

ОЦІНКА ПОШКОДЖЕНОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ТЕНЗОМЕТРІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНОГО АНАЛІЗУ СТАНУ ПОВЕРХНЕВОГО ДЕФОРМАЦІЙНОГО РЕЛЬЄФУ

П. О. МАРУЩАК¹, І. В. КОНОВАЛЕНКО¹, М. Г. ЧАУСОВ²,
Р. Т. БИЩАК³, А. П. ПИЛИПЕНКО²

¹ Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя;

² Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ;

³ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Виявлено фізико-механічні закономірності накопичення поверхневих дефектів під час комп'ютерного аналізу фотозображень поверхні деформованого зразка. Одержано основні закономірності пороутворення у сплаві Д16чт за методом тензометрії. Встановлено фізико-механічний зв'язок між деформацією розпушування та накопиченням пошкод на поверхні матеріалу.

Ключові слова: *деградація, пошкодженість, діагностування, оптично-цифровий контроль.*

Відомо, що поверхневі шари металів найчутливіші до деформаційного впливу, що створює передумови їх використання для діагностування накопичення розпорошених пошкод. Запропоновано [1] низку підходів аналізу зображень поверхні із дефектами різної фізико-механічної природи. Обґрунтовано методичні аспекти ідентифікації розпорошених та локалізованих дефектів, зокрема, й на зображеннях з великою кількістю завад [1, 2]. На їх основі проаналізовано методологію визначення стану літаків транспортної авіації за параметрами деформаційного рельєфу поверхні конструктивних елементів та зразків-свідків [2]. Додопрацьовано та поглиблено теоретичні аспекти самоорганізації поверхні сенсора втомив під час довготривалого напрацювання, обґрунтовано технологічні підходи його закріплення на поверхні [1, 2].

Для оцінювання накопичень внутрішніх мікрodefektів у матеріалі застосовують метод повних діаграм [3], який дає інформацію про кінетику пошкодженості матеріалу не лише на наростальній, але й на спадній ділянках діаграми статичного розтягу.

Відомі два принципи оцінювання технічного стану матеріалів і конструкцій: на основі закладеного проектного ресурсу або фактичного напрацювання [1–3]. Оцінка роботоздатності в межах призначеного ресурсу заснована на принципі гарантованої безпечності, а за фактичним станом – лише на аналізі допустимих пошкод і прогнозуванні “безпечної” тривалості функціонування [1]. Проте прогнозувати зародження та кінетику поширення втомних тріщин важливо за обома підходами. Поєднуючи переваги методів оптико-цифрового контролю та повних діаграм, вдається встановити взаємозв'язок між внутрішньою та поверхневою розпорошеною пошкодженістю [4].

Мета цього дослідження – вивчити взаємозв'язок між параметрами поверхневої та внутрішньої пошкодженості алюмінієвого сплаву Д16чт.

Методика. Вибір алюмінієвого сплаву Д16чт зумовлений необхідністю дослідити кінетику накопичення пошкод в авіаційному матеріалі за статичного розтягу. Це важливо, оскільки сплав можна використовувати як сенсор накопичення втоми літальних апаратів. Він схильний до поверхневих хвильових процесів упродовж пластичного деформування, тому можна чітко фіксувати пошкодженість діагностованого об'єкта. Досліджували плоскі зразки з розмірами робочої частини 10×50 mm і товщиною 5 mm. Їх випробовували на модернізованій гідравлічній установці ZD-100Pu, в якій реалізовано принцип регульованої жорсткості навантажувальної системи під час експериментів. Крім того, вона обладнана комп'ютеризованою вимірювальною системою для обробки результатів і спеціальним пристроєм, що дає можливість реалізувати раптові зміни навантаження. Під час випробувань за допомогою тензодавачів фіксували поперечне і поздовжнє звуження зразка. Поверхню зразка фотографували фотоапаратом Canon D550, використовуючи оптичний мікроскоп МБС-10.

Повну деформацію обчислювали так [3]:

$$\varepsilon = \varepsilon_l + \varepsilon_p, \quad (1)$$

де ε_l – деформація розпушування; ε_p – пластична деформація.

Кінетику накопичення розсіяних пошкод визначали за деформацією розпушування [3]:

$$\varepsilon_l = (1 - 2\mu(\varepsilon)) \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

де $\mu(\varepsilon)$ – коефіцієнт поперечної деформації, який вимірюють у будь-який момент часу; ε – відносна деформація;

$$\mu = -\varepsilon^t / \varepsilon, \quad (3)$$

тут ε^t – поперечна деформація.

Результати деформування. Криві статичного розтягу зразків до різних значень повної деформації одержали методом тензометрії (рис. 1а).

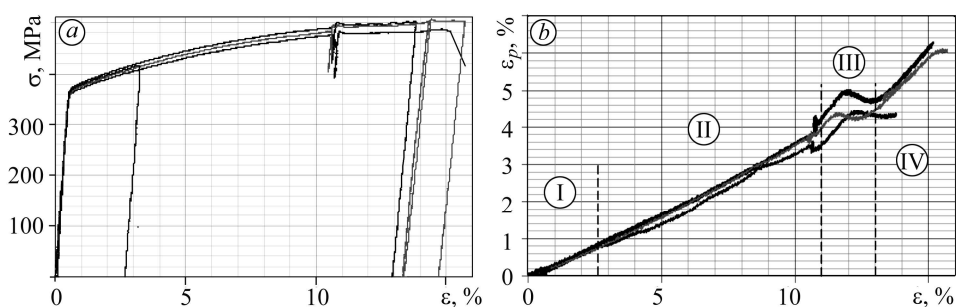


Рис. 1. Криві статичного деформування сплаву Д16чт (а) та залежність деформації розпушування від повної деформації зразка (б); I–IV – ділянки пошкодженості.

Fig. 1. Curves of static deformation of Д16чт alloy (а) and dependence of deformation and loosening on total deformation of specimens (б); I–IV – damaged areas.

Для оцінювання кінетики розсіяних пошкод на різних стадіях деформування використали модель їх накопичення у металевих матеріалах за статичного навантаження, розроблену в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, в якій за основний параметр стану матеріалу прийнято коефіцієнт поперечної деформації, якому відповідає деформація розпушування [3].

Виявили взаємозв'язок між значенням повної деформації (ϵ) та деформації розпушування (ϵ_l) і уточнили кінетику накопичення розпорошених дефектів у матеріалі (рис. 1b). Залежність $\epsilon - \epsilon_l$ практично лінійна до деформації $\epsilon = 11\%$, що свідчить про “однорідність” накопичення дефектів у матеріалі, а отже, збільшення відносного видовження зразків. Проте, якщо $\epsilon < 11\%$, на графіку присутні хвилеподібні коливання з амплітудою 2...3%, які вказують на об'єднання дефектів із утворенням мікропор. Отже, дисипативна структура утворюється переважно на кінцевому етапі такого специфічного коливання значень ϵ_l . Виявили, що на цій ділянці змінюється густина матеріалу (накопичуються структурні дефекти). Таким чином, ступінь розпушення матеріалу через суттєву зміну його структури порівняно з розтягом за менших деформацій [4, 5] зростає. Ці особливості деформування алюмінієвого сплаву можна пояснити результатами оцінки накопиченої поточної пошкодженості (див. таблицю).

Залежність деформацій $\epsilon - \epsilon_l$ у точках розвантаження повної діаграми для сплаву Д16чт

Деформація	Значення, %			
	Поздовжня ϵ	2,6	13,0	14,6
Розпушування ϵ_l	0,8	4,8	5,6	6,2

Для оцінювання стану поверхні за її фотозображенням використовували алгоритм [5, 6], який має такі стадії: вирівнювання освітленості; бінарне перетворення та обчислення площі поверхневих утворень. Довели, що пластична деформація сплаву зосереджена у локальних зонах, які вкривають поверхню системою суміжних смуг локалізованого деформування. Причиною їх утворення є структурна неоднорідність матеріалу, насамперед – внутрішні межі між зернами та їх конгломератами [7].

Автоматизований аналіз пошкод поверхні. Існує зв'язок між структурними параметрами матеріалу та відгуком його поверхневих шарів на деформаційний вплив [4, 5]. Це є фізичною передумовою оцінювання механічної поведінки матеріалів та інтерпретації фізичних механізмів деформування. При цьому параметри поверхневого деформаційного рельєфу є джерелом інформації про стан всього матеріалу. Зважаючи на це, актуально виявити основні закономірності зміни кінетики деформаційних процесів і заздалегідь оцінити взаємозв'язок структурного стану сплаву та накопичених на поверхні деформаційних пошкод. Припускали, що основним актом пластичного течіння поверхні металів є механізм “зсув + поворот” [5], який спричиняє дисипативні мезоструктури і пластичні зсуви.

Отже, передумовою для досліджень, спрямованих на встановлення зв'язку між параметрами деформації розпушування, яка характеризує накопичення пошкод матеріалу, і площею поверхневих пошкод, є припущення про їх взаємну кореляцію. Основна причина деградації поверхні матеріалу – високі внутрішні напруження, що розвиваються в тонких приповерхневих шарах під час пластичного деформування [2, 8]. Запропоновано алгоритм оцінювання пошкодженості поверхні пластично деформованого матеріалу, де вона є функцією накопичених пластичних зсувів, а параметр її оцінювання – площа поверхневих дефектів (F).

На початковому зображенні поверхні (рис. 2a–e) через неоднакову освітленість різних зон картина розподілу поверхневих утворень спотворена. Щоб усунути цей недолік, вирівнювали освітленість. Для цього виконали згортку зобра-

ження з низькочастотним фільтром і позбувалися низькочастотного складника з початкового зображення.

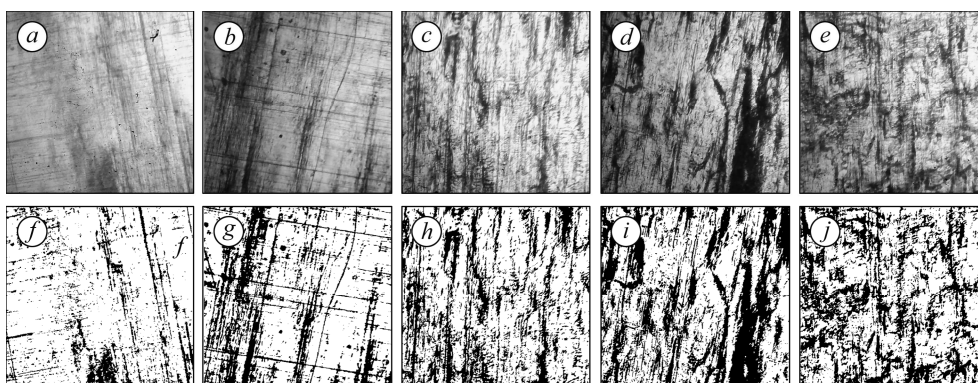


Рис. 2. Початкові зображення дослідженої поверхні у точках розвантаження повної діаграми (див. рис. 1а) (а–е) та зображення, які ілюструють результат кластеризації (f–j) (білі пікселі – фон, чорні – деформаційний рельєф).

Fig. 2. Original images of the investigated surface of the discharge points of full diagram (see Fig. 1a) (a–e) and images that illustrate the results of clustering (f–j) (white pixels – background, black – deformation relief).

Щоб отримати наближене зображення освітленості $I'(x, y)$, використали гаусовий фільтр з великим розміром ядра. Зображення з вирівняною освітленістю [6, 8]

$$I_L(x, y) = K_L \cdot \frac{I_0(x, y)}{I'(x, y)}, \quad (4)$$

де I_0 – початкове зображення; x – індекс стовпчика, $x \in (1..m)$; y – індекс рядка зображення I_0 , $y \in (1..n)$; $K_L = \max(I'(x, y))$ – коефіцієнт вирівнювання освітленості. Наступний крок алгоритму – бінарне перетворення – призначений для попереднього розподілу зображення на два кластери: фон та шукані об'єкти.

Кожну точку бінарного зображення I_B отримували, виходячи з умови

$$I_B(j, i) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } I_0(j, i) < B_{\min}, \\ 0, & \text{якщо } I_0(j, i) \geq B_{\min}, \end{cases} \quad (5)$$

де B_{\min} – граничне значення бінарного перетворення. На зображенні I_B фону відповідають білі пікселі, а розпізнаним поверхневим утворенням – чорні (рис. 2f–j).

Як інтегральний параметр для оцінювання стану дослідженої поверхні використовували коефіцієнт пошкодження поверхні:

$$F = \frac{N_b}{N} \cdot 100\% = \frac{N_b}{m \cdot n} \cdot 100\%, \quad (6)$$

де N_b – кількість пікселів зображення, які належать кластеру розпізнаних об'єктів; N – загальна їх кількість.

У підходах фізичної мезомеханіки поверхневий шар розглядають як самостійну ділянку матеріалу, яка відіграє важливу роль у механічній поведінці деформованого твердого тіла [5]. Через ослаблені міжмолекулярні зв'язки [5, 6] найдефектніша структура формується у поверхневих шарах. Отже, зсувна тривкість поверхневого шару нижча, ніж внутрішніх, і тому пластичне деформування тут інтенсивніше. Деформування сплаву Д16чт розглядали як процес, що відбу-

вається у двошаровій системі поверхневий шар—об’єм матеріалу. Граничний стан матеріалу досягається за умови насичення поверхні деформаційними утвореннями [2, 9, 10]. За результатами автоматизованого аналізу зображень поверхні деформованих зразків можна зіставити кінетику накопичення пошкод із відносною деформацією зразка (рис. 3).

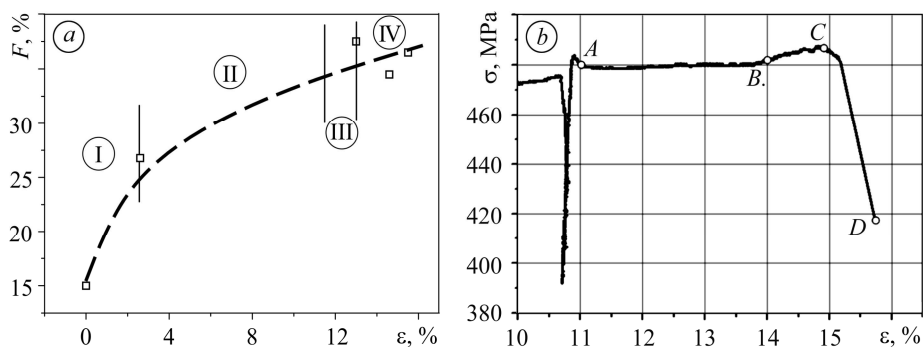


Рис. 3. Залежність площі поверхневого рельєфу від відносної деформації (а) та деформаційний процес на ділянках III і IV (b).

Fig. 3. Dependence of the area of the surface topography on the relative deformation value (a) and deformation processes in areas III and IV (b).

З метою поглибленого вивчення поведінки матеріалу у стані передруйнування аналізували деформаційні процеси у внутрішніх його шарах (рис. 3b). Тут ділянка кривої деформування локально спадає, якщо $\epsilon = 11\%$ (точка A) та зростають напруження (точка B), що свідчить про зміни мікромеханізмів руйнування та високу чутливість матеріалу до цих процесів (рис. 3b). Шийкоутворення (точка C) та вихід фронту руйнування на бічну поверхню зразка (точка D) відбулися за низькоенергоємним методом “швидкого зсуву”, що підтверджує геометрія спадної ділянки діаграми (рис. 3b). Внаслідок значної жорсткості системи навантажування [3] зафіксували коливання деформаційного процесу у матеріалі на стадії передруйнування. Отже, у матеріалі завершується злиття розпорощених дефектів у макротріщину. Такі ж “коливні” процеси виявили і на поверхні зразків, що свідчить про подібну еволюція стану поверхні, її адаптацію до зовнішнього впливу та самоорганізацію її мікроструктурних складників [5, 9–11]. Деформування спричинило об’єднання дрібних мікропошкоджень, зростання їх розмірів та утворення макродефектів [8, 9]. Одержані результати добре узгоджуються із відомими [5], де довели, що зерна поблизу поверхні слабше опираються зсувним процесам, ніж у об’ємі матеріалу, а зі збільшенням пластичної деформації зростає нелінійність цього процесу.

ВИСНОВКИ

Виявлено основні закономірності накопичення внутрішніх та поверхневих пошкод у алюмінієвому сплаві Д16чт за сумісного використання методу тензометрії та комп’ютерного аналізу зображень деформованої поверхні. Розвинуто підхід оптично-цифрового діагностування дефектності матеріалів, сформульовано низку вимог до його інформативності та кількісного опису. Встановлено кореляційний зв’язок між деформаційними характеристиками матеріалу, одержаними методом тензометрії, та площею поверхневих пошкод.

РЕЗЮМЕ. Проанализированы особенности использования поверхности в качестве сенсора поврежденности сплава Д16чт при значительных пластических деформациях. Выявлены физико-механические закономерности пространственной самоорганизации

структурно-механических поверхностных дефектов и установлена их связь с порообразованием и деформационными процессами во внутренних слоях материала.

SUMMARY. The typical features of the use of surface as a damage sensor of Д16чт alloy at large plastic deformations are analyzed. Physico-mechanical regularities of spatial self-organization of structural and mechanical surface defects and their connection with the pore formation and deformation processes in the inner layers of the material are identified.

1. *Карускевич М. В.* Методологія визначення відпрацювання ресурсу літальних апаратів за параметрами деформаційного рельєфу поверхні конструктивних елементів та зразків-свідків: Автореф. ... д-ра техн. наук. – К.: Нац. авіац. ун-т, 2012. – 40 с.
2. *Игнатович С. Р., Карускевич М. В.* Мониторинг выработки усталостного ресурса летательных аппаратов. – К.: Нац. авіац. ун-т, 2014. – 260 с.
3. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. – К.: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2004. – 134 с.
4. *Strain field evolution on the surface of aluminum sheet alloys exposed to specific impact with oscillation loading / M.G. Chausov, V.B. Berezin, A.P. Pylypenko, V.B. Hutsaylyuk // J. Strain Anal. Eng. Des. – 2015. – 50 (1). – P. 61–72.*
5. *Romanova V. A., Balokhonov R. R., and Emelyanova O. S.* On the role of internal interfaces in the development of mesoscale surface roughness in loaded materials // *Physical Mesomechanics.* – 2011. – 14. – P. 159–166.
6. *Коноваленко І. В., Маруцак П. О.* Алгоритм з самоналаштуванням для розпізнавання на зображенні каркасу сітки пошкоджень поверхні // *Матеріали XIII Міжнар. конф. “Контроль і управління в складних системах” (3–6 жовт.). – Вінниця: ВНТУ, 2016. – С. 66–68.*
7. *Комп’ютерний аналіз характерних елементів фрактографічних зображень / Р. Я. Косаревич, О. З. Студент, Л. М. Свірська, Б. П. Русин, Г. М. Никифорчин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 4. – С. 53–60.*
(*Computer analysis of characteristic elements of fractographic images / R. Ya. Kosarevych, O. Z. Student, L. M. Svirs’ka, B. P. Rusyn, H. M. Nykyforchyn // Materials Science. – 2013. – 48, № 4. – P. 474–481.*)
8. *Ясній П. В., Маруцак П. О.* Ролики МБЛЗ: Деградація і тріщиностійкість матеріалів. – Тернопіль: Джура, 2009. – 232 с.
9. *Маруцак П. О., Біцак Р. Т., Баран Д. Я.* Розпорошена та локалізована пошкодженості теплостійких сталей. – Тернопіль: Лібра Терра, 2016. – 228 с.
10. *Маруцак П. О., Біцак Р. Т.* Тріщиностійкість матеріалів і конструкцій: біметалеві ролики машин безперервного лиття заготовок. – Тернопіль: Лібра Терра, 2016. – 172 с.
11. *Software tools for the analysis of the self-organizing material surface after deformation for the problems of its segmentation and statistical processing / I. V. Lytvynenko, P. O. Maruschak, S. A. Lupenko, Yu. I. Hats, A. Menou // Proc. of the VIth Int. Symp. “Aircraft Materials” (May 11–13), Agadir, Morocco. – 2016. – P. 138–139.*

Одержано 03.07.2014