

УДК 620.187.3

П.Ясній, докт.техн.наук; В.Гладьо; М.Галушак, канд.техн.наук  
Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

## ВПЛИВ ЦИКЛІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ПРИ КОРОТКОТЕРМІНОВІЙ ПОВЗУЧОСТІ НА ДИСЛОКАЦІЙНУ СТРУКТУРУ СПЛАВУ АМГ6

*Досліджено вплив низькоамплітудної циклічної складової напруження на дислокаційну структуру сплаву АМг6 в умовах динамічної повзучості. Виявлено, що за динамічної повзучості густина дислокацій більша порівняно із статичною за однакових рівнів максимальних напружень. Циклічна складова повзучості збільшує дислокаційну густина за рахунок зменшення кроку дислокаційної сітки, а також шляхом утворення вторинної дислокаційної сітки на фоні наявної. Інтенсифікація динамічної повзучості порівняно із статичною пояснюється підвищенням термічних флуктуацій у мікрооб'ємах матеріалу, а також активізацією розмноження дислокацій за механізмом багаторазового поперечного ковзання.*

Виявлено, що низькоамплітудна циклічна складова істотно інтенсифікує повзучість алюмінієвого сплаву АМг6 порівняно із статичною за однакових значень максимального напруження [1]. Металографічні дослідження сплаву АМг6 вказують, що накладення циклічної складової на усталеній стадії повзучості приводить до утворення в матеріалі “пакетів” різних за розміром зерен [2]. Вплив циклічної складової виявляється у збільшенні густини і розмірів пор порівняно із статичною повзучістю.

Сумісна дія статичної і циклічної складових навантаження виявляють нелінійну взаємозалежність структурних змін. Циклічна складова навантаження може активувати структурні перетворення у матеріалі і змінити характер мікродеформації, що вплине на ефективність дії статичного навантаження, а зміни, викликані у матеріалі статичним навантаженням, змінюють характер і результати циклічного деформування [3].

На стадії циклічного зміцнення матеріалу формується коміркова дислокаційна структура, яка при циклічному навантаженні досягає більшої густини дислокацій при меншій деформації, ніж за статичних випробувань [4]. Так циклічне навантаження прискорює процес структурних змін у матеріалі.

Загалом деформація в умовах повзучості є результатом переміщення дислокацій і дефектів. Як відомо, за умов низькотемпературної повзучості (нижче  $0,5 T_{пл}$ ) процеси переповзання дислокацій ускладнені і дислокації переміщуються переважно шляхом ковзання певними кристалографічними площинами [5]. Оскільки у процесі деформації матеріал зміцнюється, дальша деформація у процесі повзучості відбувається за рахунок випадкових термічних флуктуацій напруження, що накладаючись на прикладене напруження, збільшують його і викликають дальшу пластичну деформацію.

Попередні дослідження [1, 2] сплаву АМг6 в умовах динамічної і статичної повзучості не дають відповіді про різницю механізмів деформування матеріалу на дислокаційному рівні. Оскільки мікроструктурні перетворення в матеріалі істотно впливають на його характеристики, виникла необхідність дослідити вплив циклічної складової навантаження на дислокаційну структуру сплаву АМг6 в умовах повзучості.

Метою даної роботи є аналіз мікроструктурних змін у сплаві АМг6 після випробування на короткотривалу статичну та динамічну повзучість (з накладанням низькоамплітудної циклічної складової) за однакових рівнів максимальних напружень.

Методом електронної просвічувальної мікроскопії досліджували мікроструктуру гладких циліндричних зразків з алюмінієвого сплаву АМг6 після випробування на

короткотривалу статичну та динамічну повзучість. Характеристики механічних властивостей сплаву АМг6:  $\sigma_{0,2}=175$  МПа;  $\sigma_{\epsilon}=360$  МПа;  $\delta=18,2\%$ ;  $\Psi=34\%$ .

Зразки діаметром 10 мм виточувалися з прутків у стані поставки, додатковій термообробці не підлягали. Випробування проводилися на сервогідравлічній машині СТМ-100 при температурі 293 К за двома схемами (див рис. 1) [1].

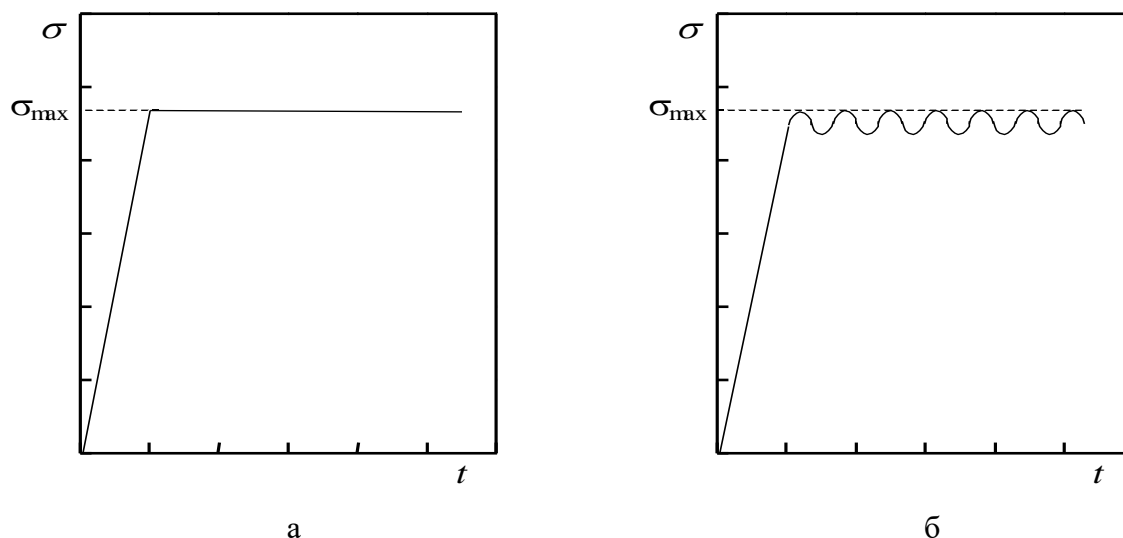


Рис. 1. Схеми навантажування зразків із сплаву АМг6: а – повзучість; б – динамічна повзучість [1].

**Таблиця**

Режими навантажування сплаву АМг6

Вид випробувань	$\sigma_{max}$ , МПа	$\sigma_a$ , МПа	$f$ , Гц
Повзучість	300		
	320		
	340		
	355		
Динамічна повзучість	300	$\pm 25$	25
	320	$\pm 25$	25
	340	$\pm 12,5$	25
		$\pm 25$	
		$\pm 37,5$	
355	$\pm 25$	25	

Повзучість і динамічну повзучість досліджували при чотирьох рівнях максимального напруження [1]. У випадку динамічної повзучості на статичне навантажування накладалось низькоамплітудне циклічне синусоїдальне навантаження. Режими навантажувань подані у таблиці.

Об'єкти для мікроструктурного дослідження методом тонкої фольги вирізували у поздовжньому напрямку на віддалі 2 мм від зовнішньої циліндричної поверхні зразків після випробування на статичну і динамічну повзучість, а також з прокату в первісному стані. Фольга для дослідження в електронному просвічувальному мікроскопі ПЕМ-125К готувались за методикою [6]. Остаточного стоншення об'єктів досягали методом струминного електролітичного полірування [7]. Електронно-мікроскопічні дослідження фольги виконували методом світлого поля на просвіт.

Матеріал досліджуваних зразків у первісному стані є деформаційно зміцненим (прокат), що означає наявність сформованої дислокаційної структури. У первісному стані матеріалу дислокаційна картина сплаву характеризується однорідною сітковою структурою (рис. 2). Розподіл дислокаційної сітки в об'ємі зерен, на границях і біля

вкрапель рівномірній. Спостерігається лише певна зміна кроку і форми сітки від рівновісної (рис. 2а) до витягнутої (рис. 2б). Густина дислокацій у матеріалі первісного стану становить  $\rho = 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ .

Густина дислокацій  $\rho$  обчислювалася як число  $n$  точок перетину дислокацій з певною площею  $F$  [8]:

$$\rho = \frac{n}{F}.$$

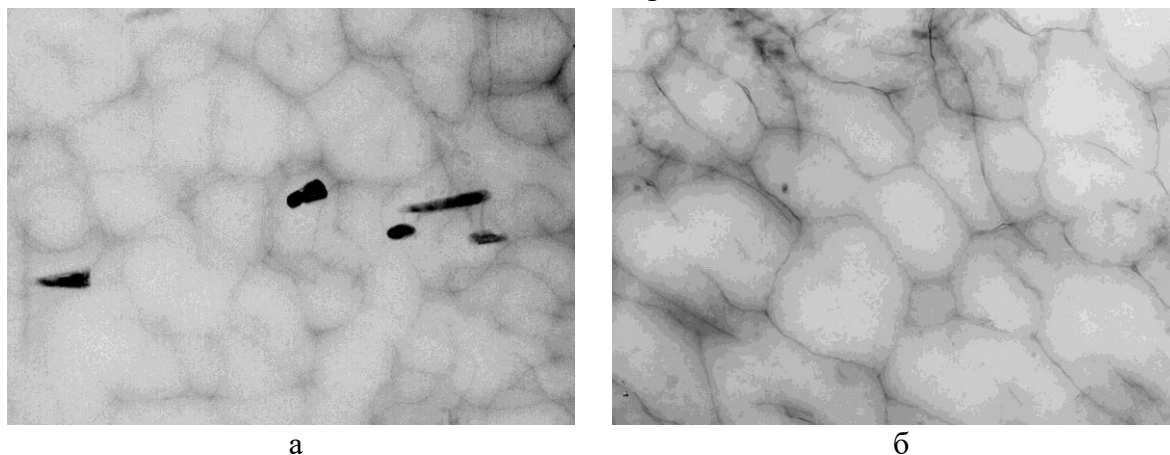


Рис. 2. Дислокаційна структура сплаву АМг6 у первісному стані ( $\times 30000$ ):  
а – рівновісна; б – витягнута.

Еволюція дислокаційної картини зразків після випробування на повзучість і динамічну повзучість порівняно з первісним станом виявляється у всіх досліджуваних мікрооб'ємах. Аналіз дислокаційної структури вказує на певну локальну неоднорідність структурних змін у досліджуваних мікрооб'ємах, що виявляється у певних максимумах і мінімумах густини дислокацій. Неоднорідність структурних змін пов'язана з різною кристалографічною орієнтацією окремих зерен. Типові дислокаційні структури досліджуваних зразків після випробування на повзучість і динамічну повзучість за різних значень максимального напруження подані на рис. 3.

Залежно від прикладеного напруження повзучості змінюється дислокаційна картина матеріалу. В умовах статичної і динамічної повзучості при  $\sigma_a = const$  із зростанням максимального напруження зростає густина дислокацій (рис. 4). Зростання густини дислокацій передовсім обумовлене зменшенням кроку дислокаційної сітки (рис. 3). Порівняння залежностей густини дислокацій від максимального напруження повзучості вказує на подібний характер залежності для двох схем навантажування, проте за умов динамічної повзучості порівняно із статичною дислокаційна густина більша за однакових значень максимальних напружень.

За статичної повзучості структура матеріалу всередині дислокаційної сітки переважно не містить дислокацій (рис. 3а). Основна відмінність у зміні дислокаційної структури за умов динамічної повзучості порівняно із статичною - це утворення вторинної дислокаційної сітки на фоні наявної (рис. 3б). Отже, за динамічної повзучості одночасно із зменшенням кроку дислокаційної сітки виникає вторинна дислокаційна структура всередині наявної. Ефект вторинної дислокаційної сітки найбільше виявляється при  $\sigma_{max} = 300 \text{ МПа}$ , що забезпечує найбільшу різницю в густині дислокацій за двох схем навантажування (рис. 4). Утворення вторинної дислокаційної сітки, очевидно, пов'язане з інтенсифікацією процесу розмноження дислокацій за механізмом багаторазового поперечного ковзання [9]. Таким чином, в умовах динамічної повзучості одночасно з інтенсифікацією процесів повзучості змінюються мікромеханізми їх плинності.

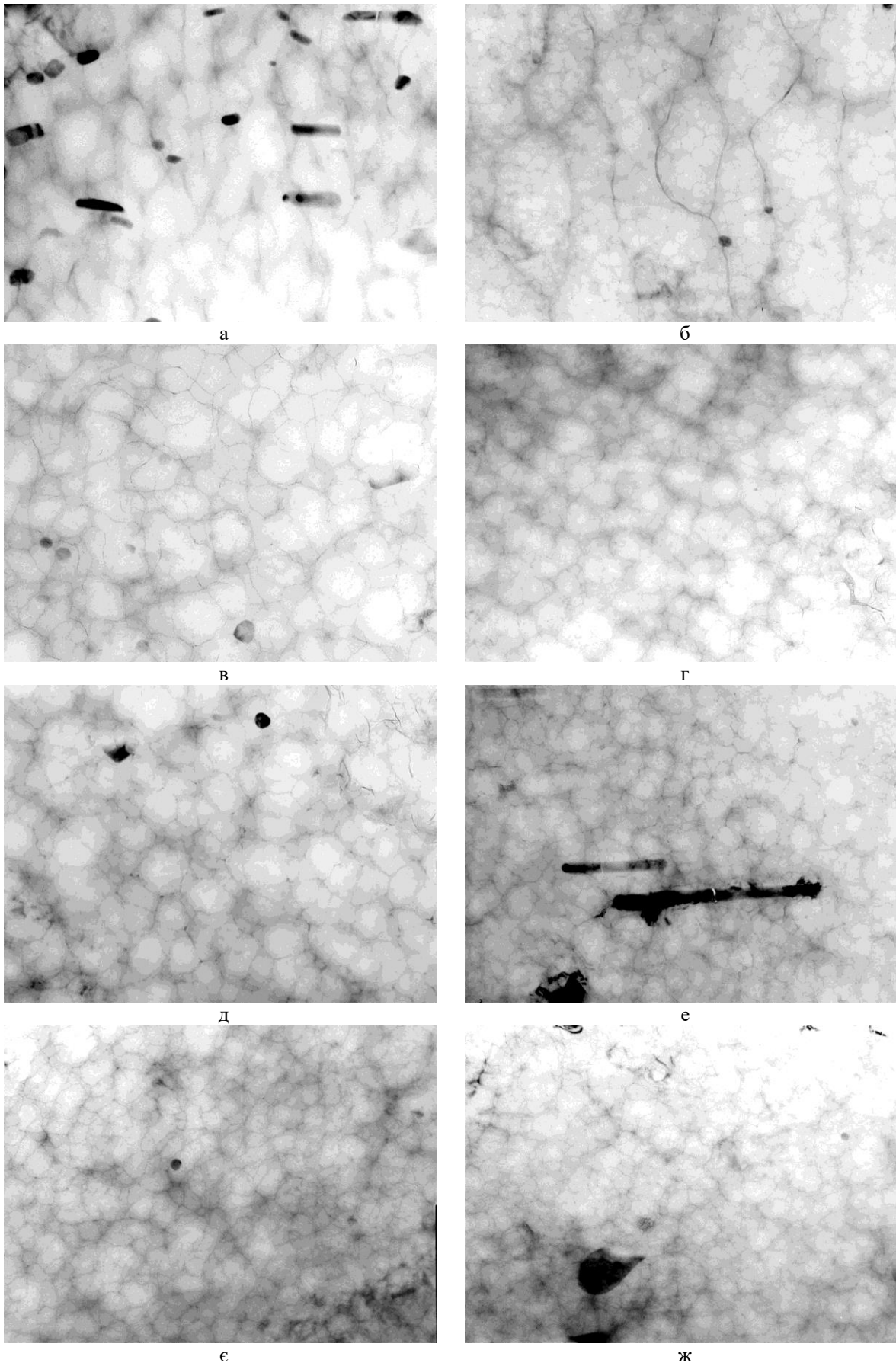


Рис. 3. Дислокаційна структура сплаву АМг6 після статичної (а, в, д, є) і динамічної повзучості (б, г, е, ж) при  $\sigma_{max}$ : 300 МПа (а, б); 320 МПа (в, г); 340 МПа (д, е); 355 МПа (є, ж) ( $\times 30000$ ).

Проаналізовано вплив асиметрії циклу навантаження при сталому  $\sigma_{max}$  на густину дислокацій. Результати, подані на рис. 5, вказують на відсутність істотного впливу амплітуди циклічної складової динамічної повзучості у досліджуваному діапазоні амплітуд ( $\sigma_a = \pm 12,5; \pm 25; \pm 37,5$  МПа) при  $\sigma_{max} = 340$  МПа на густину дислокацій. В умовах статичної повзучості ( $R = 1$ ) при  $\sigma_{max} = 340$  МПа густина дислокацій менша. Очевидно, існує порогове значення коефіцієнта асиметрії циклу  $R_n$ , при досягненні якого циклічна складова істотно не впливає на густину дислокацій. Порогове значення коефіцієнта асиметрії циклу означає зміну мікромеханізмів повзучості: при  $R > R_n$  - повзучість статична, при  $R < R_n$  - повзучість динамічна.

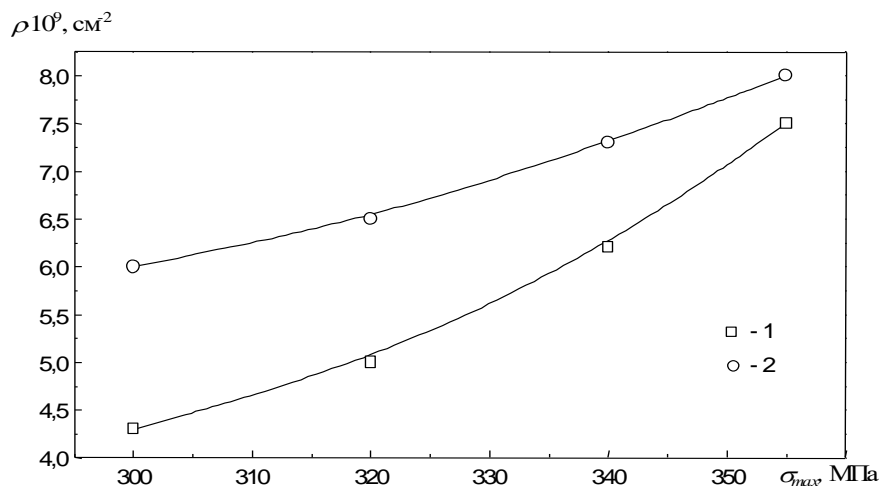


Рис. 4. Залежність густини дислокацій сплаву АМгб від максимального напруження повзучості: 1 – статична повзучість; 2 – динамічна повзучість ( $\sigma_a = \pm 25$  МПа).

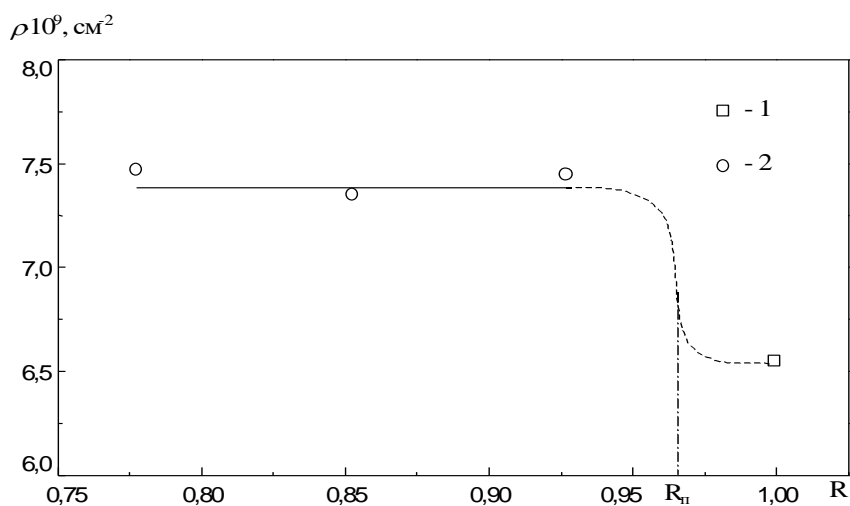


Рис. 5. Залежність густини дислокацій сплаву АМгб від коефіцієнта асиметрії циклу при  $\sigma_{max} = 340$  МПа: 1 – статична повзучість; 2 – динамічна повзучість ( $\sigma_a = \pm 12,5; \pm 25; \pm 37,5$  МПа).

Аналізуючи залежності густини дислокацій від максимального напруження та від асиметрії циклу в умовах динамічної повзучості (рис. 4, 5), можна стверджувати, що головним чинником формування дислокаційної мікроструктури в умовах динамічної повзучості є рівень максимального напруження.

Циклічна складова навантаження в умовах динамічної повзучості сприяє зростанню густини дислокацій порівняно із статичною, а отже, інтенсифікує процес повзучості. Прискорення процесів повзучості при циклічному навантаженні може

пов'язуватися з активним деформуванням матеріалу впродовж кожного циклу при переході з нижчого рівня напружень на вищий [4]. Особливості деформування при повзучості істотно залежать від температури. При температурі, наближеній до  $0,4T_{пл}$ , в алюмінії інтенсифікується поперечне ковзання дислокацій [4]. Очевидно, більша деформація повзучості сплаву АМг6 за наявності низькоамплітудної циклічної складової пояснюється підвищенням термічних флуктуацій напружень у мікрооб'ємах матеріалу, що ініціює процеси зародження нових дислокацій, а також полегшує поперечне ковзання дислокацій.

#### Висновки.

1. Виявлено, що в сплаві АМг6 в умовах статичної і динамічної повзучості із збільшенням максимального напруження густина дислокацій зростає. За динамічної повзучості спостерігається більша дислокаційна густина порівняно із статичною за однакових рівнів максимальних напружень.

2. Низькоамплітудна циклічна складова навантаження в умовах динамічної повзучості збільшує густину дислокацій у матеріалі порівняно із статичною повзучістю за рахунок зменшення кроку дислокаційної сітки, а також шляхом утворення вторинної дислокаційної сітки на фоні наявної.

3. Амплітуда циклічної складової динамічної повзучості при сталому  $\sigma_{max}$  істотно не впливає на густину дислокацій. Незалежно від амплітуди циклічної складової в дослідженому діапазоні головним чинником формування дислокаційної мікроструктури є рівень максимального напруження.

*The influence of the low-amplitude cyclic component stress on the Al-6%Mg alloy dislocation structure under dynamic creep was investigated. It was found, that under dynamic creep the dislocation density is greater as compared with the static one under similar maximum stress levels. The cyclic creep component increases the dislocation density due to the decrease of the dislocation network step, as well as by means of the secondary dislocation network formation on the basis of the given one. Dynamic creeping intensification as compare with the static one is explained by the raising of the thermal fluctuations in the material micro-pieces, as well as activation of the dislocation multiplication according to the repeated cross slipping mechanism.*

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

#### Література

1. 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: Каменярь, 1999. – Вип. 2. – Том 1. – С. 268-272.
2. Ясній П.В., Галушак М.П., Стоянова О.М., Федак С.І. Мікроструктурні особливості деформування сплаву АМг6 при повзучості та розтягу // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2001. - №5. – С. 64-68.
3. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В.А. Кузьменко. – К.: Наук. думка, 1979. - 336 с.
4. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. - К.: Наук. думка, 1978. - 238 с.
5. Физическое металловедение: В 3-х т., 3-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Кана Р.У., Хаазена П. Т. 3: Физико-механические свойства металлов и сплавов / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1987. – 663 с.
6. Практические методы в электронной микроскопии / Под ред. Одри М. Глоэра / Пер. с англ. / Под ред. В.Н. Верцнера. – Л.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
7. Гладь В. Методика і деякі результати дослідження мікроструктури алюмінієвого сплаву АМг6. // Тези доповідей V наукової конференції Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2001. - С. 102.
8. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч.1. Дефекты решетки: Учебное пособие для вузов. - М.: Металлургия, 1982. – 280 с.
9. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Структура и механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1970. - 472 с.

Одержано 12.01.2002 р.