

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 621.921

## Закономірності розподілу локальної непружності сплаву Д16Т в умовах статичного розтягу

А. М. Майло

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

*Отримано характеристику розподілу локальної непружності, що описує еволюцію мікроструктурних процесів навантаженого поверхневого шару зразка конструкційного алюмінієвого сплаву Д16Т згідно зі стадіями деформаційного зміцнення і зміною механізму деформування. Стадії деформування при статичному розтязі зіставляються з характеристикою розподілу локальної непружності з метою виявлення зв'язку між зміною механізму деформування і кінетикою локальної непружності при переході від зміцнення до знеміцнення досліджуваного сплаву.*

**Ключові слова:** непружність, діаграма розтягу, пошкоджуваність, зміцнення, знеміцнення, дисперсія, кут зсуву фаз.

**Вступ.** Фізичні процеси, що протікають у матеріалі під дією механічних навантажень, відображаються у повних діаграмах деформування [1]. За характеристику пошкоджуваності полікристалічного матеріалу в умовах статичного деформування може бути прийнята діаграма розтягу. На діаграмі за межею пружності виділяють дві основні стадії пошкоджуваності: зміцнення і знеміцнення [2]. Зміцнення характеризується збільшенням напруження зі зростанням деформації, що можливо за рахунок пластичності полікристалічного матеріалу [3]. Інтенсивність процесу зміцнення зменшується по мірі втрати пластичності матеріалу. Матеріал втрачає здатність зміцнюватися при накопиченні певного рівня залишкової деформації. Подальше навантаження викликає його знеміцнення, внаслідок чого змінюється механізм деформування і утворюється система мікротріщин [4]. Для контролю пошкоджуваності полікристалічного матеріалу в умовах статичного деформування використовується ряд структурно-чутливих параметрів. У роботі [5] за такий параметр прийнято дефект модуля пружності, обґрунтовано також використання коефіцієнта поперечної деформації на стадії знеміцнення [6]. Дефект модуля пружності не дозволяє контролювати пошкоджуваність на стадії знеміцнення пластичного матеріалу (спадна ділянка на діаграмі розтягу), що встановлено за результатами досліджень [5]. У роботі [7] за параметр пошкодження структурно-неоднорідного матеріалу приймається декремент коливань. Процес зміцнення полікристалічного матеріалу описується монотонним зростанням характеристики логарифмічного декремента коливань [7], що дозволяє контролювати його пошкоджуваність.

Мета роботи – виявити закономірності розподілу статистичних характеристик непружності у локальних зонах поверхневого шару досліджуваного матеріалу в умовах статичного деформування.

Аналіз пошкоджуваності полікристалічного матеріалу за характеристиками розподілу вищенаведених параметрів показує, що вона має монотонний характер незалежно від масштабу структурних змін. Монотонність характеристики пошкоджуваності пояснюється тим, що розглянуті залежності інтегрально описують зміну властивостей навантаженого матеріалу, але не дозволяють контролювати стадійність перебудови його структури. Дослідження [8, 9] свідчать, що методи, в яких за параметр пошкодження приймається необоротно розсіяна енергія в полікристалічному матеріалі, є найбільш чутливими до структурних змін. Аналіз експериментальних результатів [8, 9] показує, що найбільш чутливою характеристикою до структурних змін у процесі нелінійного деформування є логарифмічний декремент коливань. Отже, визначення можливостей енергетичних методів, що найбільш структурно-чутливі до зміни механізму деформування, для контролю пошкоджуваності полікристалічного матеріалу є актуальним. Одними із найпоширеніших є методи контролю непружності [10].

Традиційно непружність виражається через параметри, що інтегрально описують стан структури всього навантаженого об'єму досліджуваного матеріалу. Відомо, що полікристалічний матеріал являє собою ієрархічну структуру, реакція якої при деформуванні визначається взаємодією між групами структурних елементів на мікро-, мезо-, макрорівнях. Отже, локалізуючи зону вимірювання параметра непружності (кут зсуву фаз) на поверхні навантаженого зразка, можна контролювати роздільну здатність методу, що дозволить описати зміну механізму деформування відповідно до еволюції пластичних властивостей структури полікристалічного матеріалу. Використання статистичного підходу [11] дозволяє отримати нову характеристику непружності полікристалічного матеріалу [12], за допомогою якої можна контролювати зміну механізму деформування, до якої нечутлива інтегральна характеристика. Локальність методу визначається площею контакту у зоні вимірювання кута зсуву фаз  $\varphi$  і складає декілька розмірів структурних елементів (зерна) полікристалічного матеріалу, тоді як традиційна характеристика, що виражається аналогічним параметром, інтегрально характеризує непружність навантаженого об'єму зразка досліджуваного матеріалу.

Відомо, що для полікристалічного матеріалу характерна неоднорідність структури. Отже, вимірний у локальних зонах на поверхні зразка кут зсуву фаз має стохастичний характер. Поточному стану механічних властивостей полікристалічного матеріалу відповідає миттєве значення структурного стану, що виражається через статистичні характеристики локальних властивостей матеріалу. Схема реалізації запропонованого методу дозволяє отримувати і обробляти великий обсяг вибірки контрольованого параметра. За допомогою методів математичної статистики можна контролювати їх достовірність.

**Методика дослідження.** Об'єктом дослідження служили лабораторні зразки з циліндричною робочою частиною зі сплаву Д16Т. Досліджуваний матеріал мав наступні механічні характеристики:  $\sigma_{0,2} = 442$  МПа;  $\sigma_b = 582$  МПа;  $E = 7,41 \cdot 10^4$  МПа;  $\delta = 10\%$ ;  $\psi = 30\%$ . Зразки піддавали одновісному розтягу

за стандартною методикою на випробувальній машині Instron 8802, метрологічні характеристики якої відповідають вимогам ASTM E8. Навантаження проводили ступенево таким чином, щоб залишкова деформація після кожної ступені складала  $1,00 \pm 0,08\%$ . Задану схему навантаження (рис. 1) реалізували за допомогою такого підходу: будували початкову ділянку діаграми розтягу, з якої визначали деформацію, що відповідає границі пружності ( $\sigma_{0,05} = 435$  МПа) [13]. За результатами випробувань двох зразків вона склала 0,65 і 0,55%. Деформацію наступної ступені навантаження розраховували за формулою

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{пр}} + \varepsilon_{\text{пл}}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  – загальна деформація;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – пружна деформація;  $\varepsilon_{\text{пл}}$  – пластична деформація.

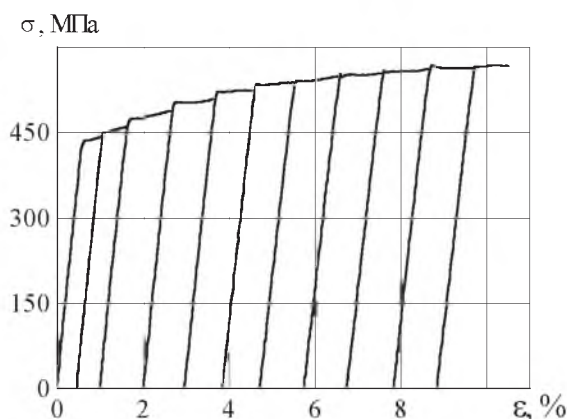


Рис. 1. Схема навантаження зразків сплаву Д16Т.

Такий підхід дозволяє ступенево навантажувати зразок до рівня залишкової деформації, що визначений для даної ступені. Зразки навантажували до руйнування. Після кожної ступені навантаження вимірювали розподіл кута зсуву фаз (далі – контрольований параметр) [14, 15] у фіксованому перерізі робочої частини на циліндричній поверхні зразка. Статистично обгрунтовану вибірку контрольованого параметра забезпечували за допомогою використання ПЕОМ на етапах автоматизації вимірювальної системи та обробки експериментальних даних, що дозволяло проводити аналіз великого обсягу вибірки.

Експериментальні дані усереднювали за результатами чотирьох ідентичних вимірювань у контрольованій зоні після кожної ступені навантаження. Обсяг вибірки виміру склав 15000 значень контрольованого параметра, що з урахуванням дискретизації у часі виміру (фактичний обсяг вибірки, за яким усереднювали результати вимірювань) дорівнював  $3 \cdot 10^4$  дискретних значень контрольованого параметра. За теоремою Бернуллі [16], якщо обсяг вибірки контрольованого процесу прямує до нескінченності, то ймовірність контрольованої величини прямує до одиниці. Середнє значення контрольованої величини виражається через математичне очікування, а за характеристику гомогенності матеріалу приймається дисперсія. Для механічних випробувань

припускається достатньою точність вимірювань, якщо відхилення від середнього значення не перевищує  $\pm 2$  значення середньоквадратичного відхилення, що відповідає 95%-ній ймовірності, яку реалізовано в даному експерименті. Математичне очікування дискретної випадкової величини характеризує положення центру її розкиду. Для емпіричного розподілу математичне очікування визначали як середнє арифметичне, зважене по частоті значень випадкової величини, що визначається за формулою

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i x_i n_i, \quad (2)$$

де  $\bar{x}$  – зважене середнє арифметичне;  $x_i$  – можливі значення випадкової дискретної величини;  $n_i$  – частість у  $i$ -у інтервалі;  $n$  – число спостережень вибірки.

Для випадкової дискретної величини недостатньо вказати центр її групування (зважене середнє значення), потрібно знати ще хоча б розкид її значень. За кількісну характеристику розкиду випадкової величини приймається дисперсія. Для емпіричного розподілу випадкової дискретної величини дисперсія визначається за формулою

$$d = \frac{1}{n} \sum_i (x_i - \bar{x})^2 n_i, \quad (3)$$

де  $d$  – дисперсія.

Локальність вимірювання контрольованого параметра характеризується відношенням діаметра зони взаємодії датчика вимірювальної системи до довжини обводу перерізу робочої частини зразка, що в даному випадку складає близько 0,002 мкм/мкм, тобто локальність одного виміру сумірна з розміром структурного елемента (зерна) досліджуваного матеріалу.

**Результати досліджень та їх аналіз.** Результати експериментальних досліджень представлено у вигляді характеристик розподілу дисперсії контрольованого параметра в залежності від рівня залишкової деформації (на рис. 2 крива 2) у діапазоні 0...12%. У таблиці наведено обсяг вибірки контрольованого параметра для кожного експериментального значення (точка у вигляді кола) характеристики розподілу дисперсії кута зсуву фаз. Результати усереднювали за даними чотирьох вибірок ідентичних вимірювань.

Характеристика дисперсії змінюється немонотонно у діапазоні деформування сплаву. На початкових етапах (до  $\varepsilon = 6\%$ ) відбувається (рис. 2) її монотонне зростання. На діаграмі розтягу у діапазоні пластичного деформування зі збільшенням зусилля навантаження вона зростає, що відповідає стадії зміцнення полікристалічного матеріалу. По мірі втрати пластичності матеріалу інтенсивність процесу зміцнення уповільнюється. Перехід від стадії зміцнення до стадії знеміцнення характеризується локалізацією пошкоджуваності за механізмом [17], що призводить до зародження макротріщини. Подальше навантаження пов'язане зі знеміцненням матеріалу, що не відображено на отриманій діаграмі 1 (рис. 2), оскільки побудова ділянки діаграми розтягу на стадії знеміцнення для такого малопластичного матеріалу, як Д16Т,

Результати вимірювання нормованих значень параметра  $\varphi$  (град)

№ вибірки	№ виміру								
	1	2	3	4	...	437	438	439	440
1	0,74	0,74	0,84	0,87	...	0,77	0,78	0,86	0,78
2	0,89	0,82	0,80	0,86	...	0,81	0,85	0,78	0,84
3	0,86	0,90	0,88	0,90	...	0,94	0,93	0,90	0,78
4	0,96	0,90	0,97	1,00	...	0,99	0,94	0,97	0,99
Крок виміру, мкм	0	50	100	150	...	$21,80 \cdot 10^3$	$21,85 \cdot 10^3$	$21,90 \cdot 10^3$	$21,95 \cdot 10^3$

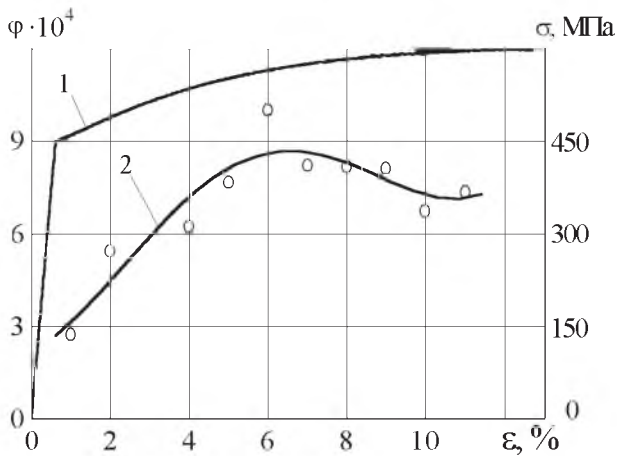


Рис. 2. Діаграма розтягу сплаву Д16Т (1) та характеристика розподілу локальної непружності в діапазоні його деформування (2).

вимагає використання відповідної методики [17]. Границя міцності матеріалу  $\sigma_B$  є тією характеристикою, що відповідає переходу матеріалу від стадії зміцнення до стадії знеміцнення на діаграмі розтягу. Для досліджуваного матеріалу границі міцності відповідає рівень залишкової деформації близько  $\epsilon_{пл} = 12\%$  (на рис. 2 крива 1). Зростання характеристики дисперсії контрольованого параметра триває до рівня  $\epsilon_{пл} = 6\%$ , що можна пояснити зміцненням матеріалу. Перехід від стадії зміцнення до стадії знеміцнення характеризується її спадом. Отже, такий перехід визначається екстремумом (максимумом характеристики) дисперсії контрольованого параметра. Аналіз характеристики розподілу 2 (рис. 2) показує, що її перегин відбувається при рівні залишкової деформації 6%, тоді як на діаграмі розтягу 1 (рис. 2) за такого рівня деформації відсутній екстремум  $\sigma = f(\epsilon)$ .

Аналогічні результати отримано при зіставленні сигналів акустичної емісії з діаграмою розтягу [18] для алюмінієвого сплаву АМг6, механічні властивості якого близькі до сплаву Д16Т (рис. 3). Показано, що при монотонному рості діаграми розтягу у діапазоні деформації 6...8% має місце максимум на амплітудній характеристиці сигналів акустичної емісії.

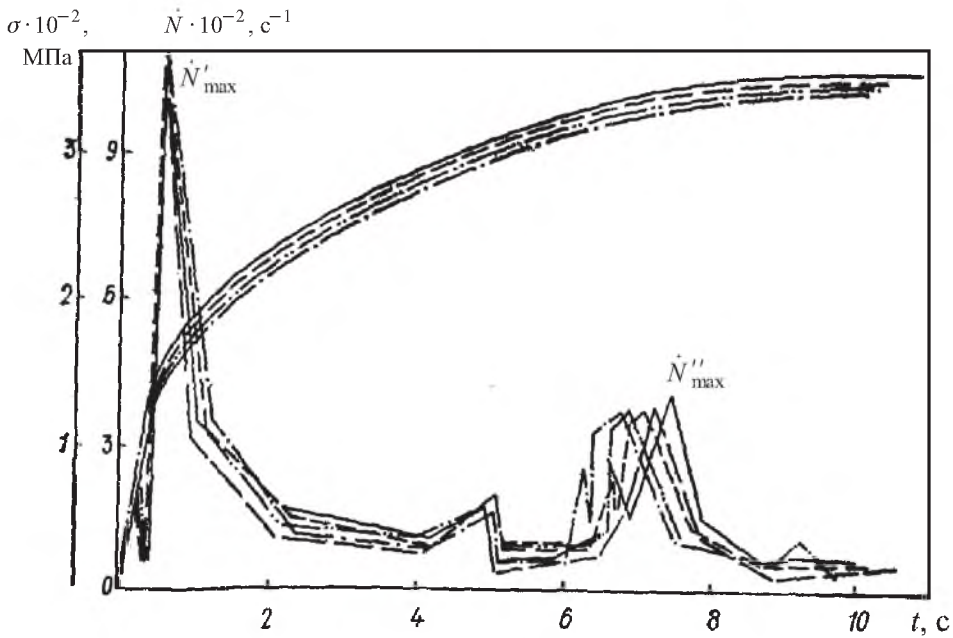


Рис. 3. Зіставлення діаграми сигналів акустичної емісії з діаграмою розтягу алюмінієвого сплаву [18].

Проведені в роботі дослідження свідчать [4], що на стадії деформаційного зміцнення при рівні залишкової деформації 7...9% від кінця полицки плинності відбувається інтенсивне звуоутворення в тілі зерна. Структурні дослідження [19] показують, що на початковій стадії знеміцнення (спадна ділянка діаграми розтягу) полікристалічний матеріал характеризується зародженням макроскопічних смуг ковзання. Періоду зародження смуг повинна передувати стадія інкубаційного накопичення пошкодження [20], тобто зміни механізму деформування матеріалу передує активізація механізму мікропластичного деформування, що розпочинається раніше, ніж це можна виявити з діаграми розтягу. Отже, діаграма розтягу у традиційній постановці експерименту не в повній мірі відображає кінетику еволюції структури полікристалічного матеріалу, а лише інтегрально характеризує механізм деформування. Максимум на характеристиці дисперсії контрольованого параметра, що має місце при рівні залишкової деформації  $\varepsilon_{\text{пл}} = 6\%$ , можна пояснити більшою чутливістю цього параметра до структурних перетворень полікристалічного матеріалу. Вищезазначені властивості контрольованого параметра дозволяють визначити пошкоджуваність полікристалічного матеріалу на ранніх стадіях пластичного деформування.

## Висновки

1. Пошкоджуваність матеріалу зразків сплаву Д16Т при розтязі описується немонотонною залежністю розподілу локальної непружності.
2. Положення максимуму характеристики (дисперсія =  $f(\varepsilon)$ ) дозволяє контролювати зміну механізму деформування.



3. Максимум характеристики розподілу локальної непружності  $f(\varepsilon)$  відповідає залишковій деформації  $\varepsilon_{III} = 6\%$  і може бути представлений як параметр пошкоджуваності матеріалу Д16Т при пластичному деформуванні (розтяг).

4. Положення окремих точок характеристики локальної непружності може враховуватися критеріями пошкоджуваності на певних стадіях процесу деформування при розтязі.

## Резюме

Получена характеристика распределения локальной неупругости, которая описывает развитие микроструктурных процессов нагруженного поверхностного слоя образца конструкционного алюминиевого сплава Д16Т в соответствии со стадиями деформационного упрочнения и изменения механизма деформирования. Стадии деформирования при статическом растяжении сопоставляются с полученной характеристикой распределения локальной неупругости с целью обнаружения связи между изменением механизма деформирования и кинетикой локальной неупругости в момент перехода от упрочнения к разупрочнению исследуемого сплава.

1. Лебедев А. А., Марусий О. И., Чаусов Н. Г., Зайцева Л. В. Исследование кинетики разрушения пластичных материалов на заключительной стадии деформирования // Пробл. прочности. – 1982. – № 1. – С. 12 – 18.
2. *Сопrotивление* материалов деформированию и разрушению. Ч. 1. – Киев: Наук. думка, 1993. – 288 с.
3. Барыкин Н. П., Валева А. Х., Валеев И. Ш. Влияние реологических параметров поверхностного слоя структурно-неоднородных заготовок на силовые и деформационные характеристики при пластической деформации // Пробл. прочности. – 2008. – № 4. – С. 123 – 131.
4. Одинг И. Л., Либеров Ю. П. Накопление дефектов и образование субмикротрещин при статическом растяжении армко-железа // Изв. АН СССР. Отд.-ние техн. наук. Металлургия и горное дело. – 1964. – № 1. – С. 113 – 119.
5. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Евецкий Ю. Л. Определение параметров поврежденности пластичных материалов на стадии разупрочнения // Пробл. прочности. – 1989. – № 9. – С. 14 – 18.
6. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Богинич И. О. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом нагружении // Там же. – 1995. – № 7. – С. 31 – 40.
7. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Богинич И. О., Недосека С. А. Комплексная оценка поврежденности материала при пластическом деформировании // Там же. – 1996. – № 5. – С. 23 – 30.
8. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Справочник. – Киев: Наук. думка, 1971. – 376 с.

9. Троценко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 344 с.
10. Троценко В. Т. Усталость и неупругость металлов. – Киев: Наук. думка, 1971. – 268 с.
11. Писаренко Г. Г., Войналович А. В., Копчевский П. М., Майло А. Н. Исследование распределения локальной неупругости в конструкционных материалах, испытанных в широком диапазоне частот нагружения: Тр. I Междунар. конф. “Деформация и разрушение материалов”. – М.: ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН, 2006. – С. 20 – 21.
12. Писаренко Г. Г., Майло А. Н., Войналович А. В. Дискретные явления неупругости при усталости металлических материалов: Тр. II Междунар. конф. “Деформация и разрушение материалов и наноматериалов”. – М.: ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН, 2007. – С. 38 – 40.
13. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Измен. 01.11.90.
14. Писаренко Г. Г., Войналович О. В., Голованов Ю. М., Василюк І. М. Пошкоджувальність та структурна неоднорідність титанового сплаву ВТ14 при циклічному навантажуванні // Пробл. прочности. – 2003. – № 6. – С. 75 – 84.
15. Писаренко Г. Г., Войналович А. В., Голованов Ю. М., Василюк І. М. Исследование закономерностей изменения стохастических свойств титановых сплавов при циклическом нагружении // Там же. – 2001. – № 3. – С. 80 – 87.
16. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятности и математической статистики. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
17. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Марусий О. И. и др. Кинетика разрушения листового пластичного материала на заключительной стадии деформирования // Пробл. прочности. – 1988. – № 12. – С. 18 – 25.
18. Стрижало В. А., Добровольский Ю. В., Стрельченко В. А. и др. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1990. – 232 с.
19. Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Лебедев А. А. Кинетика разрушения аустенитной стали на заключительной стадии деформирования // Пробл. прочности. – 1989. – № 3. – С. 16 – 21.
20. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.

Поступила 24. 09. 2008