

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.172.2

Стрибкоподібна деформація сплаву АМгб при розтязі

П. В. Ясній, С. І. Федак, В. Б. Гладь, М. П. Галушак

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

Описано та обгрунтовано гіпотезу взаємозв'язку стрибкоподібної деформації при статичному розтязі у м'якому режимі навантажування сплаву АМгб з руйнуванням дисперсних включень другої фази. Виявлено залежність величини стрибкоподібних приростів деформації від розміру дисперсних фаз і розподілу їх у даному сплаві. Запропоновано методика прогнозування стрибкоподібної деформації сплаву на основі гістограми розподілу дисперсних частинок у первинному матеріалі.

Ключові слова: стрибкоподібна деформація, статичний розтяг, м'який режим навантажування, дисперсні включення, розмір дисперсної фази.

Вступ. Стрибкоподібний характер деформації при розтязі властивий ряду конструкційних матеріалів. Відомим є ефект низькотемпературної стрибкоподібної деформації матеріалів, який пов'язаний з ініціюванням стрибка внаслідок імпульсного впливу – теплового або механічного [1]. Також відомий ефект переривчастої текучості при відносно вищих температурах (ефект Портевена–ле Шательє), який зумовлений різким збільшенням кількості рухомих дислокацій в результаті їх звільнення від закріплення домішками [2]. Дислокації можуть бути закріплені атмосферами атомів домішок, частинками другої фази або іншим чином [3]. Внаслідок динамічного деформаційного старіння процеси закріплення дислокацій домішками та їх звільнення відбуваються декілька разів, що на діаграмі деформування реєструється у вигляді “зубів”.

Стрибкоподібна деформація алюмінієвого сплаву АМгб в умовах циклічної повзучості описана в роботі [4]. Проведені дослідження мікроструктури дозволили виявити наявність дисперсоїдів у матриці, витягнутих у напрямку вальцювання, які руйнуються при пластичній деформації матеріалу [5]. Таким чином, даний сплав можна розглядати на мікрорівні як композиційний матеріал, у якому витягнутим у напрямку вальцювання дисперсоїдам належить роль волокон.

Як відомо, діаграма деформування композитного матеріалу, який руйнується за механізмом численного розтріскування, має пилкоподібний вигляд [6], зумовлений руйнуванням волокон у різних перерізах матеріалу. Коли волокно руйнується, то навантаження, яке ним сприймалося, передається

матриці, а на діаграмі розтягу з'являється зуб, пропорційний величині цього навантаження. При подальшому деформуванні в матриці відбувається локальний наклеп і зростає напруження, що забезпечує руйнування відрізків волокон в інших перерізах.

Метою роботи є обґрунтування гіпотези щодо механізму стрибкоподібної деформації сплаву АМгб за даними аналізу кінетики руйнування включень другої фази і розробка методики розрахунку приростів пластичної деформації при статичному розтязі у режимі м'якого навантажування на основі гістограми розподілу дисперсоїдів у матриці первинного сплаву.

Матеріали і методика досліджень. Гладкі циліндричні зразки зі сплаву АМгб деформували розтягом на електрогідравлічній машині СТМ-100 при температурі 293 К. Зразки діаметром 10 мм і довжиною робочої частини 25 мм виточували з прутків у стані постачання. Розтяг здійснювали зі швидкістю навантажування $\dot{\sigma} = 1,6$ МПа/с [7].

Мікроструктуру зразків досліджували на просвічуючому електронному мікроскопі ПЕМ-125К. Об'єкти для дослідження методом тонких фольг вирізали у поздовжньому і поперечному напрямку з деформованих зразків, а також із недеформованого первинного прокату.

На металографічному мікроскопі ММ-10 досліджували мікроструктуру сплаву АМгб в первинному стані. Темплети вирізали перпендикулярно до осі прокату.

Результати досліджень. Деформація розтягом сплаву АМгб супроводжується ефектом переривчастої текучості, або стрибкоподібної деформації, що в умовах м'якого навантаження на діаграмі деформування реєструється у вигляді "сходинок". Причому зі збільшенням напруження розтягу зростає приріст деформації стрибка (збільшується ширина "сходинок").

Електронно-мікроскопічні дослідження фольги на просвіт виявили в матриці α -твердого розчину Mg в Al включення другої фази, частинки якої рівномірно розподілені в об'ємі зерен. Переважного розташування частинок на границях зерен не відмічено. Включення можна поділити на два типи. До першого типу відносяться масивні частинки в основному округлої і витягнутої форми, середній розмір яких сягає 5,0 мкм. Другий тип складають дисперсоїди правильної циліндричної форми довжиною 0,20–4,00 мкм і діаметром 0,08–0,15 мкм. Дисперсоїди витягнуті в напрямку прокату заготовки. У недеформованому матеріалі первинного стану включення обох типів є суцільними.

На основі результатів металографічних (рис. 1,а) та електронно-мікроскопічних досліджень (рис. 1,б) проведено підрахунок кількості масивних включень і дисперсоїдів у поперечному перерізі зразків зі сплаву АМгб. Густина включень у поперечному перерізі зразка зі сплаву АМгб на $0,01 \text{ мм}^2$ при діаметрі включень 5–10, 1–2 та 0,08–0,15 мкм дорівнювала відповідно 22, 445 та 30000.

Кількість дисперсоїдів значно перевищує кількість масивних включень. Оскільки дисперсні частинки є основним бар'єром для руху дислокацій, аналізували вплив частинок другої фази на пластичну деформацію сплаву АМгб лише для дисперсоїдів.

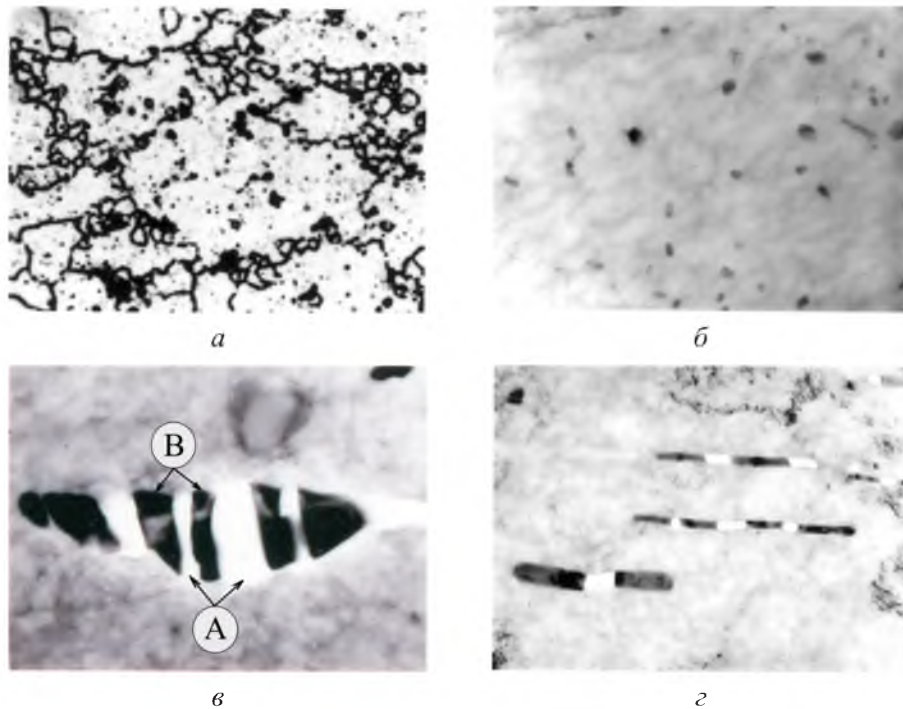


Рис. 1. Мікροструктура сплаву АМг6: *a, б* – первинний стан, поперечний переріз, відповідно $\times 400$ і $\times 2000$; *в, г* – відповідно розтріпані масивні частинки ($\times 5000$) і дисперсоїди ($\times 20000$) після розтягу (*A* – порожнини; *B* – фрагменти).

Було проведено вимірювання геометричних параметрів і статистичний аналіз кількості дисперсоїдів у залежності від початкового коефіцієнта форми α_0 , який визначали як відношення довжини дисперсоїда l_0 до його діаметра d в первинному матеріалі:

$$\alpha_0 = \frac{l_0}{d}.$$

Залежність відносної кількості дисперсоїдів n від коефіцієнта форми α_0 в первинному матеріалі представлена на рис. 2.

У поздовжньому напрямку зразків після випробування на розтяг виявлено розтріскування масивних частинок (рис. 1,в) і дисперсоїдів (рис. 1,г) на окремі фрагменти. Руйнування частинок відбувалося переважно перпендикулярно до напрямку дії навантаження. У залежності від початкового коефіцієнта форми α_0 дисперсоїди розтріснулися на два–сім окремих фрагментів. Включення з більшим початковим коефіцієнтом форми розтріснулися на більшу кількість фрагментів.

Між фрагментами розтріпаних частинок утворюються пори, розмір яких зростає зі збільшенням величини пластичної деформації. Утворення пор відшаруванням частинок від матриці спостерігається рідко, в основному біля масивних включень рівновісної форми. Очевидно, напруження руйнування крихких частинок менше за напруження, що необхідне для відшарування частинки від матриці, і тому при зростанні напруження відбувається руйнування частинок.

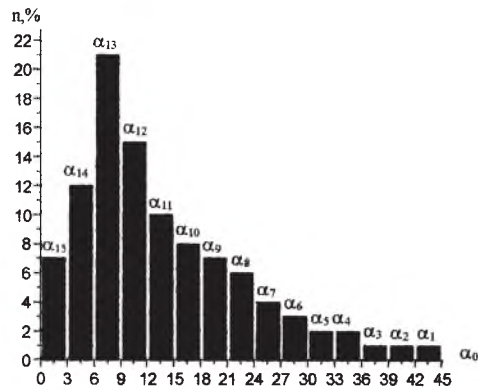


Рис. 2. Гістограма кількості дисперсоїдів n в первинному сплаві АМг6 в залежності від коефіцієнта форми α_0 .

У залежності від напруження в матриці і коефіцієнта форми частинок дисперсоїди розтріскулися певну кількість разів, але при досягненні фрагментом коефіцієнта форми 3,4 подальше розтріскування не відбувається. Дисперсоїди з початковим коефіцієнтом форми $\alpha_0 < 3,4$ залишаються незруйнованими при максимальній деформації в шийці зразків. Таким чином, коефіцієнт форми характеризує потенційну здатність дисперсоїдів до розтріскування.

Обговорення результатів. Аналіз порожнин, що утворилися внаслідок розтріскуваних на декілька фрагментів включень, показав, що вони мають різні розміри (рис. 1, в, г). Це свідчить про поступове розтріскування включень зі збільшенням деформації зразків. Отже, дисперсоїди під час розтягу руйнуються не одночасно, а поступово розтріскуються на дрібніші фрагменти при збільшенні навантаження.

Отже, сплав АМг6 на мікрорівні можна розглядати як композитний матеріал із в'язкою основою та крихкими включеннями. У цьому випадку дисперсоїдам належить роль перешкод на шляху дислокацій. При критичному значенні густини дислокацій руйнуються крихкі включення і відповідно розсіюється накопичена дислокаційна хмара. Процес розтріскування дисперсоїдів і розсіювання дислокаційної хмари супроводжується відповідним приростом пластичної деформації. У випадку руйнування дисперсоїдів певного розміру в матеріалі відбувається відповідний приріст деформації, що є пропорційним до їхньої кількості. Тому приріст стрибкоподібної деформації пропонується розраховувати наступним чином:

$$\Delta \varepsilon_i = f(\sigma_i) n_i, \quad (1)$$

де $f(\sigma_i)$ – функція, що характеризує зміцнення матеріалу при відповідному напруженні розтягу σ_i ; n_i – відносна кількість дисперсоїдів розміру α_i .

Залежність між величиною стрибкоподібних приростів пластичної деформації та відповідним максимальним напруженням розтягу показана на рис. 3. Видно, що величина приросту пластичної деформації збільшується під час кожного наступного стрибка майже лінійно зі зростанням напружень

у всіх досліджених зразках. Аналітично залежність приросту пластичної деформації від напруження розтягу описується наступним чином:

$$\Delta\varepsilon_i = A\sigma_i + B, \quad (2)$$

де $A = 1,4554 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$; $B = -0,029$.

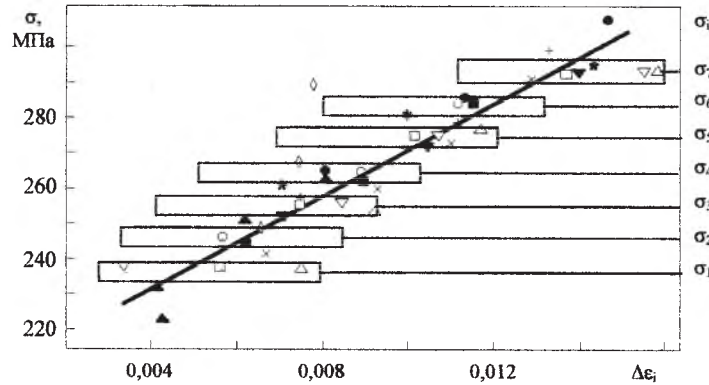


Рис. 3. Залежність величини стрибкоподібних приростів деформації $\Delta\varepsilon_i$ від рівня напружень σ_i при розтязі зразків зі сплаву АМгб. (Точки відповідають результатам випробувань за однакових умов 12 зразків.)

Отже, переважна кількість приростів деформації (до 75%) відбувається при рівнях напружень, які відповідають розтріскуванню дисперсоїдів певного розміру α_i (на рис. 3 виділені прямокутниками області). Залежність напруження розтріскування включень σ_i відповідного розміру α_i від величини напруження розтягу має чітко виражений лінійний характер і може бути представлена у вигляді функції від номера розміру включення:

$$\sigma_i = \sigma_0 + \Delta\sigma(i-1), \quad (3)$$

де $\sigma_0 = 235 \text{ МПа}$; $\Delta\sigma = 10 \text{ МПа}$.

На основі представленої на рис. 2 гістограми і формули (3) побудовано динамічну діаграму коефіцієнтів форми дисперсоїдів і їх фрагментів при розтязі сплаву АМгб у залежності від напружень руйнування дисперсоїдів відповідного розміру (рис. 4) з урахуванням того, що при досягненні фрагментом коефіцієнта форми 3,4 подальше руйнування не відбувається. Припустимо, що спочатку руйнуються дисперсоїди з максимальним коефіцієнтом форми α_1 , що викликає перший стрибок деформації. У результаті цього утворюється у два рази більше дисперсоїдів із коефіцієнтом форми, що у два рази менший, ніж α_1 . Таким чином, у діаграму розподілу дисперсоїдів вноситься поправка на зміну їх кількості. На динамічній діаграмі до напруження 235 МПа кількість дисперсоїдів відповідає гістограмі первинного матеріалу. При більших значеннях напруження розтягу кількість дисперсоїдів подано відносно їх кількості до початку стрибкоподібних приростів деформації з урахуванням утворених внаслідок розтріскування дисперсоїдів фрагментів.

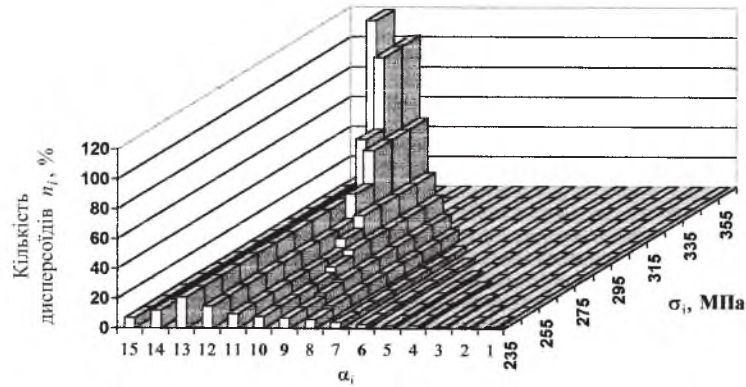


Рис. 4. Розрахункова діаграма фрагментів дисперсоїдів при розтязі сплаву АМг6.

Розрахунок коефіцієнтів форми фрагментів дисперсоїдів проведено з використанням динамічної діаграми, отриманої після розтягу зразків зі сплаву АМг6. Рис. 5 ілюструє порівняльну гістограму коефіцієнтів форми фрагментів дисперсоїдів згідно з проведеним розрахунком та їх кількістю, що визначена експериментально за допомогою електронної мікроскопії. Незначну різницю між розрахунковими та експериментальними даними можна пояснити неоднорідністю протікання пластичної деформації в об'ємі матеріалу.

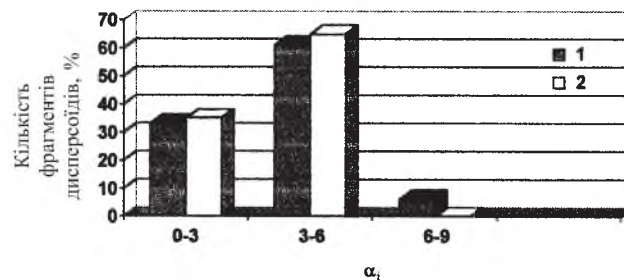


Рис. 5. Гістограма кількості фрагментів дисперсоїдів у залежності від відповідного коефіцієнта форми дисперсоїдів після розтягу зразків зі сплаву АМг6: 1 – експеримент; 2 – розрахунок згідно з моделлю.

Функцію $f(\sigma_i)$, що характеризує зміцнення матеріалу при відповідній величині напруження розтягу σ_i , знаходимо згідно з формулами (1), (2) та апроксимуємо у вигляді лінійної залежності (рис. 6):

$$f(\sigma_i) = C + D\sigma_i, \quad (4)$$

де $C = 1,573$; $D = -4,37 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}$.

Таким чином, приріст деформації $\Delta \varepsilon_i$, зумовлений руйнуванням дисперсоїдів розміру α_i , буде:

$$\Delta \varepsilon_i = (C + D\sigma_i)n_i, \quad (5)$$

де σ_i – напруження розтріскування; n_i – відносна кількість дисперсоїдів.

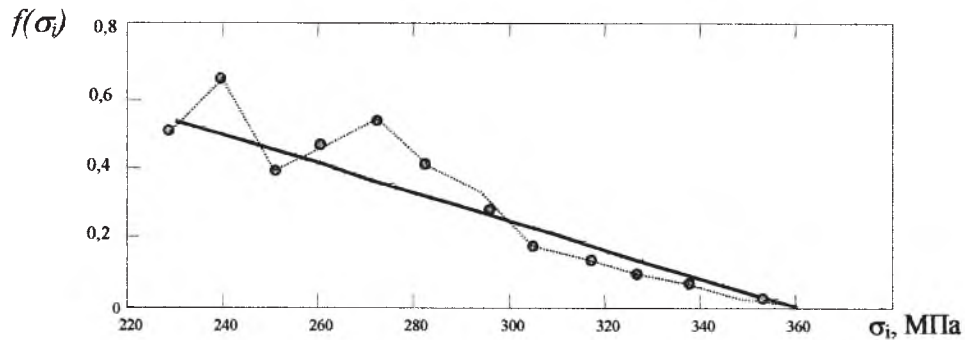


Рис. 6. Функція $f(\sigma_i)$ при відповідній величині напруження розтріскування σ_i ; точки – експеримент; суцільна лінія – апроксимація експериментальної залежності.

Запропонована методика може бути використана для прогнозування стрибкоподібної деформації сплаву АМгб, що має інший первинний стан.

Висновки

1. Запропоновано та обґрунтовано гіпотезу взаємозв'язку стрибкоподібної деформації при статичному розтязі у м'якому режимі навантажування сплаву АМгб з руйнуванням дисперсних включень другої фази. Отримано розрахункову залежність величини стрибкоподібних приростів деформації від розміру і розподілу дисперсних фаз.

2. Розроблено методику прогнозування стрибкоподібних приростів деформації при розтязі у м'якому режимі навантажування сплаву АМгб, що базується на використанні гістограми розподілу дисперсних частинок у первинному матеріалі.

Резюме

Описана и обоснована гипотеза взаимосвязи между скачкообразной деформацией при статическом растяжении в мягком режиме нагружения сплава АМгб и разрушением дисперсных включений второй фазы. Обнаружена зависимость величины скачкообразных приростов деформации от размера дисперсных фаз и распределения их в данном сплаве. Предложена методика прогнозирования скачкообразной деформации сплава на основании гистограммы распределения дисперсных частиц в первичном материале.

1. Стрижало В. А., Воробьев Е. В. Низкотемпературная прерывистая ползучесть упрочняющихся материалов // Пробл. прочности. – 1994. – № 10. – С. 3 – 8.
2. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Структура и механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 472 с.
3. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

4. *Стрижало В. А.* Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. – Киев: Наук. думка, 1978. – 238 с.
5. *Ясній П. В., Гладько В. Б.* Вплив циклічної розтягової складової навантаження на дислокаційну структуру сплаву АМг6 // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 3. – С. 63 – 68.
6. *Картинос Д. М., Тучинский Л. И., Сапожникова А. Б. и др.* Композиционные материалы в технике. – Киев: Техніка, 1985. – 152 с.
7. *Ясній П., Галуцзяк М.* Методика і деякі результати дослідження впливу циклічного навантажування на діаграми деформування сплаву АМг6 // Вісник Тернопіль. держ. техн. ун-ту. – Тернопіль: Тернопіль. держ. техн. ун-т, 1998. – 3, число 4. – С. 62 – 66.

Поступила 18. 10. 2002