

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя

**БЕРЕЗІН ВАЛЕНТИН БОРИСОВИЧ**

УДК 539.381

**ВПЛИВ УДАРНО-КОЛИВАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА  
КІНЕТИКУ ПОЛЯ ДЕФОРМАЦІЙ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ  
МЕТАЛІВ**

Спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Тернопіль – 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті біоресурсів і природокористування України

Науковий керівник: **Чаусов Микола Георгійович**, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, завідувач кафедри механіки та опору матеріалів, м. Київ

Офіційні опоненти: **Добрянський Іван Михайлович**, доктор технічних наук, професор, Львівський національний аграрний університет, завідувач кафедри будівельних конструкцій, м. Дубляни

**Бородій Михайло Васильович**, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка Національної академії наук України, провідний науковий співробітник відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій при криогенних температурах, м. Київ

Захист відбудеться «19» вересня 2014р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д58.052.01 в Тернопільському національному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46601, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Тернопільського національного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46601, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий «15» серпня 2014 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Б.Г. Шелестовський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність.** При імпульсному вводит енергії до будь – якого середовища виникає динамічний хаос і процес стає незрівноваженим.

Теоретичним дослідженням динамічного хаосу у твердому тілі присвячені праці Клімова Д. М., Петрова А.Г., Георгієвського Д.В., Магницького Н.А., Сидорова С.В., Заславського Г.М., Сагдеева Р.З., Усікова Д.А., Ерофеева В.І., Кажасва В.В., Семерикової Н.П., Ліхтенберга А., Лібермана М., Егліта М.Є., Ліхачова В.А., Паніна В.Е., Засимчук Е.Є., Маркашової Л.І., Владімірова В.І., Степанова Г.В., Сулима Г.Т., Іванової В.С., та ін. Однак теоретичні моделі, що розробляються, не враховують структурних перетворень при динамічних незрівноважених процесах, які проявляються в вигляді самоорганізованих просторових дисипативних структур, і тому не відображають фізичну сутність процесу.

Нажаль на сьогодні наявні тільки одиничні роботи з експериментального дослідження механічної поведінки пластичних матеріалів при динамічних незрівноважених процесах (ДНП), які проведені на кафедрі механіки та опору матеріалів НУБіП України і реалізовані у вигляді ударно-коливального режиму навантаження. В результаті аналізу цих робіт виявлено ряд специфічних особливостей деформування матеріалів при і після реалізації ДНП, які проявляються, в першу чергу, шляхом різкої пластифікації деяких матеріалів при наступному статичному розтягу за рахунок створення дисипативних структур, що потребує подальшого детального обґрунтування, в тому числі, і фізичними методами досліджень.

Обмеженість експериментальних даних зраховання впливу ДНП на механічні характеристики при подальшому навантаженні призводить до того, що на даний момент відсутні чіткі рекомендації зраховання впливу даного процесу на зміну механічних властивостей матеріалу при подальшому статичному чи іншому виді навантаження.

Залишається головне запитання, що запускає новий механізм деформування, пов'язаний із зміною структури та яка його фізична природа? Дати відповідь на це питання без додаткових детальних металофізичних досліджень не можливо. Проте, більшість металофізичних досліджень проводяться, як правило, після реалізації режиму навантаження і для такого специфічного процесу як ДНП за рахунок релаксаційних явищ деталі нового механізму деформування найчастіше втрачаються. З іншого боку, один із перспективних напрямів дослідження для розуміння фізичних процесів, що протікають в матеріалах при ДНП, може бути пов'язаний з оцінкою еволюції поля деформацій на поверхні листових пластичних матеріалів.

Як показано у працях Joshi S., Halim H., Mazière M., Boyce W., Bodelot L., часто існує зв'язок між структурними параметрами матеріалу та його полем деформацій, або між фізичним процесом і відповідним полем деформацій. Ці аспекти можуть слугувати аргументом для вибору моделі механічної поведінки матеріалів чи оцінки фізичних механізмів процесу деформування. Причому поле

деформацій це джерело інформації, яке дозволяє виявити найдрібніші аспекти у механічній поведінці матеріалу.

Зважаючи на це, актуальним є виявлення основних закономірностей кінетики поля деформацій матеріалів різних класів при та після реалізації ДНП і проведення попередньої оцінки взаємозв'язку структурного стану матеріалу та поля деформацій на поверхні матеріалу після реалізації ДНП.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в рамках наукової бюджетної теми №110/313-пр «Дослідити динамічні процеси середовищ та механічних систем при імпульсному вводі енергії (номер держреєстрації 0109U003214, 2009-2011), в якій автор приймав участь як виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даної роботи є встановлення основних закономірностей зміни кінетики поля деформацій та механічних властивостей металів різних класів під час і після ударно-коливального режиму навантаження («динамічний незрівноважений процес») та попередня оцінка взаємозв'язку поля деформацій із структурним станом матеріалу.

У відповідності з поставленою метою основними завданнями дослідження були прийняті наступні:

- аналіз та узагальнення сучасних уявлень про закономірності кінетики поля деформацій матеріалів при складних режимах навантаження, в першу чергу, з урахуванням динамічних навантажень;
- розробка програмного оптичного комплексу для дослідження поля деформацій матеріалів методом кореляції цифрових зображень;
- виявлення основних закономірностей кінетики поля деформацій матеріалів різних класів при і після реалізації ДНП;
- проведення попередньої оцінки взаємозв'язку структурного стану матеріалу та поля деформацій на поверхні матеріалу після реалізації ДНП;
- дослідження впливу ДНП на механічну поведінку матеріалів при подальшому статичному та ударному навантаженні.

*Об'єкт дослідження* – поле деформацій та механічні властивості металів.

*Предмет дослідження* – зміна кінетики поля деформацій та механічних властивостей алюмінієвих сплавів та сталей під час і після ударно-коливального режиму навантаження «динамічний незрівноважений процес».

*Методи дослідження.* Теоретичні дослідження проводилися з використанням методів механіки деформівного твердого тіла й обчислювальної математики. Для експериментальних досліджень кінетики поля деформацій матеріалів різних класів використовували методи тензометрії та оптичні методи. Експериментальна частина роботи проведена за допомогою новітньої високошвидкісної камери “Phantomv711”, що дало змогу отримати високу точність та достовірність результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

- в роботі теоретично й експериментально обґрунтовано доцільність використання метода кореляції цифрових зображень для оцінки кінетики поля деформацій матеріалів при ударних навантаженнях [4,9,10,11,18];

- вперше встановлено загальні закономірності кінетики поля деформацій матеріалів різних класів: алюмінієвих сплавів Д16, 2024 –Т3, нержавіючої сталі 12Х17 та високоміцної корпусної сталі, при та після ударно-коливального навантаження («динамічний незрівноважений процес») [3,6,10,11,13,14,18];

- виявлено вплив ДНП на зміну механічних властивостей металів при подальшому статичному та динамічному навантаженні [1,2,5,7,8,11,15-17];

- проведено попередню оцінку взаємозв'язку структурного стану алюмінієвого сплаву Д16 та поля деформацій на поверхні сплаву після реалізації ДНП [3,18].

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено і апробовано програмний комплекс для оцінки поля деформацій методом кореляції цифрових зображень. Отримано характерні зображення поля деформацій алюмінієвих сплавів Д16, 2024-Т3, нержавіючої сталі 12Х17 та високоміцної корпусної сталі, що виникають при та після ударно-коливального навантаження «динамічний незрівноважений процес». Ці зображення можуть бути використанні при діагностиці матеріалів, аналізі процесів руйнування, та при виробництві деталей, що виготовляються методами штамповки. Результати дисертаційної роботи в частині розробленого програмного комплексу використовувались у ТОВ «Комфортна оселя» для оцінки деформованого стану колон та пілонів монолітної конструкції.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати, які становлять суть дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. В публікаціях написаних у співавторстві здобувачеві належить:

- розробка програмного комплексу для аналізу поля деформацій за допомогою методу кореляції цифрових зображень[4,9];

- розробка програмного пакету для проведення тензометричних вимірювань із частотою до 100 кГц;

- розробка експериментальних методик дослідження поля деформацій при складних режимах навантаження[1,2,3,6,10,11,13];

- експериментальне дослідження поля деформацій і виявлення основних закономірностей його поведінки при ударно-коливальному навантаженні алюмінієвих сплавів Д16, 2024-Т3, нержавіючої сталі 12Х17 та високоміцної корпусної сталі[3,5,6,10,11,13,14,18];

- експериментальне дослідження за допомогою безконтактногоекстензометра механічної поведінки матеріалів при ударно-коливальному навантаженні на основі метода кореляції цифрових зображень[13,14,18].

Постановку задач, аналіз та трактування результатів, формулювання наукових висновків проведено спільно з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на X Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка та технологія - 2009» (Севастополь, 2009), 24<sup>th</sup> Symposium on Experimental Mechanics of Solids (Wroclaw, Poland, 2010), XI Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка та технологія -

2011» (Севастополь, 2011), 52 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Уфа, Россия, 2012), XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка та технологія - 2012» (Севастополь, 2012), Fifth International conference on engineering failure analysis (Hague, Netherlands, 2012), 5<sup>th</sup> International scientific conference on defensive technologies, (Belgrade, Serbia, 2012), International conference “Materials Science Engineering” (Darmstadt, Germany, 2012), 13<sup>th</sup> conference “New Trends in Fatigue and Fracture” (Moscow, Russia, 2013), 4<sup>th</sup> International conference on Integrity, reliability and failure of mechanical systems (Funchal, Portugal, 2013), 12<sup>th</sup> International conference on Fracture and Damage Mechanics (Sardinia, Italy, 2013), 7<sup>th</sup> International conference “Materials structure & micromechanics of fracture” (Brno, Czech republic, 2013). В повному обсязі робота була обговорена і схвалена на засіданні кафедри механіки Львівського національного університету імені Івана Франка, тематичному семінарі «Статична і циклічна міцність» Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, університетському семінарі «Механіка, міцність матеріалів і конструкцій» Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя, проблемної вченої ради Науково-дослідного інституту техніки і технологій Національного університету біоресурсів і природокористування України.

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані у 18 друкованих працях, з них – 4 статті у фахових наукових виданнях [1-4], 2 статті у виданнях, внесених до міжнародної наукометричної бази “SCOPUS” [5,6], 1 стаття у міжнародному виданні [7], 4 статті у інших виданнях [8-11], 1 патент на винахід України [12], 6 матеріалів та тез доповідей на міжнародних наукових конференціях [13-18].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 157 сторінок, в т.ч. 60 рисунків, 3 таблиці та список використаних джерел із 229 найменувань.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**Увступі** дається загальна характеристика роботи, розкрито суть і стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність теми дисертації, викладено анотований зміст роботи.

**У першому розділі** проаналізовано сучасні методи безконтактного дослідження неоднорідного поля деформацій матеріалів при навантаженні. Проведений аналіз свідчить, що на даний момент існує цілий ряд методів дослідження поля деформацій: фото еластичність/пластичність, муар-інтерферометрія, голографія, спекл-методи та метод кореляції цифрових зображень.

В якості основного висновку можна зазначити, що метод кореляції цифрових зображень володіє найбільш широкими можливостями при визначенні поля деформацій і має мінімальні вимоги до наявного устаткування. Він відрізняється дешевизною устаткування, простотою, та достатньою точністю – до 0,004% абсолютної похибки при визначенні деформації і дає можливість аналізу швидкоплинних явищ при деформацій матеріалу за допомогою високошвидкісної

камери. Можна відмітити його універсальність, в порівнянні з іншими методами. Основний його недолік — середня точність визначення деформації легко компенсується використанням камер високої роздільної здатності. Також в даному розділі проаналізовано наявні результати експериментальних досліджень по оцінці поля деформацій матеріалів методом кореляції цифрових зображень при різних швидкостях деформації, що реалізуються при різних схемах навантаження. Основна увага зверталась на ті роботи, які присвячені оцінці поля деформацій матеріалів, що володіють суттєво різною деформаційною поведінкою як при статичному, так і при динамічному навантаженні. Це, в першу чергу, відноситься до матеріалів, що не схильні до локалізації пластичної деформації, наприклад, нержавіючі сталі, і, матеріалів, що проявляють специфічну деформаційну поведінку при навантаженні, наприклад, алюмінієві сплави. Показано, що механічна поведінка матеріалів при різних типах навантаження, включаючи і динамічне навантаження, може бути достовірно оцінена лише за допомогою поля деформацій на всій робочій поверхні зразка. Особливо це стосується досліджень із впливу імпульсних підвантажень на процеси деформування пластичних матеріалів. В даному випадку за рахунок динамічного коливального перерозподілу навантаження в механічній системі заданої жорсткості можуть протікати такі процеси деформування, які однозначно можна віднести до практично не досліджених. Аналіз літературних джерел показує, що не зважаючи на широке застосування методу кореляції цифрових зображень для аналізу поля деформацій матеріалів в лабораторіях розвинутих країн світу, власні програмні комплекси для дослідження поля деформацій методом кореляції цифрових зображень при складних режимах навантаження в Україні, нажаль, практично відсутні.

У висновку розділу сформульовані основні задачі і етапи дослідження.

**В другому розділі** описано власний розроблений програмний комплекс для дослідження поля деформацій методом кореляції цифрових зображень.

В якості критерію відповідності для розробленого комплексу обрано квадратичне відхилення, так як воно забезпечує найбільшу швидкість роботи, але з деякими змінами, спрямованими на підвищення ефективності роботи комплексу. А саме:

$$Q = \sum \sum (A(x, y) - C \cdot B(x^*, y^*) - D)^2, \quad (1)$$

де  $C$  – коефіцієнт, що враховує зміни в контрасті поверхні,  $D$  – коефіцієнт, що враховує лінійний зсув в освітленні;  $x, y$  – координати точки в базовому зображенні;  $x^*, y^*$  – координати положення точки в деформованому зображенні;  $A, B$  – інтенсивності базового і zdeформованого зображень, відповідно.

Для вибору міри відповідності при оптимізації в даній роботі використовується алгоритм Левенберга-Марквардта. Оскільки основою для даного алгоритму є якобіан коефіцієнту відповідності, то з метою покращення точності та швидкості роботи метода нами розроблено наступний алгоритм роботи комплексу:

1. Отримати головну діагональ матриці жорсткості сітки, використовуючи якобіан елементів.

2. Оптимізувати параметри елементів методом Левенберга-Марквардта, використовуючи головну діагональ матриці жорсткості в якості її наближення.

На основі аналізу роботи програмного комплексу по синтетичним зображенням, вираз для похибки визначення деформацій із імовірністю в 95%, при фільтрації з розміром вікна 5x5 елементів базового поля та кроком сітки 10 пікселів методом плаваючих найменших квадратів, можна подати у наступному вигляді:

$$\Delta\varepsilon = \frac{500n\text{пкс} \cdot \rho}{k-1} + \frac{1}{2} \cdot \frac{0.03n\text{пкс}^{-2}}{\rho^2} + 0.67 \cdot Q + 0.083 \cdot Q^2 + \frac{4.88 \cdot 10^5 + 8.77 \cdot 10^5 \cdot Q^{0.67}}{n^4 \cdot K}, \quad (2)$$

де  $\Delta\varepsilon$  – середнє значення максимального відхилення при визначенні деформації, взяте у відсотках;  $n$  – розмір сторони елемента, пікс.;  $k$  – умовний порядок фільтру інтерполяції (для базисних сплайнів ця величина відповідає його порядку);  $\rho$  – середнє значення похідної по відповідній координаті зображення, пікс<sup>-1</sup>;  $Q$  – середнє амплітудне значення білого шуму на зображенні, взяте у відсотках (по відношенню до максимального значення рівня білого, для програмного комплексу це 255);  $K$  – коефіцієнт, що враховує вид інтерполяції (для базисних сплайнів  $K=1\text{пкс}^{-4}$ ).

Розроблений програмний комплекс в даній роботі оснащався високошвидкісними камерами різних типів: Phantomv711 (швидкість зйомки до 1400000 к/с), CanonEOS 7D (швидкість зйомки до 60 к/с), CasioExilimProEX-F1 (швидкість зйомки до 1200 к/с). Він складається з трьох модулів – препроцесору, модуля розв'язку та постпроцесору. Така схема забезпечує гнучкість при доданні нових можливостей у відповідні програми.

**У третьому розділі** описано методику механічних випробувань при ударно-коливальному навантаженні пластичних матеріалів при високочастотному, високошвидкісному коливальному процесі (динамічний незрівноважений процес (ДНП)).

Методика випробувань реалізована на базі модифікованої гідравлічної установці для статичних випробувань ZD-100Pu. Модифікована версія установки складається з двох контурів – зовнішнього (навантажувальної рами випробувальної машини) і внутрішнього (рис. 1а,б, відповідно). Внутрішній контур представляє собою найпростішу статично не визначену конструкцію, у вигляді трьох паралельних елементів, що навантажуються одночасно – центрального зразка та двох симетричних зразків-супутників («крихких проб») різного поперечного перерізу, виготовлених із загартованих сталей 65Г чи У8-У12. При навантаженні даної конструкції зразки-супутники руйнуються (при заданих навантаженні чи деформації) і здійснюється імпульсне введення енергії у матеріал досліджуваного зразка.



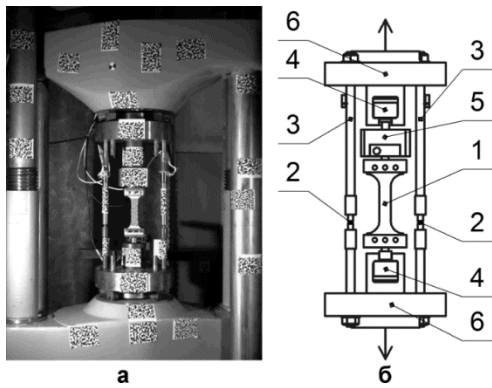


Рис.1. Випробувальна установка ; а – загальний вигляд (силава рама установки – зовнішній контур); б – внутрішній контур: 1 – досліджуваний зразок, 2 – крихкі проби, 3 – тензометричні штанги, 4 – сферичні опори, 5 – динамометр (власна частота 12 кГц), 6 – фланці

Так, суть ДНП полягає в високошвидкісному розтягуванні матеріалу з накладанням на нього коливального процесу з високою частотою (кілька кілогерц). Такий режим навантаження досягається внаслідок вільних коливань механічної системи (рис. 1а) та надлишку тиску в гідравлічній системі. Таким чином можна контролювати цей процес за допомогою зміни співвідношення жорсткість/маса зовнішнього контуру системи (рис. 1б) та величиною проскакування гідроциліндра, що визначається руйнівним навантаженням крихких проб. Вибір випробовуваних матеріалів в даній роботі був обумовлений задачею порівняння кінетик поля деформацій матеріалів з явно вираженим

хвильовим процесом пластичного деформування – алюмінієві сплави Д16 і 2024-Т3 та матеріалу з відносно однорідним і пропорційним процесом пластичного деформування – нержавіюча сталь 12Х17. Також було цікаво оцінити вплив ДНП на механічну поведінку високоміцних сталей, які володіють дуже малою пластичністю (1...2%). Тому в роботі були проведені дослідження на високоміцній корпусній сталі, яка використовується в виробі спеціальної техніки. Для дослідів була спеціально вибрана плоска форма зразків, так як це дозволяє здійснювати зйомку поля деформацій з використанням лише однієї камери, в даному випадку результуюче поле деформацій можна вважати двовимірним. Використовувались великі зразки з розмірами робочої частини 25x75 мм і малі зразки з розмірами робочої частини 10x18 мм. Товщина зразків із алюмінієвих сплавів і нержавіючої сталі складала 3 мм, із високоміцної корпусної сталі – 4,8 мм. В усіх дослідів з реалізації ДНП руйнівне зусилля крихких проб було в межах: на нержавіючій сталі – 60...160 кН; на великих зразках із алюмінієвих сплавів – 75...120 кН, на малих – 40...100 кН; на високоміцній корпусній сталі – 80...190 кН.

Імпульсне підвантаження при статичному розтягу алюмінієвих сплавів накладалося при деформації 1,8...7%; нержавіючої сталі при деформації 5...8%; високоміцної корпусної сталі при деформації 0,05...0,25%.

**Учетвертому розділі** наведено результати оцінки еволюції поля деформацій на поверхні листових алюмінієвих сплавів Д16 та 2024-Т3 при різних режимах навантаження. На рис. 2 приведена, для прикладу, кінетика поля деформацій алюмінієвого сплаву 2024-Т3 при статичному розтягу. З рис. 2 видно, що основною характерною властивістю процесу статичного деформування є рух по поверхні зразків відносно вираженої смуги локалізованої деформації до моменту «шийкоутворення». Ці дані співпадають з відомими літературними даними, і тим самим, ще раз підтверджують роботоздатність розробленого програмного

комплексу та достовірність отриманих при його використанні експериментальних даних.

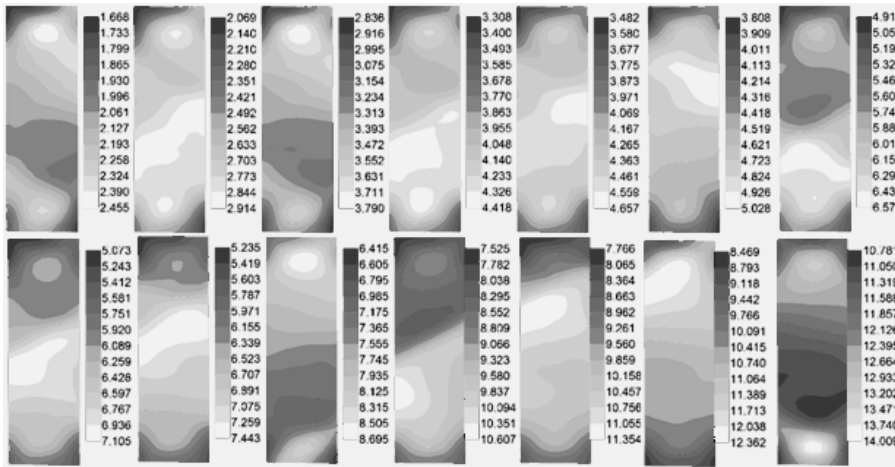


Рис. 2. Кінетика статичного процесу деформування алюмінієвого сплаву 2024-T3 (максимальна головна деформація, нульовий (опорний) кадр відповідає недеформованому матеріалу)

При випробуванні партії великих зразків в кількості 22 штуки із сплаву 2024-T3 було виявлено три характерні види деформування при ДНП (рис.3). Їх можна охарактеризувати наступним чином:

- збільшення площі смуги неоднорідності, сформованої при статичному деформуванні, із зміною орієнтації її фронту неоднорідності на  $\sim 90^\circ$  (рис.3,а);
- розрив смуги неоднорідності на дві смуги, що рухаються у протилежних напрямках (рис.3,б);
- розрив смуги неоднорідності на дві смуги з подальшою їхньою взаємодією з утворенням нової смуги (рис.3,в).

Також, спостерігається випадковість розподілу коливальних процесів локальної деформацій по поверхні зразків в процесі ДНП, існує тенденція різкого зростання рівня деформацій у нових ядрах, що зароджуються в менш деформованих зонах зразків.

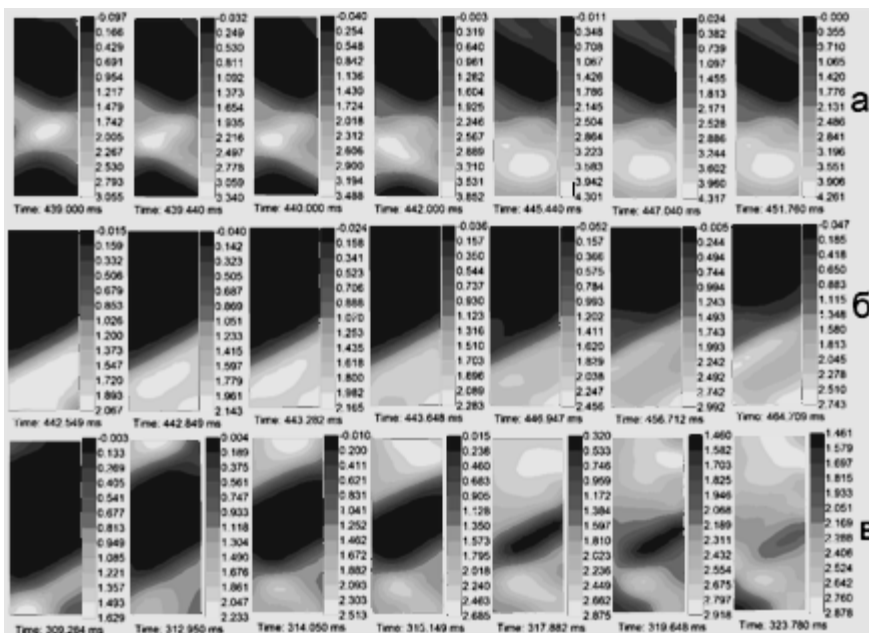


Рис.3. Кінетики поля деформацій при ДНП сплаву 2024-T3 (максимальна головна деформація, базовий кадр відповідає заданому рівню деформації): а – зміна орієнтації смуги фронту неоднорідності; б – розрив смуги неоднорідної деформації; в – взаємодія смуг неоднорідної деформації

Поле мінімальної головної деформації в цілому має такий самий характер як і поле максимальної головної деформації. При випробуваннях практично для кожного великого зразка фіксувалась картина розподілу коливальних процесів по робочій частині. Виявлена випадковість розподілу коливальних процесів локальної деформації по поверхні великих зразків в процесі ДНП вказує на той факт, що стандартна методика запису діаграм з використанням одиночних екстензометрів або тензорезисторів при ДНП відображає інтегральну величину деформації лише в заданій області зразка на базі вимірювань і не несе достатньої кількості інформації для повного аналізу процесу деформування по всій поверхні. На рис. 4, для прикладу, подано результати запису діаграм деформування сплаву 2024-T3 одиночним тензорезистором для великих деформацій (Vishay, EP-08-500BL-350) в процесі реалізації ДНП, встановленого на базі 12,7 мм.

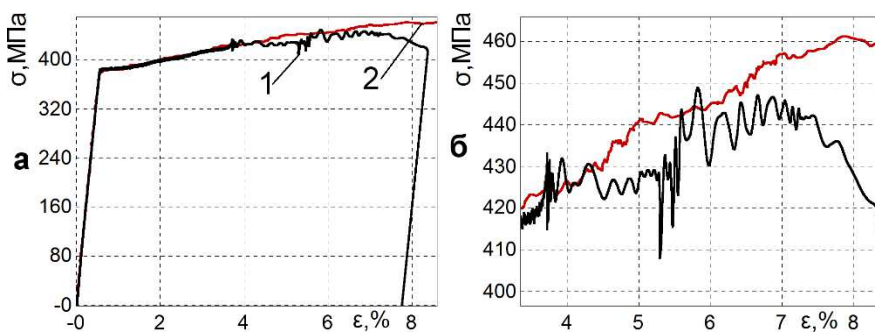


Рис. 4. Діаграма деформування алюмінієвого сплаву 2024-T3, записана тензорезистором (малий зразок), а – загальний вигляд: 1 – ДНП ( $F_{\text{імп}} = 99,1$  кН), 2 – статика; б – збільшена ділянка з ДНП

При випробуванні партії великих зразків в кількості 20 штук із сплаву Д16 встановлено, що характерні режими деформування в процесі реалізації ДНП аналогічні виявленим у 2024-T3: збільшення площі смуги неоднорідності, сформованої при статичному деформуванні, із зміною орієнтації її фронту неоднорідності на  $\sim 90^\circ$ ; розрив смуги неоднорідності на дві смуги, що рухаються у протилежних напрямках; розрив смуги неоднорідності на дві смуги з подальшою їхньою взаємодією з утворенням нової смуги. Також, з метою аналізу зв'язку структурного стану з полем деформацій, що формується в результаті ДНП, після випробувань було зроблено ТЕМ структури на одному із зразків сплаву Д16. На основі порівняння ТЕМ структур і поля деформацій (рис.5) можна зробити висновок, що на ділянці з найбільш інтенсивною деформацією тонко-смугова структура розвивається найбільше, що безпосередньо впливає на пластифікацію. На ділянках зразка з меншим рівнем деформацій спостерігаються лише окремі частини тонко-смугової структури. Можна також зробити припущення, що «білі» частини ТЕМ структур (див. рис.5) представляють собою неповністю сформовані тонко-смугові дисипативні структури після рекристалізації. Фізично вони являють собою рекристалізовані зерна, сформовані із зародків мікросмуг та мікрозерен, що виростили в процесі пластичного деформування. Таким чином, підтверджується той факт, що існує безпосередній зв'язок поля деформацій на поверхні зразка з утвореною дисипативною структурою в об'ємі матеріалу.

Безсумнівно, що утворена в об'ємі матеріалу тонко-смугова дисипативна структура може по-різному впливати на механічні характеристики алюмінієвих сплавів Д16 і 2024-T3 при повторному статичному розтягу. Тут, в першу чергу,

слід звернути увагу на той факт, що після ДНП відбувається зміна як кінетики поля деформацій, так і значень самих механічних характеристик. Оскільки раніше нами було виявлено, що витримка в цілому призводить до зменшення вираженості проявів ефекту ДНП, то повторні статичні випробування проводились практично одразу ж після реалізації ДНП.

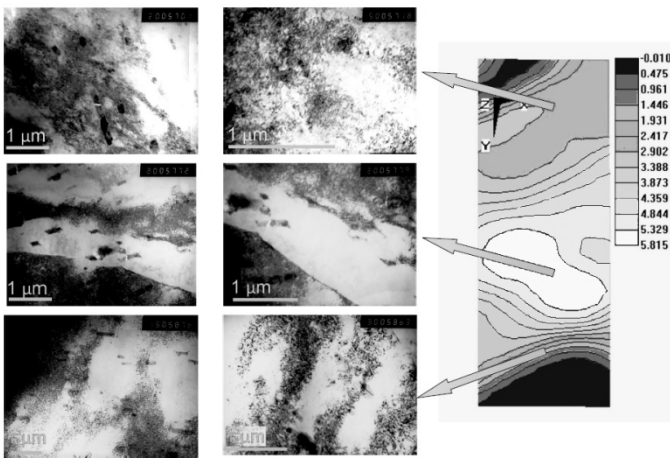


Рис. 5. Взаємозв'язок структури алюмінієвого сплаву Д16 з полем деформацій при ДНП (поле деформацій – максимальна головна деформація, нульовий кадр із заданою деформацією)

Так, сплаву 2024-Т3 після ДНП властиве збільшення на 3-10% ступеня локальної деформацій в точці, де відбудеться руйнування матеріалу. В той же час для сплаву Д16 властива затримка процесу «шийкоутворення» на рівні 8-15%, причому така затримка не притаманна сплаву 2024-Т3.

Проведені дослідження також виявили наявність двох стадій ДНП – низької і високої швидкості, що відповідають, ймовірно, за формування і розвиток дисипативної структури в сплавах.

Середня швидкість деформування на першій стадії реалізації ДНП для алюмінієвих сплавів становить 100-300%/с. На другій стадії, коли відбувається розповсюдження утвореної дисипативної структури по об'єму досліджуваного зразка, відмічається різке збільшення швидкості деформування в локальних зонах до 5000-6000%/с. Крім того, на основі даних по всім випробуваним зразкам з імовірністю 95% було встановлено, що частота коливального навантаження при ДНП лежить в діапазоні 1-2 кГц.

У п'ятому розділі наведено результати оцінки еволюції поля деформацій на поверхні листових сталей: нержавіючої 12Х17 та високоміцної корпусної, при різних режимах навантаження. Значна увага в цих дослідях приділялась дослідженню кінетики поля деформацій сталей при ДНП, а також впливу ДНП на зміну механічних властивостей при подальшому статичному та ударному навантаженні. ДНП в сталі 12Х17 реалізовували при різноманітних рівнях попередньої статичної деформації. Реалізація ДНП при малій початковій деформації була спеціально обрана з метою зниження впливу пошкодження матеріалу на характер процесу. На рис. 6, для прикладу, представлено експериментальні результати у випадку, коли імпульсне підвантаження здійснювалось практично на пружній ділянці деформування.

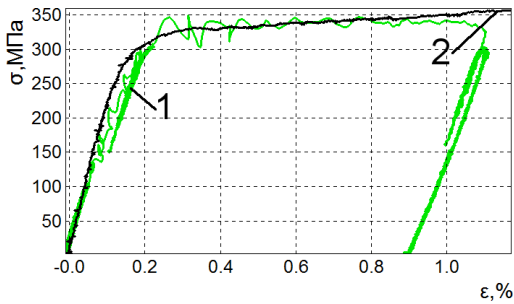


Рис. 6. Статичне деформування та ДНП нержавіючої сталі 12X17: 1 – крива ДНП ( $F_{imp} = 94,1$  кН); 2 – крива статичного деформування

Слід відмітити, що криві деформації при статиці і ДНП в значній мірі співпадають, і суттєве відхилення спостерігається лише наприкінці реалізації ДНП. Це може свідчити про той факт, що дисипативна структура утворюється переважно на заключному етапі такого специфічного швидкісного коливального деформування. На відміну від випробуваних алюмінієвих сплавів (див. рис. 3), графіки локальної деформації сталі при ДНП свідчать про значну однорідність поля деформацій (по-точково) (рис. 7). Завдяки

такій однорідності поля деформацій достовірно визначена частота високочастотних коливань сталі при ДНП (1,2...2,4 кГц).

Характер поля мінімальної головної деформації практично не змінюється в порівнянні зі статичним розтягом. Також слід відмітити «хвилю» деформації, що рухається з невисокою швидкістю 0,3-0,7 м/с. В процесі ДНП максимум деформації прямує до центральної частини зразка, проте після розвантаження і подальшого деформування він зміщується до периферії. Його рух не однорідний і траєкторія зазвичай має серповидний вигляд. Крім того, поле деформацій після ДНП володіє меншою симетрією та має «розірваний» вигляд, особливо на початковому етапі деформування. В подальшому однорідність поля зростає, проте після вираженого «шийкоутворення» центральна частина поля все одно має деякий кут нахилу в порівнянні із статикою. Така розмитість поля пояснює причину затримки «шийкоутворення» – для початку «шийкоутворення» деформація має перейти від верхньої області до центру, таке явище переходу вказує на наявність процесів перерозподілу дислокацій у об'ємі матеріалу.

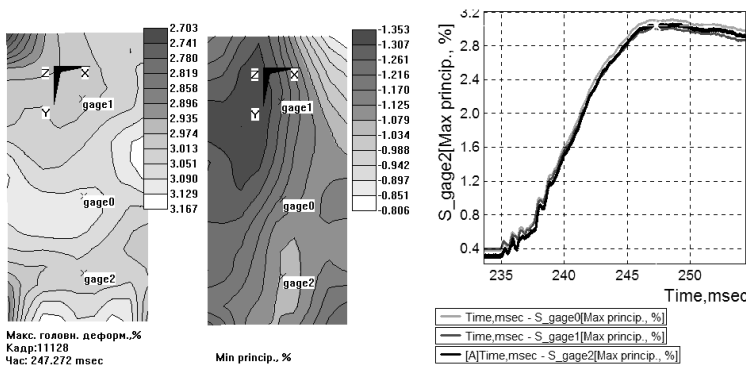


Рис. 7. Типова кінетика деформування нержавіючої сталі 12X17 при ДНП, у базі нульового кадру

Для даної сталі було встановлено, що міцність практично не змінюється після ДНП. Проте ДНП має сильний вплив на характеристики пластичності сталі. В даній роботі оцінювався вплив ДНП на початок «шийкоутворення» і на загальну пластичність сталі 12X17. Момент початку «шийкоутворення» оцінювався як класичним методом – визначався максимумом на діаграмі видовження-зусилля, так і специфічним методом кореляції цифрових зображень, який використовує все поле деформацій.



Рис. 8. Порівняння процесу статичного деформування, для обох процесів встановлено однакову базу – базу нульового кадру після ДНП: а – поля деформацій при статичному деформуванні; б – поля деформацій при статичному деформуванні після ДНП

Між значеннями, отриманими різними методами, було встановлено чітку відповідність, що засвідчило ефективність використання інформації по полю деформацій. На рис. 9а наведено залежність початку «шийкоутворення» від локальної руйнівної деформації, даний графік явно свідчить про затримку процесу утворення шийки, викликаної дією ДНП.

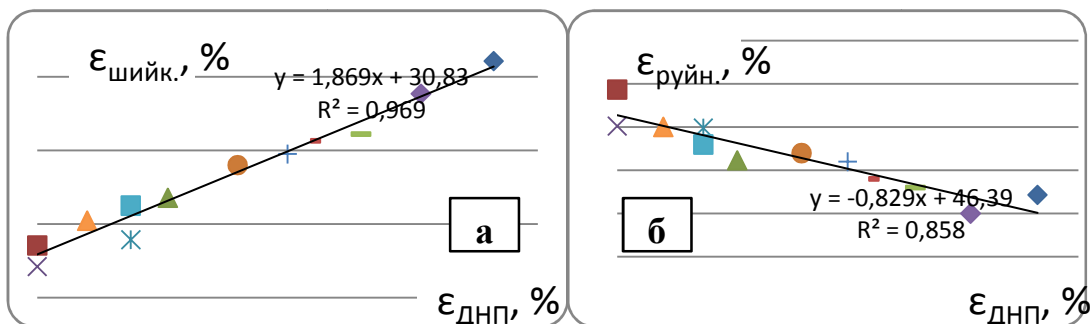


Рис. 9: а – залежність початку «шийкоутворення» у відсотках до локальної руйнівної деформації від величини деформації, отриманої внаслідок ДНП (різниця між початковим і кінцевим значеннями), в порівнянні зі статикою; б – залежність руйнівної деформації по віртуальній базі 2 мм від величини деформації, отриманої внаслідок ДНП (різниця між початковим і кінцевим значеннями), в порівнянні зі статикою

Попередні випробування продемонстрували значну чутливість ефектів викликаних ДНП до часу, що пройшов з моменту його реалізації. З метою початкової оцінки цього ефекту, ДНП був реалізований на 3-х парах зразків з витримкою 0-7 днів та 3 місяці. Парам зразків була надана одна й та сама деформація перед ДНП, удар був нанесений зусиллям у межах 123...147 кН.

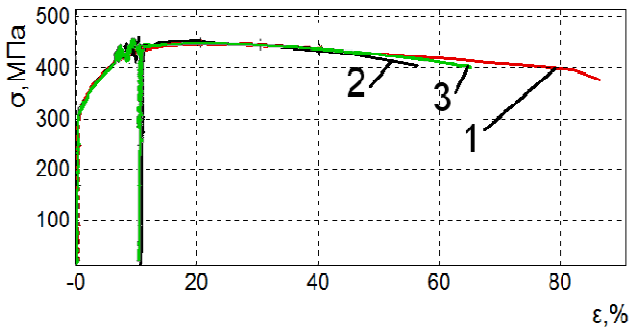


Рис. 10. Типова картина впливу ДНП на міцність та пластичність нержавіючої сталі в короткотривалому інтервалі часу витримки після ДНП: 1-статика, 2-після ДНП витримка 1 тиждень, 3-після ДНП витримка 3 місяці

режимах навантаження та оцінок коефіцієнтів запасу міцності.

Аналіз поля деформацій показує, що після витримки поле деформацій сталі 12Х17 значно більш однорідне в порівнянні із полем без витримки, але це не призводить до покращення механічних властивостей матеріалу, оскільки внаслідок релаксації позитивні якості дисипативної структури втрачаються, а пошкодженість чи дефекти отримані в результаті ДНП не зникають. В той же час, матеріал після релаксаційних процесів все ще має затримку «шийкоутворення». Таке явище можливо в випадку збільшення однорідності механічних властивостей матеріалу після ДНП. Для підтвердження цього факту було додатково проведено контроль якості структурного стану поверхні досліджуваних зразків. Оцінку структурного стану проводили з використанням відомого LM-методу, розробленого в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. Слід відмітити, що більшим значенням коефіцієнта  $m$  відповідає низький рівень розсіювання характеристик твердості, і, відповідно, краща структурна організація матеріалу. На основі цих даних було проведено порівняння поля залишкової деформації після ДНП з розподілом коефіцієнта гомогенності (рис. 11).

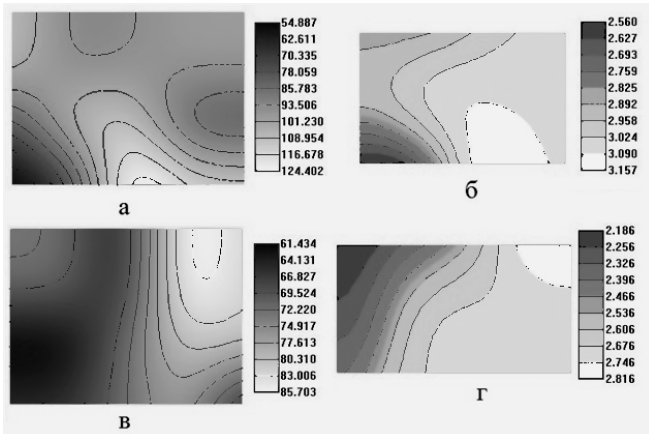


Рис. 11. Поля залишкової поздовжньої деформації і коефіцієнта гомогенності  $m$  (деформація відносно кадру, що відповідає моменту ввімкнення камери): а, б – зразок №3 (коефіцієнт гомогенності і поле деформацій, відповідно); в, г – зразок №4 (коефіцієнт гомогенності і поле деформацій)

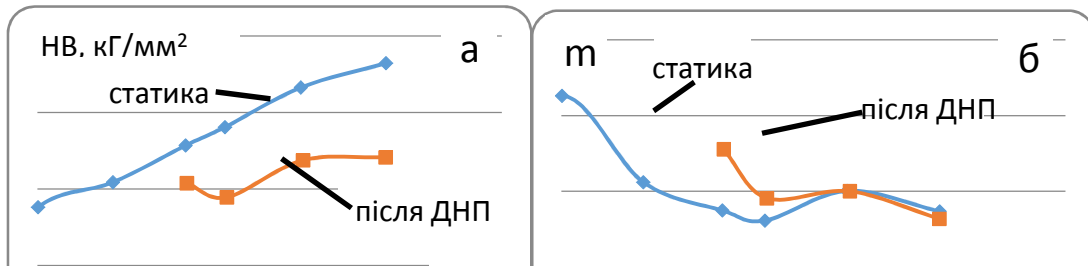


Рис. 12. Розподіл твердості та коефіцієнта гомогенності  $m$  в залежності від залишкової деформації: а – розподіл твердості по всій робочій ділянці зразка; б – розподіл коефіцієнта гомогенності по всій робочій ділянці зразка

З рис. 11 можна відмітити якісну подібність поля залишкової деформації і коефіцієнта гомогенності  $m$ . Це може свідчити про те, що деформаційна анізотропія є наслідком структурної неоднорідності матеріалу. Крім того, проводився аналіз розподілу твердості та коефіцієнта гомогенності  $m$  в залежності від залишкової деформації. З рис. 12 видно суттєве падіння твердості після реалізації ДНП в порівнянні зі статикою, особливо при більших значеннях деформації.

Випробування високоміцної корпусної сталі проводили в два етапи, на першому етапі шість зразків із досліджуваної сталі піддавали впливу ДНП різноманітної інтенсивності при заданих рівнях пружних деформацій. На другому етапі, на зразки, випробовані при складному режимі навантаження (статичний розтяг – ДНП), включаючи і один у вихідному стані наносили однаковий концентратор, а потім на ударному копрі PSW-30 оцінювали ударну в'язкість сталі в залежності від рівня залишкової деформації після імпульсного введення енергії у матеріал.

На рис.14, для прикладу, представлені типові криві деформування високоміцної сталі при статичному розтязі та після імпульсного введення енергії. Аналіз отриманих експериментальних даних свідчить про суттєвий вплив ДНП на збільшення загальної пластичності сталі. Слід звернути увагу на той факт, що при деяких режимах імпульсного введення енергії у матеріал зразка фіксувалася залишкова деформація стиску.

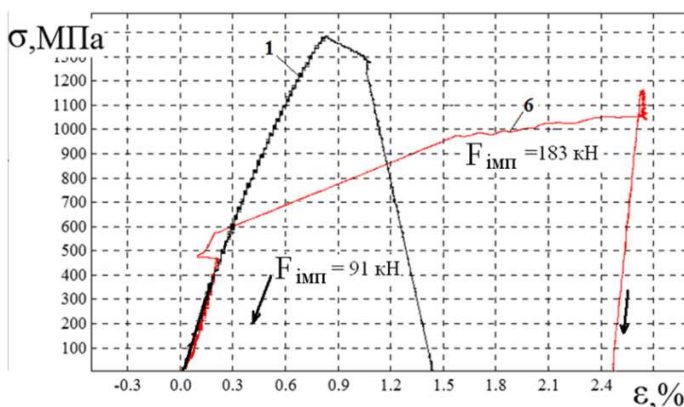


Рис. 14. Діаграми деформування сталі: 1 – статичний розтяг; крива 6 – після імпульсного введення енергії при заданих інтенсивності та статичному рівні деформації

Це може свідчити тільки про те, що при імпульсному введенні енергії утворюється дисипативна структура. Слід відмітити, що спостерігається значна



неоднорідність поля залишкової деформації на робочій частині зразків після імпульсного введення енергії у матеріал (рис.15). Даний ефект можна пояснити складним режимом технологічної обробки при виготовленні даної сталі, що забезпечує градієнтальність механічних властивостей по товщині вихідної плити, з якої виготовлялись зразки.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити однозначний висновок про те, що при контрольованих ДНП пластичність досліджуваної сталі варіюється в широких межах (може збільшуватись більш ніж в 2,5 рази) і, як результат, в даних досліджах в достатньо широких межах ( $\approx 14,5\%$ ) зафіксовано зміну ударної в'язкості в порівнянні з недеформованим станом матеріалу.

Таким чином, високоміцна корпусна сталь під дією ДНП проявляє значну схильність до пластифікації, імовірно, за рахунок структурних перетворень.

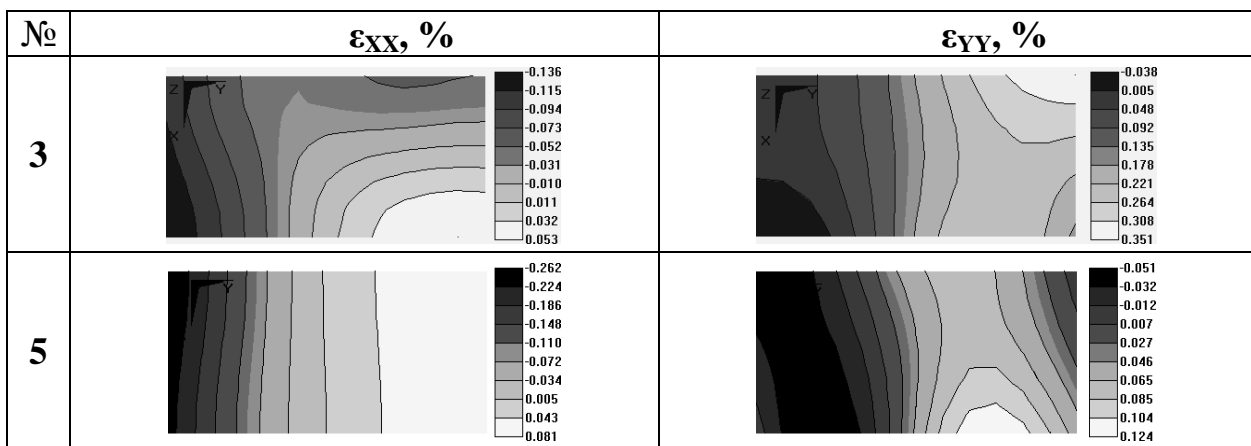


Рис. 15. Поля залишкової деформації після імпульсного введення енергії у високоміцну сталь. Напрямок розтягу – вісь у; 3,4,5 – номери випробуваних зразків

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням у якому розв'язано актуальну та важливу наукову задачу оцінки поля деформацій металів різних класів при та після ударно-коливального навантаження («динамічний незрівноважений процес») та зроблено попередню оцінку взаємозв'язку між полем деформацій та структурним станом матеріалу.

Найбільш важливі науково-практичні результати та висновки:

1. Проведено аналіз відомих методів оцінки поля деформацій матеріалів в процесі різних режимів навантаження та встановлено оптимальний з точки зору практичного використання – метод кореляції цифрових зображень.
2. Розроблено програмний комплекс для аналізу поля деформацій методом кореляції цифрових зображень, який було обладнано камерами Phantom v711, Casio Exilim Pro EX-F1, Canon EOS 5D.
3. Вперше встановлено основні закономірності кінетики поля деформацій матеріалів, що володіють схильністю до неоднорідного процесу деформування (алюмінієві сплави Д16 і 2024-T3) та з монотонним процесом деформування (нержавіюча сталь 12X17). Для алюмінієвих сплавів в процесі реалізації ДНП виявлено три характерні режими кінетики поля деформацій:

- збільшення площі смуги неоднорідної деформації із зміною її орієнтації на  $\sim 90^\circ$ ;
- розрив смуги локалізованої деформації на дві частини, кожна з яких рухається в протилежних напрямках;
- розрив смуги локалізованої деформації на дві частини з подальшою їх взаємодією та утворенням нової смуги.

4. Виявлено, що закономірності кінетики поля деформацій нержавіючої сталі 12X17 при ДНП не суттєво відрізняються від кінетики поля деформацій даної сталі при статичному розтягу. Встановлено рух найбільш інтенсивно zdeформованої частини поля деформацій сталі 12X17 до центру зразка після ДНП – появу яскраво вираженої кінетики в процесі деформування при складному режимі навантаження. Показано типову кінетику поля деформацій сталі 12X17 та наявність «хвилі», що рухається по зразку із швидкістю 0,3-0,7 м/с.

5. На зразках із алюмінієвого сплаву Д16 проведена попередня оцінка взаємозв'язку структурного стану сплаву на основі ТЕМ структур матеріалу та поля деформацій на поверхні зразку. Виявлено, що на ділянках зразка з найбільш інтенсивною деформацією тонко-смугова дисипативна структура в сплаві розвивається найбільше. На менш zdeформованих ділянках зразка спостерігається неповністю сформована тонко-смугова дисипативна структура. Таким чином експериментально підтверджено, що створення тонко-смугової дисипативної структури в алюмінієвих сплавах при ДНП сприяє їх пластифікації.

6. Виявлено, що ДНП призводить до зменшення пластичності нержавіючої сталі на 15-35%, та до затримки «шийкоутворення» на 30% відносно руйнівної деформації. В результаті реалізації ДНП відбувається пластифікація алюмінієвих сплавів при подальшому деформуванні. Так, при подальшому статичному деформуванні відбувається затримка процесу «шийкоутворення» у сплаві Д16 на 8-15% та зростає величина локальної деформації у точках, де відбувається руйнування зразка, на 3-10% у сплаві 2024-T3.

7. Виявлено вплив релаксаційних процесів на подальше деформування сталі 12X17 після ДНП. Їх вплив призводить до зміни кінетики деформування та до значного падіння пластичності на 20-30%. При довготривалій витримці лише відмічається падіння пластичності на 15-35%.

8. В результаті проведених досліджень виявлена наявність двох стадій процесу низької і високої швидкості, що, імовірно, відповідають за формування і розвиток дисипативної структури в матеріалах. Середня швидкість деформування на першій стадії процесу становить, відповідно, 100-300%/с для алюмінієвих сплавів Д16 і 2024-T3 та 100-200%/с для нержавіючої сталі 12X17. На другій стадії, де, імовірно, відбувається розповсюдження утвореної дисипативної структури по об'єму досліджуваного зразка, відмічається різке збільшення швидкості деформування в локальних зонах до 5000-6000%/с для алюмінієвих сплавів Д16 і 2024-T3, та до 600-1000%/с для нержавіючої сталі 12X17. Встановлено, що частота коливального навантаження, яка реалізується при ударно – коливальному режимі навантаження матеріалів, лежить в діапазоні 1-2 кГц.

9. Встановлено, що високоміцна корпусна сталь під дією ДНП проявляє значну схильність до пластифікації за рахунок структурних перетворень, так її пластичність зростає у 2,5 рази. Виявлено можливість збільшення ударної в'язкості високоміцної корпусної сталі за рахунок ДНП.

**ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Методика виявлення змін структурного стану пластичних матеріалів в процесі раптових змін в режимі навантаження / М. Г. Чаусов, А. П. Пилипенко, М. М. Бондар, В. М. Параца, В. Б. Березін // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2008. – № 3. – С. 7 – 14.
2. Чаусов Н. Г. Особенности деформирования материалов в упругой области при динамических неравновесных процессах / Н. Г. Чаусов, В. Б. Березин, М. М. Бондар // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2009. – № 3. – С. 24 – 27.
3. Самоорганізація структури листового алюмінієвого сплаву при динамічних незрівноважених процесах / М. Г. Чаусов, О. Е. Засимчук, В. Б. Березін, К. М. Порохнюк // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2009. – № 4. – С. 67 – 73.
4. Березін В. Б. Дослідження поля деформації плоскої поверхні зразків матеріалів методом кореляції цифрових зображень. (Статичне навантаження) / В. Б. Березін, М. Г. Чаусов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2011. – № 2. – С. 15 – 20.
5. Influence of Combined Loading on Microstructure and Properties of Aluminum Alloy 2024-T3 / E. Zasimchuk, L. Markashova, O. Baskova, T. Turchak, N. Chausov, V. Hutsaylyuk, V. Berezin // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – V. 22. – P. 3421 – 3429. – DOI : 10.1007/s11665-013-0630-z.
6. Strength analysis of mechanical systems at dynamic non-equilibrium processes / V. Hutsaylyuk, M. Chausov, V. Berezin, A. Pylypenko // Engineering Failure Analysis. – 2013. – V. 35. – P. 636 – 644. – DOI : 10.1016/j.engfailanal.2013.06.005.
7. Влияние импульсного ввода энергии и высокой температуры на пластификацию алюминиевого сплава Д16 / Н. Г. Чаусов, А. П. Пилипенко, В. Б. Березин, Е. М. Волянская, В. В. Ключков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 4. – С. 143 – 156.
8. Влияние вида напряженного состояния на деформирование нержавеющей стали при импульсных подгрузках / Н. Г. Чаусов, А. П. Пилипенко, В. Б. Березин, В. Н. Параца // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – № 39. – С. 208 – 211.
9. Березін В. Б. Оптичний комплекс для безконтактного дослідження поля деформації плоскої поверхні методом кореляції цифрових зображень / В. Б. Березін, М. Г. Чаусов М., Й. Й. Лучко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2011. – Т. 41. – С. 30 – 39.
10. Чаусов Н. Г. Эволюция поля деформации на поверхности листовой нержавеющей стали при динамических неравновесных процессах / Н. Г. Чаусов, В. Б. Березин // Вісник Національного технічного університету України "Київський Політехнічний Інститут".серія: Машинобудування. – 2011. – № 63. – С. 253 – 257.
11. Чаусов Н. Г. Влияние динамических неравновесных процессов на механические свойства высокопрочной стали / Н. Г. Чаусов, В. О. Хитрик, В. Б. Березин // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та

конструкцій: збірник наукових праць / [ред. Лучко Й.Й.] – Львів: Каменяр, 2012. – Т. 9. – С. 271 – 279.

12. Патент України № 91389 Спосіб реалізації надпластичного стану матеріалу у процесі деформування / Чаусов М. Г., Пилипенко А. П., Параца В. М., Березін В. Б. / Заявлено 25.06.2008; Опубліковано 26.07.2010. – Бюл. №14.

13. Чаусов Н. Г. Эволюция поля деформации на поверхности листовой нержавеющей стали при динамических неравновесных процессах / Н. Г. Чаусов, В. Б. Березин // "Прогресивна техніка і технологія – 2011" : XII міжнар. наук.-практ. конф., 20–24 черв. 2011 р., м. Севастополь : тези доп. – К., 2011. – С. 20.

14. Chausov M. Evolution of the deformation field on the surface of sheet plastic materials at dynamic nonequilibrium processes / M. Chausov, V. Berezin, A. Pylypenko // "New Trends in Fatigue and Fracture" : 13<sup>th</sup> int'l. sci. conf., 13–16 may 2013 yr., Moscow, Russia : conf. proc. – M., 2013. – P. 72 – 79.

15. Influence of pre-combined loading on mechanical properties and fracture mechanism of aluminum alloy 2024-T3 / V. Hutsaylyuk, M. Chausov, L. Śnieżek, J. Torzewski, T. Słezak, A. Pylypenko, V. Berezin // Integrity, reliability and failure : 4<sup>th</sup> int'l. sci. conf., 23–27 june 2013 yr., Funchal, Portugal : conf. proc. – Funchal, 2013. – P. 229 – 231.

16. Structural modifications of the aluminum alloy in conditions of additional shock impulse load / V. Hutsaylyuk, M. Chausov, L. Śnieżek, A. Pylypenko, T. Słezak, V. Berezin // Materials structure and micromechanics of fracture : 7<sup>th</sup> int'l. sci. conf., 1–3 july 2013 yr., Brno, Czech Republic : conf. proc. – Brno, 2013. – P. 141.

17. Influence of additional force impulse at the monotonic load on the deformation of 2024-T3 aluminum alloy / V. Hutsaylyuk, L. Śnieżek, J. Torzewski, M. Chausov, V. Berezin. // Defensive technologies : 5<sup>th</sup> int'l. sci. conf., 18–19 sept. 2012 yr., Belgrade, Serbia : conf. proc. – Belgrade, 2012. – P. 648 – 654.

18. Influence of dissipative structures formed by impulsed loads on the processes of deformation and fracture / V. Hutsaylyuk, M. Chausov, V. Berezin, A. Pylypenko, K. Volyanska // Key Engineering Materials. – 2014. – V.577. – P. 573 – 576. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.577-578.273.

## АНОТАЦІЯ

**Березін В.Б. Вплив ударно-коливального навантаження на кінетику поля деформацій та механічні властивості металів. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 2014.

З використанням власного розробленого програмного комплексу на основі методу кореляції цифрових зображень, який оснащався високошвидкісною камерою Phantom v711, встановлені основні закономірності кінетики поля деформацій металів різних класів: алюмінієвих сплавів Д16 і 2024-T3, нержавіючої сталі 12X17 та високоміцної корпусної сталі, при ударно-коливальному навантаженні «динамічний незрівноважений процес (ДНП)» і оцінений вплив різкої зміни кінетики поля деформацій при ДНП на зміну кінетики поля деформацій та механічних властивостей металів при подальшому статичному і ударному навантаженні. Показано, що реалізація ДНП в металах, в першу чергу, впливає на зміну пластичності при подальшому деформуванні. Причому цей

вплив для різних металів неоднозначний. Так, зокрема, пластичні властивості алюмінієвих сплавів після реалізації ДНП при повторному статичному розтягу значно покращуються. Це відноситься як до затримки «шийкоутворення» в сплавах до 15 %, так і до підвищення загальної пластичності до 10%. Як показали спеціально проведенні метало-фізичні дослідження методом трансмісійної-електронної мікроскопії даний ефект напряму пов'язаний з утворенням при ДНП в об'ємі матеріалу тонко-смугової дисипативної структури. Пластичність нержавіючої сталі 12Х17 після ДНП при повторному статичному розтягу значно погіршується ~ на 15...35%. Виявлений значний вплив релаксаційних процесів після ДНП, в залежності від часу витримки, що практично у всіх випадках призводить до падіння пластичності до 35%. На зразку із сплаву Д16 встановлений безпосередній зв'язок між полем деформацій на поверхні зразка і утвореною дисипативною структурою. Показано, що після ДНП пластичність високоміцної корпусної сталі збільшується ~в 2,5 рази. Також виявлена можливість збільшення ударної в'язкості високоміцної корпусної сталі за рахунок ДНП.

**Ключові слова:** динамічний незрівноважений процес, метод кореляції цифрових зображень, поле деформацій, дисипативна структура, процеси деформування.

## АННОТАЦІЯ

**Березин В.Б. Влияние ударно-колебательного нагружения на кинетику поля деформаций и механические свойства металлов. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 –механика деформируемого твердого тела. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, г. Тернополь, 2014.

Диссертация посвящена установлению основных закономерностей кинетики поля деформации металлов разных классов: алюминиевые сплавы Д16, 2024 - Т3, нержавеющая сталь 12Х17 и высокопрочная корпусная сталь, в процессе и после ударно-колебательного режима нагружения («динамический неравновесный процесс»), и связи поля деформации с механическими свойствами и структурой металлов. Неравновесное состояние материала в механических системах связано с резким обменом энергии между отдельными элементами системы. При таких процессах формируется существенно неоднородное поле деформации на поверхности образца материала или элемента конструкции, связанное с образованием в объеме тонко-полосовой диссипативной структуры, плотность которой меньше плотности основного материала. В настоящей работе для оценки кинетики поля деформации для исследуемых режимов нагружения используется собственный разработанный программный комплекс на основе метода корреляции цифровых изображений, который оснащался современной высокоскоростной камерой Phantom v711. Для каждого из исследуемых материалов выявлены характерные режимы поля деформаций в процессе реализации ДНП: увеличение площади полосы неоднородной деформации со

сменой ориентации ее фронта на  $\sim 90^0$ ; разрыв полосы неоднородной деформации на две полосы, движущиеся в противоположных направлениях; разрыв полосы неоднородной деформации на две с их последующим взаимодействием. Показано, что за счет резкого изменения кинетики поля деформации металлов при ДНП при последующем статическом и ударном нагружении их механические свойства могут существенно изменяться по сравнению со стандартным статическим растяжением. В первую очередь, это сказывается на пластических свойствах металлов. Так, в частности, процесс «шейкообразования» в сплаве Д16 задерживается на 8-15% и увеличивается величина локальной максимальной пластической деформации в сплаве 2024-T3 до 10%. При этом уменьшения прочности у сплава 2024-T3 после ДНП не отмечается, а в сплаве Д16 выявлено незначительное уменьшение прочности, на 10-30 МПа. Кроме того, было показано, что для алюминиевого сплава Д16 существует непосредственная связь между его полем деформации и структурным состоянием материала. Установлено монотонное поведение поля деформации нержавеющей стали 12Х17 как при статическом деформировании, так и при деформировании после ДНП. Поле деформации у данного вида материала при ДНП не характеризуется явно выраженными характерными видами деформирования, хотя и обладает особенностями. В отличие от алюминиевых сплавов пластичность нержавеющей стали 12Х17 после ДНП существенно уменьшается – на 15-35%, в тоже время задерживается процесс «шейкообразования» на 30% относительно деформации разрушения. В процессе исследований установлено существенное влияние релаксационных процессов на изменение механических свойств нержавеющей стали 12Х17 при последующем статическом растяжении. При временной выдержке после ДНП до 7 дней фиксируется значительное уменьшение пластичности на 20-30% а также раннее начало процесса шейкообразования. При временной выдержке 3 месяца отмечается уменьшение пластичности на 15-35%. Для нержавеющей стали был экспериментально установлен факт качественного подобия полей деформации и коэффициента гомогенности  $m$ , который определяется по методу ЛМ-твердости, разработанному в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. Установлено существенное различие в локальных скоростях деформирования металлов разных классов при ДНП, для алюминиевых сплавов она составляла 100-6000%/с, а для нержавеющей стали 100-1000%/с. В работе показано, что за счет реализации ДНП можно существенно повысить пластичность высокопрочной корпусной стали ~в 2,5 раза и регулировать ударную вязкость стали. Поле деформации данного материала характеризуется существенной неоднородностью вызванной как особенностями технологической обработки так и воздействием на него ДНП.

**Ключевые слова:** динамический неравновесный процесс, метод корреляции цифровых изображений, поле деформации, диссипативная структура, процессы деформирования.

#### ANNOTATION

**Berezin V.B. The influence of impact-oscillatory loading regime on strain field kinetics and mechanical properties of metals. – Manuscript.**

Dissertation for the candidate degree in engineering in speciality 01.02.04 – Mechanics of deformable solids. – Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2014.

Thesis is devoted to the establishment of the basic laws of kinetics of the strain field of different classes of materials: aluminum alloys D16, 2024-T3, stainless steel 12H17 and high-strength cladding steel, during and after the specific impact-oscillatory mode of loading ("dynamic nonequilibrium process"), and to the determination of the dependencies between strain field, mechanical properties and structure of the material. In such processes, essentially inhomogeneous strain field is being formed on the surface of a sample of material or structural element associated with the formation of thin-strip dissipative structure in the bulk of the material, the density of which is less than the density of the base material. Herein we use own designed program complex, based on digital image correlation method to evaluate the kinetics of the deformation field for the test loading conditions equipped with modern high-speed camera Phantom v711 ( frame rate up to 1.4 million fps). For each of the tested materials the characteristic modes of deformation fields during and after the DNP were revealed. It is shown that due to the dramatic changes of the kinetics of the deformation field of materials at the DNP in the subsequent static and impact loading of materials, their mechanical properties can vary significantly compared with the conventional static tension. First of all, this affects the properties of the plastic materials. In particular, the process of necking in alloy D16 is delayed by 8-15 % and increases the maximum value of the local plastic deformation of the alloy 2024-T3 by 10%. Unlike aluminum alloys, stainless steel plasticity after DNP is significantly reduced - by 15-35%, at the same time the process is of necking is delayed by 30% relative to the strain at fracture point. During the study we found a significant effect of relaxation processes on the mechanical properties of stainless steel 12H17 during subsequent static tension. It is also shown that by implementing the DNP we can significantly improve the ductility of high-strength cladding steel– up to 2.5 times and adjust the impact toughness of steel.

**Keywords:** dynamical nonequilibrium process, digital image correlation method, strain field, dissipative structure, deformation processes.

