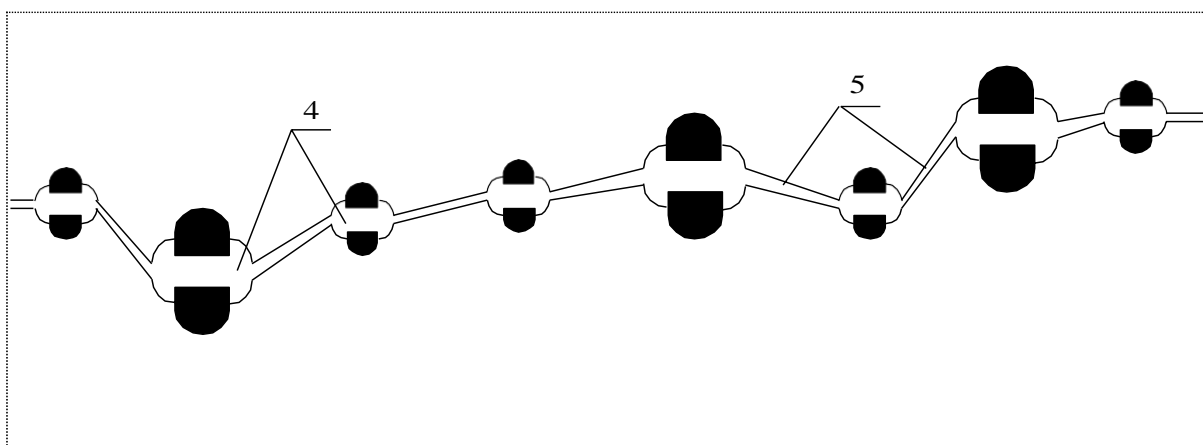
масивних включень. На поперечному перерізі (рис. 4б) видно великі пори, утворені включеннями, і тріщини між ними, а самі включення стравлені під час електролітичного полірування фольги. Оскільки включення рівномірно розподілені в об'ємі зерен, а на границях структурних елементів пори не утворюються, тріщина поширюється між порами в середині зерен. Отже, матеріал руйнується транскристалітно, а тріщини, що з'єднують пори на ділянці відриву, перпендикулярні до напрямку дії навантаження (рис. 4а).

В умовах комбінованого розтягу (з накладанням циклічної складової), на відміну від квазістатичного розтягу і повзучості, виявлено тріщини в поздовжньому напрямку зразків (рис. 4в, г). Тріщини виявлено на об'єктах, вирізаних з ділянок з максимальною пластичною деформацією (ділянки зрізу). Поздовжні тріщини, переважно зигзагоподібної форми, виникають як між включеннями (ліва частина рис. 4в), так і в самій матриці (права частина рис. 4в; рис. 4г). Подібні поздовжні тріщини в умовах комбінованого розтягу виявлені на поверхні відриву зразків із сплаву АМгб і відсутні при квазістатичному розтягуванні і повзучості [1].

Можна відзначити, що поява поздовжніх тріщин в сплаві АМгб за наявності циклічної складової не вплинула на характеристики міцності і пластичності матеріалу, оскільки тимчасова границя міцності і поперечне звуження зразків в шийці однакові для зазначених типів випробувань [1].



а



б

Рис. 3. Схема розтріскування включень (а) і поширення тріщини між розтрісканими включеннями (б) в сплаві АМгб: 1 – розтріскані включення; 2 – пори; 3 – площина поперечного перерізу зразка; 4 – великі пори, утворені на розтрісканих включеннях; 5 – тріщина.

Пластичне деформування, яке обумовлене рухом і розмноженням дислокацій, супроводжується інтенсивним зміцненням за рахунок росту густини дислокацій. Коли густина дислокацій в певному мікрооб'ємі досягає критичного значення, в місцях перетину смуг ковзання виникають мікротріщини. Відомо, що виникнення поздовжніх тріщин обумовлене двома факторами: наявністю в шийці зразка поперечних напружень розтягу і підвищенням в процесі деформації енергії границь [3]. При квазістатичному розтязі і короткотерміновій повзучості граничний стан, необхідний для утворення тріщин розшарування, не досягається. Утворення тріщин розшарування, орієнтованих вздовж напрямку розтягу в умовах комбінованого навантаження, пов'язане з вичерпуванням пластичності в місцях перетину ліній ковзання і руйнуванням границь елементів мікроструктури, таких, як границі дислокаційних комірок або границі зерен.

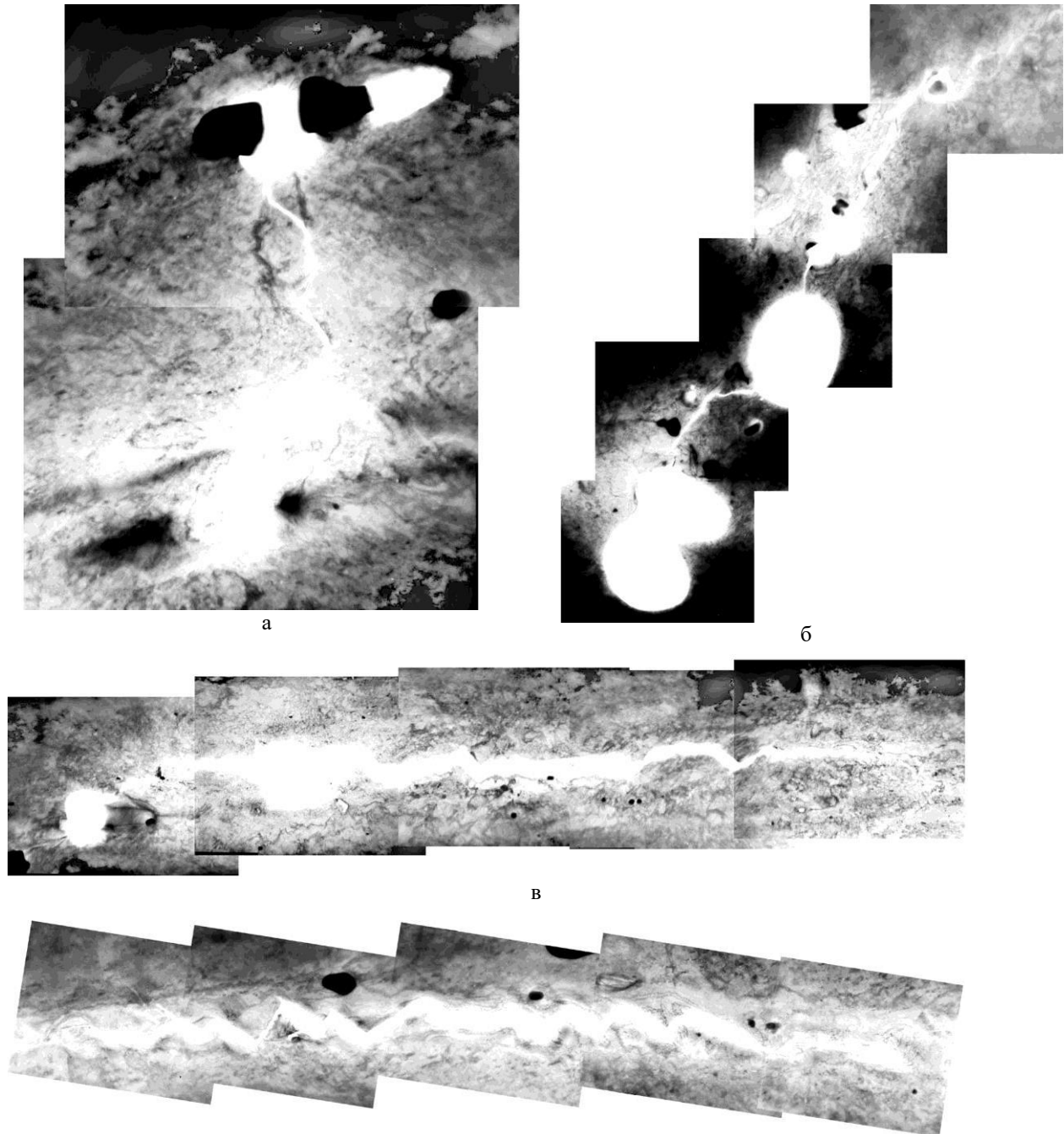


Рис. 4. Тріщини в сплаві АМг6 (а, в, г – поздовжній, б – поперечний напрямки вирізу об'єктів):  
а – поперечна тріщина  $\times 4000$ ; б – тріщина між порами  $\times 1500$ ; в, г – поздовжні тріщини  $\times 2000$ .

За комбінованого розтягу з накладанням циклічної складової густина дислокацій зростає інтенсивніше, ніж за квазістатичного розтягу. Очевидно, інтенсивне зростання густини дислокацій за рахунок циклічної складової забезпечує інтенсифікацію структурних змін в матеріалі, вичерпування пластичності і виникнення в шийці зразка поздовжніх мікротріщин на границях структурних елементів і в місцях перетину смуг ковзання.

Таким чином, поява поздовжніх тріщин в сплаві АМгб при розтягу за наявності циклічної складової навантаження пов'язана з інтенсифікацією структурних змін в матеріалі, зростанням густини дислокацій і вичерпуванням пластичності в локальних об'ємах матеріалу.

### **Висновки**

1. Досліджено мікромеханізми деформування і руйнування сплаву АМгб в умовах квазістатичного розтягу, комбінованого розтягу (з накладанням низькоамплітудної циклічної складової) і короткотривалої повзучості.

2. Виявлено, що незалежно від схеми навантажування руйнування сплаву АМгб відбувається шляхом зародження і підростання пор, локалізації деформації в смугах ковзання на перетинках і руйнування перетинок внаслідок вичерпування пластичності матеріалу.

3. Основним механізмом утворення пор є розтріскування крихких включень другої фази. Кількісний аналіз вказує на приблизно однакові значення густини включень в поперечному перерізі зразків і ямок на ділянці відриву, що підтверджує першочергову роль включень в зародженні пор.

4. В умовах комбінованого розтягу в матеріалі додатково до утворення пор на включеннях виникають поздовжні тріщини розшарування, пов'язані з інтенсифікацією структурних змін за наявності циклічної складової і вичерпуванням пластичності в локальних об'ємах матеріалу.

*Pore initiation and growth micromechanisms under stretch and creep in Al-6%Mg alloy specimens are investigated. It is shown that under the material deformation the second phase brittle including cracking takes place. While cracking, pores appear, which take an active part in the process of fracture by means of the further growth and combination. The statically analyses of the second phase including number in the specimens cross-section and the number of pits in the separation area is carried out. It is found that the including density is well coordinated with the separation pit density. Under the combined stretch, on the contrary to the quasi-static stretch and creep, linear cracks appear in the shear area of the material. Crack stratification is caused by the material structural changer investigation when cyclic component is available.*

Робота виконувалась за рахунок бюджетних коштів Державного фонду фундаментальних досліджень України.

### **Література**

1. Ясній П.В., Галушак М.П., Федак С.І. Мікромеханізми руйнування сплаву АМгб в умовах повзучості і короткотермінового розтягу // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2000. – Т. 5, ч. 1. – С. 6-11.
2. Ясній П.В., Галушак М.П., Стоянова О.М., Федак С.І. Мікроструктурні особливості деформування сплаву АМгб при повзучості та розтягу // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2001. - №5. – С. 64-68.
3. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов / Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П. и др.; / Под. ред. Трефилова В.И. – К: Наук. думка, 1989. – 256 с.
4. Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов: Пер. с англ. / Под. ред. Брайента К.Л., Бенерджи С.К. – М.: Металлургия, 1988. – 552 с.
5. Иванова В.С. Разрушение металлов. Серия “Достижения отечественного металловедения”. - М.: Металлургия, 1979. - 168 с.
6. Практические методы в электронной микроскопии / Под ред. Одри М. Глоэра: Пер. с англ. / Под ред. В.Н. Верцнера. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1980. – 375 с.
7. Гладь В. Методика і деякі результати дослідження мікроструктури алюмінієвого сплаву АМгб. // Тези доповідей V наукової конференції Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2001. - С. 102.

*Одержано 19.02.2002 р.*