

Взаємозв'язок між пластичною деформацією і мікроструктурними параметрами в умовах активного розтягу і повзучості сплаву АМг6

П. В. Ясній, В. Б. Гладь, С. І. Федак

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

Досліджено взаємозв'язок між пластичною деформацією сплаву АМг6 в умовах квазістатичного і комбінованого розтягу, повзучості, динамічної повзучості і густиною дислокацій. Виявлено, що зростання пластичної деформації за наявності циклічної складової навантаження задовільно узгоджується зі збільшенням густини дислокацій матеріалу. Запропоновано залежності для розрахунку густини дислокацій (пластичної деформації) в матеріалі за наявності циклічної складової навантаження.

Ключові слова: квазістатичний і комбінований розтяг, повзучість, густина дислокацій, складова навантаження.

Вступ. Відомо, що загальна деформація при комбінованому розтязі з амплітудою циклічного навантаження $0,15\sigma_{0,2}$ суттєво більша ніж при квазістатичному за однакового напруження [1]. Накладення додаткового низькоамплітудного циклічного навантаження істотно інтенсифікує повзучість алюмінієвого сплаву АМг6 порівняно зі статичним навантаженням за однакових значень максимального напруження [2].

Сумісна дія статичної і циклічної складових навантаження виявляє взаємозалежність структурних змін у матеріалі. Циклічна складова навантаження активізує структурні перетворення у матеріалі і змінює характер мікрореформації, що впливає на ефективність дії статичного навантаження, а зміни, викликані статичним навантаженням, впливають на характер і результати циклічного деформування [3].

Загалом пластична деформація є результатом переміщення дислокацій і дефектів. Відомо, що в умовах низькотемпературної повзучості (нижче $0,5T_{пл}$) процеси переповзання дислокацій ускладнені, і дислокації переміщуються переважно шляхом ковзання певними кристалографічними площинами [4]. Оскільки у процесі деформації матеріал зміцнюється, подальша деформація у процесі повзучості відбувається за рахунок випадкових термічних флуктуацій напруження, які накладаються на прикладене напруження і збільшують його з подальшого пластичною деформацією. На стадії циклічного зміцнення матеріалу формується коміркова дислокаційна структура, яка при циклічному навантаженні досягає більшої густини дислокацій за деформації меншої, ніж за статичних випробувань [5]. Отже, циклічне навантаження прискорює процес структурних змін у матеріалі.

Метою даної роботи є дослідження механізмів збільшення пластичної деформації сплаву АМг6 в умовах розтягу і повзучості з накладенням додаткової циклічної складової.

Матеріали і методика досліджень. Гладкі циліндричні зразки з алюмінієвого сплаву АМг6 деформували розтягом в умовах короткотривалої повзучості на сервогідравлічній машині СТМ-100 за наступними схемами [1, 2]. У першому випадку зразки квазістатично розтягували до руйнування зі швидкістю зростання умовного напруження $\dot{\sigma} = 1,6$ МПа/с. За другою схемою на розтяг зі швидкістю $\dot{\sigma} = 1,6$ МПа/с накладали циклічне синусоїдальне навантаження з частотою $f = 25$ Гц і амплітудою $\sigma_a = \pm 25$ МПа (комбіноване навантаження) [1]. Короткотривалу повзучість і динамічну повзучість сплаву АМг6 досліджували при температурі 293 К і максимальних напруженнях $\sigma_{\max} = 300, 340$ і 355 МПа [2]. Зразки діаметром 10 мм (рис. 1) виточували з прутків у стані постачання без додаткової термообробки.

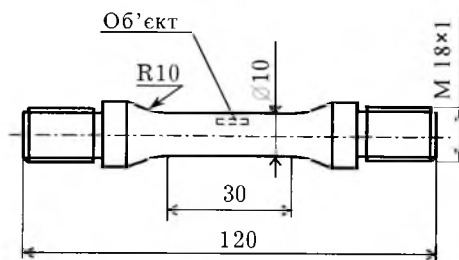


Рис. 1. Зразки зі сплаву АМг6 для випробування на розтяг та повзучість і місце вирізу об'єктів для електронно-мікроскопічних досліджень.

Мікроструктуру зразків зі сплаву АМг6 після випробування на розтяг і повзучість досліджували в електронному просвічуючому мікроскопі ПЕМ-125К. Об'єкти для мікроструктурного дослідження методом тонких фольг вирізали із зразків після випробування на статичну і динамічну повзучість у поздовжньому напрямку на відстані 2 мм від зовнішньої циліндричної поверхні (рис. 1), після випробування на квазістатичний і комбінований розтяг із ділянок рівномірної деформації на відстані 1 мм від зовнішньої циліндричної поверхні зруйнованих зразків. Окрім того, досліджували матеріал із прокату в первинному стані. Фольги для дослідження готували за методикою [6]. Об'єкти остаточно стоншували методом струминного електролітичного полірування.

Скалярну густину дислокацій ρ розраховували методом січних як число N точок перетину дислокацій з випадковими січними загальною довжиною L_0 у фользі товщиною s [7]:

$$\rho = \frac{2N}{L_0 s}. \quad (1)$$

Результати досліджень та їх аналіз. Дислокаційна картина сплаву АМг6 у первинному стані характеризується однорідною сітковою структурою. Розподіл дислокаційної сітки в об'ємі зерен, на границях і біля включень – рівномірний. Спостерігається лише певна зміна кроку і форми дислокаційної сітки від рівновісної до витягнутої. У такому матеріалі скалярна густина дислокацій ρ складає $2 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$.

В умовах розтягу комбіноване навантаження значно збільшує загальну деформацію порівняно з квазістатичним розтягом за однакових рівнів напружень (діаграма деформації зміщується вправо) [1]. Дослідження дислокаційної структури зразків після деформації розтягом виявили значну різницю в густині дислокацій за двох схем навантажування (таблиця).

Скалярна густина дислокацій сплаву АМг6

Вид випробування	σ_{\max} , МПа	$\rho \cdot 10^{-13}$, м ⁻²
Первинний стан	–	2,0
Квазістатичний розтяг	360	3,3
Комбінований розтяг	360	4,0
Повзучість	300	4,3
	340	6,2
	355	7,5
Динамічна повзучість	300	6,0
	340	7,3
	355	8,0

При квазістатичному розтязі на ділянці рівномірної деформації зразка зростає скалярна густина дислокацій відносно первинного стану матеріалу. У випадку комбінованого розтягу густина дислокацій значно більша порівняно з первинним станом матеріалу, а також із квазістатично деформованим, що зумовлено зменшенням кроку дислокаційної сітки (рис. 2,а,б). Отже, в умовах комбінованого розтягу за рахунок циклічної складової інтенсифікується зародження додаткових дислокацій і збільшується їх скалярна густина.

В умовах динамічної повзучості сумісна дія статичного і циклічного навантаження інтенсифікує процеси повзучості сплаву АМг6, що збільшує загальну деформацію порівняно зі статичною повзучістю при однакових максимальних напруженнях і часі випробування [2]. Дослідження дислокаційної структури зразків свідчать, що в умовах статичної і динамічної повзучості з підвищенням максимального напруження зростає скалярна густина дислокацій (таблиця), що в першу чергу зумовлено зменшенням кроку дислокаційної сітки (рис. 2,в,г). Основна ж відмінність дислокаційної структури за умов динамічної повзучості порівняно зі статичною – це утворення вторинної дислокаційної сітки на фоні існуючої (рис. 2,г).

Порівняння залежностей скалярної густини дислокацій від максимального напруження повзучості свідчить, що вони подібні для двох схем навантажування, проте за умов динамічної повзучості густина дислокацій більша при однакових максимальних напруженнях і часі випробування, ніж за умов статичної (рис. 3).

Циклічна складова навантаження за динамічної повзучості порівняно зі статичною сприяє зростанню густини дислокацій, а отже, інтенсифікує процес повзучості. Очевидно, більша деформація повзучості сплаву АМг6 за наявності низькоамплітудної циклічної складової зумовлена підвищенням

термічних флуктуацій напружень у мікрооб'ємах матеріалу, що ініціює процеси зародження нових дислокацій і полегшує поперечне їх ковзання.

Густина дислокацій ρ за відсутності динамічного повороту вважається пропорційною пластичній деформації ε [8]:

$$\rho = \rho_0 + A\varepsilon, \quad (2)$$

де ρ_0 – початкова густина дислокацій в матеріалі; A – коефіцієнт, який характеризує швидкість розмноження дислокацій ($\partial\rho/\partial\varepsilon$).

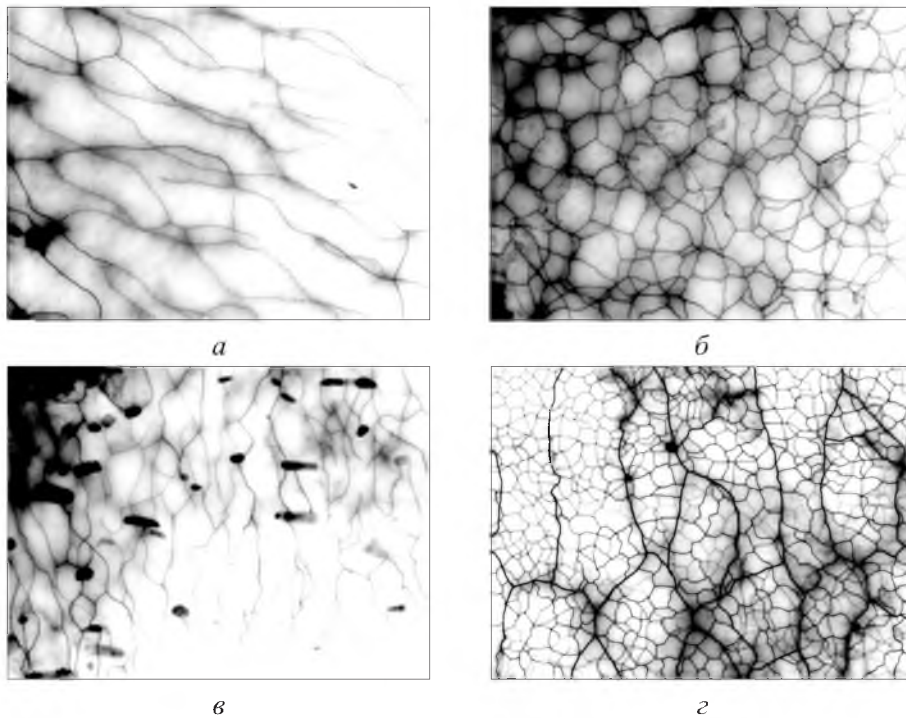


Рис. 2. Дислокаційна структура сплаву АМг6 після розтягу і повзучості при $\sigma_{\max} = 300$ МПа: а – квазістатичний розтяг; б – комбінований розтяг; в – статична повзучість; г – динамічна повзучість ($\times 30000$).

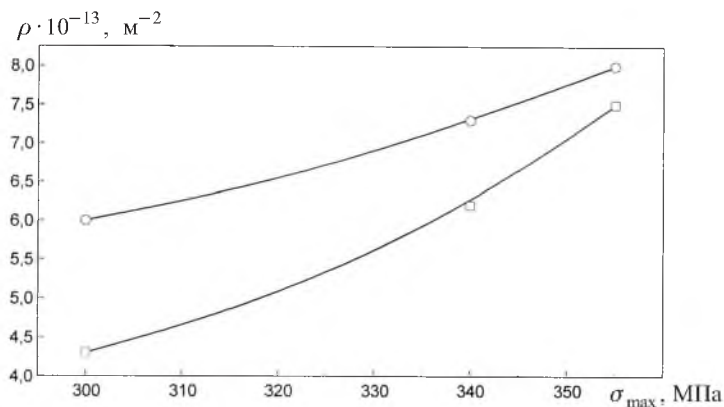


Рис. 3. Залежність скалярної густини дислокацій сплаву АМг6 від максимального напруження повзучості: \square – статична повзучість; \circ – динамічна повзучість ($\sigma_a = \pm 25$ МПа).

Відомо, що упродовж розвантаження зразка і при виготовленні тонкої фольги дислокаційна структура змінюється. Проте, в сплавах менша рухливість дислокацій забезпечує краще збереження дислокаційної структури порівняно з чистими металами [9]. Таким чином, зміною густини дислокацій в процесі розвантаження зразка і при виготовленні тонкої фольги знехтуємо. Як відомо, утворення дислокацій – процес, який мало контролює повзучість на усталеній ділянці (не відмічено помітного зростання густини дислокацій) [10]. Оскільки на усталеній ділянці повзучості процеси зародження й анігіляції дислокацій стабілізуються, загальна густина дислокацій в матеріалі залишається постійною. Отже, пластичну деформацію при розтязі і на неусталеній ділянці повзучості розраховуємо відповідно до зміни густини дислокацій:

$$\varepsilon = \frac{\rho - \rho_0}{A}. \quad (3)$$

В умовах комбінованого розтягу і динамічної повзучості сплаву АМг6 густина дислокацій більша, ніж при квазістатичному розтязі і статичній повзучості. Таким чином, зростання густини дислокацій, що утворюються в матеріалі при навантаженні з накладенням циклічної складової, приймемо у вигляді добутку двох незалежних функцій:

$$\rho - \rho_0 = Q(\sigma_{\max})G(\sigma_{\max}, \sigma_a), \quad (4)$$

де $Q(\sigma_{\max})$ – функція впливу статичного навантаження на густину дислокацій; $G(\sigma_{\max}, \sigma_a)$ – функція впливу циклічної складової на густину дислокацій. У випадку $\sigma_a = 0$ функція впливу циклічної складової має обмеження: $G(\sigma_{\max}, 0) = 1$.

Повзучість і динамічна повзучість. Деформація в умовах повзучості описується за теорією зміцнення [11]:

$$p_c = \left[\frac{1}{m} B(\sigma_{\max})^n t \right]^m, \quad (5)$$

де m , B , n – постійні величини, залежні від температури; σ_{\max} – максимальне напруження при повзучості; t – час. Згідно з рівністю (4) у випадку статичної повзучості функція $G(\sigma_{\max}, 0) = 1$, і відповідно зміна густини дислокацій в часі на неусталеній ділянці повзучості прийме вигляд

$$\rho - \rho_{0n} = Q(\sigma_{\max}) = A_n \left[\frac{1}{m} B(\sigma_{\max})^n t \right]^m, \quad (6)$$

де ρ_{0n} – густина дислокацій в початковий момент повзучості; A_n – коефіцієнт швидкості розмноження дислокацій при повзучості.

За експериментальними даними (таблиця) побудували залежність впливу циклічної складової на густину дислокацій при $\sigma_a = \text{const}$, апроксимовану функцією $G(\sigma_{\max})$, яка представлена на рис. 4, при $\sigma_{0,2} < \sigma_{\max} < \sigma_B$:

$$G(\sigma_{\max}) = D''(\sigma_{\max} - \Omega)^\eta, \quad (7)$$

де D'' , Ω , η – залежні від температури постійні величини.

Зміну густини дислокацій на неусталеній ділянці динамічної повзучості з урахуванням (6) і (7) визначимо за формулою

$$\rho - \rho_{0n} = A_n \left[\frac{1}{m} B(\sigma_{\max})^n t \right]^m D''(\sigma_{\max} - \Omega)^\eta. \quad (8)$$

Оскільки на усталеній ділянці повзучості загальна густина дислокацій в матеріалі залишається постійною, загальну деформацію динамічної повзучості на неусталеній і усталеній ділянках розраховуємо з урахуванням впливу циклічної складової на густину дислокацій на неусталеній ділянці повзучості:

$$\rho_d = \left[\frac{1}{m} B(\sigma_{\max})^n t \right]^m D''(\sigma_{\max} - \Omega)^\eta. \quad (9)$$

Коефіцієнти для розрахунку густини дислокацій в сплаві АМг6 в умовах повзучості за формулами (6) і (8): $B = 1,14 \cdot 10^{-49}$; $A_n = 5,0 \cdot 10^{16}$; $n = 16,5$; $m = 0,625$; $D'' = 0,012$; $\eta = 1,0$; $\Omega = 444,17$.

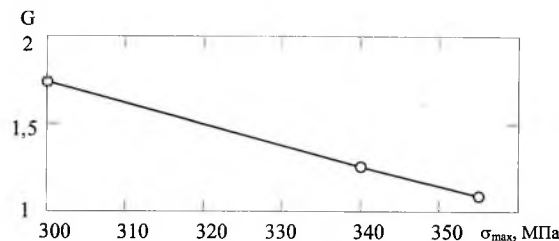


Рис. 4. Експериментальна – точки і розрахункова за формулою (7) – лінія функція $G(\sigma_{\max})$ впливу циклічної складової на рівень густини дислокацій в сплаві АМг6.

Залежності деформації статичної і динамічної повзучості сплаву АМг6 від часу при $\sigma_{\max} = 300, 340$ і 355 МПа, обчислені за формулами (5) і (9), задовільно узгоджуються з експериментальними результатами [2] (рис. 5).

Одновісний квазістатичний і комбінований розтяг. Функцію впливу циклічної складової $G(\sigma_{\max})$ на рівень густини дислокацій в сплаві АМг6 можна використати і для випадку одновісного розтягу.

Відомо [2], що відношення деформації динамічної повзучості до деформації статичної повзучості є сталим для заданого максимального напруження (рис. 6,а). Припустимо, що динамічний процес виходу на постійне значення функції $G(\sigma_{\max})$ здійснюється за той же час і з тією ж швидкістю, що і відношення деформації динамічної повзучості до деформації статичної повзучості (рис. 6,б).

Вигляд функції виходу на усталене значення $G(\sigma_{\max}, t)$ (рис. 6,б) вибирається з умов: $G(\sigma_{\max}, 0) = 1$ і $G(\sigma_{\max}, t^*) = G(\sigma_{\max})$. Цим умовам задовольняє наступна залежність:

$$G(\sigma_{\max}, t) = 1 - \left(\frac{t}{t^*(\sigma_{\max})} \right)^\eta (1 - G(\sigma_{\max})), \quad (10)$$

де $G(\sigma_{\max})$ – усталене значення G (рис. 4); $t^*(\sigma_{\max})$ – час виходу функції $G(\sigma_{\max}, t)$ на усталене значення $G(\sigma_{\max})$; η – показник степеневі функції виходу на усталене значення; t – час, $0 \leq t \leq t^*$.

Із представлених на рис. 6,а експериментальних значень знаходимо функцію $t^*(\sigma_{\max})$ (рис. 6,б) для діапазону значень $\sigma_{0,2} \leq \sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{в}}$ у вигляді

$$t^*(\sigma_{\max}) = M(\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\max})^k, \quad (11)$$

де M, k – постійні матеріалу при фіксованих значеннях амплітуди σ_a та температури.

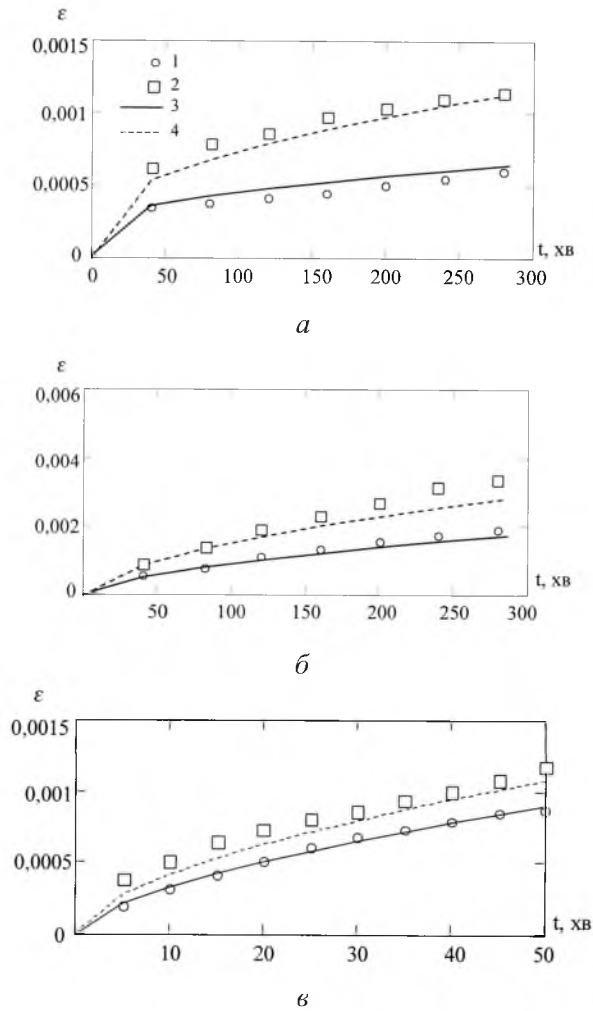


Рис. 5. Діаграми статичної (1, 3) і динамічної (2, 4) повзучості сплаву АМг6 при різних σ_{\max} : а – $\sigma_{\max} = 300$ МПа; б – $\sigma_{\max} = 340$ МПа; в – $\sigma_{\max} = 355$ МПа (1, 2 – експеримент; 3, 4 – розрахунок за формулами відповідно (5), (9)).

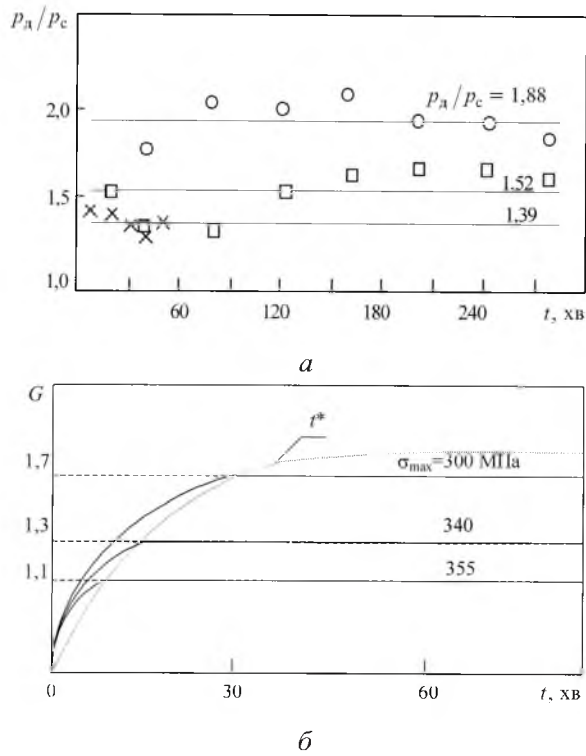


Рис. 6. Залежність відношення деформацій динамічної і статичної повзучості (а) і функції впливу циклічної складової на рівень густини дислокацій (б) від часу та максимального напруження: $\circ - \sigma_{max} = 300$ МПа; $\square - \sigma_{max} = 340$ МПа; $\times - \sigma_{max} = 355$ МПа.

З урахуванням формули (11) залежність (10) запишемо наступним чином:

$$G(\sigma_{max}, t) = 1 - \left(\frac{t}{M(\sigma_b - \sigma_{max})^k} \right)^\eta (1 - G(\sigma_{max})), \quad 0 \leq t \leq t^*. \quad (12)$$

Для випадку розтягу будемо розглядати зростання густини дислокацій ρ_p як східчастий процес зі сталим приростом напруження (рис. 7).

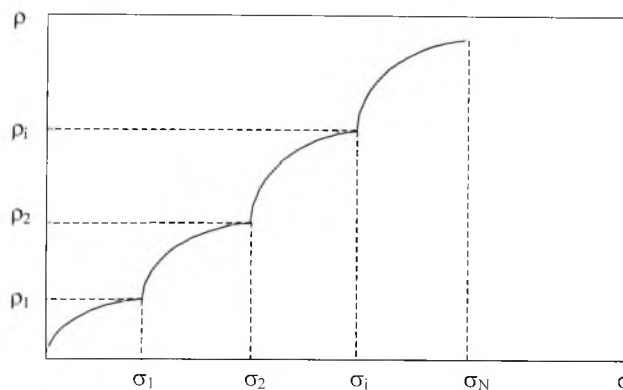


Рис. 7. Схема розрахунку густини дислокацій для випадку розтягу.

При постійній швидкості навантажування маємо

$$\sigma_{\max} = \dot{\sigma}t. \quad (13)$$

Поділимо діаграму квазістатичного розтягу на N однакових ділянок за умови, що перша ділянка починається від $\sigma_{0,2}$ і має протяжність $\frac{\sigma_{\text{в}} - \sigma_{0,2}}{N}$.

Аналогічно напруження на i -й ділянці визначається як $\sigma_i = \sigma_{0,2} + i \frac{\sigma_{\text{в}} - \sigma_{0,2}}{N}$.

Час, за який відбувається зростання функції $G(\sigma_{\max}, t)$ на цій ділянці, буде $\Delta t = \frac{\sigma_{\text{в}} - \sigma_{0,2}}{N\dot{\sigma}}$.

Пластична деформація в умовах розтягу описується степеневим законом $\varepsilon = C\sigma^{n'}$. Приріст густини дислокацій $\Delta\rho_i$ на ділянці σ_i згідно зі степеневим законом зміни деформації при розтязі з урахуванням (3) виразимо так:

$$\Delta\rho(\sigma_i) = A_p C ((\sigma_i + \Delta\sigma)^{n'} - \sigma_i^{n'}), \quad (14)$$

де C , n' – постійні матеріалу; A_p – коефіцієнт швидкості розмноження дислокацій при розтязі.

Результуючий приріст густини дислокацій $(\rho_p - \rho_0)$ в умовах квазістатичного розтягу отримуємо як суму приростів густин на всіх ділянках:

$$\rho_p - \rho_0 = \sum_{i=1}^N \Delta\rho(\sigma_i) = \sum_{i=1}^N A_p C ((\sigma_i + \Delta\sigma)^{n'} - \sigma_i^{n'}). \quad (15)$$

Густина дислокацій за одновісного розтягу, обчислена за формулою (15) з розбиттям $N = 1000$ для $\sigma_{\max} = 360$ МПа, буде $\rho_p = 3,2 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$.

В умовах комбінованого розтягу вплив циклічної складової на густину дислокацій описується функцією $G(\sigma_{\max}, t)$.

З урахуванням формули (14) густину дислокацій в умовах комбінованого навантажування $\rho_{\text{р.д}}$ визначимо за допомогою східчастої схеми, що запропонована для квазістатичного розтягу:

$$\rho_{\text{р.д}} - \rho_0 = \sum_{i=1}^N \Delta\rho_i(\sigma_i) G(\sigma_i, \Delta t), \quad (16)$$

або, враховуючи (12):

$$\rho_{\text{р.д}} - \rho_0 = \sum_{i=1}^N A_p C ((\sigma_i + \Delta\sigma)^{n'} - \sigma_i^{n'}) \left(1 - \left(\frac{t}{M(\sigma_{\text{в}} - \sigma_i)^k} \right)^\eta (1 - G(\sigma_i)) \right). \quad (17)$$

Коефіцієнти для розрахунку густини дислокацій в умовах квазістатичного і комбінованого розтягу, обчислені за формулами (15) і (17), дорівнюють: $A_p = 1 \cdot 10^{14}$; $M = 0,76$; $k = 0,9$; $\eta = 0,04$; $C = 2,9 \cdot 10^{-12}$; $n' = 1,588$.

Густина дислокацій за одновісного комбінованого розтягу, обчислена за формулою (17) з розбиттям $N = 1000$ для $\sigma_{\max} = 360$ МПа: $\rho_{pд} = 4,06 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$.

Пластична деформація за квазістатичного і комбінованого розтягу, що розрахована за формулою (3) з урахуванням відповідно (15) і (17), задовільно узгоджується з експериментальними даними (рис. 8).

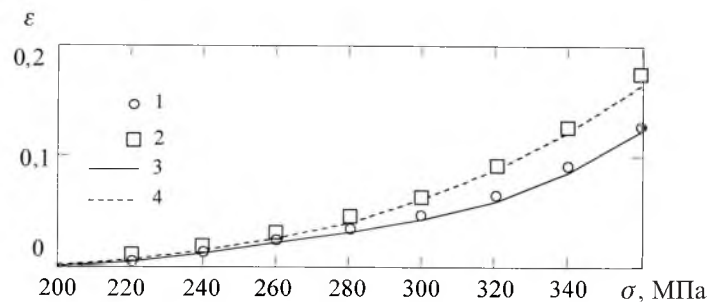


Рис. 8. Залежність пластичної деформації сплаву АМгб від напруження при квазістатичному (1, 3) і комбінованому (2, 4) розтязі. (Точки – експеримент, лінії – розрахунок за формулою (3) з урахуванням відповідно (15), (17).)

Отже, збільшення пластичної деформації сплаву АМгб в умовах розтягу і повзучості з накладенням додаткової циклічної складової задовільно описується запропонованою функцією впливу циклічної складової на густину дислокацій $G(\sigma_{\max}, \sigma_a)$.

Висновки

1. Виявлено, що зростання пластичної деформації сплаву АМгб в умовах розтягу і повзучості з накладенням циклічної складової навантаження пов'язане зі зростанням густини дислокацій матеріалу.

2. Отримано залежності для розрахунку густини дислокацій і пластичної деформації сплаву АМгб в умовах квазістатичного і комбінованого розтягу, статичної та динамічної повзучості.

Резюме

Исследована взаимосвязь между пластической деформацией сплава АМгб в условиях квазистатического и комбинированного растяжения, ползучести, динамической ползучести и плотностью дислокаций. Обнаружено, что увеличение пластической деформации при наличии циклической составляющей нагружения удовлетворительно согласуется с повышением плотности дислокаций материала. Предложены зависимости для расчета плотности дислокаций (пластической деформации) в материале при наличии циклической составляющей нагружения.

1. Ясній П., Галуцак М. Методика і деякі результати дослідження впливу циклічного навантажування на діаграми деформування сплаву АМг6 // Вісн. Тернопіль. держ. техн. ун-ту. – 1998. – 3, число 4. – С. 62 – 66.
2. Ясній П. В., Галуцак М. П., Федак С. І. Вплив амплітуди циклічного навантажування на динамічну повзучість алюмінієвого сплаву // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. – 1999. – 1, вип. 2. – С. 268 – 272.
3. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В. А. Кузьменко. – Киев: Наук. думка, 1979. – 336 с.
4. Физическое металловедение: В 3 т., 3-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Р. У. Кана, П. Хаазена. Т. 3: Физико-механические свойства металлов и сплавов: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1987. – 663 с.
5. Стрижало В. А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. – Киев: Наук. думка, 1978. – 238 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. Новиков И. И. Дефекты кристаллического строения металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 232 с.
8. Трефилов В. И., Моисеев В. Ф., Печковский Э. П. и др. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов / Под ред. В. И. Трефилова. – Киев: Наук. думка, 1989. – 256 с.
9. Утевский Л. М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. – М.: Металлургия, 1973. – 583 с.
10. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Структура и механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 472 с.
11. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.

Поступила 21. 05. 2003