

СТРИБКОПОДІБНА ДЕФОРМАЦІЯ СПЛАВУ АМг6 ПРИ ПОВЗУЧОСТІ

Досліджено взаємозв'язок стрибкоподібної деформації повзучості сплаву АМг6 з руйнуванням дисперсних включень другої фази. Виявлено залежність величини стрибкоподібних приростів деформації від розміру і розподілу дисперсних фаз у даному сплаві. Запропоновано методику прогнозування стрибкоподібної повзучості сплаву АМг6 на основі гістограми розподілу дисперсних частинок у матеріалі.

Сплав АМг6 успішно конкурує зі сталями, титаном і його сплавами завдяки низькій питомій масі і високим показникам опору до руйнування під дією статичних, циклічних та динамічних навантажень, хорошій корозійній стійкості і технологічності. Він широко використовується в авіа- та суднобудуванні для виготовлення несучих конструкцій, деталей та метизів. Тому дослідження механічних властивостей даного матеріалу є актуальними. Як показали проведені раніше дослідження [1], пластична деформація сплаву АМг6 супроводжується стрибкоподібними приростами. Сумарна деформація стрибків перевищує всю іншу деформацію в 5 - 10 разів. Створення моделі прогнозування стрибкоподібної деформації в умовах статичного та змінного в часі навантажування дає змогу поліпшити існуючі розрахунки елементів конструкцій зі сплавом АМг6.

Для низької конструкційних матеріалів властивий стрибкоподібний характер приросту деформації при повзучості [1, 2, 3]. Одним з таких матеріалів є алюмінієвий сплав АМг6. Стрибкоподібна деформація сплаву АМг6 в умовах циклічної повзучості описана в праці [2], де автором зазначена можливість зв'язку цього процесу з розміром та розподілом дисперсних фаз у даному матеріалі. Однак при жорсткому типі навантажування така закономірність не була виявлена, і цей ефект авторами був пояснений теорією деформаційного старіння матеріалу. Приведені в праці [4] дослідження мікроструктури сплаву АМг6 виявили наявність дисперсоїдів у матриці, витягнутих в напрямку вальцювання, які руйнуються при пластичній деформації матеріалу. Таким чином, сплав АМг6 на мікрорівні можна розглядати як композиційний матеріал, в якому роль волокон відіграють витягнуті в напрямку вальцювання дисперсоїди.

Метою даної роботи є пояснення ефекту стрибкоподібної деформації в умовах повзучості сплаву АМг6 на основі аналізу розтріснутих включень другої фази і розробка моделі прогнозування стрибків повзучості на основі гістограми розподілу дисперсоїдів у матриці сплаву.

Матеріали і методика досліджень

Повзучість гладких циліндричних зразків з алюмінієвого сплаву АМг6 досліджували на сервогідроліній машині СТМ-100 при температурі 293 К [1]. Зразки діаметром 10 мм виточували з прутків в стані постачання, додатковій термообробці не піддавали. Попередній розтяг до заданого рівня напружень повзучості здійснювали зі швидкістю зростання умовного статичного напруження $\dot{\sigma} = 1,6$ МПа/с. Повзучість зразків досліджували при рівні напружень $\sigma_c = 300, 320, 340, 355$ МПа та динамічній повзучості при частоті f і амплітуді навантажування σ_a з максимальним рівнем напружень у циклі $\sigma_{max} = 300$ МПа ($f = 25$ Гц, $\sigma_a = 25$ МПа), 355 МПа ($f = 25$ Гц, $\sigma_a = 25$ МПа), 340 МПа ($f = 10 \dots 50$ Гц, $\sigma_a = 12 \dots 37$ МПа).

Мікроструктуру зразків зі сплаву АМг6 після випробування на розтяг та повзучість досліджували на електронному просвічувальному мікроскопі ПЕМ-125К. Об'єкти для дослідження методом тонких фольг вирізали у поздовжньому і поперечному напрямку з деформованих зразків, а також з недеформованого прокату в первісному стані.

На металографічному мікроскопі МИМ-10 досліджували мікроструктуру сплаву АМг6 в первісному стані. Темплети вирізали перпендикулярно до осі прокату.

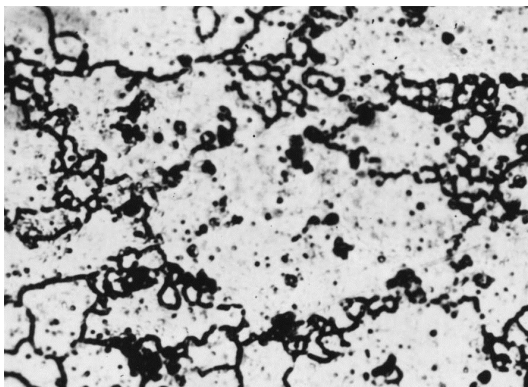
Результати досліджень

Деформування розтягом сплаву АМг6 супроводжується ефектом переривчастої текучості, або стрибкоподібної деформації, що реєструється графічно в умовах м'якого навантаження у вигляді "сходинок" на діаграмі деформування. Зі збільшенням напруження розтягу зростає деформація стрибка (ширина "сходинок" на діаграмі розтягу). Деформація повзучості при постійному рівні напружень та при накладенні додаткової низькоамплітудної циклічної складової також супроводжується стрибкоподібними приростами деформації повзучості, що є співрозмірними зі "сходінками" деформації розтягу.

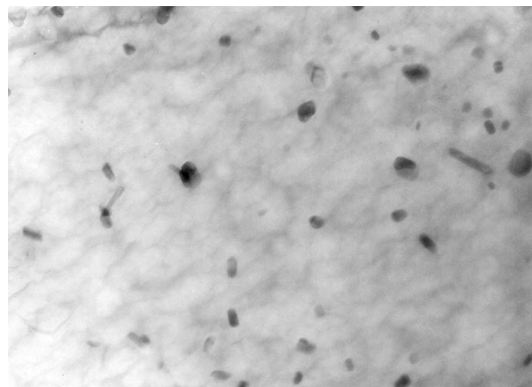
Електронно-мікроскопічні дослідження фольги на просвіт виявили в матриці α твердого розчину Mg в Al включення другої фази. Частинки другої фази рівномірно розподілені в об'ємі зерен. Переважного розташування частинок на границях зерен не виявлено. Включення можна поділити на два типи. До першого відносяться масивні частинки середнім розміром 5,0 мкм. Частинки в основному округлої і витягнутої форми. Другий тип складають дисперсоїди правильної циліндричної форми. Довжина дисперсоїдів від 0,20 до 4,00 мкм і діаметр від 0,08 до 0,15 мкм. Дисперсоїди витягнуті в напрямку прокату заготовки. В недеформованому матеріалі первісного стану включення обох типів мають суцільну форму. У залежності від довжини l_i та діаметру d дисперсоїди характеризуються коефіцієнтом форми : $\alpha_i = \frac{l_i}{d}$.

На основі металографічних (рис. 1а) і електронно-мікроскопічних фотографій (рис. 1б) проведено підрахунок кількості масивних включень і дисперсоїдів в поперечному перерізі матеріалу. Густина включень різного розміру в поперечному перерізі зразків із сплаву АМг6 подано в таблиці 1.

Як видно з таблиці 1, кількість дисперсоїдів значно перевищує кількість масивних включень. Оскільки дисперсні частинки є основним бар'єром для руху дислокацій, аналіз впливу частинок другої фази на пластичну деформацію сплаву АМг6 проводили лише для дисперсоїдів.



а



б

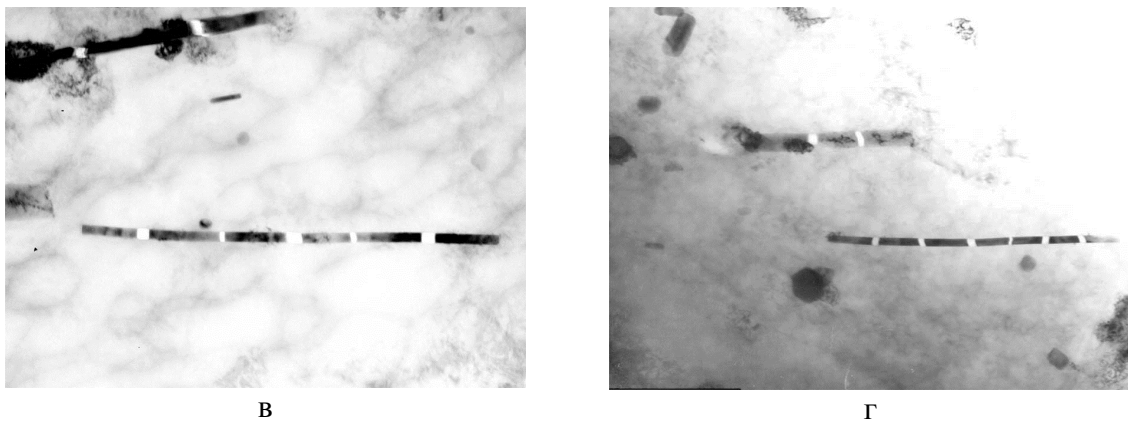


Рис. 1. Мікроструктура сплаву АМг6: первісний стан в поперечному перерізі (а) $\times 400$; (б) $\times 20000$; розтріснуті дисперсоїди (в, г) $\times 20000$ після повзучості

Таблиця 1

Густина включень в поперечному перерізі сплаву АМг6	
Діаметр включень, мкм	Кількість включень на $0,01 \text{ мм}^2$
5,0-10,0	22
1,0-2,0	445
0,08-0,15	30000

Обговорення результатів

Діаграма деформування сплаву АМг6

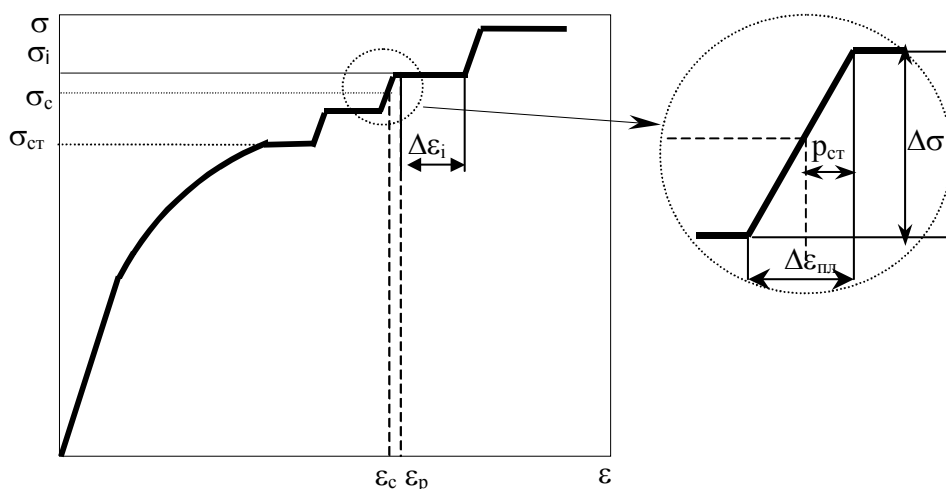


Рис. 2. Діаграма деформування сплаву АМг6 за квазістатичного розтягування

В межах зміни σ від 0 до напруження ініціації стрибкоподібних приростів деформації $\sigma_{ст}$ процес деформування протікає за класичною схемою.

Пружна деформація змінюється за лінійним законом:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\sigma}{E}, \quad (1)$$

де E – модуль Юнга.

На ділянці пластичної деформації до $\sigma_{ст}$, приріст пластичної деформації задовільно описується степеневим законом:

$$\varepsilon_n = C \cdot \sigma^n, \quad (2)$$

де C, n – сталі матеріалу.

Після перевищення напруженнями значення σ_{cm} відбуваються стрибкоподібні прирости деформації.

Після стрибка залежність деформації від напруження є лінійною. Після збільшення напруження на величину $\Delta\sigma$ відбувається наступний стрибок. Тобто весь процес розтягу в межах $\sigma_{cm} < \sigma < \sigma_v$ є чергуванням ділянок, паралельних між собою, і миттєвих приростів деформації або, іншими словами, чергуванням процесів зміцнення і знеміцнення матеріалу (рис. 2).

Ділянка стрибкоподібного приросту деформацій за м'якого типу навантажування характеризується: напруженням початку процесу стрибків σ_{cm} , приростом напруження між стрибками $\Delta\sigma$, модулем пружності на цих ділянках E' та деформацією стрибка $\Delta\varepsilon_i$ за напруження σ_i .

Для сплаву АМг6 експериментально визначене значення σ_{cm} за однакових механічних характеристик має діапазон від 235 МПа до 265 МПа. Для розрахунків приймаємо $\sigma_{cm}=235$ МПа.

На основі експериментальних даних, отриманих на 13 зразках, стрибкоподібні прирости деформації було зафіксовано за досягання приросту напружень 8-14 МПа (рис.3). Для розрахунків приймемо усереднене значення приросту напружень між стрибкоподібними приростами $\Delta\sigma=10$ МПа.

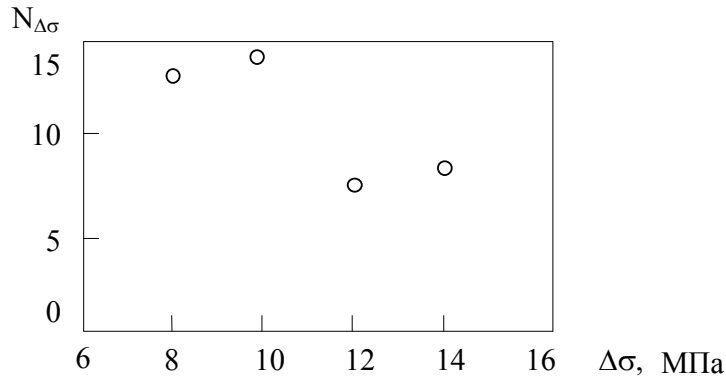


Рис. 3. Кількість стрибкоподібних приростів деформації $N_{\Delta\sigma}$ за відповідних приростів напруження $\Delta\sigma$ при одновісному розтязі сплаву АМг6

Величина приросту пластичної деформації під час кожного наступного стрибка більша, ніж у попереднього. При цьому зростання відбувається майже лінійно із збільшенням напружень у всіх досліджених зразках, а тривалість стрибків змінюється від 0,1 до 0,4 с.

Приріст деформації $\Delta\varepsilon_i$, зумовлений руйнуванням дисперсоїдів розміру α_i , буде:

$$\Delta\varepsilon_i = (H + D \cdot \sigma_i) \cdot n_i. \quad (3)$$

де σ_i – номінальні напруження розтріскування дисперсоїдів відповідного розміру α_i : $\sigma_i = \sigma_{cm} + \Delta\sigma \cdot (i - 1)$, $i=0..12$; H, D - постійні матеріалу; n_i - кількість дисперсоїдів розміру α_i , що знаходиться відповідно до динамічної гістограми розтягу (рис.4).

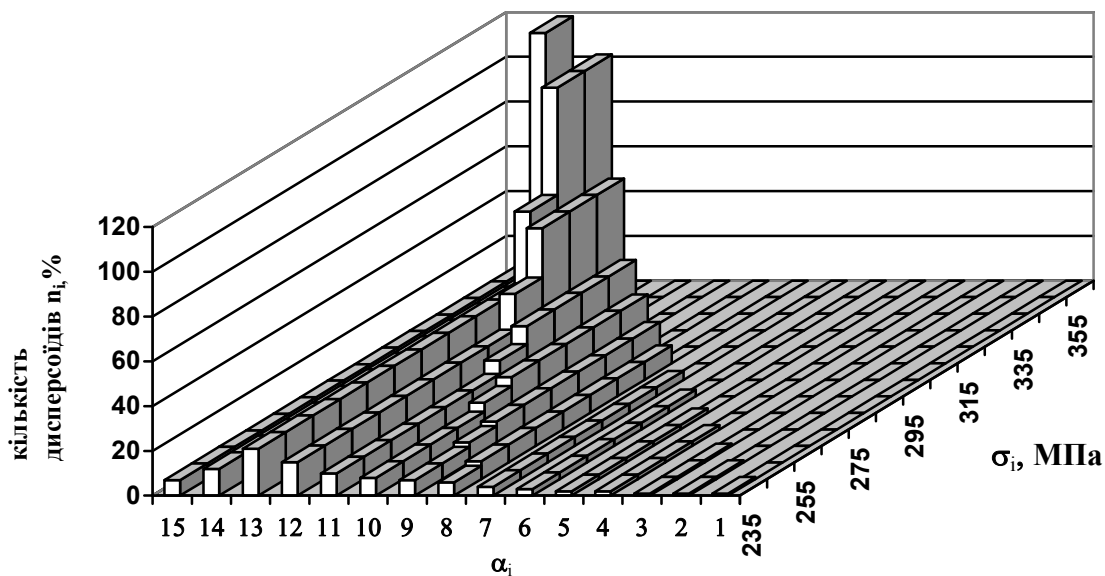


Рис. 4. Розрахункова діаграма фрагментів дисперсодів при розтязі сплаву АМг6

Приріст деформації $\Delta\varepsilon_{nl}$ на ділянці зміцнення, згідно з припущенням про постійне значення приросту напружень між стрибками деформації $\Delta\sigma$, можна вважати постійною величиною:

$$\Delta\varepsilon_{nl} = \frac{\Delta\sigma}{E'} = 0,001 \frac{мм}{мм} \quad (4)$$

Для одновісного розтягу залежність деформації за досягання напруження, більшого за σ_{cm} , здійснюється згідно з формулою:

$$\varepsilon(\sigma) = \frac{\sigma_{02}}{E} + C \cdot (\sigma_{cm} - \sigma_{02})^n + \frac{\sigma - \sigma_{02}}{E'} + \sum_{i=0}^N (C + D \cdot \sigma_i) \cdot n_i, \text{ де } \sigma_i = \sigma_{cm} + \Delta\sigma \cdot i, i=0..N, \quad (5)$$

де N – кількість стрибкоподібних приростів деформації, які відбулися до напруження σ . $N = \frac{\sigma - 0,6 \cdot \sigma_{\sigma}}{\Delta\sigma}$. Характеристики та постійні величини, які використовуються у формулі (5) для досліджуваного сплаву АМг6 за температури $T=293$ К подано в таблиці 2.

Таблиця 2

Характеристики та постійні величини сплаву АМг6

E , МПа	σ_{σ} , МПа	σ_{02} , МПа	C , $\frac{1}{\text{МПа}}$	n	E' , МПа
$0,74 \cdot 10^5$	360	170	$2,9 \cdot 10^{-12}$	4,2	$1 \cdot 10^4$
$\Delta\varepsilon$, мм/мм	$\Delta\sigma$, МПа	H , мм ²		D , $\frac{\text{мм}^2}{\text{МПа}}$	σ_{cm} , МПа
0,001	10	$5,244 \cdot 10^{-7}$		$-1,457 \cdot 10^{-9}$	235

Повзучість

Під час експериментів на повзучість зразки навантажувались до певного рівня $\sigma_c > \sigma_{cm}$ зі сталою швидкістю навантажування. Після досягнення цього рівня зразки дос-

ліджували на повзучість. Повзучість сплаву АМг6 супроводжується стрибкоподібними приростами деформації, аналогічними як при деформуванні розтягом (рис.5).

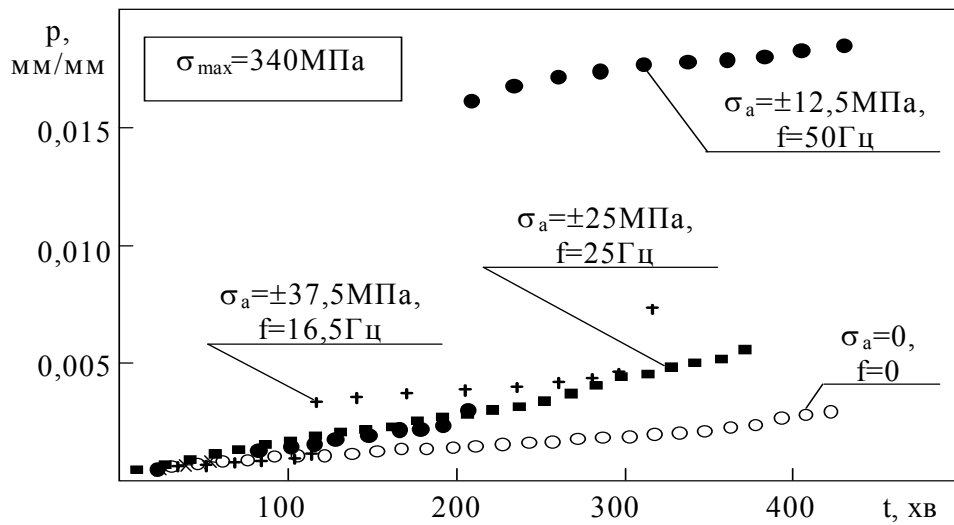


Рис. 5. Діаграма стрибкоподібної повзучості сплаву АМг6 за статичного та циклічного навантаження за максимального рівня навантаження 344 МПа

До моменту випробування на повзучість в матеріалі виявлено зруйновані і ще незруйновані дисперсоїди. Їх кількісна характеристика описується динамічною гістограмою при розтязі. Вважаємо, що процес стрибкоподібної повзучості подібно стрибкоподібній деформації розтягу спричинюється розтріскуванням дисперсоїдів в об'ємі матеріалу.

Будемо вважати, що повна деформація при повзучості ε_{cm}^II (попереднього розтягу $\varepsilon(\sigma_c)$ та самої повзучості p_{cm}) до ініціації стрибкоподібної повзучості відповідає деформації при одновісному розтязі ε_{cm}^I до початку стрибка.

Визначення часу до стрибка деформації.

Згідно з нашим припущенням, стрибкоподібний приріст деформації повзучості відбудеться за умови:

$$\varepsilon(\sigma_c) + p_{cm} = \varepsilon(\sigma_i). \quad (6)$$

З рівності (6) деформація повзучості до стрибка визначається наступним чином:

$$p_{cm} = \varepsilon(\sigma_i) - \varepsilon(\sigma_c). \quad (7)$$

Деформація повзучості p від часу при сталому рівні напруження σ_c до стрибкоподібного приросту деформації задовільно описується рівнянням [5]:

$$p = \left(\frac{1}{m} B \left(\frac{\sigma_c}{1-S} \right)^n t \right)^m, \quad (8)$$

де B , n , m - сталі матеріалу; S - відносна площа пор; t - час повзучості.

З рівнянь (7), (8), з урахуванням (5), час досягання деформації повзучості p_{cm} за статичного навантаження буде :

$$t_{cm} = \frac{m \cdot (\sigma_i - \sigma_c)^{\frac{1}{m}}}{B \cdot (E' \cdot S)^{\frac{1}{m}} \cdot \sigma_c^n}. \quad (9)$$

Динамічна повзучість

У випадку динамічної повзучості в перших циклах навантажування відбувається зростання деформації $\varepsilon_{1\sigma}$, співрозмірне зі стрибком при одновісному розтязі $\Delta\varepsilon$. Цей процес пов'язаний з довантаженням матеріалу на величину амплітуди. Вважаємо, що ініціювання динамічної повзучості викликає процес руйнування дисперсоїдів розміру α_i (найбільшого незруйнованого після деформації розтягом). Деформація стрибка при повзучості буде відповідати рівню напружень σ_{i+1} розтріскування наступного класу дисперсоїдів α_{i+1} з відповідним приростом деформації $\Delta\varepsilon_{i+1}$.

Для цього випадку деформація повзучості до ініціювання стрибкоподібного приросту повзучості буде:

$$p_{CT} = \varepsilon(\sigma_{i+1}) - (\varepsilon(\sigma_{max} - \sigma_a) + \varepsilon_{1\sigma}). \quad (10)$$

Необхідно зауважити, що при рівні довантажування на величину $\sigma_a=37,5$ МПа відбувся приріст $\varepsilon_{1\sigma}$, співрозмірний двом послідовним стрибкам при розтягові. В цьому випадку деформація стрибка прогнозувалась як $\Delta\varepsilon_{i+2}$, і формула (10) запишеться в наступному вигляді:

$$p_{CT} = \varepsilon(\sigma_{i+2}) - (\varepsilon(\sigma_{max} - \sigma_a) + \varepsilon_{1\sigma}). \quad (11)$$

Результати досліджень стрибкоподібної повзучості подано в таблиці 3.

Таблиця 3

Стрибкоподібна повзучість сплаву АМг6

Динамічна повзучість						
σ_{max} , МПа	σ_a , МПа	f , Гц	p_{cm} , мм/мм		$\Delta\varepsilon_i$, мм/мм	
			експеримент	розрахунок за ф-лою (10)	Експеримент	розрахунок за ф-лою (3)
340	25	50	$0,65 \cdot 10^{-3}$	0,001	0,014	0,018
340	25	10	$0,96 \cdot 10^{-3}$	0,001	0,005	0,018
340	37,5	16	$0,62 \cdot 10^{-3}$	0,001*	$2,8 \cdot 10^{-3}$	0,018
Повзучість за постійного навантажування						
σ_e , МПа	p_{cm} , мм/мм		$\Delta\varepsilon_i$, мм/мм		t_{cm} , ХВ	
	Експеримент	розрах. за ф-лою (8)	експеримент	розрах. за ф-лою (3)	експеримент	розрах. за ф-лою (9)
318	$0,73 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$	0,011	0,018	155	168
340	$0,75 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0,021	72	45

*- розрахунок за ф-лою (11).

Висновки

1. Виявлено основні закономірності перебігу стрибкоподібної деформації в умовах розтягу та повзучості сплаву АМг6 при м'якому типі навантажування. Отримано розрахункову залежність величини стрибкоподібних приростів деформації від розміру і розподілу дисперсних фаз.
2. Запропоновано методику розрахунку стрибкоподібної деформації повзучості сплаву АМг6 при $T=293$ К, яка ґрунтується на використанні гістограми розподілу дисперсоїдів матеріалу у первісному стані і дозволяє прогнозувати величину стрибка та деформацію повзучості, за досягання якої відбувається стрибкоподібний приріст деформації. Для повзучості за постійного навантажування методика дозволяє розраховувати також час ініціації стрибкоподібної повзучості.

Надалі, для виявлення границь застосування запропонованої методики розрахунку стрибкоподібної деформації повзучості сплаву АМг6 необхідно провести дослі-

дження стрибкоподібного деформування сплаву АМгб при одновісному навантажуванні за різної швидкості навантажування та температури, дослідити динамічну повзучість при різних асиметриях циклу та частотах.

The interrelation of stepwise creep deformation of AlMg and dispersed inclusions fracture of the second phase has been studied. It is stated the relations and between the instant incrementation deformation and phase size and distribution in this alloy. The proposed technique of stepwise creep prediction in AlMg is based on histogram of disperse particles in the material.

Література

1. Ясній П., Галушак М. Методика і деякі результати дослідження впливу циклічного навантажування на діаграми деформування сплаву АМг-6 // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль. ТДТУ. – 1998. – Том 3, число 4. – С. 62-66.
2. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. - К.: Наук. думка, 1978. - 238 с.
3. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Сапожникова А.Б. и др. Композиционные материалы в технике. – К.: Техніка, 1985. – 152 с.
4. Ясній П.В., Гладько В.Б. Вплив циклічної розтягової складової навантаження на дислокаційну структуру сплаву АМгб // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2002. - №3. – С. 63-68.
5. П.В. Ясній, М.П. Галушак, С.І. Федак Моделювання процесу пошкоджуваності матеріалу при повзучості з накладанням додаткової високочастотної циклічної складової. // Проблеми міцності. –2003. -№1. – С. 48 - 54.

Одержано 27.02.2003 р.