Самоорганізація структури листового алюмінієвого сплаву при динамічних незрівноважених процесах/ М. Чаусов, О. Засимчук, К. Порохнюк, В. Березін // Вісник ТДТУ. — 2009. — Том 14. — № 4. — С. 67-73. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 620.171:539.374

М. Чаусов, докт. техн. наук; О. Засимчук, докт. фіз.-мат. наук; К. Порохнюк, В. Березін

Національний університет біоресурсів і природокористування України

САМООРГАНІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ЛИСТОВОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ ПРИ ДИНАМІЧНИХ НЕЗРІВНОВАЖЕНИХ ПРОЦЕСАХ

Резюме. *Виявлено особливості деформування листового алюмінієвого сплаву при динамічних незрівноважених процесах. З використанням монокристального сенсора і розробленої методики оцінювання деформованого стану матеріалу на плоских зразках із застосуванням швидкісної фотозйомки отримано додаткову інформацію про утворення дисипативних, менш щільних, структур під час динамічних незрівноважених процесів.*

Ключові слова: *листовий алюмінієвий сплав, динамічні незрівноважені процеси, монокристальний сенсор, дисипативні структури.*

M.Chausov, E. Zasimchuk, K. Porokhniuk, V.Berezin

THE STRUCTURE SELF-ORGANIZATION OF SHEET ALUMINIUM ALLOY WHILE DYNAMICAL UNBALANCED PROCESS

The summary. *There are shown peculiarities of the deformation of aluminum alloy sheet in dynamic unbalanced processes. Additional information about forming of dissipation structures, which are less dense, was obtained using a monocystal sensor and optical strain field measurement method.*

Key words: *deformation, of aluminum alloy sheet, dynamic unbalanced processes, dissipation structures, a monocystal sensor.*

Вступ. У фундаментальних дослідженнях брюссельської наукової школи на чолі з І. Пригожиним уперше показано, що в умовах нелінійної динаміки в усіх фізико-хімічних системах проходить процес самоорганізації структури, при якому в умовах значного відхилення від рівноваги проявляються нові фундаментальні властивості речовини [1…3]. Тому цікаво як з фундаментальної, так і з практичної точки зору дослідити механічну поведінку матеріалів при динамічних незрівноважених процесах, пов'язаних із різким обміном енергії між механічною системою і зовнішнім середовищем, а саме, коли при значному поглинанні енергії матеріалом за дуже короткий проміжок часу можна спостерігати нестійкість раніше утвореної субструктури з подальшою її самоорганізацією у вигляді структури, що якісно відрізняється від початкової, з новими механічними властивостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На жаль, робіт з даного напрямку механіки практично не проводили. Це пов'язано з тим, що донині практично не було експериментальних методик механічних випробувань, які б давали можливість реалізовувати й регулювати початковими умовами енергетичний обмін у замкненій системі і досліджувати механічну поведінку матеріалів в умовах хаотичної динаміки.

Таку методику вперше розроблено на кафедрі опору матеріалів Національного університету біоресурсів і природокористування України [4, 5].

Вказаний ефект досягаєють за рахунок реалізації складного режиму навантаження і деяких конструктивних особливостей механічної навантажувальної системи [5, 6].

Метою досліджень є отримання додаткової інформації про механічну і структурну поведінку матеріалів при динамічних незрівноважених процесах.

Дослідження, виконані на зразках армко-заліза, сталей різних класів, алюмінієвого сплаву Д16 і технічної міді, дали можливість виявити ряд специфічних особливостей деформування матеріалів у пружній і пластичній областях при динамічних незрівноважених процесах. Досліджували суцільні циліндричні зразки діаметром 8мм і довжиною робочої ділянки 25мм та спеціальні ступінчасті зразки, що складаються з послідовно з'єднаних основного зразка (діаметром 8мм і довжиною 25мм) та допоміжного зразка (діаметром 14…25мм і довжиною 64…130мм).

Встановлено, що при динамічно незрівноважених процесах у пластичній області матеріалів виникають дисипативні структури у вигляді об'ємно пов'язаних, на різних масштабних рівнях, тонких смуг (каналів), що мають ряд специфічних властивостей [6, 7]. Найперше слід звернути увагу на:

– різке зростання пластичності при суттєвому зменшенні опору деформуванню на стандартній висхідній гілці діаграми деформування практично для будь-якого матеріалу;

– досягнення надпластичного стану матеріалу за кімнатної температури при багаторазових послідовних реалізаціях динамічних незрівноважених процесів;

– обставину, що при встановленому складному режимі навантаження (статичний розтяг – різке підвищення швидкості деформації – статичний розтяг) можна реалізувати резерви механічних властивостей матеріалів на стадії розміцнення.

Матеріал, що перебуває у пружному стані, при імпульсних підвантаженнях здатен до коливальних структурних перебудов, в результаті яких відбувається самоорганізація структурного перетворення (зокрема, шляхом двійникування) і утворюється дисипативна структура, міцність якої нижча початкової. При реалізації динамічних незрівноважених процесів в *пружній області* матеріалів має місце яскраво виражена коливальна післядія, порівняно з коливальною післядією в *пластичній області*, що супроводжується різким зростанням пластичності.

При таких дослідженнях виникають два основних запитання. Перше – що запускає новий механізм деформації, пов'язаний з самоорганізацією структури? Друге – які причини самоорганізації структури матеріалу: чи структура визначається досягненням мінімуму вільної енергії чи принципом максимального заповнення об'єму матеріалу дисипативною структурою, пов'язаною на різних масштабних рівнях? Дати відповідь на ці запитання без детальних експериментальних досліджень неможливо.

У зв'язку з цим досліджено плоскі тонкі зразки при динамічних незрівноважених процесах, бо на думку авторів, за рахунок полегшення умов деформування в напрямку поздовжньої осі зразка, а також за рахунок виникнення додаткових можливостей реєстрації поля деформації на основній грані зразка (фотозйомка та ін.), можна отримати детальнішу інформацію про механізми утворення дисипативних структур у матеріалах. Ця інформація необхідна для розроблення фізично адекватної моделі деформування і руйнування матеріалів при динамічних незрівноважених процесах.

У даній роботі наведено нові оригінальні результати, що стосуються особливостей деформування листового пластичного матеріалу при динамічних незрівноважених процесах.

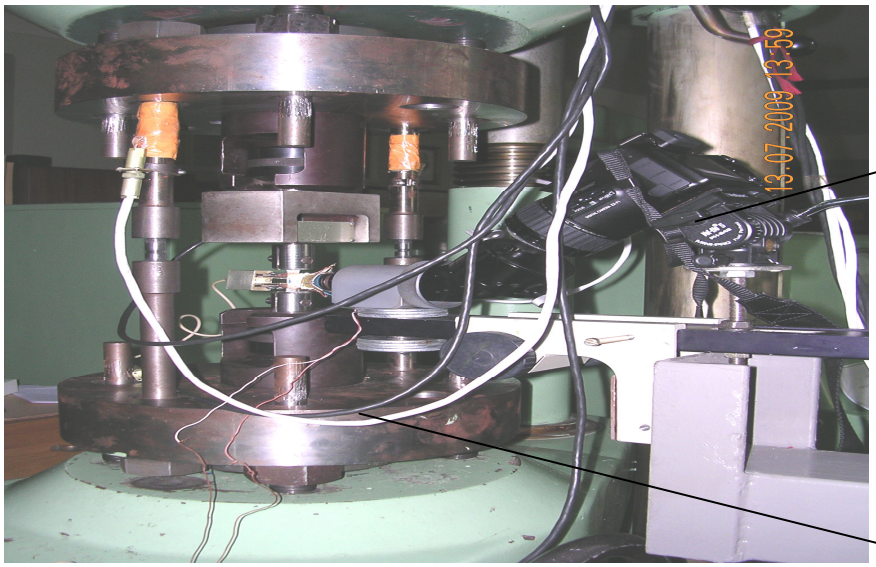
Методика досліджень. Дослідження проводили на плоских зразках із алюмінієвого сплаву товщиною 1,5мм.

Методика механічних досліджень аналогічна описаній в роботах [5…7]. Оцінювали зміни структурного і деформованого стану сплаву при динамічних незрівноважених процесах за двома розробленими методиками.

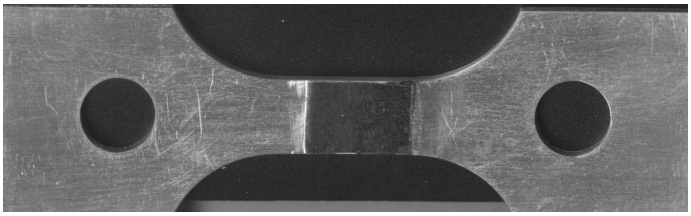
Про структуроутворення під навантаженням, що є активною модою деформації (самоорганізації), можна зробити висновок за поверхневим рельєфом, який фіксується безпосередньо в процесі деформації. Ми обрали найсприятливіший спосіб реалізації формування деформаційних структур, пов'язаних з рельєфом [8, 9].

На робочу частину зразків за допомогою спеціального клею PASCOFix наклеювали монокристальну фольгу товщиною 200 мкм орієнтування <100>{001}, виготовлену з монокристала алюмінію високої чистоти за допомогою електроіскрового різання з наступним електрополіруванням. Механічні характеристики монокристала

алюмінію орієнтування <100>{001} такі: межа текучості σ_T = 26 МПа, ступінь деформації до руйнування ε_p = 63%. Розвиток поверхневого рельєфу монокристала досліджували безпосередньо у процесі деформування шляхом знімання відеофільму за допомогою мікроскопа та фотокамери Casio Exilim Pro EX-F1 з частотою вимірювання до 1200 кадрів/с. Фотоінформацію передавали безпосередньо на комп'ютер. На рисунку 1 зображено установку і зразок із наклеєним монокристалом.



а)



б)

Рис. 1. Обладнання для випробувань: *а* – загальний вигляд дослідної установки: *1* – фотокамера, *2* – мікроскоп; *б* – зразок з наклеєним монокристалом

Результати дослідженью. На рисунку 2 зображено результати механічних досліджень алюмінієвого сплаву при статичному розтязі та складному режимі навантаження (статичний розтяг – раптове підвищення швидкості деформації – статичний розтяг). Аналіз отриманих результатів свідчить, що загальні закономірності деформування матеріалів при динамічних незрівноважених процесах, встановлені при дослідженні суцільних циліндричних зразків, зберігаються при дослідженні листових зразків. У даному випадку матеріал значною мірою пластифікується при збільшенні імпульсу впливу і рівень падіння напружень (короткочасне розміцнення) зростає, що підтверджує встановлений раніше факт. При будь-якому заданому ступені деформації матеріалу існує таке критичне значення імпульсу впливу (середньої швидкості деформації процесу навантаження), за якого зразок матеріалу в процесі різких змін у режимі навантаження розривається на дві частини. Таким чином, швидкість підведення енергії до дослідного зразка є ключовою характеристикою при подібних режимах навантаження. За певної швидкості підведення енергії до матеріалу останній не встигає поглинути її більше певної (критичної) величини. З іншого боку, проведені дослідження дозволили встановити і деякі відмінності в механічній поведінці плоских зразків матеріалу в порівнянні з циліндричними. Зокрема, вже після одного імпульсу

підвантаження на матеріал при наступному статичному розтязі можливе отримання надпластичного стану матеріалу за кімнатної температури, область А на кривій 3 (рисунок 2). Раніше при дослідженні циліндричних зразків подібні ефекти спостерігали після не менше трьох послідовних імпульсів підвантаження, причому було встановлено, що багаторазові різкі зміни в режимі навантаження сприяють суттєвому зменшенню найімовірнішого розміру смуг дисипативної структури і сумарної ширини кривої розподілу [6]. Даний факт свідчить про полегшення умов утворення дисипативних структур у плоских зразках і вказує на те, що, ймовірно, основною причиною самоорганізації структури є принцип максимального заповнення об'єму матеріалу дисипативною структурою, пов'язаною на різних масштабних рівнях.

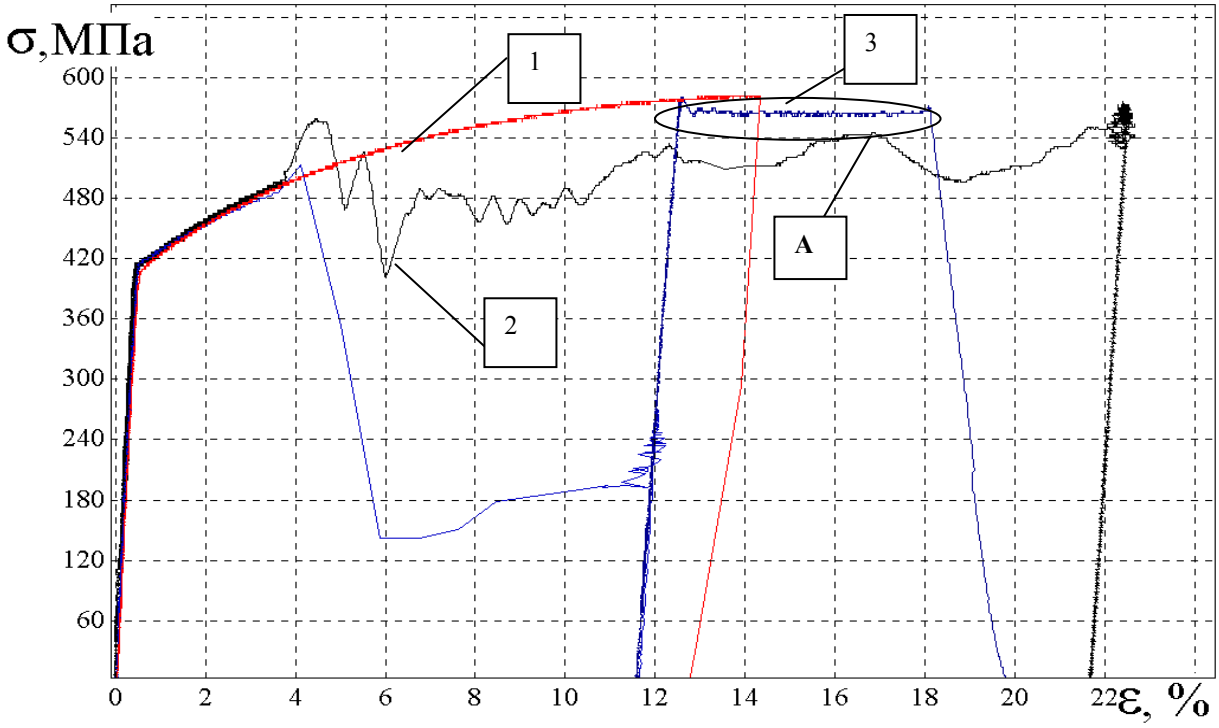


Рис. 2. Результати досліджень алюмінієвого сплаву:
1 – статичний розтяг; *2, 3* – складний режим навантаження при зростаючих імпульсах впливу на систему, f = 2400 вим./с

Цікаво прослідкувати утворення рельєфу монокристала в процесі динамічних незрівноважених процесів, оскільки його можна трактувати як поверхневий слід внутрішньої дисипативної структури, що формується в матеріалі. Внаслідок того, що монокристал жорстко закріплений на зразку, надлишкове поле напружень може релаксувати шляхом звичайної формозміни розтягом. Водночас монокристал може змінювати свою форму і в напрямку, перпендикулярному його поверхні. Така формозміна нерозривно пов'язана зі зменшенням щільності монокристала (при незмінній масі). Таке можливо, коли при різкому надходженні ззовні енергії виникає нестійкість структури матеріалу з подальшою її організацією у вигляді структурних елементів з нижчою щільністю. На рисунку 3, для прикладу, зображено рельєф монокристала в момент завершення динамічного незрівноваженого процесу. Спостерігаються характерні структурні сліди локалізації в макроекструзіях у вигляді утворення решітки "гребенів" ("гір"). Припускаємо, що, як і при інших видах деформації монокристала, за складних режимів навантаження [9] рельєф, який

спостерігається, є слідом утворених гідродинамічної пластичної течії дисипативних структур.

На сучасному етапі розвитку обчислювальної техніки з'явилася можливість проводити цифрову відеозйомку на швидкостях 24-1000000 кадрів/с. Це дає змогу досліджувати процеси деформування як за високих швидкостей деформування, так і за квазістатичних режимів. Оскільки кадр, відзнятий камерою, є проекцією реального об'єкта на матрицю камери, то послідовність цих кадрів, відзнятих однією камерою, дає змогу отримати двовимірне поле деформації плоскої поверхні, а двома камерами з різних ракурсів – отримати поле деформації об'ємної поверхні. Методика вимірювання поля деформації полягає в співставленні двох кадрів – базового і "деформованого". Процес співставлення полягає в обчисленні коефіцієнта кореляції між двома частинами фотографії [10…12].

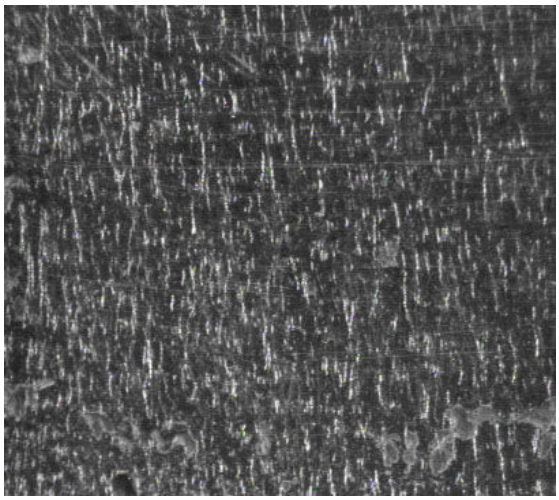


Рис. 3. Рельєф монокристала після динамічних навантажень

Наступні результати були отримані за методом, коли задано область зображення на базовому кадрі, що являє собою масив точок, елементи якого мають вигляд $\{x, y, G\}$, де x – абсциса точки, y – ордината точки, G – значення рівня сірого в точці. Коефіцієнт кореляції визначають так:

$$C = \sum_S (g(x, y) - G(x^*, y^*))^2 ,$$

де $g(x, y)$ – значення рівня сірого в точці базового зображення;

$\{x, y\}$ – її координати;

$G(x^*, y^*)$ – значення рівня сірого в точці деформованого зображення, отримане шляхом бікубічної інтерполяції;

S – область зображення;

$x^* = a_1 \cdot x + b_1 \cdot y + c_1$

$y^* = a_2 \cdot x + b_2 \cdot y + c_2$ – координати точки, яку поставлено у відповідність в деформованому зображенні.

Шляхом нелінійної оптимізації проводили мінімізацію коефіцієнта C шляхом підбору параметрів $\{a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2\}$, з яких після виключення повороту можна обчислити тензор деформації у даній точці.

Реєстрацію зображень проводили фотокамерою Casio Exilim Pro EX-F1 зі швидкістю 600 кадрів/с. Початковий кадр мав такий вигляд, як зображено на рисунку 4.

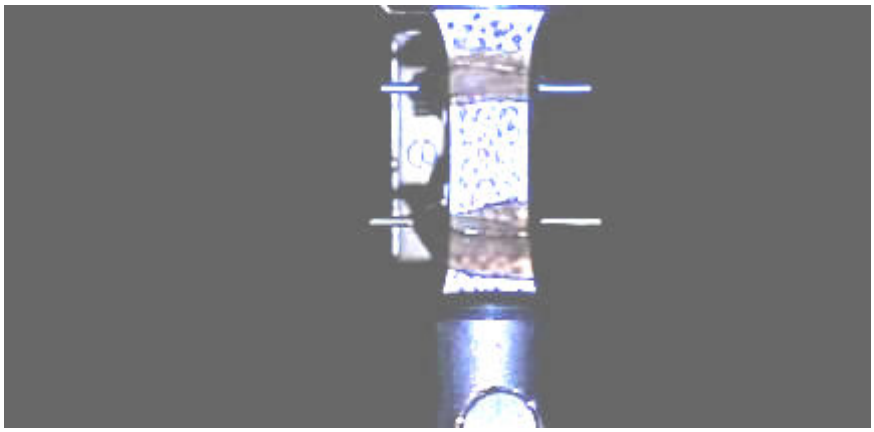


Рис. 4. Початковий кадр робочої частини зразка

Для дослідження протікання процесу деформування в різних зонах робочої частини зразка початковий кадр було поділено на три області (рис. 5).

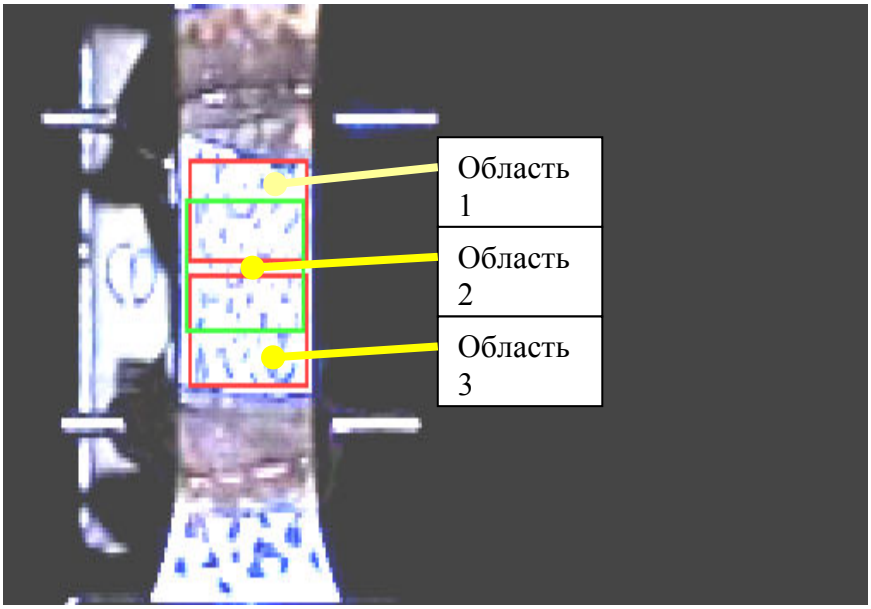


Рис. 5. Області оцінювання деформації на робочій частині зразка в процесі імпульсного підвантаження

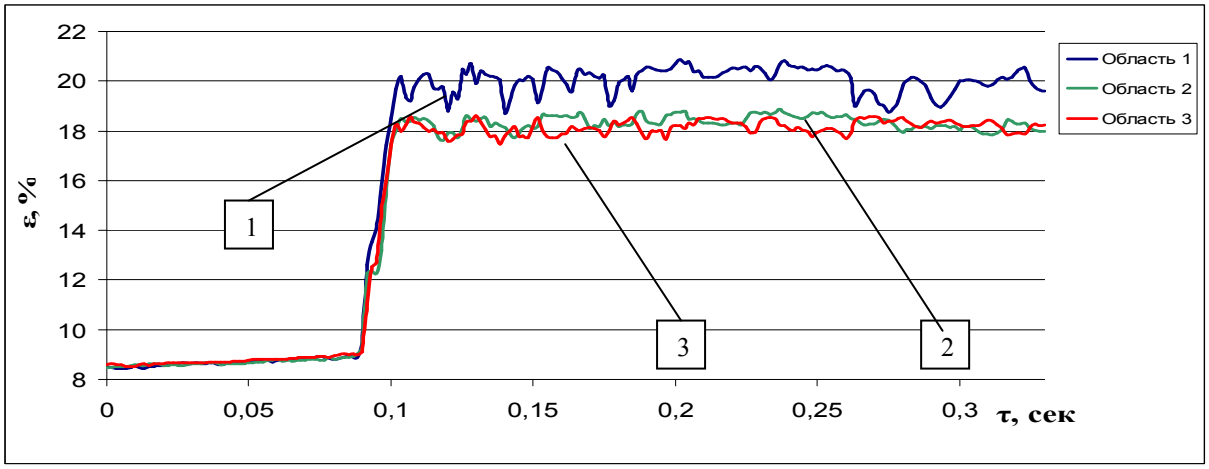


Рис. 6. Зростання деформації у часі в обраних областях робочої частини зразка в процесі імпульсного підвантаження

Проведені розрахунки зростання абсолютної деформації на базі вимірювань у процесі імпульсного підвантаження і коливальної післядії матеріалу (рис. 6) якісно і кількісно співпадають із результатами механічних випробувань. Вони надають додаткову інформацію про розподіл деформації в локальних зонах, що дуже важливо для розуміння кінетики процесу утворення дисипативних структур в об'ємі зразка матеріалу.

Висновки.

1. Виявлено загальні закономірності й деякі відмінності деформування плоских зразків з алюмінієвого сплаву в динамічних незрівноважених процесах у порівнянні з деформуванням циліндричних зразків. Встановлено, що умови утворення дисипативних структур у плоских зразках матеріалу полегшуються. Для прикладу показано, що вже після одного заданого імпульсу підвантаження на листовий матеріал при наступному статичному розтязі за кімнатної температури можна отримати надпластичний стан матеріалу. Даний факт можна ефективно використовувати при ударному штампуванні матеріалів.

2. Вивчено формування рельєфу на поверхні монокристальної пластини алюмінію орієнтування <100>{001}, жорстко закріпленої на полікристалічному сплаві, в процесі динамічних незрівноважених процесів. Зроблено припущення, що рельєф, який спостерігаємо на поверхні монокристала у вигляді макроекструзій, являє собою поверхневий слід дисипативної структури, що формується в монокристалі внаслідок розтягу основного зразка.

3. Розроблено й апробовано методику оцінювання деформованого стану матеріалу на плоских зразках із використанням швидкісної фотозйомки. Проведено розрахунки зі зростання абсолютної деформації на базі вимірювань у процесі імпульсного підвантаження і коливальної післядії матеріалу, які якісно та кількісно співпадають із результатами механічних досліджень. Локальні вимірювання деформації в обраних областях робочої частини зразка свідчать про кінетику процесу утворення дисипативної структури в об'ємі матеріалу.

Література

1. Пригожин И. Познание сложного. Введение / Г. Николис, И. Пригожин; [пер. с англ.]. Изд. 2-е, стереотипное. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 344с.
2. Пригожин И. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках / Илья Пригожин; [пер. с англ.]. Изд. 2-е, доп. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 288с.
3. Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдорф, И. Пригожин – М.: Мир, 1973. – 273с.
4. Чаусов Н.Г. Установка для испытаний материалов с построением полных диаграмм деформирования / Н.Г. Чаусов, Д.Г. Войтюк, А.П. Пилипенко, А.М. Кузьменко // Проблемы прочности. – 2004. – № 5. – С. 117 – 123.
5. Чаусов Н.Г. Комплексная оценка поврежденности пластичных материалов при различных режимах нагружения / Н.Г. Чаусов, С.А. Недосека, А.П. Пилипенко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – № 3. – С. 16 – 21.
6. Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах / Н.Г. Чаусов, Е.Э. Засимчук, Л.И. Маркашова [та ін.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – Т. 75, № 6. – С. 52 – 59.
7. Особенности трансформации структуры пластичных материалов в процессе резких смен в режиме нагружения / Е.Э. Засимчук, Л.И. Маркашова, Т.В. Турчак, Н.Г. Чаусов [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 2. – С. 77 – 82.
8. Засимчук Е.Э. Сенсоры для оценки деформационного повреждения в структурно-неоднородных авиационных сплавах / Е.Э. Засимчук, Ю.Г. Гордиенко, Р.Г. Гонтарева, И.К. Засимчук // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5, № 2. – С. 87 – 95.
9. Засимчук Е.Э. Наблюдение in situ формирования поверхностного рельефа в монокристальной фольге алюминия в процессе стесненного растяжения / Е.Э. Засимчук, И.Т. Ярматов // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 3. – С. 55 – 60.
10. Sun Y. Finite-element formulation for a digital image correlation method / Y. Sun, J. Pang, C. Wong, F. Su // Appl. Optics. – 2005. – № 44. – P. 7357– 7363.
11. Wang C. B. An automated approach for direct measurement of two dimensional strain distributions within articular cartilage under unconfined compression / C. B. Wang, J. M. Deng, G. A. Ateshian, C. T. Hung // J. Biomed. Eng. – 2002. – № 24. – P. 557 – 567.
12. Li E. B. Application of digital image correlation technique to dynamic measurement of the velocity filed in the deformation zone in cold rolling / E. B. Li, A. K. Tieu, W. Y. D. Yuen // Opt. Lasers Eng. – 2003. – № 39. – P. 479 – 488.

Одержано 30.10.2009р.