

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

На правах рукопису

Березін Валентин Борисович

УДК 539.381

**В п л и в   у д а р н о   –   к о л и в а л ь н о г о  
н а в а н т а ж е н н я   н а   к і н е т и к у   п о л я  
д е ф о р м а ц і й   т а   м е х а н і ч н і   в л а с т и в о с т і  
м е т а л і в**

Спеціальність 01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Науковий керівник:  
Чаусов Микола Георгійович,  
доктор технічних наук, професор

Київ - 2014

## Зміст

<b>Зміст .....</b>	<b>2</b>
<b>Перелік умовних скорочень .....</b>	<b>5</b>
<b>Вступ .....</b>	<b>6</b>
<b>Розділ 1. Стан проблеми та основні методи для дослідження поля деформації матеріалів .....</b>	<b>12</b>
1.1. Аналіз сучасних методів безконтактного дослідження неоднорідного поля деформації матеріалів при навантаженні .....	13
1.1.1. Метод фотоеластичності/пластичності .....	15
1.1.2. Метод геометричної муар-інтерферометрії .....	16
1.1.3. Муар інтерферометрія .....	16
1.1.4. Метод TV-голографії (ширографія, ESPI) .....	17
1.1.5. Метод термоеластичного аналізу напружень .....	18
1.1.6. Метод кореляції цифрових зображень .....	19
1.1.7. Порівняння методів дослідження поля деформації .....	20
1.1.8. Висновки .....	21
1.2. Оцінка кінетики поля деформації сталей .....	22
1.3. Оцінка кінетики поля деформації алюмінієвих сплавів .....	25
1.4. Оцінка кінетики поля деформації матеріалів при динамічному навантаженні .....	28
1.5. Кінетика деформування матеріалів при складних режимах навантаження .....	31
1.6. Висновки .....	34
<b>Розділ 2. Програмний комплекс для дослідження поля деформації методом кореляції цифрових зображень .....</b>	<b>35</b>
2.1. Основні принципи побудови систем для дослідження поля деформації методом кореляції цифрових зображень .....	35

2.2. Програмне забезпечення для реалізації методу кореляції цифрових зображень .....	39
2.3. Оцінка точності роботи програмного пакету для аналізу поля деформації методом кореляції цифрових зображень .....	45
2.4. Програмний пакет для аналізу поля деформації методом кореляції цифрових зображень .....	48
2.5. Висновки.....	56
<b>Розділ 3. Методики випробувань і зразки для досліджень .....</b>	<b>58</b>
3.1. Установка для проведення експериментів та її приборне забезпечення .....	58
3.2. Програмний пакет для виконання тензометричних вимірювань.....	61
3.3. Зразки та матеріали для досліджень .....	65
3.4. Висновки.....	69
<b>Розділ 4. Еволюція поля деформації на поверхні листових алюмінієвих сплавів Д16 та 2024-Т3 при різних режимах навантаження..</b>	<b>70</b>
4.1. Кінетика поля деформації на поверхні листових алюмінієвих сплавів Д16 та 2024-Т3 при статичному розтягу .....	71
4.2. Кінетика поля деформації алюмінієвих сплавів 2024-Т3 та Д16 при ДНП.....	73
4.3. Кінетика поля деформації та механічна поведінка алюмінієвих сплавів Д16 та 2024-Т3 після ДНП.....	82
4.4. Оцінка механічних параметрів, при яких реалізується ДНП в алюмінієвих сплавах .....	90
4.5. Висновки.....	92
<b>Розділ 5. Еволюція поля деформації на плоскій поверхні сталей при різних режимах навантаження.....</b>	<b>94</b>
5.1. Кінетика поля деформації нержавіючої сталі 12Х17 при статичному розтягу .....	94
5.2. Кінетика поля деформації нержавіючої сталі 12Х17 при ДНП .....	98

5.3. Кінетика поля деформації нержавіючої сталі 12Х17 після ДНП ..	103
5.4. Контроль якості структурного стану нержавіючої сталі після складного режиму навантаження (статичний розтяг – ДНП) .....	112
5.5. Дослідження поля деформації високоміцної корпусної сталі після ДНП.....	116
5.6. Висновки.....	122
<b>Загальні висновки.....</b>	<b>124</b>
<b>Література.....</b>	<b>127</b>
<b>Додатки.....</b>	<b>156</b>

## Перелік умовних скорочень

Скорочення, термін, позначення	Пояснення
ДНП	Динамічний незрівноважений процес
рх, пікс.	Pixel, піксель
MCE	Метод скінченних елементів
НДС	Напружено-деформований стан
TEM	Трансмісійна електронна мікроскопія
LOESS	Locally weighted scatterplot smoothing, локальний метод найменших квадратів, що формулюється для частини деякої глобальної множини
FPU	Floating-point unit, математичний співпроцесор
SSE2	Streaming SIMD Extensions 2, набір інструкцій платформи x86, що дозволяє виконувати кілька однотипних інструкцій паралельно
CSpline	Circle splines, «колові сплайни» - дозволяють інтерполювати набір точок використовуючи дугу кола.

## Вступ

**Актуальність теми.** При імпульсному вводиті 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., Ерофєєва В.І., Кажаяєва 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., Іванової В.С., та ін. [1-17]. 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 теперішній час 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 [18-21].

Обмеженість експериментальних даних з урахування впливу ДНП на механічні характеристики при подальшому навантаженні призводить до того, що на даний момент відсутні чіткі рекомендації з урахування впливу даного процесу на зміну механічних властивостей матеріалу при наступному 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 деформації на поверхні листових пластичних матеріалів.

Як показано у працях Joshi S., Halim H., Mazière M., Boyce V., Bodelot L. [22-26], часто існує зв'язок між структурними параметрами матеріалу та його полем деформації, або між фізичним процесом і відповідним полем деформації. Ці аспекти можуть слугувати аргументом для вибору моделі механічної поведінки матеріалів чи оцінки фізичних механізмів процесу деформування. Причому поле деформації це джерело інформації, яке дозволяє виявити найдрібніші аспекти у механічній поведінці матеріалу.

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

властивостей металів різних класів під час і після ударно-коливального режиму навантаження («динамічний незрівноважений процес») та попередня оцінка взаємозв'язку поля деформації із структурним станом матеріалу.

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

1. Аналіз та узагальнення сучасних уявлень про закономірності кінетики поля деформації матеріалів при складних режимах навантаження, в першу чергу, з урахуванням динамічних навантажень.
2. Розробка програмного оптичного комплексу для дослідження поля деформації матеріалів методом кореляції цифрових зображень.
3. Виявлення основних закономірностей кінетики поля деформації матеріалів різних класів при і після реалізації ДНП.
4. Проведення попередньої оцінки взаємозв'язку структурного стану матеріалу та поля деформації на поверхні матеріалу після реалізації ДНП.
5. Дослідження впливу ДНП на механічну поведінку матеріалів при наступному статичному та ударному навантаженні.

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

**Предмет дослідження** – зміна кінетики поля деформації 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 і обчислювальної математики. Для експериментальних досліджень кінетики поля деформації матеріалів різних класів використовували методи тензометрії та оптичні методи. Експериментальна частина роботи проведена за допомогою новітньої високошвидкісної камери Phantom v711, що дало змогу отримати високу точність та достовірність результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В роботі теоретично і експериментально обґрунтовано доцільність використання метода кореляції



цифрових зображень для оцінки кінетики поля деформації металів при ударних навантаженнях. Вперше встановлено загальні закономірності кінетики поля деформації матеріалів різних класів: алюмінієвих сплавів Д16, 2024 –Т3, нержавіючої сталі 12Х17 та високоміцної корпусної сталі, при та після ударно-коливального навантаження («динамічний незрівноважений процес»). Проведено попередню оцінку взаємозв'язку структурного стану алюмінієвого сплаву Д16 та поля деформації на поверхні сплаву після реалізації ДНП.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено і апробовано програмний комплекс для оцінки поля деформації методом кореляції цифрових зображень. Отримано характерні зображення поля деформації 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 деформації за допомогою методу кореляції цифрових зображень;
- розробка програмного пакету для проведення тензометричних вимірювань із частотою до 100 кГц;
- розробка експериментальних методик дослідження поля деформації при складних режимах навантаження;
- експериментальне дослідження поля деформації і виявлення основних закономірностей його поведінки при складних режимах навантаження

алюмінієвих сплавів Д16, 2024-Т3, нержавіючої сталі 12Х17 та високоміцної корпусної сталі;

- експериментальне дослідження за допомогою безконтактного екстензометра механічної поведінки матеріалів при складних режимах навантаження на основі метода кореляції цифрових зображень.

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).

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

**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.

## **Розділ 1. Стан проблеми та основні методи для дослідження поля деформації матеріалів**

Розуміння закономірностей процесу деформування матеріалів при різноманітних типах навантаження важливе не лише з позицій фундаментальної науки, але і з точки зору прикладної науки для встановлення взаємозв'язку граничних деформацій з фізичними властивостями матеріалів, основу яких на якому фактично визначають експлуатаційну надійність конструкцій.

Численні експериментальні дослідження, проведені в даному напрямі, виявили, як мінімум, три основних фактори, які впливають на кінетику деформованого стану матеріалів в процесі навантаження [27-34]: фізичні властивості матеріалів, характер навантаження, вид напруженого стану.

Не зважаючи на важливість і необхідність дослідження деформованого стану матеріалів в процесі навантаження, експериментальних робіт присвячених даній проблемі, зокрема при динамічному навантаженні, явно недостатньо. Для розробки достовірних критеріїв руйнування матеріалів дуже важливими є експериментальні дослідження по виявленню основних відмінностей в деформаційному процесі конкретного матеріалу при статичному і динамічному видах навантаження. Це дає змогу зрозуміти, які параметри керують процесом руйнування матеріалу при різних швидкостях навантаження. Нажаль, таких порівняльних даних у літературі також надзвичайно мало. Наявність різноманітних концентраторів напружень на робочій поверхні зразків матеріалів (отвори, виточки, тріщини) суттєво змінюють напружений стан поблизу подібних концентраторів та вносить свої особливості у процес деформування матеріалів при різних швидкостях навантаження. В даному випадку процес деформування сильно локалізований в окремих зонах, тому оцінка кінетики деформованого стану матеріалу, особливо при динамічному навантаженні, сильно ускладнюється. Це питання потребує окремого розгляду.

Дослідження поля деформації проводяться для надзвичайно широкого кола матеріалів, сюди входять: сталі [35-44], алюмінієві сплави [45-53], титанові сплави [54-59], композиційні матеріали [60-73], будівельні матеріали [74-81], геоінженерні матеріали [82-90], біомедичні та біологічні матеріали [91-99], та інші матеріали [100-112].

Таке широке коло досліджень викликане інформативністю самого поля деформації відносно механічної поведінки матеріалу, особливо в умовах складного навантаження. Також є і екзотичні способи застосування цих методів, наприклад, оцінка пошкодженості та моменту появи тріщин у пластиковій вибухівці [113], оцінка контактної жорсткості [114] та інш. Таким чином роботи з дослідження поля деформації покривають дуже широкий спектр навантаження матеріалів та задач дослідження. Проте, абсолютна більшість цих робіт концентрується на дослідженні механічної поведінки матеріалу у статиці чи простій динаміці, або при циклічних навантаженнях. Основною метою даних робіт є верифікація існуючих моделей/гіпотез, визначення механічних характеристик матеріалів і т.д. В свою чергу, поле деформації при складних режимах навантаження розглядається значно рідше [115-118]. Це може бути викликано все ще не достатньою поширеністю методів дослідження поля деформації у випробувальних лабораторіях, або громіздкістю та складністю аналізу поля деформації при заздалегідь не відомій поведінці матеріалу при складних режимах навантаження.

### **1.1. Аналіз сучасних методів безконтактного дослідження неоднорідного поля деформації матеріалів при навантаженні**

Дослідження поля деформації на реальних об'єктах та під час експериментів на зразках, є однією з основних задач механіки матеріалів. Необхідність описання механічної поведінки нових класів матеріалів, що володіють суттєвою орто- чи анізотропією, є цілком очевидною, виходячи з потреб сучасного виробництва. Також важливим є питання поведінки типових

конструкційних матеріалів при складних умовах навантаження, або за наявності однієї чи багатьох тріщин. Всі ці фактори призвели до бурхливого розвитку методів дослідження поля деформації [119]. Поле деформації матеріалів можна вважати основним джерелом інформації для побудови моделей, що описують механічну поведінку матеріалів при складних умовах навантаження. Результати вимірювань кінетики поля деформацій та переміщень можна використати по різному:

- для перевірки граничних умов перед проведенням експерименту. В цьому випадку, ця інформація дозволяє експериментатору проконтролювати чи задовольняють граничні умови, що створюються системою захватів, граничним умовам, що задані методикою проведення експерименту;
- для контролю експерименту, використовуючи оптичні засоби реєстрації замість використання механічних тензометрів та екстензометрів. Тут, результати отримані гібридними техніками (що включають в себе симуляцію за методом скінчених елементів) грають роль вхідних сигналів, що порівнюються з безпосередньо виміряним полем переміщень, як це робиться для так званих псевдо-динамічних випробувань;
- для проведення експериментів на матеріалах чи конструкціях, для яких одно-точкового вимірювання деформації недостатньо для повного контролю експерименту, конкретно у випадках, коли просторова неоднорідність розподілу деформацій заздалегідь невідома;
- для проведення експерименту, при якому відсутній безпосередній контакт з досліджуваною поверхнею. Це надає корисні рішення для проведення експериментів в агресивних, гарячих, корозивних середовищах, чи для дуже м'яких тіл, для яких не можливо адаптувати тензометричний метод (полімери, деревина та папір, мінеральна вата);
- для визначення властивостей матеріалу чи для перевірки моделей механічної поведінки матеріалу.

На даний момент існує цілий ряд методів дослідження поля деформації [119]: фотоеластичність/пластичність, муар-інтерферометрія, голографія, спекл-методи та метод кореляції цифрових зображень.

### 1.1.1. Метод фотоеластичності/пластичності

Принцип роботи цих методів полягає в оптичній анізотропії твердих тіл під дією напружень [119-124]. При цьому ці тіла мають бути оптично прозорими, що розділяє цю групу методів ще на дві підгрупи. А саме: на підгрупу, що має справу з оптично прозорими твердими тілами, та підгрупу, що досліджує розподіл деформації за допомогою нанесення оптично прозорого покриття з віддзеркалюючою підложкою на оптично непрозорий матеріал. При цьому оптично прозорий матеріал має володіти властивістю подвійного заломлення світла. Для дослідження плоскої деформації такої оптично прозорої поверхні через неї пропускають плоско-поляризоване світло. При проходженні через поверхню з плоско-деформованим станом світло розділяється на дві хвилі, площини коливань яких співпадають з головними напрямками деформації.

Швидкості розповсюдження цих двох хвиль пропорційні величині відповідної головної деформації, що дає:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N}{t} \cdot \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{\lambda}{K}, \quad (1.1)$$

де  $N$  – порядок інтерференційної смуги,  $t$  – товщина покриття чи моделі,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона,  $\lambda$  – довжина хвилі освітлення,  $k$  – коефіцієнт оптичної чутливості по деформаціям.

Для аналізу розподілу деформації використовують інтерферограмми цих двох променів після проходження через полярископ.

**Ключові аспекти необхідні для роботи метода:** Лінійна та еластична робоча область, гомогенний ізотропний матеріал (фотоеластична поверхня/тіло), адіабатичні умови, механічні характеристики матеріалу слабо залежать від зміни температури, постійна температура оточуючого середовища.

**Переваги:** Прямий метод вимірювання, визначення напружень/деформацій, мобільність.

**Недоліки:** Необхідно джерело світла, робочий діапазон температур 0-60 °С, можливе насичення рівня напружень (втрата роздільної здатності), калібрування чи покриття необхідні для точних вимірювань.

### 1.1.2. Метод геометричної муар-інтерферометрії

Сутність даного методу полягає в спостереженні за зображенням, що формується при накладенні двох періодичних сіток [119, 125-127]. Однією з них є нанесена на поверхню досліджуваного плоского об'єкту сіткоподібна текстура, а друга – сітка через яку дивляться на досліджувану поверхню. При розгляданні зображення, що формується таким чином, утворюється так званий муар-візерунок. Для отримання поля переміщень зображень використовують двовимірне Фур'є-перетворення отриманого зображення.

**Переваги:** Визначення деформацій в реальному часі.

**Недоліки:** Чутливий до твердотільного переміщення, необхідність нанесення сіток, невисока точність.

### 1.1.3. Муар інтерферометрія

Даний метод подібний попередньому [119, 128-132], проте володіє значно вищою точністю вимірювань. З фізичної точки зору даний метод використовує два явища:

- Дифракцію когерентних хвиль, які падають на досліджувану поверхню з двох симетрично розташованих точок на решіткоподібну текстуру. При цьому текстура утворюється за допомогою механічного нанесення відповідних рисок на поверхню, чи накладанням адгезійного покриття, на яке нанесено ці риси.
- Інтерференцію цих двох хвиль, що відіграє роль другої решітки, з метою візуалізації деформації текстури в вигляді інтерферограми.



Тобто, формується унікальна базова інтерферограма, що характеризує наявну на зразку текстуру. При навантаженні поверхні дослідження решіткоподібна текстура деформується, і, при порівнянні нової інтерферограми з базовою, стає можливим визначення переміщень. При цьому інтерферограма являє собою набір областей чорного та білого кольору, що відповідає дискретизації ізоліній переміщення решіткоподібною текстурою.

**Переваги:** Визначення деформацій в реальному часі, висока чутливість, висока точність.

**Недоліки:** Чутливий до оточуючого середовища (лабораторний метод), чутливий до твердотілого переміщення, необхідність нанесення сіток, необхідна висока кваліфікація оператора, після нанесення сітки максимальна деформація, що фіксується – не змінна і для аналізу більших деформацій метод використовується в інкрементальному режимі (кроками розміром із максимальну деформацію задану сіткою).

#### 1.1.4. Метод TV-голографії (ширографія, ESPI)

Суть методу полягає в освітленні лазерним променем шорсткої досліджуваної поверхні [119, 133-137]. Зображення утворюють набір точкоподібних областей, які утворюються на сенсорі камери, внаслідок інтерференції монохроматичного променя при відбитті шорсткою поверхнею. Базове зображення утворюється при освітленні недеформованої поверхні, а порівняння зображень базової і деформованої поверхонь утворюють поле переміщень, яке є одновимірним для варіанту з одним променем. При дослідженні двовимірного поля деформації необхідне використання двох монохроматичних джерел світла, одне з яких називають базовим, а друге – додатковим. При цьому, на досліджуваній поверхні відповідні промені від базового і додаткового джерел світла інтерферують, а зображення являє собою інтерферограму цих двох променів. Плоска деформація призводить до зміни оптичного шляху відбитих променів, що, в свою чергу, змінює зображення деформованої поверхні. Сам кадр (інтерферограма) являє собою хаотично

розміщені плями - спекли. На основі аналізу цих двох кадрів, подібного до того який використовується у методі кореляції цифрових зображень, стає можливим обчислення відповідного поля переміщень. При цьому основним недоліком є чутливість системи реєстрації до вібрацій власного корпусу, та необхідність шорсткої, не дзеркальної поверхні. Системи на основі даного методу широко використовуються у виробництві під час контролю якості.

**Ключові аспекти необхідні для роботи метода:** диффузивна досліджувана поверхня (для дзеркальної поверхні необхідно покриття матовою фарбою), переміщення між кроками навантажування не перевищує розміру спекла.

**Переваги:** Визначення трьох компонент переміщення, висока чутливість, висока точність.

**Недоліки:** Чутливий до вібрацій, важко працювати з великими твердотільними переміщеннями, відсутня реалізація для великих деформацій.

### 1.1.5. Метод термоеластичного аналізу напружень

При деформації змінюється об'єм твердого тіла, до того ж при еластичних деформаціях та адіабатичному режимі деформування внаслідок гістерезису можливе визначення деформації, знаючи розподіл температур в початковому та деформованому станах. А саме – внаслідок внутрішнього тертя при деформації стиску відбувається зростання температури, а при розтягу – її зниження [119, 138-141]. Проте ці зміни настільки незначні при пружних деформаціях, що до появи інфрачервоних камер із роздільною здатністю в  $0,001^{\circ}\text{C}$  даний метод не мав практичної цінності, хоча основну ідею було закладено Зенером ще в 1930-х [142, 143]. При цьому зміна температури в тілі при деформації:

$$\Delta T = -T_0 \cdot \frac{\alpha}{\rho \cdot c_p} \cdot \Delta \sigma_{kk}, \quad (1.2)$$

де  $\Delta T$  – зміна температури при деформації,  $\alpha$  – коефіцієнт лінійного розширення,  $T_0$  – температура оточуючого середовища,  $\rho$  – густина тіла,  $c_p$  –

питома теплоємність при постійному тиску,  $\Delta\sigma_{kk}$  – зміна першого інваріанту тензора напружень відносно початкового стану.

Таким чином, використовуючи інфрачервону камеру високої роздільної здатності можливе вимірювання величини першого інваріанту тензора напружень.

**Ключові аспекти необхідні для роботи метода:** лінійне та еластичне навантаження, гомогенний ізотропний матеріал, адіабатичні умови, механічні характеристики матеріалу не залежать від малих змін температури, постійна температура оточуючого середовища.

**Переваги:** легкий аналіз на макрорівні, можна досліджувати зміну фаз у матеріалі, визначення напружень у матеріалі.

**Недоліки:** необхідне циклічне навантаження досліджуваного зразка, лінійне та еластичне навантаження.

### 1.1.6. Метод кореляції цифрових зображень

Основа даного методу полягає в безпосередньому порівнянні двох зображень – базового, що відповідає початковому стану, та зображення, що відповідає деформованому стану поверхні [119, 144-149]. Процес порівняння полягає в встановленні відповідності між двома областями на базовому та “здеформованому” зображенні, для яких можна задати функцію переміщень у вигляді афінного чи перспективного перетворень, або у вигляді квадратичної форми чи іншого виду. Набір таких областей формує поле переміщень, з якого отримується поле деформацій. При цьому процес встановлення відповідності між двома областями полягає в чисельній оптимізації критерію якості (міри відповідності між двома досліджуваними областями) функції переміщення.

**Переваги:** аналіз від нано- до макро (цілі будинки, секції мостів) рівня, дешевизна та портативність, простота експериментальної установки, вимірювання 3-х компонент переміщення поверхні, можливість дослідження об’ємних деформацій.

**Недоліки:** середня роздільна здатність по деформаціям (порівняно з лазерною інтерферометрією), необхідність у нанесенні текстури.

### 1.1.7. Порівняння методів дослідження поля деформації

З метою дослідження переваг та недоліків того чи іншого методу було проведено аналіз вищезазначених методів на основі даних, що містяться в науковій літературі [119, 144, 150-154] та на основі технічних характеристик комерційно доступних пакетів фірм: Dantec Dynamics A/S; Correlated Solutions, Inc.; LaVision GmbH, що працюють на основі цих методів. Це дозволило виключити вплив конкретної реалізації алгоритму обробки даних, що є суттєвим фактором при аналізі того чи іншого методу. Так як більшість методів вимірюють поле переміщень, то при порівнянні точності визначення деформації, якщо точність по деформації не було вказано, використовувались відповідні значення, отримані чисельним диференціюванням поля переміщень за допомогою центральної різниці із кроком рівним дискретності сітки поля переміщень.

В табл. 1 вказано переваги та недоліки методів, при цьому було використано такі позначення, з метою зручності подання інформації:

- ESPI (Electronic speckle pattern interferometry) – метод TV- голографії.
- GMI (Grating (moiré) interferometry) – муар-інтерферометрія.
- GM (Geometric moiré) - метод геометричної муар-інтерферометрії.
- RPE (Reflection photo-elasticity/plasticity) – методи фото-еластичності/пластичності з нанесенням прозорих покриттів.
- TPE (Transmission photo-elasticity/plasticity) – методи фото-еластичності/пластичності з використанням прозорих моделей.
- TSA (Thermoelastic stress analysis) - метод термоеластичного аналізу напружень.
- DIC (Digital image correlation) – метод кореляції цифрових зображень.

Таблиця 1.1.

## Порівняння методів дослідження поля деформації

Метод	Похибка <sup>1</sup>	Переваги		Недоліки			
		Динаміка <sup>2</sup>	Об'єм <sup>3</sup>	Освітлення <sup>4</sup>	Матеріал <sup>5</sup>	Вартість <sup>6</sup>	Текстура <sup>7</sup>
DIC	0,004-0,01 *	так	так	ні	ні	ні	так
ESPI	≤ 0,001	умовно **	ні	так	ні	ні	ні
GMI	0,001-0,005 *	так***	ні	так	ні	ні	так
GM	0,01-0,1	так	ні	ні	ні	ні	так
RPE	≤ 0,002	так	ні	ні	ні	ні	так
TPE	≤ 0,002	так	так	ні	так	ні	ні
TSA	0,001-0,01 *	теоретично	ні	ні	ні	так	ні

Примітки: \* – менше значення відповідає даним по лабораторним дослідження, більше — по комерційним пакетам при застосуванні в загальному випадку; \*\* – можливе дослідження вібрацій, але не процеси різкого переходу між еластичним та пластичним станами; \*\*\* – необхідна віброізоляція; 1 – типова абсолютна похибка визначення локальної деформації, %; 2 – можливість дослідження динамічних процесів; 3 – можливість дослідження розподілу деформації по об'єму матеріалу; 4 – необхідне когерентне освітлення; 5 – необхідний спеціальний матеріал досліджуваного зразка; 6 – дороге устаткування системи реєстрації; 7 – необхідність нанесення текстури/спеціальних покриттів.

## 1.1.8. Висновки

В якості основного висновку можна зазначити, що метод кореляції цифрових зображень володіє найбільш широкими можливостями при визначенні поля деформації 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 деформації 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, особливо при статичних дослідженнях, так як вартість

таких камер на даний момент невисока. Аналіз літературних джерел показує, що не зважаючи на широке застосування методу кореляції цифрових зображень для аналізу поля деформації в лабораторіях розвинутих країн світу, власні програмні комплекси для дослідження поля деформації методом кореляції цифрових зображень в Україні практично відсутні.

## **1.2. Оцінка кінетики поля деформації сталей**

Проаналізуємо наявні результати експериментальних досліджень по оцінці кінетики поля деформацій матеріалів при різних швидкостях деформації, що реалізуються при різних схемах навантаження.

Особливо цікаво звернути увагу на ті роботи, які присвячені оцінці поля деформації матеріалів, що володіють суттєво різною деформаційною поведінкою як при статичному, так і при динамічному навантаженні. Це, в першу чергу, відноситься к матеріалам, що не схильні до пластичної локалізації, наприклад, нержавіючі сталі, і, матеріалам, що проявляють специфічну деформаційну поведінку при навантаженні, наприклад, алюмінієві сплави. Тому, тільки відмітимо, що із аналізу робіт, що присвячені оцінці поля деформацій сталей різних класів при різних режимах навантаження [35-44] можна зробити такій основний висновок – поле деформації незамінний інструмент у дослідженні механічній поведінки матеріалу, однак це така характеристика, яка навіть для простих режимів навантаження важко інтерпретується. Основну увагу в даному параграфі приділимо оцінці поля деформації при навантаженні нержавіючих сталей.

У роботі [155] було оцінено коефіцієнти інтенсивності напружень при змішаному режимі навантаження нержавіючої сталі, на основі відповідних полів деформації, та показано, що використання цих даних призводить до збільшення надійності отриманих результатів, так як використовується усереднення по всьому полю, а не окремі перетурбовані значення в околі тріщини. Так, у роботі [156] розглянуто процес вирубки з нержавіючої сталі.

Показано, що поле деформації в околі штампа добре корелює з результатами МСЕ, отриманими з використанням відносно простої моделі пластичності. Інформація по полю деформації була використана [157] з метою оцінки густини мезотріщин на основі поля деформації. Проаналізувавши дані по еволюції поля деформації, автори дійшли таких висновків: що даний метод дозволяє визначати тріщини, довші ніж 150 мкм; що імовірнісна модель використана у їхній роботі добре описує отримані експериментальні результати. Роботу [158] було присвячено визначенню J-інтегралу на основі поля деформації. В ній показано, що така методика не чутлива до зони пластичності біля верхів'я тріщини, а отримані результати з високою точністю відповідають результатам, отриманим моделюванням з використанням МСЕ. Робота [159] була присвячена оцінці пошкодженості нержавіючої сталі. В результаті досліджень автори встановили модель накопичення пошкоджень, та прийшли до конкретних практичних результатів. Зокрема, виявлено, що найбільше зменшення товщини зразка та максимальна деформація знаходяться у різних місцях, що викликано трьохосністю НДС. В роботі [160] досліджено поведінку нержавіючої сталі при середніх швидкостях деформування (до 150000%/с) та показано кінетику поля швидкості деформації візуально аналогічну статичному полю деформації (відповідно масштабованому). Робота [161] цікава своїм висновком про складність аналізу та інтерпретації неоднорідного поля деформації нержавіючої сталі при випробуваннях на високоциклову втому за двохосного навантаження. Також, у цій роботі встановлено, що втомне руйнування нержавіючої сталі проходить із значним рівнем пластичної деформації 4-8%. Дослідженню зв'язаних полів деформації та температури присвячено роботу [26]. Авторами встановлено, що в невеликій зоні досліджуваного зразка при розтязі деякі точки поля осьової деформації мають від'ємне значення. Автори пояснюють це явище різною орієнтацією зерен матеріалу та звертаються до по-точкового аналізу значень деформації. Це лише підтверджує вищезгаданий висновок роботи [161] про складність інтерпретації

поля деформації як при складних, так і при простих режимах навантаження. Робота [162] присвячена встановленню коефіцієнтів моделі пошкодженості шляхом оптимізації результатів, отриманих МСЕ, відносно експериментальних даних про поле деформації. В ній автори з успіхом використали інформацію по полю деформації при різноманітних складних режимах деформування. В результаті аналіз МСЕ зміг достатньо точно встановити геометрію шийки при розтязі плоского зразка. Дослідження поведінки зварного шва з нержавіючої сталі утвореного лазером були проведені у роботі [25]. Так, за допомогою інформації про поле деформації було встановлено, що матеріал зруйнувався в Робота [163] була присвячена ідентифікації параметрів моделі деформування нержавіючої сталі з використанням експериментально отриманого поля деформації. В результаті оптимізації параметрів моделі авторам вдалося досягти високого ступеня подібності між полем деформації та результатами МСЕ. Слід відмітити, що досліджувався статичний режим навантаження, та навіть для нього стандартні моделі, як виявилось, вносять чималу похибку. Цікавим є висновок авторів про те, що прості моделі поведінки матеріалу підходять лише для тих експериментів, на основі яких вони були сформульовані. Як наслідок постає необхідність побудови більш складних моделей для пакетів МСЕ.

При аналізі літературних джерел виявлено, що чисельні значення поля деформації все ще слабе місце існуючих моделей поведінки матеріалу – для кожного експерименту проводиться підбір параметрів. В багатьох випадках при зміні режиму навантаження для задовільного описання результатів експериментів треба знову проводити оптимізації. Як і для інших сталей поле деформації нержавіючих сталей виявилось характеристикою, яка навіть для простих режимів навантаження важко інтерпретується. Однак не було виявлено суттєвих особливостей в самій кінетиці поля деформації нержавіючих сталей.



### 1.3. Оцінка кінетики поля деформації алюмінієвих сплавів

Як вже відмічалось, алюмінієві сплави проявляють специфічну деформаційну поведінку при навантаженні, Вони, як правило, володіють ярко вираженою кінетикою поля деформації, яка в даних сплавах пояснюється наявністю ефекту Портевіна – Ле Шательє [164, 165]. Цей ефект проявляється в скачках деформації та коливаннях напруження на діаграмі деформація-напруження. При статичному розтязі, зазвичай, по поверхні зразка проходить смуга неоднорідної деформації. Загальноприйнято, що існує три види таких смуг – А, В і С [166]. Смуга по типу А формується при відносно високих швидкостях деформування і низьких температурах, та характеризується плавним проходженням по зразку з незначним спадом напруження. Смуга по типу В рухається «стрибками» і зазвичай формується перед вже існуючою смугою неоднорідної деформації, стрибки у напруженнях не значні. Смуги по типу С формуються при низьких швидкостях чи високих температурах, утворюються у вигляді великих, випадкових смуг, та характеризуються значними стрибками у напруженнях. В роботі [167] за допомогою термографії та методу кореляції цифрових зображень було встановлено, що в залежності від зростання величини деформації зростає і стрибок у смузі деформування. Крім того, виявлено, що поява першого стрибка деформації залежить від швидкості деформування та проілюстровано кореляцію між температурним полем і полем деформації. Також було встановлено позитивні сторони цього ефекту. Наприклад, в роботі [168] встановлено, що ефект Портевіна – Ле Шательє призводить до гомогенізації поля деформації в випадках, коли зразок містить концентратор. В такому випадку деформованою буде уся смуга неоднорідної деформації, що поширюється від концентратора. Проте, в роботі [169] встановлено, що в випадку концентратора у формі V-вирізу не відбувається такого сильного гомогенізування поля деформації і основна деформація концентрується в околі вирізу. Факт, що деформація накопичується при проходженні смуги деформування вздовж зразка виявлено авторами [170]. В

цій же роботі вказано, що процес проходження смуги неоднорідного деформування у деякій мірі регулярний та координований хвильовий процес. Також показано, що падіння напружень на діаграмі напруження-деформація пов'язане з формуванням смуги неоднорідної деформації та вказано на відсутність взаємодії між кількома сформованими смугами деформації, що б призвела до зміни поля деформації чи її кінетики. Успішну спробу моделювання таких процесів методом МСЕ, з використанням специфічної моделі поведінки матеріалу, було здійснено у [24]. Так, було змодельовано процес накопичення атомів твердого розчину навколо дислокацій, що відповідає затримці деформації у зв'язку з попаданням дислокації у «перепону» та вивільненню дислокацій, як тільки накопичилась достатня кількість атомів твердого розчину. У роботі [171] встановлено, що розподіл деформації в середині смуги суттєво неоднорідний, а швидкість деформування всередині смуги знаходиться в інтервалі 10-100%/с, в той час як швидкість переміщення захватів не перевищувала  $1,5 \cdot 10^{-2}$  %/с. Автори відмічають важливість аналізу кінетики поля деформації для дослідження таких процесів деформування. Моделювання ефекту Портевіна – Ле Шательє за допомогою МСЕ здійснено в роботі [172], використовуючи інформацію по полю деформації та температури. Знову відзначається незамінність інформації по полю деформації при моделюванні цього ефекту. Крім того показано, що результати моделювання процесу деформування МСЕ дають задовільну якісну картину процесу деформування. Цікаве явище продемонстровано в роботі [173]. Там випробування проводились при температурі  $-50^{\circ}\text{C}$  та низькій швидкості деформування. Такі умови призвели до зникнення смуги неоднорідної деформації. Було показано, що при V-трьохточковому згині максимальна деформація до руйнування значно перевищує таку при статичному розтязі. Це явище в роботі пояснене тим, що «смуга зсуву», що виникає на заключних етапах деформування, спричиняє пошкодження, а не пошкодження «смуги зсуву». Також авторами висунуто припущення, що «смуги зсуву» викликані

неоднорідністю деформування на мікрорівні. В роботі [174] показано, що при жорсткому режимі навантаженні із швидкістю до 5%/с при підвищених швидкостях деформування на процес взаємодії між смугами типу А та В сильно впливає підвищення температури зразка при деформуванні. Також з-за температури зменшується і рівень деформації, необхідний для початку проходження цих смуг, що нівелює збільшення цього рівня, викликане підвищеною швидкістю деформування. Моделювання процесу тріщиноутворення при змішаному режимі проводилися у роботі [175]. Використовуючи інформацію по полю деформації автори визначали траєкторії тріщин і намагалися змоделювати процес, використовуючи МСЕ. В результаті вони отримали траєкторії тріщин, що суттєво відрізняються від експериментальних. Цілком імовірно, що така невідповідність – наслідок не врахування ефекту Портевіна-Ле Шательє і неоднорідної кінетики поля деформації. Робота [22] присвячена поведінці ультрамілкозернистого алюмінію (розмір зерна 1 мкм – 100 нм). В цій роботі встановлено суттєвий вплив розміру зерна на кінематику ефекту Портевіна-Ле Шательє. Також встановлено явище накладання двох смуг неоднорідної деформації з утворенням великого ядра, проте причини такого накладання не досліджені і ніяк не зв'язані з структурою. Детальне дослідження форми смуги неоднорідності проведено в роботі [176]. Було визначено видовження зразка при проходженні смуги, при різних швидкостях деформування. Встановлено, що деформація зсуву в такій смузі практично відсутня, оскільки напрям головної деформації практично паралельний осі зразка. Крім того, було встановлено, що мали місце усі три види смуг А,В,С з класичною поведінкою для кожної з них. В роботі [177] було виявлено, що смуга типу В являє собою стаціонарну послідовність дзвоноподібних у розподілі деформації смуг, крім того відсутнє проходження будь-якого фронту пластичної деформації по його довжині. Натомість, смуга типу А являє собою лавиноподібне накладання великої кількості маленьких фронтів, що рухаються на невелику відстань [178], а смуга С як і В стаціонарні

(в тому розумінні, що нема руху всередині смуги). В цій же роботі вказано, що швидкість деформування всередині смуги, щонайменше на три порядки вище за номінальну, а процес лавиноподібного накладання відбувається протягом кількох мілісекунд. В роботі [23] виявлено вплив релаксаційних ефектів на смуги типу В. Також, було виявлено, що смуги неоднорідності не формують місця для зародження «смуги зсуву». Та найважливішим моментом є те, що ефект Портевіна-Ле Шательє відповідає за зниження пластичності, так як у режимі з температурою  $-50^{\circ}\text{C}$  цей ефект не проявляється, а пластичність збільшується в порівнянні з кімнатною температурою, за якої він проявляється. Таким чином, однозначно встановлено, що деформування алюмінієвих сплавів при кімнатній температурі проходить з реалізацією ефекту Портевіна-Ле Шательє. Смуги неоднорідної деформації, що утворюються у цих сплавах, мають різні характеристики у часовій розгортці, а на швидкість, інтенсивність, та початок нуклеації (утворення) цих смуг сильно впливає як температура, так і швидкість деформування. Ефект Портевіна-Ле Шательє сильно впливає на пластичність (в негативну сторону). Проте він сам по собі не утворює пошкодженої, що вказує на наявність більш специфічних механізмів пошкодження даних матеріалів. Кінетика поля деформації алюмінієвих сплавів в цьому процесі з однієї сторони має простий характер – проходження/утворення смуг неоднорідної деформації, а з іншого боку виявлено явище взаємодії цих смуг при зміні мікроструктурних параметрів, зокрема, сильному зменшенні розміру зерна. Тому, як показують літературні дані, чисельне моделювання МСЕ деформування алюмінієвих сплавів з ефектом Портевіна-Ле Шательє мало задовільне для інженерних розрахунків.

#### **1.4. Оцінка кінетики поля деформації матеріалів при динамічному навантаженні**

В першу чергу, відмітимо, що кількість експериментальних робіт по оцінці поля деформації матеріалів різних класів при динамічному навантаженні

дуже обмежена. Це викликано кількома факторами: високою вартістю високошвидкісної камери (>15-20 тис. \$); значним збільшенням допуску на відповідність між експериментальними даними та симуляцією, тому багато аспектів поведінки залишається поза увагою; технічною складністю проведення таких експериментів, і, як наслідок, їх висока вартість. Однак, аналіз доступних джерел інформації показує, що механічна поведінка матеріалів при динамічному навантаженні може бути достовірно оцінена лише за допомогою поля деформації на всій робочій поверхні зразка. Так, в роботі [179] розглянуто механічну поведінку високоміцних сталей в широкому діапазоні швидкостей деформування. Швидкості деформування 0,1%/с – 1000%/с були реалізовані на сервогідравлічній випробувальній машині, 15000 %/с – 60000 %/с, використовуючи складений стержень Гопкінсона. Поле деформації визначалося з метою дослідження процесів локалізації деформації. Загалом процеси дифузивного та локалізованого шийкоутворення авторам вдалося відтворити з високою точністю. В роботі [180] було встановлено, що алюмінієвий сплав 1050 утворює кілька шийок при швидкості деформування 4500 %/с. Особливо автори відмітили незамінність інформації по полю деформації для аналізу поведінки композиційних матеріалів. Процес швидкісного деформування сталевих зразків з робочою зоною у вигляді двох дуг окружності розглядався у роботі [181]. Зразки деформувалися із швидкістю 100 %/с, в той же час локальна швидкість деформування сягала 1000 %/с. Показано, що спад напружень на діаграмі деформування пов'язаний із утворенням смуг Людерса, та запропоновано нову модель поведінки матеріалу. Також, поля деформації чітко показують спад інтенсивності процесу пластичного деформування по мірі того як матеріал підходить до шийкоутворення, що також безпосередньо пов'язано з інтенсивним утворенням смуг Людерса у початкові моменти пластичного деформування. В роботі [182] досліджувалася поведінка магнієвого сплаву AZ31 при швидкостях випробування до 100000%/с. Автори прийшли до основного висновку, що даний сплав практично не втрачає

пластичності в такому широкому діапазоні швидкостей, а також у нього практично відсутнє кінематичне зміцнення. Проблеми отримання інформації по полю деформації для методу кореляції цифрових зображень при випробуваннях і моделюваннях взаємодії ударної хвилі від вибуху та досліджуваного елемента дуже детально розглядалися у роботі [183]. Загалом, підхід авторів дозволив зробити систему практично не чутливою до коливань з високою амплітудою та ударної хвилі. В роботі [184] було розглянуто механічну поведінку ультрамілкозернистого алюмінію при крученні в широкому діапазоні швидкостей деформування від 0,1%/с до 50000%/с. З поля деформації було встановлено, що деформація дуже швидко локалізується, практично одразу ж після настання пластичного стану. Поведінку пластин різної кривизни із алюмінію 2024-T3 при взаємодії з ударним фронтом досліджували в роботі [185]. Було встановлено, що процес деформування пластини займає приблизно 1 мс, також було визначено панель, що володіє найкращими захисними якостями (з великою кривизною). Поля деформації пластин дозволили визначити конкретні місця утворення пластичної деформації та її характер. Експериментальні результати були співставлені з чисельними, виявилось, що вони в значній мірі корелюють між собою. В роботі [186] досліджувалась поведінка титанового сплаву Ti6Al4V при швидкостях деформування до 100000%/с. Встановлено, що при розтягу процес локалізації деформації настає дуже швидко, що повністю унеможливорює застосування усереднених вимірювань деформації. А використовуючи поле деформації, було з високою точністю встановлено параметри моделі поведінки матеріалу. Деформаційна поведінка листового алюмінієвого сплаву AA5182-O при електрогідравлічній формовці досліджувалась у роботі [187]. Було встановлено, що швидкість деформування сягає 66400%/с, а місце з максимальною швидкістю деформування було в більшості випадків розташоване поза вершиною «купола» (який утворюється при формовці). Визначено, що кожна із точок поля деформації володіє своєю унікальною історією деформування. В роботі [188]

визначався вплив швидкості деформування на здатність до формовки алюмінієвого сплаву AA5086. З використанням поля деформації було встановлено моменти локалізації деформації, та факт, що при високій швидкості деформування  $\sim 10000\%/c$  і до температури  $200-250^{\circ}C$  цей матеріал володіє зниженою здатністю до формовки.

### **1.5. Кінетика деформування матеріалів при складних режимах навантаження**

Відомо, що будь-яка зміна в історії навантаження конструкції призводить до зміни кінетики деформування матеріалів, і, відповідно, до зміни кінетики накопичення пошкоджень в матеріалі і їх граничних значень [189]. Особливу небезпеку для конструкцій можуть спричинити динамічні перевантаження, які накладаються на статичний режим навантаження матеріалу конструкцій, так як на думку багатьох дослідників вони істотно підвищують схильність матеріалів до окрихчування [190]. Причому, класичні уявлення про деформування матеріалів при розтягу з урахуванням впливу швидкості навантаження вказують на те, що превалює зростання опору деформуванню з зростанням швидкості деформації (за відсутності фазових перетворень), внаслідок зростання в'язкої складової опору і зменшення часу для розвитку процесу її релаксації [190]. Відповідно, до зміни пластичних властивостей матеріалів при зростанні швидкості деформації в літературі є суперечливі дані [190, 191].

Досліди з впливу імпульсних підвантажень на процеси деформування пластичних матеріалів, проведені на кафедрі механіки та опору матеріалів Національного університету біоресурсів та природокористування України, показали, що навіть в найпростішій статично невизначеній конструкції, коли одночасно навантажуються три паралельних елементи в різних структурних станах, у випадку миттєвого крихкого руйнування одного з елементів в матеріалі сусіднього елемента, який знаходиться в пружно – пластичному стані, за рахунок динамічного коливального перерозподілу навантаження в

механічній системі заданої жорсткості можуть протікати такі процеси деформування, які однозначно можна віднести до практично не досліджуваних [18, 21, 192-196]. Подальші металофізичні дослідження показали [18, 197, 198], що при такому режимі навантаження, який автори називають динамічний незрівноважений процес (ДНП), у матеріалах протікають самоорганізаційні процеси з утворенням нових просторових тонко-смугових структур, що пов'язані на різних масштабних рівнях, і які своїм виглядом нагадують адіабатичні смуги зсуву (рис. 1.1).

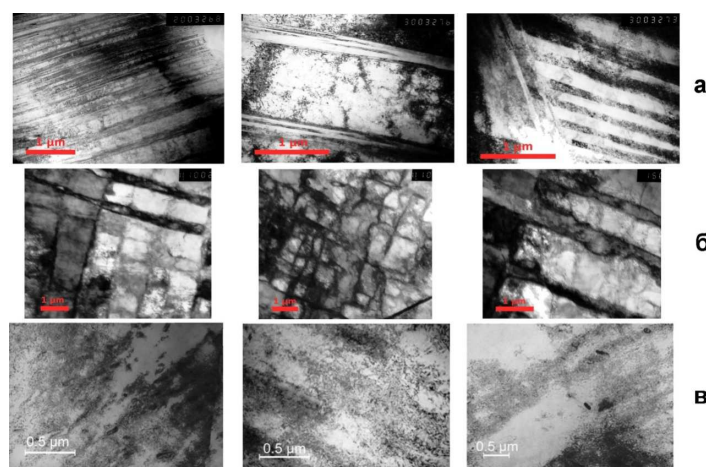


Рис. 1.1. ТЕМ структури матеріалів після реалізації ДНП; а – нержавіюча сталь [199], б – АРМКО залізо [199], в – алюмінієвий сплав 2024-Т3 [197]

Тут слід зазначити, що умови, за яких утворюються ці смуги, кардинально відрізняються від умов утворення адіабатичних смуг зсуву, зокрема, в даному випадку швидкості деформування матеріалів на порядки менше тих, при яких утворюються класичні адіабатичні смуги зсуву. Причому, як показують розрахунки, приріст температури в матеріалі, навіть якщо уся робота деформації піде на цей процес, не може перевищувати 200 К [199]. Це ще раз підтверджує, що дані процеси не пов'язані зі значним приростом температури. В процесі експериментів також встановлено, що по мірі збільшення імпульсів впливу на досліджуваний матеріал відбувається збільшення стрибка деформації при ДНП. Відповідно, як показали експерименти, при будь-якому заданому ступені деформації обов'язково існує



таке критичне значення імпульсу впливу  $F_{\text{імп.крит.}}$ , при якому зразок матеріалу в процесі ДНП практично розділяється на дві частини [21]. Виявлені структурні перетворення проходять виключно в режимі навантаження (так зване енергетичне структуроутворення), а після закінчення дії навантаження структура може піддаватися релаксаційним змінам. Незважаючи на подібні релаксаційні зміни структури, при наступному статичному розтязі кожний новий стан матеріалу після конкретного імпульсу впливу набуває нові механічні властивості. Причому суттєву роль тут може зіграти час витримки після імпульсу впливу, кількість імпульсів, а також і послідовність заданих конкретних величин імпульсів впливу. Попередні дослідження також показали, що для більшості досліджених матеріалів вплив одноразової раптової зміни в режимі навантаження на характеристики тріщиностійкості – негативний. Він значно зменшує питому роботу руйнування  $A_p$  і параметр тріщиностійкості  $K_{\lambda}$  [200]. Важливим є той факт, що при ДНП утворення нових дисипативних структур підкорюється своїм внутрішнім законам, які ще практично не вивчені, і на практиці виникає ситуація, коли ретельно підготована складними технологічними операціями структура матеріалу за десятки мілісекунд руйнується з утворенням нових гетерогенних структур, що сприяють різкій пластифікації матеріалу в багатьох випадках. Для матеріалів різних класів, випробуваних при кімнатній температурі, суттєвий приріст пластичності не призводить до значного падіння міцності [21, 201]. Проте, експериментально встановлений факт окрихчування дисипативних структур чи їх меж в алюмінієвому сплаві 2024-T3 після витримки в рідкому азоті, що призводить до квазікрихкого руйнування при повторному статичному розтязі [197], вимагає привернути увагу до розробки нових методів розрахунку відповідальних конструкцій, що мають враховувати такі види короткочасної зміни структури.

З іншої сторони, також очевидно, що за рахунок одноразових і багаторазових імпульсних підвантажень можна створити такі дисипативні структури в матеріалах, які після відповідних релаксаційних змін будуть

володіти новими особливими механічними властивостями, зокрема, може підвищуватись пластичність матеріалів, досягатись надпластичний стан, зникати структурна анізотропія та інш. [19, 194, 202]. Нажаль, на даний момент відомості про те, як себе поведуть матеріали при ДНП дуже обмежені. Це викликано багатьма факторами: сам характер динамічного процесу навантаження не відноситься до елементарних; з часом проходить релаксація дисипативних структур; відмічається швидкоплинність процесу зміни структури а також чутливість процесу до початкових умов.

У зв'язку з цим дослідження механічної поведінки матеріалів при ДНП виходять на перший план. Слід також звернути особливу увагу на той факт, що практично не досліджений фізичний механізм даного процесу.

## **1.6. Висновки**

1. Не зважаючи на широке застосування методу кореляції цифрових зображень для аналізу поля деформації матеріалів при різних режимах навантаження в лабораторіях розвинутих країн світу, власні програмні комплекси для дослідження поля деформації методом кореляції цифрових зображень в Україні практично відсутні.
2. Експериментальні дослідження механічної поведінки матеріалів при і після реалізації ДНП майже відсутні, в зв'язку з цим невідома фізична природа механізму деформації при ДНП, що пов'язана з короткочасною зміною структури матеріалів.
3. Практично відсутні роботи по оцінці кінетики поля деформації на поверхні листових пластичних матеріалів при і після реалізації ДНП.
4. Не виявленні взаємозв'язки структурного стану матеріалу та поля деформації на поверхні матеріалу після реалізації ДНП.
5. Не має експериментально обґрунтованих рекомендацій по оцінці впливу ДНП на зміну механічних властивостей матеріалів при наступному статичному розтягу чи іншому режиму навантаження.

## **Розділ 2. Програмний комплекс для дослідження поля деформації методом кореляції цифрових зображень**

### **2.1. Основні принципи побудови систем для дослідження поля деформації методом кореляції цифрових зображень**

Типова система для дослідження поля деформації методом кореляції цифрових зображень складається з однієї (для вимірювання плоскої деформації) чи двох цифрових (для вимірювання деформації на не плоских поверхнях) камер наукового/промислового рівня, так як точність вимірювань регламентується якістю сенсора камери та текстурою поверхні [144]. Також, в якості джерела світла використовують прожектори з однорідним освітленням, що забезпечує мінімальну похибку вимірювань, пов'язаних з неоднорідністю освітлення робочої зони. Проте, серцем оптичного комплексу є програмне забезпечення, що виконує кореляцію цифрових зображень.

При дослідженні плоского поля деформації необхідно пам'ятати, що такі вимірювання мають деякі обмеження [119, 144]:

1. Досліджувана поверхня може бути апроксимована площиною з достатньою точністю.
2. Досліджувана поверхня має бути паралельною площині сенсора цифрової камери.
3. Зразок, в процес деформування, залишається плоским.

Тут слід відмітити, що вимога плоскості досліджуваної поверхні часто задовольняється самою постановкою експерименту – дослідження складного поля деформації дуже часто проводять на зразках з плоскою геометрією.

При вимірюваннях, що використовують систему, що складається з двох цифрових камер єдиним обмеженням є збереження досліджуваних поверхонь у фокусі, зокрема, для цього використовують телецентричні лінзи [119].

Типовими областями застосування вимірювань плоского поля деформації є [119, 144]:

1. Статичний розтяг/стиск для дослідження орто- чи анізотропії матеріалу чи його поведінки при одновісному напруженому-деформованому стані. В таких дослідження безконтактні методи мають суттєву перевагу – вони не вимагають механічного впливу на досліджуваний зразок, а отже являють собою високоефективний інструмент для дослідження матеріалів з високою чутливістю до концентраторів напружень.
2. Статичний згин/кручення для дослідження поведінки композитних матеріалів, чи матеріалів, що мають суттєву ортотропію. Зокрема, випробування деревини чи слоїстих оболонок.
3. Динамічні режими навантаження. Такі типи випробувань реалізують переваги безконтактних вимірювань у повній мірі (безконтактні вимірювання – без інерційні, і відсутній ризик від'єднання чутливого елемента). Проте основною проблемою для цих типів випробувань є необхідність використання високошвидкісних камер, вартість яких стартує з позначки 20-40 тисяч \$.
4. Випробування при плоскому режимі навантаження. Цей тип випробувань є найбільш загальним – наприклад випробування матеріалів при двохосному навантаження (зразків у формі хреста) дозволяють оцінити модель поведінки матеріалу за 5-10 випробувань.
5. Вимірювання поля деформації за допомогою двох камер (отримання трьохвимірною поля переміщень) є найбільш універсальним, так як воно дозволяє отримати розподіл деформації на поверхнях практично будь-якої форми.

Також існують реалізації метода кореляції, що дозволяють дослідити розподіл деформації у об'ємі матеріалу, використовуючи ТЕМ – мікроскопію, МРТ-сканування, чи рентгенографічну макрографію [203-205]. На даний

момент, метод кореляції цифрових зображень є єдиним методом, що дозволяє це зробити.

Типовими областями застосування вимірювань трьохвимірного поля деформації є [119, 144]:

1. Дослідження деформації біологічних тканин безпосередньо на піддослідному об'єкті.
2. Дослідження процесів пробивання перешкоди балістичним снарядом за допомогою високошвидкісної камери.
3. Дослідження процесів деформування тривимірної конструкції, зокрема краш-тести, дроп-тести.

Розглянемо з яких етапів має складатися типовий експеримент з використанням метода кореляції цифрових зображень:

1. Типовий експеримент з дослідження поведінки матеріалу з використанням метода кореляції цифрових зображень розпочинається з нанесення текстури стохастичного характеру на досліджуваний зразок. Цей процес може бути виконаний за допомогою розпилення краски, нанесення літографічної текстури, або вручну. Слід врахувати, що нанесена текстура має бути міцно зв'язана з поверхнею досліджуваного матеріалу, для цього слід підвищити шорсткість досліджуваної поверхні, якщо вона полірована, та знежирити її. Також, нанесення текстури проводять безпосередньо перед випробуванням, щоб забезпечити максимальну еластичність нанесеної текстури.
2. Після нанесення текстури проводять калібрування оптичної системи. Для систем, що складаються з однієї камери, калібрування полягає у таруванні дисторсії оптичної системи, оскільки реальна оптична система має неспіввідповідності між лінзами, що призводить до утворення деформації дійсного зображення. Даний процес полягає у наступному: проводять зйомку одного чи декількох положень у просторі калібрувальної сітки утвореної елементами, що утворюють деяку прямолінійну сітку. При чому, калібрування одним зображенням потребує виготовлення високоточного

калібрувального маркеру, в той же час калібрування групою зображень маркерів не потребує такої високої точності, проте такий вид калібрування створює серйозні проблеми при калібруванні високошвидкісних камер. Калібрування системи з двох чи більше камер проводиться для встановлення проєктивної відповідності та для тарування індивідуальної дисторсії кожної з камер.

3. Наступним етапом є синхронізація камери та силовимірювального пристрою. Цей етап зазвичай виконується спеціалізованим програмним забезпеченням, яке синхронізує годинник камери та годинник АЦП на який поступають дані з динамометричної системи. Проте, все більшого поширення набувають системи з використанням камер професійного, а не наукового рівня, у зв'язку з меншою вартістю готового рішення у збиток точності та функціональності. Синхронізація таких систем викликає серйозні труднощі у зв'язку з двома причинними: неможливістю синхронізації з точністю краще ніж 1 секунда та відсутністю синхронізації за тригером. До цього можна додати, що точність запису часу зйомки до заголовку EXIF кадру становить 2-3 секунди, що суттєво знижує діапазон швидкостей при яких можливе використання камер такого типу.
4. Передостаннім етапом є власне проведення дослідження з деформування зразка матеріалу чи конструкції. Цей етап вимагає контролю фокусу камери на досліджуваній поверхні, що особливо актуально для систем, що значно деформуються.
5. Останнім етапом є обробка результатів. Тут можна відмітити, що цей етап може проводитись одночасно з проведенням дослідження, тобто «на льоту». Він включає в себе обробку даних по калібровці камер, та фазу, що являє собою обробку отриманих зображень програмним комплексом.

## 2.2. Програмне забезпечення для реалізації методу кореляції цифрових зображень

Для задач дослідження поставлених даною роботою достатньо визначити поле деформації плоскої поверхні. Також, це дозволяє використовувати лише одну камеру, що здешевшує систему. Саме тому система буде будуватись для аналізу плоского поля деформації.

В основі методу кореляції цифрових зображень, як вже відмічалось, лежить можливість порівняння двох областей цифрового зображення поверхні, що знаходяться в різних деформованих станах, одна з яких є точкою відліку, так званим базовим кадром та відповідає стану за якого відсутня будь-яка деформація поверхні, а друга - цифровому зображенню поверхні з конкретним полем деформації, що нас цікавить (рис. 2.1).

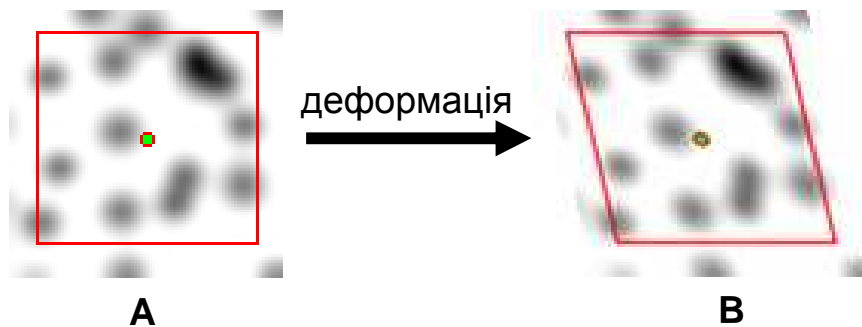


Рис. 2.1. Деформування невеликої ділянки базового кадру

Процес порівняння можна представити так: для невеликої ділянки базового зображення, деформований стан якої можна описати простою функцією переміщень, проводять підбір параметрів цієї функції переміщень. Підбір проводиться з метою оптимізації критерію відповідності двох ділянок і вже з отриманої функції переміщень можна відтворити поле деформації [147].

В якості функції переміщень широко застосовуються функції переміщень, що добре відомі з методу скінчених елементів [144].

Для даного методу, в основному, застосовують чорно-білі зображення, в яких числове значення відповідає певній градації сірого кольору, яке нормують

до діапазону 0,0-1,0, найчастіше 0,0 - відповідає абсолютно чорному, а 1,0 - абсолютно білому кольору.

На рис. 2.1 показано основну ідею побудови відповідностей між областями в базовому і деформованому кадрах. Для деякої ділянки базового кадру, яка являє собою набір чисельних значень інтенсивності кольору, вибирають критерій відповідності.

Загалом критерії відповідності діляться на дві групи [206]:

$$\text{квадратичне відхилення: } \sum \sum (A(x, y) - B(x^*, y^*))^2, \quad (2.1)$$

$$\text{крос-кореляція: } \frac{\sum \sum A(x, y) \cdot B(x^*, y^*)}{\sum \sum A(x, y) \cdot \sum \sum B(x^*, y^*)}, \quad (2.2)$$

де  $A(x, y)$  - значення інтенсивності в точці з множини базового кадру,  $B(x^*, y^*)$  - значення інтенсивності в точці з множини деформованої області.

Подвійна сума вказана для розуміння, що мова йде про двовимірні множини. Після вибору критерію цілком можливо провести його оптимізацію. При цьому сама задача оптимізації переважно нелінійна, хоча існують підходи з лінійною задачею оптимізації. Провівши оптимізацію можна відтворити поле переміщення і, відповідно, поле деформації. Також слід відмітити, що метод буде сходиться в деякому околі справжнього положення області, що відповідає базовій, як правило, радіус цього околу (радіус збіжності) становить 1-6 пікселів. Тобто при відхиленні центру мас zdeформованого елемента в цих межах, метод буде сходиться до дійсного положення деформованої області. Також існують обмеження на величину деформації, проте вони суттєво менші, метод може сходиться при величинах деформації до 15%, в залежності від розмірів базової області.

В якості критерію відповідності для розробленого комплексу обрано квадратичне відхилення [147], так як воно забезпечує найбільшу швидкість роботи, з деякими змінами, спрямованими на підвищення ефективності роботи комплексу. А саме:



$$Q = \sum \sum (A(x, y) - C \cdot B(x^*, y^*) - D)^2, \quad (2.3)$$

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.

Функцію переміщень для ізопараметричного чотирьохточкового елемента обрано у вигляді:

$$x^* = \frac{1}{4} \cdot X_0 \cdot (1-r) \cdot (1-s) + \frac{1}{4} \cdot X_1 \cdot (1+r) \cdot (1-s) + \frac{1}{4} \cdot X_2 \cdot (1+r) \cdot (1+s) + \frac{1}{4} \cdot X_3 \cdot (1-r) \cdot (1+s) = \frac{1}{4} \cdot (X_0 \cdot h_0 + X_1 \cdot h_1 + X_2 \cdot h_2 + X_3 \cdot h_3), \quad (2.4)$$

$$y^* = \frac{1}{4} \cdot Y_0 \cdot (1-r) \cdot (1-s) + \frac{1}{4} \cdot Y_1 \cdot (1+r) \cdot (1-s) + \frac{1}{4} \cdot Y_2 \cdot (1+r) \cdot (1+s) + \frac{1}{4} \cdot Y_3 \cdot (1-r) \cdot (1+s) = \frac{1}{4} \cdot (Y_0 \cdot h_0 + Y_1 \cdot h_1 + Y_2 \cdot h_2 + Y_3 \cdot h_3), \quad (2.5)$$

де  $r, s$  – локальні координати елемента;  $X_i, Y_i$  – координати відповідних вершин zdeформованого елемента.

Ця функція широко відома у методі скінчених елементів. Вона гарантує неперервність поля переміщень.

У методі цифрової кореляції зображень цікавою є ідея формування сітки елементів і побудови при цьому відповідної матриці жорсткості для цих елементів. Проте вона має недолік – необхідність достатньо трудомісткого в плані комп'ютерного часу обчислення цієї матриці. Натомість в даному комплексі було використано таку ж ідею об'єднання елементів у сітку, але матриця жорсткості була замінена своєю головною діагоналлю.

Тобто як і у методі скінчених елементів ми маємо глобальну сітку вершин (їх координат) на базовому зображенні та по-елементне представлення цієї сітки у вигляді коефіцієнта відповідності для кожного з її елементів. При чому

елемент являє собою множину точок на недеформованому зображенні плюс локальні координати вершин на деформованому зображенні.

Цілком зрозуміло, що функція деформації може приймати нецілочисельні значення. Тому для обчислення інтенсивності бажано застосовувати двовимірні інтерполяції високого порядку – бікубічну чи вищого порядку, сплайн функції третього чи вищих ступенів. Це зумовлено надзвичайно високим впливом інтерполяції на точність результатів.

На рис. 2.2 показано елемент та сітку з елементів на базовому кадрі, в даному комплексі форма елементів може бути не тільки прямокутною, а й будь-якою з множини чотирикутників. Така форма дозволяє моделювати достатньо складні границі, а отже розширює межі використання цього комплексу. Основна мета побудови сітки — усереднення градієнта коефіцієнта відповідності для вершини, що належить кільком елементам. Цим забезпечується неперервність переміщень в межах сітки і зменшується вплив шуму на результат.

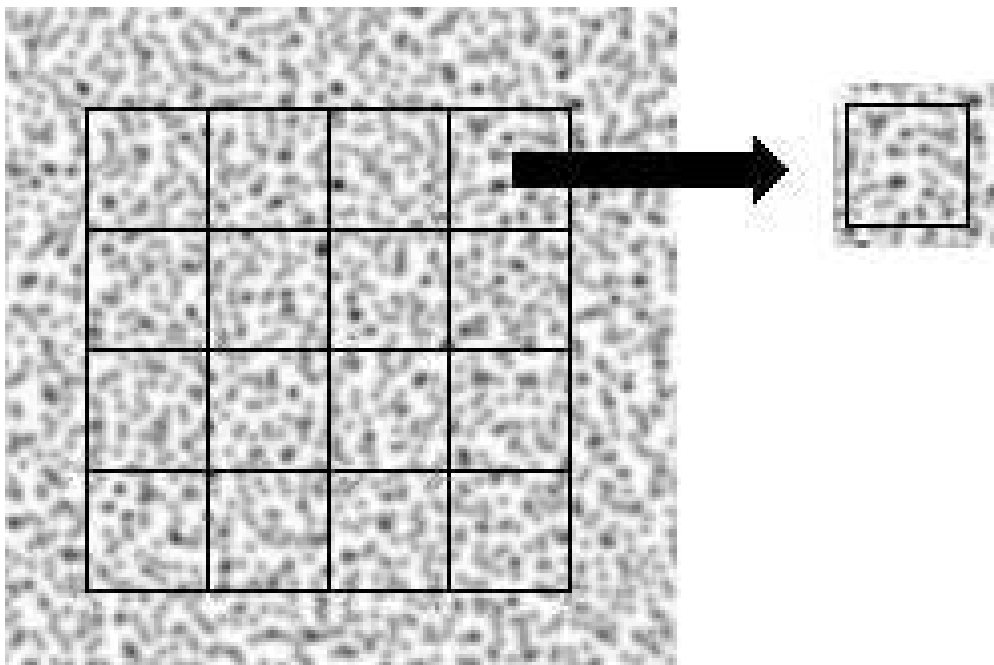


Рис. 2.2. Сітка елементів та елемент на базовому кадрі

Для вибору міри відповідності при оптимізації в даній роботі використовується алгоритм Левенберга-Марквардта [207]. Оскільки основою для даного алгоритму є якобіан коефіцієнту відповідності, то з метою покращення точності та швидкості роботи метода нами застосований підхід, оснований на розкладанні базового зображення у ряд Тейлора:

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

$$Q = \sum \sum \left( A(x, y) + \frac{\partial A(x, y)}{\partial x} \cdot (x^* - x) + \frac{\partial A(x, y)}{\partial y} \cdot (y^* - y) - C \cdot B(x^*, y^*) - D \right)^2. \quad (2.6)$$

Також вважаємо, що в градієнт коефіцієнта не входить частина від zdeформованої області  $B$ , тобто:

$$\frac{\partial Q}{\partial X_i} = \frac{\partial A(x, y)}{\partial x} \cdot h_i, \quad \frac{\partial Q}{\partial Y_i} = \frac{\partial A(x, y)}{\partial y} \cdot h_i, \quad \frac{\partial Q}{\partial C_0} = -B(x^*, y^*), \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial k} = -B(x^*, y^*) \cdot \varepsilon_x \cdot \varepsilon_y, \quad \frac{\partial Q}{\partial D} = -1.$$

Відповідний алгоритм оптимізації для елемента наступний:

1. Отримати базове і zdeформоване зображення.
2. Побудувати інтерполяції базового і zdeформованого зображень.
3. Побудувати якобіан  $J$ , його транспозицію  $J^T$  та матрицю жорсткості елемента  $J^T J$ .
4. Провести грубий пошук положення елемента на zdeформованому зображенні, використовуючи заданий користувачем радіус збіжності.
5. Провести оптимізацію параметрів, використовуючи метод Левенберга-Марквардта.

Другим етапом роботи комплексу є оптимізація параметрів з точки зору утворення поля елементами сітки. При цьому міра відповідності всієї сітки є сумою мір відповідності усіх елементів.

Нами розроблений наступний алгоритм роботи комплексу:

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

Для оцінки точності комплексу проводяться експерименти на синтетично згенерованих зображеннях різних полів деформації [146, 147]. Також були проведені експерименти з гумовим зразком, що дозволяє оцінити роботу комплексу в широкому діапазоні деформацій.

Методика генерування синтетичного зображення з довільно заданим полем деформації полягала в наступних положеннях:

1. Базове синтетичне зображення являє собою сукупність двовимірних кривих вигляду  $I_k(x, y) = A \cdot \exp(-(x - x_c)^2 \cdot S_x - (y - y_c)^2 \cdot S_y)$ , рівномірно розподілених в прямокутній області з розмірами синтетичного зображення. При цьому  $k=1..n$ , де  $n$  – кількість чорних плям на синтетичному зображенні.
2. Для кожного із пікселів базового синтетичного зображення з координатами  $(x_p, y_p)$  інтенсивність кольору визначається за формулою  $IPX = \sum_1^n I_k(x_p, y_p)$ .
3. Після визначення інтенсивності в пікселях проводиться нормування до діапазону 0.0-1.0, що відповідає абсолютно білому і абсолютно чорному кольорам. При цьому максимальна інтенсивність в пікселі приймається за 0.0, а мінімальна за 1.0.
4. Задається функція переміщення у формі  $x_d = x_b + u(x_b, y_b); y_d = y_b + v(x_b, y_b)$ , де  $x_d, y_d$  - координати точки у zdeформованому зображенні,  $x_b, y_b$  - координати точки у базовому зображенні,  $u(x_b, y_b), v(x_b, y_b)$  - відповідно горизонтальне і вертикальне переміщення точки відносно положення у базовому зображенні.

5. Для кожного із пікселів у здеформованому зображенні проводиться пошук відповідного йому положення у базовому зображенні з координатами  $x_{bi}$ ,  $y_{bi}$  інвертуванням функції переміщення методом Ньютона-Рафсона, з точністю визначення не гірше ніж  $10^{-6}$  пікселя по кожній із координат.
6. Обчислюється значення інтенсивності у пікселях здеформованого зображення за формулою 
$$IPX = \sum_1^n I_k(x_{bi}, y_{bi})$$
7. Для деформованого зображення проводиться нормування аналогічно п.п. 3.

При цьому забезпечується дуже висока якість деформованого зображення, так як не використовується інтерполяція, а використовується сукупність аналітично заданих функцій. А точність визначення відповідних положень пікселів при інвертуванні величною в  $10^{-6}$  пікселя по кожній з координат суттєво перевищує точність роботи методу кореляції цифрових зображень, що становить не менше  $10^{-4}$  пікселя.

### **2.3. Оцінка точності роботи програмного пакету для аналізу поля деформації методом кореляції цифрових зображень**

Основною задачею даної оцінки є перевірка загальновідомих оцінок точності роботи метода кореляції цифрових зображень за допомогою реєстрації простого зміщення зображення по горизонталі та вертикалі. Як відомо, тут головним обмежувачем точності буде метод інтерполяції, що використовується, густина плям на зображенні та наявний шум на зображенні [144].

Методика перевірки, зазвичай, полягає в наступному: базове синтетичне зображення зміщується на 0,05 пікселя, утворюючи таким чином здеформоване зображення, цю процедуру повторюють для послідовності в 10-40 кадрів, що представляє собою зміщення базового зображення по одній з координатних

осей на 2 пікселі [144]. Також існує альтернативний метод перевірки, що полягає в наступному [208]:

1. Утворюється серія зображень, що відповідають базовому зображенню, що послідовно зміщується з кроком в 1 піксель по відповідній координаті.
2. Шляхом зчитування з кроком в 10 пікселів по кожній з координат утворюються так звані “децимовані” зображення, переміщення на яких відповідають 0.1 пікселя, 0.2 пікселя, і т.д.

З метою перевірки впливу зміни в контрасті на точність визначення деформацій для зображень поверхні гумового зразка було проведено такий експеримент: спочатку визначалось поле деформації з формулою без врахування змін в контрасті поверхні з використанням елементу розміром 28x28 пікс., а потім визначалося поле переміщення з використанням змін у контрасті при розмірі елементу 28x28 пікс. Отримані результати порівнювались із отриманими без врахування змін у контрасті при розмірі елементу 30x30.

Результати із врахуванням змін у контрасті мали на 12% менше абсолютне максимальне відхилення та на 5% менше середнє відхилення. Це свідчить про доцільність використання інформації про зміну контрасту поверхні при деформуванні.

З рис. 2.3 чітко видно вплив виду інтерполяції на процес, а саме — перехід від білінійної до кубічної інтерполяції зменшить похибку визначення переміщення приблизно в два рази. В свою чергу похибка для групи кубічних інтерполяцій суттєво залежить від вибору коефіцієнтів поліноміального фільтра. Також, слід відмітити, що різниця в часі обчислення білінійної інтерполяції і базисної-сплайн інтерполяції також становить 3-4 рази (при використанні інструкцій FPU, при використанні інструкцій SSE2 різниця не перевищує 2 рази). Тобто, білінійну інтерполяцію доцільно використовувати при грубому пошуку, та на початкових ітераціях оптимізації коефіцієнта відповідності. Таке рішення дозволяє підвищити швидкість обчислень на 40-

200% без втрати точності визначення переміщень. А при використанні інтерполяції більш високого порядку доцільно використати підхід, що базується на поступовому збільшенні порядку інтерполяції, що також може заощадити 50-70% часу роботи системи.

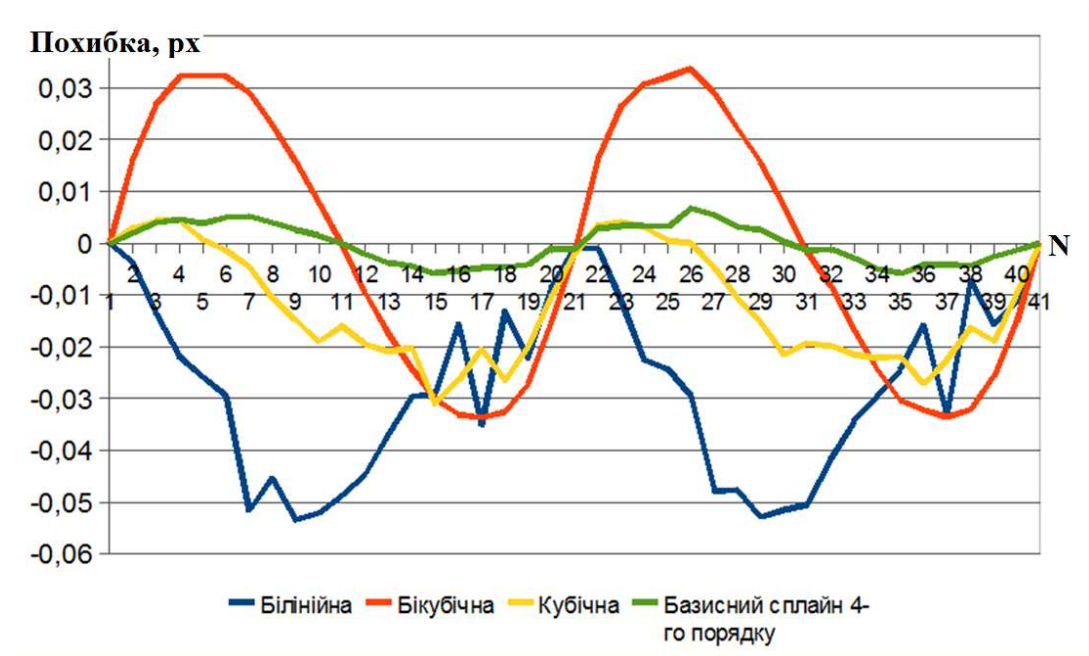


Рис. 2.3. Вплив виду інтерполяції на точність визначення субпіксельного переміщення (крок між зображеннями 0,05 пікселя). По осі ординат вказана похибка визначення положення у пікселях, по осі абсцис — номер зображення

В більшості програмних комплексів підтримується порядок сплайн-інтерполяції від 4 до 16 [150]. Фільтри з порядком від 8 надають можливість аналізувати зображення з текстурою, розмір елементів якої 1-2 пікселі, та надають максимальний захист від білого шуму, наявного в реальних зображеннях.

Результати на рис. 2.3 повністю відповідають Фур'є-образу ядра інтерполяційного фільтру [144], що й є основною метою перевірки. Також чітко видно, що найкращу якість забезпечують базисні-сплайн інтерполяції, чи інтерполяції на їх базі. При цьому, слід віддати перевагу 8 точковим фільтрам,

так як погрішність визначення переміщення при їх використанні становить менше ніж 0,002 пікселя.

На основі аналізу роботи програмного комплексу по синтетичним зображенням, вираз для похибки визначення деформації 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:

$$\Delta\varepsilon = \frac{500\text{пiкс} \cdot \rho}{k-1} + \frac{1}{2} \cdot \frac{0.03\text{пiкс}^{-2}}{\rho^2} + 0.67 \cdot Q + 0.083 \cdot Q^2 + \frac{4.88 \cdot 10^5 + 8.77 \cdot 10^5 \cdot Q^{0.67}}{n^4 \cdot K}, \quad (2.8)$$

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);  $\rho$  – середня 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  $K=1\text{пiкс}^4$ ).

Додаткова фільтрація отриманих результатів методом LOESS [209], дозволяє досягати значення максимальної похибки визначення деформації менше ніж 0,005% (а для великих елементів до 0,003%) при обробці зображень розміром 1000x1000 пікс. з використанням елементів розміром 30x30 пікс.

## **2.4. Програмний пакет для аналізу поля деформації методом кореляції цифрових зображень**

Розроблений пакет складається з трьох модулів – препроцесору, модуля розв'язку та постпроцесору. Модульну схему було обрано для зручності оновлення відповідних програм та забезпечення стандартизованого у межах



комплексу міжпрограмного інтерфейсу. Така схема забезпечує гнучкість при доданні нових можливостей у відповідні програми.

Загальний алгоритм роботи з комплексом полякає у таких кроках:

1. Створення області інтересу засобами препроцесора. Користувач на обраному базовому кадрі відео чи фото створює засобами малювання контуру області, що його цікавлять (рис. 2.4).

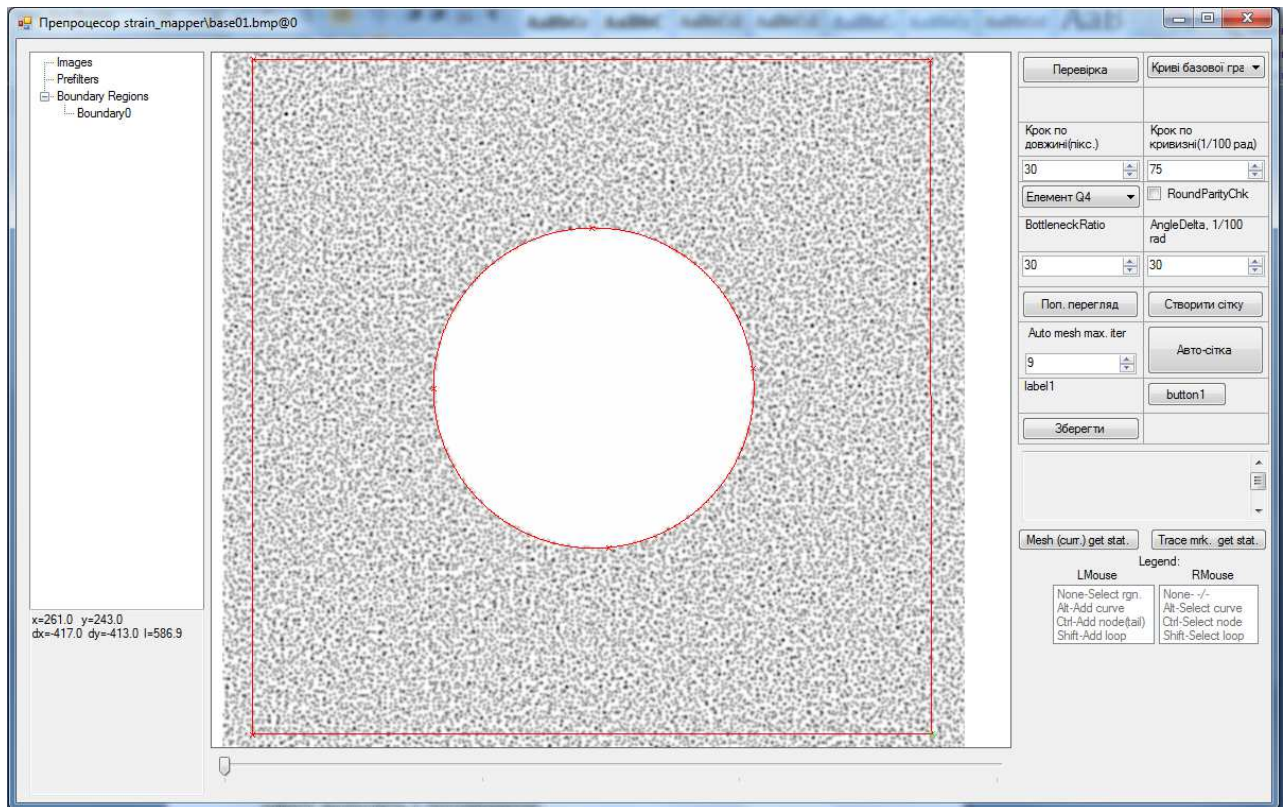


Рис. 2.4. Вікно програми препроцесору із введеним контуром

При цьому такі області можуть бути як зв'язаними так і незв'язаними. При побудові цих контурів можуть використовуватися як ламані так і кругові сплайни (CSpline) [210], чим забезпечується точне відтворення об'єктів типу коло/еліпс так і утворення більш складних криволінійних ліній. Створення контурів і введення ключових точок відбувається за допомогою «гарячих» клавіш та миші, що підвищує швидкість і зручність роботи. Також на цьому кроці користувач обирає трасувальні елементи, з яких буде починатись розв'язок (рис. 2.5).

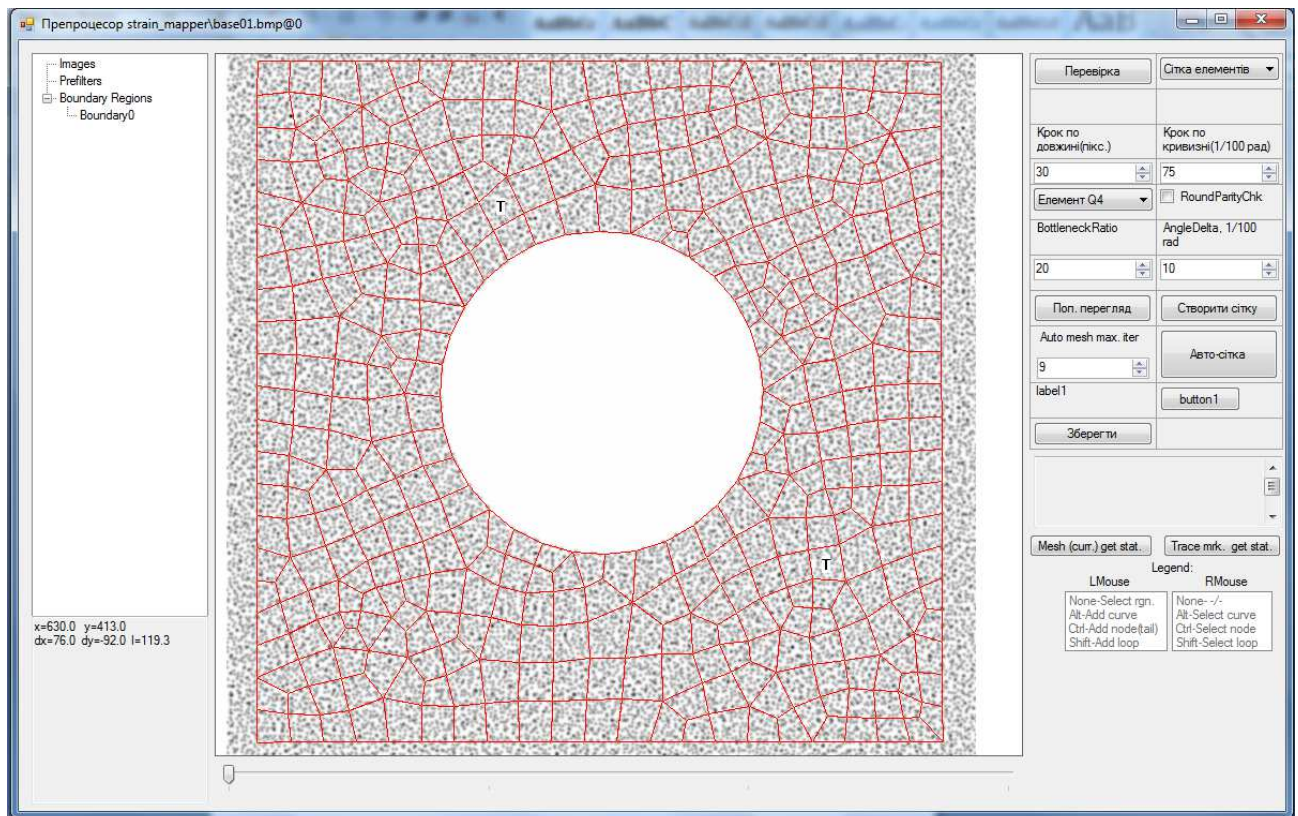


Рис. 2.5. Вікно програми препроцесору із сіткою елементів та вказаними трасувальними елементами (за якими буде проводитись грубий пошук)

Вони необхідні для оптимізації роботи пакету при великих переміщеннях, пошук елемента, який значно змістився, потребує багато часу. Тому після того як їхнє положення буде встановлено, будуть відомі приблизні координати їх сусідів, а потім сусідів їх сусідів, і.т.д.

2. Запуск модуля розв'язку. Процес розв'язку може відбуватися у двох режимах: у режимі обробки одразу усієї множини кадрів чи в режимі очікування зупинки користувачем, при якому модуль автоматично обробляє нові кадри, що надходять з камери (рис. 2.6). Перший режим призначений для роботи з готовими множинами фото чи відеоінформації після проведення відповідного експерименту, його слід використовувати при роботі з високошвидкісними камерами чи коли такий режим зручний для користувача. Другий режим призначається для обробки поля деформації у реальному часі – результат одразу надходить у постпроцесор.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
TRACE RES=0.001
AVE. ITER. TO SOLVE=7.2; AVE. IMG. CALLS=16.4
RESIDUAL=0.227
ZNCC: MIN=1.000 MAX=1.000 AVE=1.000
FRAME=10 FPS IACT/SOLVE1=20.833/25.000 ELSRCH=2000.0 ELPS=10923.1

TRACE RES=0.001
AVE. ITER. TO SOLVE=7.1; AVE. IMG. CALLS=16.2
RESIDUAL=0.234
ZNCC: MIN=1.000 MAX=1.000 AVE=1.000
FRAME=11 FPS IACT/SOLVE1=20.833/25.641 ELSRCH=1.$ ELPS=10923.1

TRACE RES=0.001
AVE. ITER. TO SOLVE=7.0; AVE=1.000 CALLS=16.1
RESIDUAL=0.238
ZNCC: MIN=1.000 MAX=1.000 AVE=1.000
FRAME=12 FPS IACT/SOLVE1=21.277/26.316 ELSRCH=1.$ ELPS=11210.5

TRACE RES=0.001
AVE. ITER. TO SOLVE=7.0; AVE. IMG. CALLS=16.0
RESIDUAL=0.244
ZNCC: MIN=1.000 MAX=1.000 AVE=1.000
FRAME=13 FPS IACT/SOLVE1=21.277/25.641 ELSRCH=2000.0 ELPS=11210.5

NEXT FRAME WAS NOT FOUND...STOPPING SOLUTION

```

Рис. 2.6. Виведення модуля розв’язку у консоль Windows (приклад для елемента 30x30 пікселів). 1 – поточна частота кадрів/с роботи модуля; 2 – кількість опрацьованих елементів за секунду; 3 – кількість трасувальних елементів за секунду

При цьому, слід відмітити, що сам модуль розв’язку генерує результати по розподілу переміщень на досліджуваній поверхні. Ці результати містять значний рівень шуму. Тому модуль обробки результатів містить у собі функції згладжування, метою роботи яких є зменшення шуму, в першу чергу, на похідних поля переміщень (деформаціях).

3. Обробка та візуалізація отриманих результатів у модулі постпроцесору. Цей процес можна здійснювати для послідовності у реальному часі, наприклад, для аналізу величини і місць концентрації деформації.

Багато випадків, коли самою схемою експерименту наперед задано вигляд функції переміщень для всієї досліджуваної області. Такі випадки зустрічаються при статичному розтягу, статичному згині, стиску тіла у формі диску. Тоді фільтрація результату проводиться дуже просто – мінімізується квадратичне відхилення між заданим виглядом функції та отриманими переміщеннями. Такий вид згладжування використовується для високоточного

визначення сталих матеріалу та зовнішнього навантаження, але область його використання для реальних конструкцій дуже вузька.

Крім того, функція згладжування може реалізується на основі фільтру НЧ. В такому випадку отримані результати переводять у Фур'є-простір (простір амплітуда-частота комплексних гармонік) за допомогою швидкого перетворення Фур'є [144, 206]. Після цього користувачем задається частота відсічки, що призводить до відкидання усіх частот, що вище заданої. Суттєвим недоліком такого методу пост-обробки результатів є те, що вхідні і вихідні дані представляються у вигляді суми гармонік, крім того це перетворення дуже погано пристосовано до обробки імпульсних сигналів (напр. функція Хевісайда). Тому основною областю використання даного типу фільтрації сигналів є обробка даних з припущенням, що вони утворені сукупністю синусоїд, але такий тип поля деформації/переміщення в механіці деформівного тіла зустрічається дуже рідко (мається на увазі миттєвий розподіл величини по поверхні, а не розгортка у часі, де гармонічні функції є одними із основних).

Більш загальним підходом до пост-обробки отриманих результатів є використання методу плаваючих найменших квадратів (LOESS) [209]. Цей метод полягає в тому, що для деякої області з отриманого поля, розміри якої залежать від обраного ступеня фільтрація, проводиться регресія за методом найменших квадратів, використовуючи деяку просту функцію переміщень/деформації. Це дозволяє використовувати неформалізований підхід до задачі згладжування поля переміщень/деформації, і тому, виявляти неоднорідності будь-якого розміру більшого ніж елемент кореляції.

Також застосовують підхід на основі фільтрації поля переміщень скінченими елементами [144]. В даному підході досліджувана ділянка розбивається на елементи, розміри яких більші, щонайменше в 2 рази ніж розміри базового елемента кореляції. Цей підхід дозволяє застосувати фізичні обмеження на поле деформації, використовуючи явний підхід, що дозволяє



підвищити фізичну точність результатів. Проте суттєвим недоліком даного методу є необхідність суттєвої гладкості границі досліджуваної області.

При проведенні пост-обробки результатів проводиться відсічка елементів, коефіцієнт крос-кореляції для яких менший деякої межі. Це проводиться з метою усунення елементів, функція форми яких не відповідає дійсним переміщенням, що є типовим явищем при появі значної неоднорідності при деформуванні, чи при утворенні тріщини. Така відсічка дозволяє мінімізувати вплив цих факторів на отриманий результат, крім того, вона дозволяє відслідковувати шлях тріщини та її швидкість розповсюдження.

Необхідно відмітити гібридний метод [211], що полягає в симбіозі метода скінчених елементів та метода кореляції цифрових зображень. Його використовують з метою досліджень локальних відхилень властивостей матеріалу. Для цього проводять експеримент, при якому заздалегідь відома модель поведінки матеріалу – еластична чи пластична, схема навантаження – плоска чи тривимірна задача, граничні умови. Результати отримані методом кореляції цифрових зображень надсилаються до модуля розв'язку задач методом скінчених елементів, з граничними умовами, що задані користувачем. Цей крок фактично ідентичний методу пост-обробки з використанням скінчених елементів для фільтрації поля переміщень, проте ця задача має значно глибшу фізичну суть і вимагає знання моделі поведінки матеріалу.

Кінцевим етапом роботи модуля пост-обробки результатів є безпосереднє обчислення деформацій, використовуючи тензор нескінченно малих деформацій, якщо відсутні значні локальні повороти елемента, чи тензор Лагранжа, якщо деформації значні і передбачається значні локальні повороти елемента (рис. 2.7, рис. 2.8).

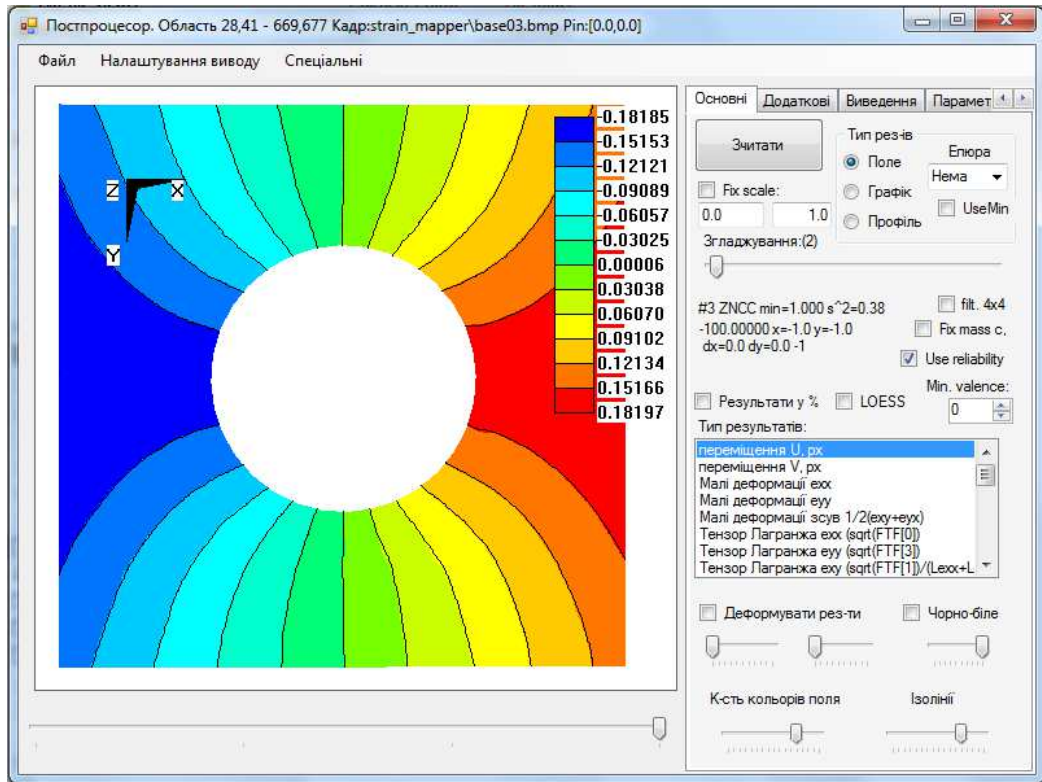


Рис. 2.7. Вікно програми постпроцесору із результатом – компонентою переміщень U

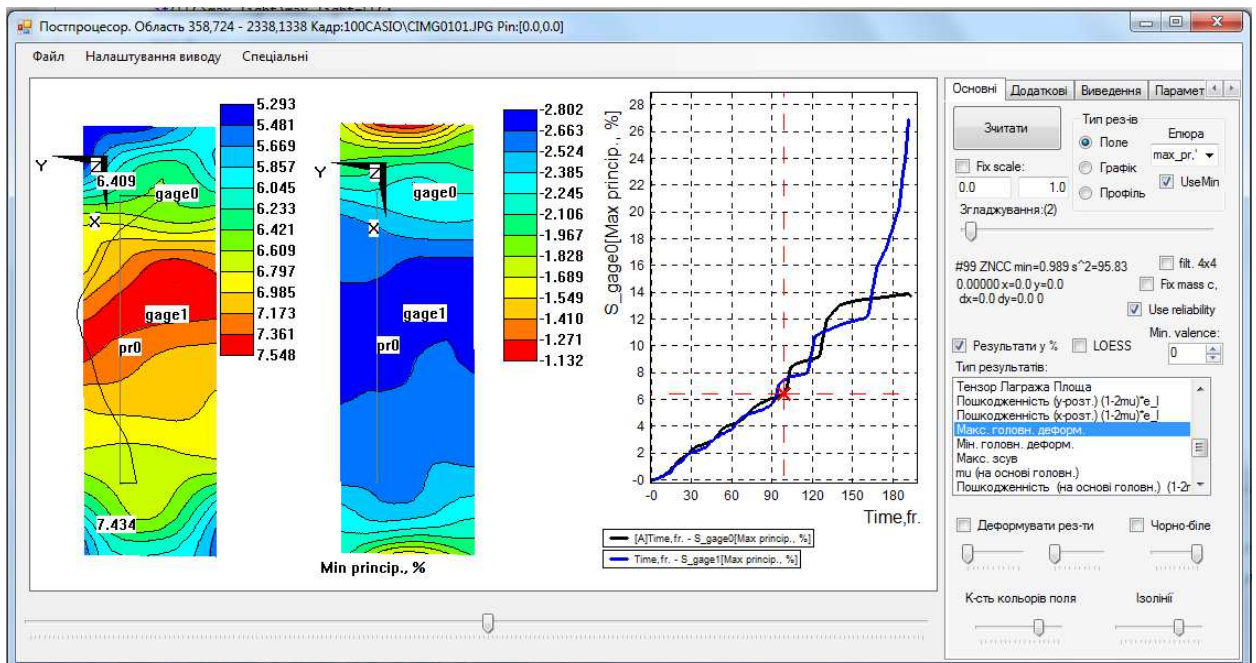


Рис. 2.8. Вікно програми постпроцесору із композитним результатом

Модуль обробки результатів містить в собі вбудовані функції:

- побудови розгортки локальних величин із поля деформацій, або переміщень у часі;
- статистичні та математичні функції обробки результатів, при цьому результати представляються у вигляді табличних величин;
- згладжування отриманих результатів;
- створення відео файлів з полем деформацій та композитним результатами;
- побудова довільних діаграм на основі синхронізованих даних із системою тензометричного вимірювання;
- побудова епюр довільних величин на полях деформації;
- визначення і динамічне оновлення у відповідній таблиці значень мінімуму і максимуму деформації, площі однорідності та ін.;
- експорт отриманих результатів у табличні редактори;
- визначення і графічну побудову векторних величин на полі деформації, таких як максимальна чи мінімальна головна деформація;
- накладання отриманих результатів на фактичне зображення.

Розроблений програмний комплекс забезпечує визначення і максимально ретельну обробку поля деформації на основі методу кореляції цифрових зображень. Надійність отриманих результатів можна контролювати за по елементним значенням коефіцієнта крос-кореляції. Рекомендованим значенням для отримання достовірних результатів, є величина коефіцієнту крос-кореляції не менша ніж 0,75. Значення коефіцієнту крос-кореляції менші ніж 0,7 слід вважати не точними. Модуль розв'язку автоматично відкидає елементи, які не відповідають критерію мінімального коефіцієнта крос-кореляції. Крім того, для елементів, що знаходяться на границях досліджуваного поля можна встановити режим відкидання за кількістю ключових точок на границі, що дозволяє отримувати високоточні результати для внутрішніх частин досліджуваної ділянки.

Типові показники точності визначення деформації (максимальна абсолютна похибка на синтетичних зображеннях, рівень шуму до 2,5%, дані взяті для пластини з отвором для діапазону деформацій 0-0,1% при використанні чотирьох-точкового ізопараметричного елемента, густина сітки 400 елементів 30x30 на поле 700x700 пікс., діаметр отвору 300 пікс.):

- 0,035% для елемента розміром 20x20;
- 0,01% для елемента розміром 30x30;
- 0,008% для елемента розміром 40x40;
- 0,005% для елемента розміром 60x60;
- 0,003% для елемента розміром 80x80.

## 2.5. Висновки

Розроблений і апробований програмний комплекс для дослідження поля деформацій методом кореляцій цифрових зображень.

Його можна застосовувати в лабораторних і в польових умовах, що дозволяє вирішувати цілий ряд задач як наукового, так і виробничо-експлуатаційного характеру.

Використання розробленого програмного комплексу можливе для:

1. Дослідження деформаційної поведінки матеріалів при різних видах навантаження.
2. Дослідження однорідності і розвитку деформації на зразках і елементах конструкцій (типова похибка локального значення деформації - +/- 0,01%, при цьому існують шляхи для досягнення похибки в +/- 0,001% в лабораторних умовах).
3. Дослідження поведінки матеріалів при надзвичайно високих деформаціях >100%.
4. Визначення пружних сталей у анізо- та ортотропних матеріалах, композитах.



5. Дослідження поведінки тонких плівок, м'яких або делікатних матеріалів, для яких не можливе застосування тензOMETричних методів.
6. Дослідження динамічних процесів в матеріалах (вібрації, ударні хвилі).
7. Дослідження поля деформації поблизу переходів форми та дефектів.
8. Дослідження форми та динаміки розвитку тріщин.
9. Дослідження деформаційної поведінки матеріалу за високих та низьких температур.
10. Проведення досліджень механічної поведінки матеріалу на нано- і макрорівні.
11. Оцінка стану реальних елементів конструкцій різних розмірів в процесі навантаження – від мікросистем до будівель.
12. Перевірка на правильність розв'язку задач механіки, отриманих чисельними методами.

## Розділ 3. Методики випробувань і зразки для досліджень

### 3.1. Установа для проведення експериментів та її приборне забезпечення

Дослідження проводились на модифікованій гідравлічній установці для статичних випробувань ZD-100Pu. Модифікація даної установки проводилася з метою отримання складного режиму навантаження виду статичний розтяг – високочастотний, високошвидкісний коливальний процес (динамічний незрівноважений процес (ДНП)).

Модифікована версія установки складається з двох контурів – зовнішнього (навантажувальної рами випробувальної машини) і внутрішнього (рис. 3.1а,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.

Для реалізації ДНП випробування проводяться за такою схемою:

1. Статичний розтяг досліджуваного зразка до заданого рівня навантаження/деформації, за регламентом проведення експерименту.
2. Закручування у штанги крихких зразків-супутників (крихких проб). Деформація проби до розриву не перевищує 0,1 мм.
3. Деформування внутрішнього контуру (зразок+крихкі проби) до моменту руйнування крихких проб. За цей період зразок здеформується не більше ніж на 0,5%, в випадку випробуваних зразків з найменшою базою (рис. 3.5а), то ж типове значення додаткової деформації на зразку ще менше.
4. Руйнування крихких проб, що призводить до коливань у випробувальній установці з одночасним переміщенням гідравлічного циліндру у напрямі

розтягу досліджуваного зразка – реалізація ДНП.

5. Зупинка системи оператором, чи подальше статичне деформування.

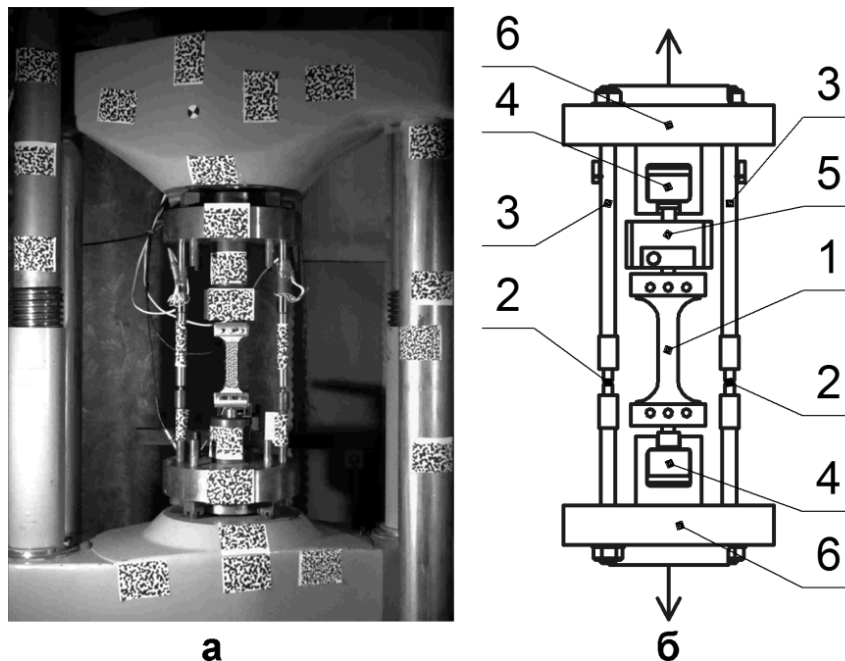


Рис. 3.1. Випробувальна установка ; а – загальний вигляд (силова рама установки – зовнішній контур); б – внутрішній контур: 1 – досліджуваний зразок, 2 – крихкі проби, 3 – тензометричні штанги, 4 – сферичні опори, 5 – динамометр (власна частота 12 кГц), 6 – фланці

Як вже відмічалось, суть ДНП полягає в високошвидкісному розтягу матеріалу з накладанням на нього коливального процесу з високою частотою (кілька кілогерц). Такий режим навантаження досягається внаслідок вільних коливань механічної системи (рис. 3.1а) та надлишку тиску в гідравлічній системі. Таким чином можна контролювати цей процес за допомогою зміни співвідношення жорсткість/маса зовнішнього контуру системи (рис. 3.1б) та величиною проскоку гідроциліндра, що визначається руйнівним навантаженням крихких проб.

При проведенні експериментів зусилля на зразку та крихких пробах фіксуються незалежними тензодинамометрами виробництва АНТК ім. О.К.Антонова.

В процесі статичного розтягу та реалізації ДНП деформації на поверхні плоских зразків фіксуються стандартним екстензометром на базі 11 мм, виробництва АНТК ім. О.К.Антонова, та методом кореляції цифрових зображень по всьому полю робочої частини зразків з використанням спеціально розробленого в даній роботі програмного комплексу і високошвидкісних камер.

При цьому, при випробуваннях зразків з високою швидкістю деформування (реалізація ДНП в матеріалі) фіксація поля деформації проводилася високошвидкісною камерою Phantom v711 з швидкістю реєстрації від 15000 к/с до 680000 к/с. (максимальна швидкість реєстрації 1400000 к/с). (рис. 3.2).

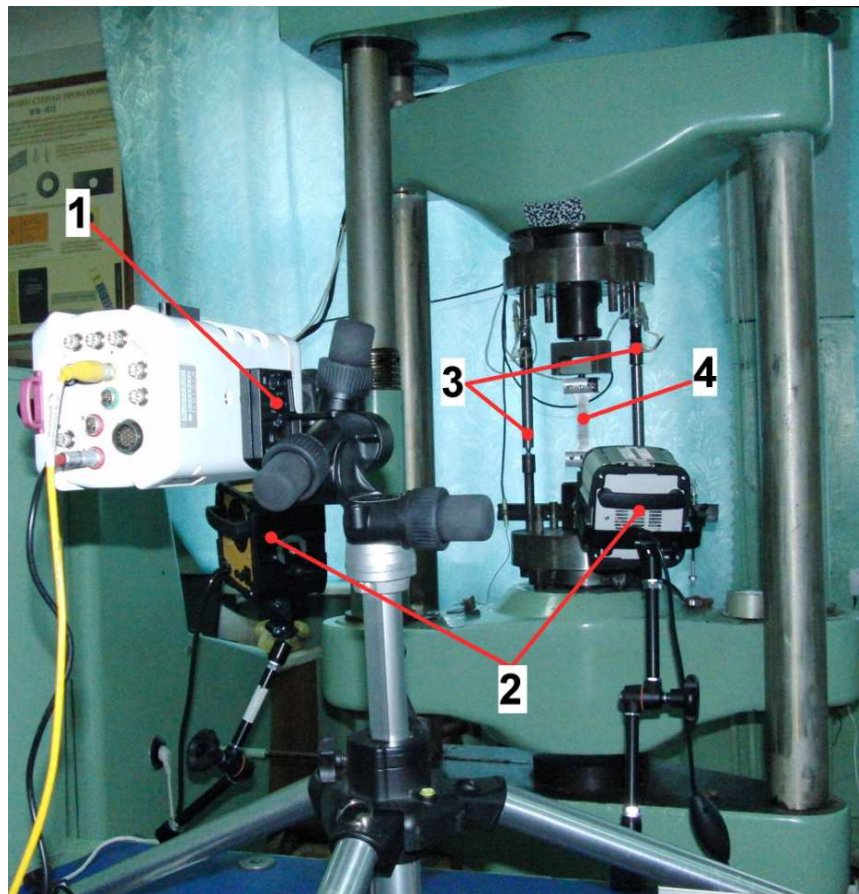


Рис. 3.2. Випробувальна установка з обладнанням для визначення кінетики поля деформації при ДНП: 1 – високошвидкісна камера Phantom v711; 2 – високостабільне галогенне джерело світло; 3 – штанги з тензодинамометрами; 4 – досліджуваний зразок

При статичних випробуваннях зразків фіксація поля деформації проводилася камерами Canon EOS 7D (максимальна швидкість реєстрації 60 к/с) та Casio Exilim Pro EX-F1 (максимальна швидкість реєстрації 1200 к/с). При використанні даного виду камер використовувалися LED-прожектори в якості джерела світла, у зв'язку з практичною відсутністю коливання освітленості зразків при їх використанні.

### **3.2. Програмний пакет для виконання тензометричних вимірювань**

У зв'язку з моральною застарілістю та низькою швидкістю попереднього пакету для виконання тензометричних вимірювань Specimen, а саме: його дуже обмеженою частотою вимірювань у 2400-3000 кГц, неможливістю синхронізації із зовнішніми пристроями, неточностями у визначенні точного часу проведення експерименту – було розроблено новий програмний пакет DAQ\_lite. Основними нововведеннями стали: частота вимірювання до 100 кГц, можливість синхронізації із зовнішніми пристроями через послідовний/паралельний інтерфейси, чи через виклик заданої функції у користувацькій бібліотеці. Даний пакет складається з трьох програм – модуля реєстрації експерименту DAQ\_lite9113 (за назвою АЦП, що використовується), ExpViewer – для розширеної обробки результатів одного чи кількох експериментів, програми DAQ\_Configure для створення шаблонних ini файлів для різних видів/схем експерименту.

Розроблений програмний пакет DAQ\_lite забезпечує наступні основні функції:

- створення нового експерименту;
- виклик старого експерименту;
- зміну конфігурації експерименту (вибір каналів, встановлення параметрів каналів, повздовжньої і поперечної бази та площі зразка, написи для виведених графіків);

- увімкнення режиму опитування каналів з індикацією показів будь-яких вибраних каналів у фізичній розмірності;
- установка нуля каналів з рівнями усереднення заданими користувачем;
- запуск реєстрації показів вибраних каналів із заданою дискретністю опитувань на диск або у оперативну пам'ять при високій швидкості реєстрації;
- відображення в процесі реєстрації поточної діаграми деформування в координатах: навантаження ( $P$ , кН) - подовження ( $\Delta l$ , мм) (рис. 2.6), напруження – деформація, чи у координатах будь-якої математичної функції, що задається користувачем у вигляді формули, або через виклик користувацької функції у Dll-бібліотеці;
- зупинка реєстрації;
- після закінчення реєстрації (або виклику старого експерименту) виведення графіків (рис. 2.7):
  - а. навантаження ( $P$ ) – подовження ( $\Delta l$ );
  - б. умовне напруження ( $\sigma$ ) – відносне видовження ( $\epsilon$ , %);
  - в. умовне напруження ( $\sigma$ ) – відносне звуження ( $\epsilon'$ , %);
  - г. істинне напруження ( $S_K$ ) – істинна деформація ( $e$ );
  - д. істинне напруження ( $S_K$ ) – відносне видовження ( $\epsilon$ , %);
  - е. будь-яка комбінація графіків, з координатами на основі математичної функції від каналів, що реєструються;
  - ж. масштабування окремих ділянок графіків «вікно»;
  - з. друк вибраного «вікна » з попереднім переглядом.

Дані з текстового файлу реєстрації можна експортувати до Excel, OpenOffice Calc або інший пакет для подальшої обробки, проте у зв'язку з великою кількістю точок реєстрації (типове значення 300-500 тисяч) для пришвидшення обробки рекомендуємо користуватись програмою ExpViewer з комплексу. Ця програма забезпечує обробку сукупності графіків, що містить 10-20 млн. точок у реальному часі. Крім того, вона містить вбудовані функції

визначення видовження по положенню двох маркерів, згладжування експериментальних значень, визначення стандартних експериментальних величин, таких як напруження деформація безпосередньо із файлу експерименту.

При конфігуруванні експерименту (див. рис. 3.3) задаються:

- канали, що використовуються в експерименті (з метою подальшої обробки результатів експерименту канали датчиків відповідно іменуються у файлі з результатами);
- тарувальні коефіцієнти каналів (розмірність каналу, тарувальний коефіцієнт, нуль каналу, коментарій каналу);
- параметри зразка (повздовжня база L (мм), поперечна база B (мм), площа A (мм<sup>2</sup>));
- усереднення (з метою підвищення співвідношення сигнал-шум).

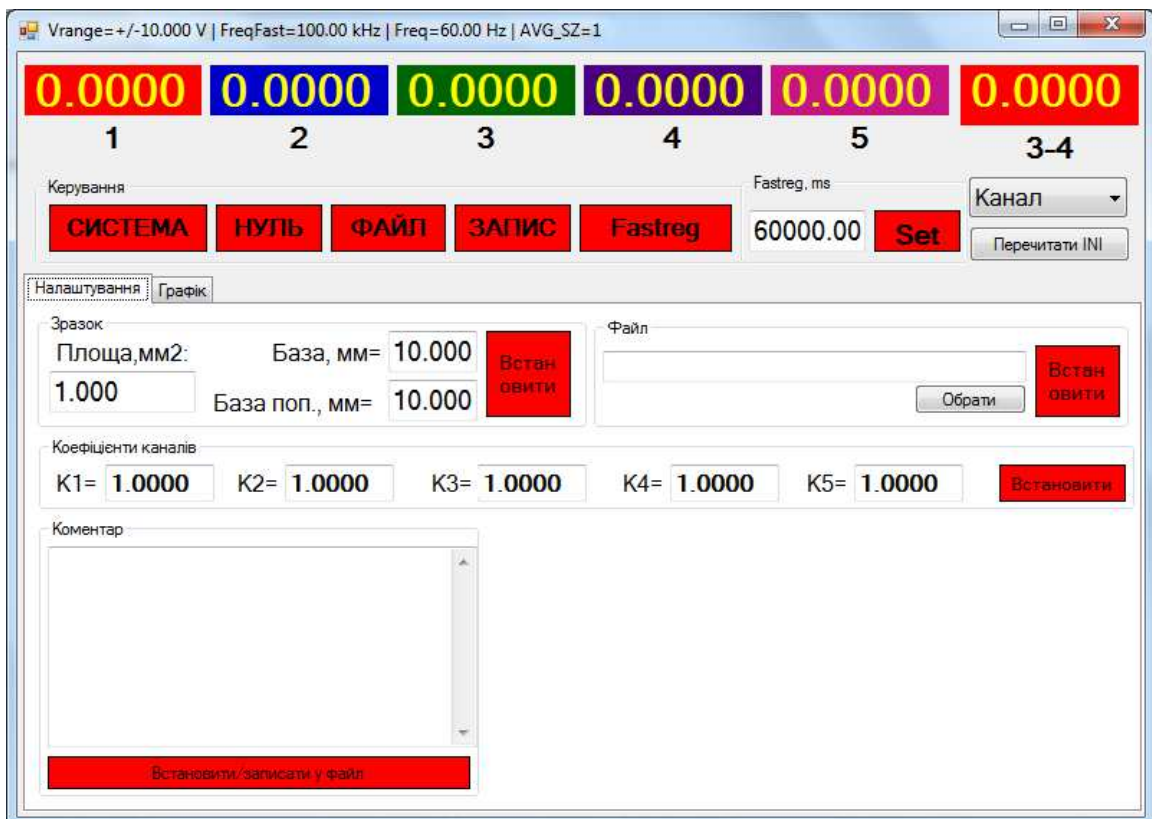


Рис. 3.3. Меню вибору конфігурації вимірювальної системи

Стандартними засобами Windows вибирається диск, папка, ім'я файлу нового експерименту. Перед проведенням експерименту необхідно встановити початкові налаштування вимірювальної системи. Це можливо зробити через іні-файл чи програмою DAQ\_Configure. На відміну від попередньої програми Fastreg розроблена система дозволяє користувачу встановити рівні вхідних сигналів, що підтримуються платою АЦП. Після встановлення датчиків і прогріву підсилювачів наявна можливість обнулити покази каналів програмно без регулювання підсилювачів для зменшення систематичної похибки вимірювань. При встановленні нуля виконується багаторазове опитування показів (кількість опитувань задається користувачем, рекомендована кількість не менше 25), визначення середнього арифметичного, яке й приймається за нуль.

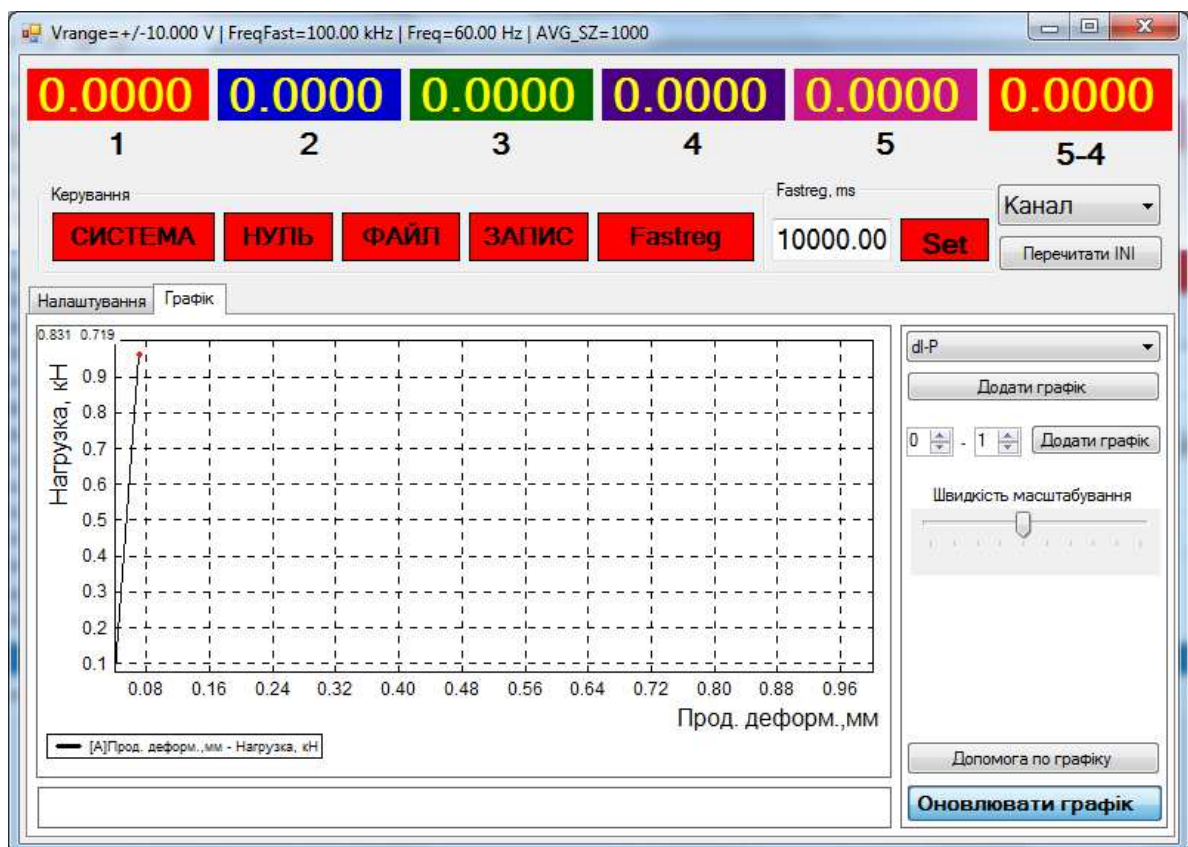


Рис. 3.4. Меню вибору графіків після закінчення експерименту

Поточні експериментальні дані подаються і візуалізуються у своїх фізичних розмінностях на основі тарувальних коефіцієнтів. Перехід до високої



швидкості реєстрації здійснюється за допомогою кнопки «Fastreg». Протягом усього експерименту користувач має змогу переглядати графіки процесу деформування в зручній формі (рис. 3.4). Розроблена вимірювальна система для проведення і обробки результатів випробувань дозволяє в реальному часі контролювати хід експерименту як за допомогою графіків, так і за допомогою рівня одного чи кількох каналів.

### **3.3. Зразки та матеріали для досліджень**

Вибір випробовуваних матеріалів в даній роботі був обумовлений задачею порівняння кінетик поля деформації 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. Крім того, нами було накопичено значний масив даних по ТЕМ структурах у матеріалах цих типів, що дозволяє пов'язати поле деформації та ТЕМ структури в цих матеріалах при різних деформаціях на основі порівняння кривих напруження-деформація. Як відомо, алюмінієві сплави знайшли широке застосування в аерокосмічній техніці та автомобілебудуванні, а нержавіючі сталі в енергетиці. Також було цікаво оцінити вплив ДНП на механічну поведінку високоміцних сталей, які володіють дуже малою пластичністю (1...2%). Тому в роботі були проведені досліді на високоміцній корпусній сталі, яка використовується в виробках спеціальної техніки. Завдяки такому вибору матеріалів було отримано можливість аналізу поведінки металів різних класів при ДНП з метою вивчення основних закономірностей пов'язаних саме із спільними моментами в поведінці матеріалу, викликаних ДНП. В табл. 3.1 приведені механічні властивості досліджуваних матеріалів.

Таблиця 3.1.

Механічні властивості досліджуваних матеріалів (визначені експериментально, локальні значення)

Марка матеріалу	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{\epsilon}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , % (на основі поперечної деформації у площині за умови збереження об'єму)
2024-T3	345	450	27	14
Д16	322	460	32	17
12X17	280	455	60	31
Високоміцна корпусна сталь	800	1350	1,3	0,5

Зразки з нержавіючої сталі 12X17 були виготовлені лазерною різкою, зразки з алюмінієвих сплавів Д16, 2024-T3 та високоміцної корпусної сталі – фрезеруванням.

Для дослідів була спеціально вибрана плоска форма зразків, так як це дозволяє здійснювати зйомку поля деформації з використанням лише однієї камери, в даному випадку результуюче поле деформації можна вважати двовимірним. Переміщення зразка в напрямку перпендикулярному до площини камери створюють похибку визначення переміщення та деформації, що не перевищує 0,1% від фактичного значення величини. Умови навантаження досліджуваного зразка, зокрема відсутність згину у відповідних площинах контролювалися як тензометричним так і оптичним методами.

Визначення поля деформації на зразку проводилося з використанням елементів розміром 30x30 пікселів з ізопараметричною чотирьох-точковою функцією форми. Величина згладжування складала вікно розміром 3x3 елементи, метод згладжування – LOESS. При побудові результатів не було елементів, що не задовольняли умові мінімальної крос-кореляції.

Кількість елементів по полю по найменшому характерному розміру зображення була не менше 10, що забезпечує достатньо надійне відтворення поля деформації досліджуваного типу. З метою верифікації даного факту у статистиці на алюмінієвих сплавах були проведені відповідні дослідження із кількістю елементів 5, 10 та 20 на найменшу характерну довжину. Рівень шуму

камери забезпечував точність визначення по деформаціям не гірше ніж 0,03% абсолютного відхилення. Густина текстури на досліджуваних зразках складала не менше 12 точок на елемент. Досліджувані зразки перед нанесенням текстури попередньо оброблялися до матової поверхні та оброблялися спиртом з метою обезжирення.

Текстура наносилась за допомогою спеціальної фарби з мінімальною товщиною, яка забезпечувала надійну адгезію до поверхні матеріалу. Нанесення текстури відбувалося за допомогою аерографа при швидкості зйомки до 60000 к/с, чи перманентного маркера при більших значеннях швидкості зйомки. Умови освітлення підбиралися таким чином, щоб унеможливити засвітлення окремих ділянок досліджуваної поверхні під час експерименту. Варіація умов освітлення по полю деформації під час проведення експериментів не перевищувала встановлених меж.

В усіх дослідах по реалізації ДНП руйнівне зусилля крихких проб було в межах:

- на нержавіючій сталі – 60...160 кН;
- на великих зразках з алюмінієвих сплавів – 75...120 кН;
- на малих з алюмінієвих сплавів – 40...100 кН;
- на високоміцній корпусної сталі – 80...190 кН.

Відхилення в значеннях між лівою та правою пробами автоматично висвітлювалося програмою DAQ\_lite9113 та вносились відповідні поправки до симетричності розподілу навантаження. Симетричність розподілу навантаження між «крихкими пробами» в процесі деформування регулювалася за допомогою затяжки різьби на штангах. Різниця в руйнівному навантаженні між лівою і правою «крихкими пробами» не перевищувала 5% середньоарифметичного значення.

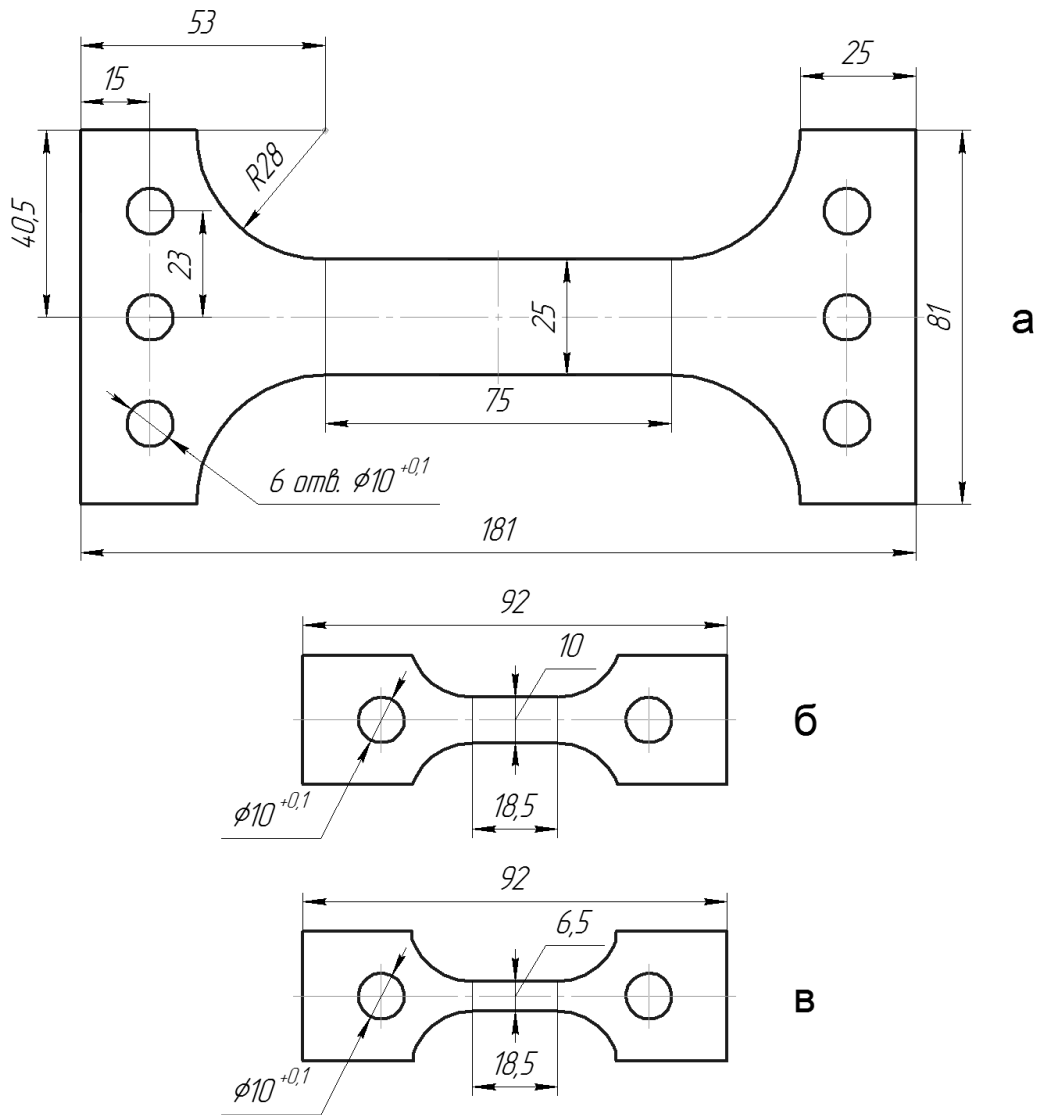


Рис. 3.5. Зразки для випробувань. а – великий зразок; б – малий зразок, в – зразок для випробувань із високоміцної корпусної сталі

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%. Вибір інтервалу величини імпульсного підвантаження був обумовлений необхідністю мінімізації отриманої в результаті ДНП пошкоженості матеріалу. Статичні дослідження проводилися без витримки, та з витримками у часі 7 днів та 3 місяці, для дослідження впливу релаксаційних процесів.

Загалом було випробувано: з алюмінієвого сплаву 2024-T3 – 22 великих та 30 малих зразків; з алюмінієвого сплаву Д16 – 20 великих зразків; з

нержавіючої сталі 12Х17 – 18 великих зразків, з високоміцної корпусної сталі – 7 зразків.

### **3.4. Висновки**

1. В результаті проведених дослідів відпрацьовано оригінальну методику дослідження механічної поведінки матеріалів різних класів в умовах реалізації ДНП. Суть даної методики полягає в накладанні високочастотного коливального процесу (1...2 кГц) на процес статичного розтягу матеріалів.
2. Враховуючи специфіку даних випробувань розроблено новий програмний пакет DAQ\_9113lite для виконання тензометричних вимірювань в процесі і після реалізації ДНП. Основними нововведеннями розробленого програмного продукту стали: частоту вимірювання збільшено до 100 кГц, з'явилась можливість синхронізації із зовнішніми пристроями через послідовний/паралельний інтерфейси, чи через виклик заданої функції у користувацькій бібліотеці.
3. Відпрацьовано роботу розробленого програмного комплексу для оцінки поля деформації при різних режимах навантаження з високошвидкісними камерами різних типів: Phantom v711 (швидкість зйомки до 1400000 к/с), Canon EOS 7D (швидкість зйомки до 60 к/с), Casio Exilim Pro EX-F1 (швидкість зйомки до 1200 к/с).

## **Розділ 4. Еволюція поля деформації на поверхні листових алюмінієвих сплавів Д16 та 2024-Т3 при різних режимах навантаження**

Алюмінієві сплави характеризуються схильністю до хвилеподібного процесу пластичного деформування [22, 23, 171]. Загальноприйнятим є той факт, що таке хвилеподібне деформування цих сплавів пов'язане з перерозподілом дислокацій у об'ємі матеріалу [212].

При попередніх дослідженнях було встановлено дуже специфічну поведінку алюмінієвих сплавів Д16 і 2024 – Т3 в процесі і після реалізації ДНП. А саме – значне окрихчування при температурі рідкого азоту після ДНП; високу чутливість до концентраторів напружень при ДНП (було достатньо не глибокої риски для того, щоб зразок зруйнувався при відносно невеликих імпульсах підвантаження в порівнянні з вихідним станом); суттєвий приріст пластичності після ДНП із збереженням показників міцності як при кімнатній так і при підвищеній температурах [19, 20, 213-215].

Виходячи із цього, для даних сплавів було реалізовано найширшу програму випробувань. В процесі цих випробувань увага акцентувалася на таких основних моментах:

- Дослідження еволюції поля деформації на плоскій поверхні алюмінієвих сплавах Д16 та 2024 – Т3 при стандартному статичному деформуванні і при реалізації ДНП, та виявлення подібностей і відмінностей в процесі їх деформування.
- Уточнення реальних швидкостей деформування алюмінієвих сплавів при ДНП.
- Встановлення зв'язку між полем деформації алюмінієвого сплаву після реалізації ДНП та структурним станом матеріалу.

Крім того, додатково визначали такі специфічні характеристики ДНП як неодноразність розриву крихких проб та оцінка швидкості спадання навантаження на зразках-супутниках під час їх руйнування.

#### 4.1. Кінетика поля деформації на поверхні листових алюмінієвих сплавів Д16 та 2024-Т3 при статичному розтягу

Кінетика поля деформації алюмінієвих сплавів при статичному розтягу з використанням методу кореляції цифрових зображень достатньо добре досліджена [23, 24, 29, 165, 172-174] і тому в даному параграфі будемо обмежуватись тільки коротким аналізом отриманих результатів.

При статичному деформуванні область зйомки камерою займала всю робочу частину як малих, так і широких зразків (рис. 4.1).

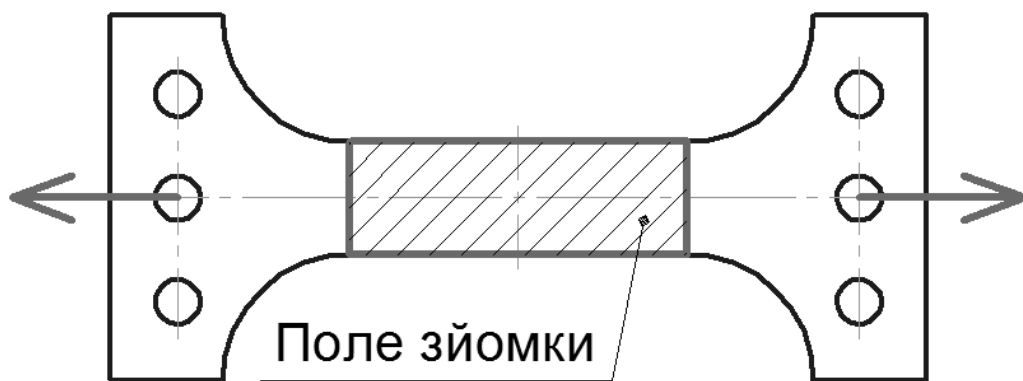


Рис. 4.1. Фізичне положення поля зйомки на зразку у статисти

На рис. 4.2 та рис. 4.3 приведені картини процесу статичного деформування, відповідно, сплаву 2024-Т3 та Д16.

З рис. 4.2 та рис. 4.3 видно, що основною характерною властивістю процесу статичного деформування є рух по поверхні зразків відносно вираженої смуги локалізованої деформації до моменту шийкоутворення. Ці дані повністю співпадають з раніше отриманими результатами [216] і тим самим ще раз підтверджують роботоздатність розробленого програмного комплексу і достовірність отриманих при його використанні експериментальних даних.

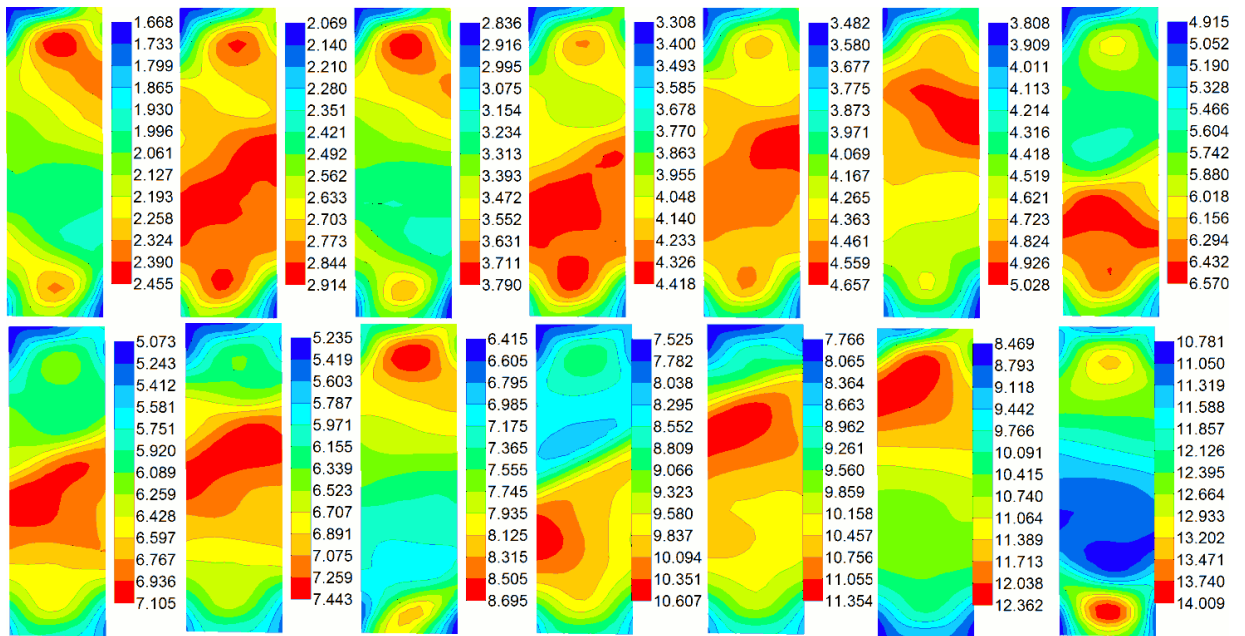


Рис. 4.2. Кінетика статичного процесу деформування алюмінієвого сплаву 2024-T3 (максимальна головна деформація, нульовий (опорний) кадр відповідає недеформованому матеріалу)

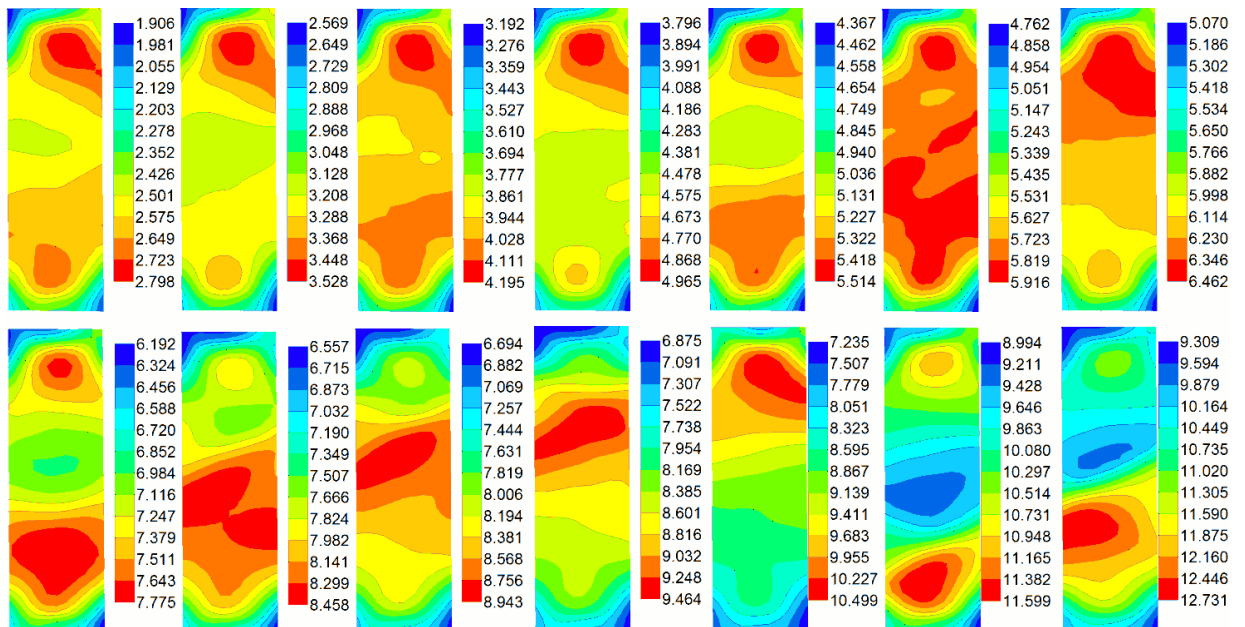


Рис. 4.3. Кінетика статичного процесу деформування алюмінієвого сплаву Д16



(максимальна головна деформація, нульовий (опорний) кадр відповідає недеформованому матеріалу)

#### 4.2. Кінетика поля деформації алюмінієвих сплавів 2024-T3 та Д16 при ДНП

При оцінці поля деформації алюмінієвих сплавів 2024-T3 та Д16 при ДНП проводилась зйомка частини робочої області зразка (рис. 4.4).

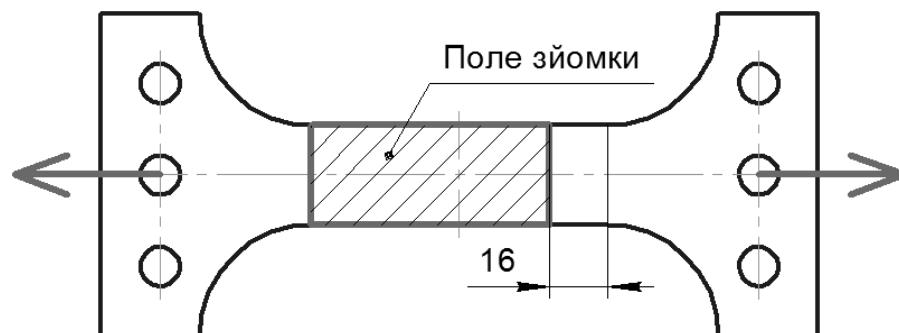


Рис. 4.4. Фізичне положення поля зйомки на зразку при ДНП

Таке специфічне положення області зйомки при ДНП було викликано необхідністю наклепки спеціального одиночного тензорезистора для великих деформацій (Vishay, EP-08-500BL-350), база вимірювань 12,7 мм, з метою побудови достовірних діаграм деформування сплавів.

Також, слід відмітити, що нульовий кадр при зйомці ДНП в високошвидкісному режимі мав деяку деформацію (від 1,5 до 6,8%), проте навіть для матеріалу з такою вираженою кінетикою деформування це не вносить змін у якісні характеристики процесу деформування. Крім того, обчислення такого поля відносно базового кадру дає змогу більш точно розглядати зміни у кінетиці, оскільки автоматично відсіюється складне поле, викликане статичним деформуванням.

Так як ДНП пов'язаний з різкою зміною швидкості деформування, то проводились попередні дослідження поведінки цього матеріалу при зміні швидкості деформування за двома режимами: деформування зі швидкістю 80%/с від нуля; статичне деформування до певного рівня, розвантаження та

подальше деформування зі швидкістю 60%/с. Ці значення відповідають діапазону початкових швидкостей при ДНП. Розглянемо типові характерні поля деформації, що утворюються при таких режимах деформування.

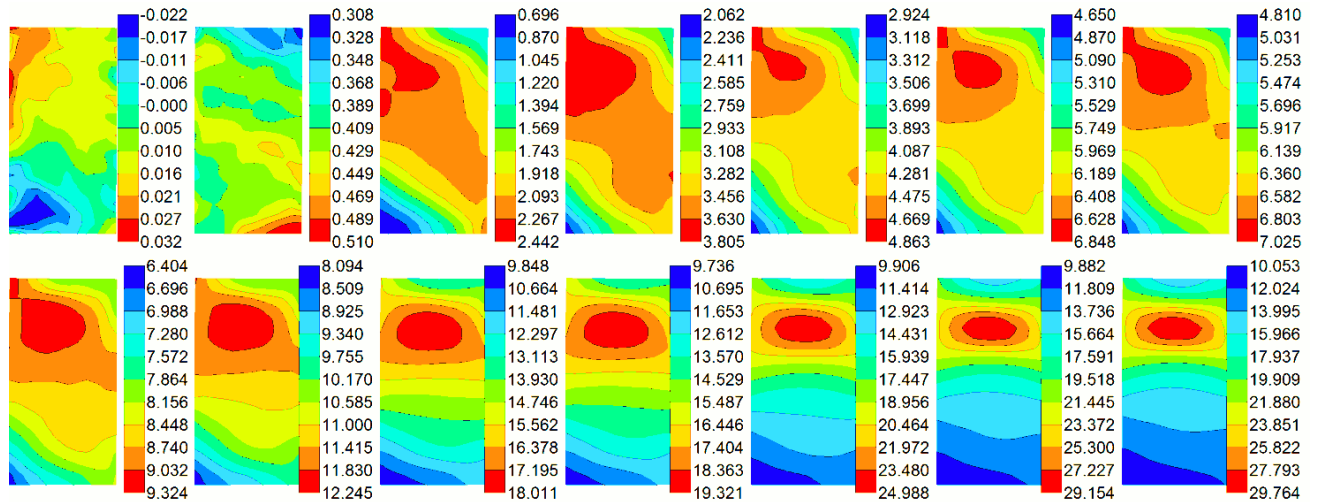


Рис. 4.5. Поле деформації алюмінієвого сплаву 2024-Т3 при швидкості деформування 80%/с (базовий кадр відповідає недеформованому матеріалу, максимальна головна деформація)

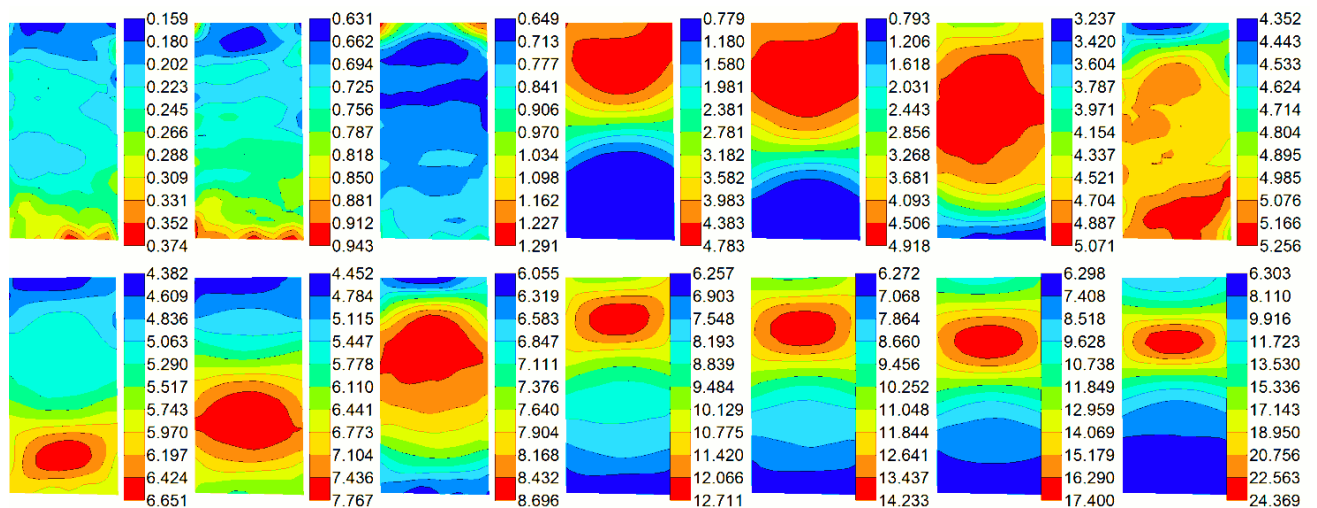


Рис. 4.6. Поле деформації алюмінієвого сплаву 2024-Т3 при швидкості деформування 60%/с, з розвантаженням на рівні деформації нульового кадру (базовий кадр відповідає середній деформації 5,1%, максимальна головна деформація)

Кут нахилу максимальної головної осі деформації при ДНП відносно поздовжньої осі зразка лежить в межах  $\pm 3^\circ$ , а при статичних випробуваннях та випробуваннях з підвищеною швидкістю  $\pm 2^\circ$ .

З рис. 4.5 чітко видно монотонність процесу деформування та перехід до локалізації деформації при простому високошвидкісному деформуванні, також слід відмітити, що при швидкості деформування 60%/с кінетика деформування аналогічна. Проте, на рис. 4.6 видно рух смуги неоднорідності аналогічний такому, що відбувається в процесі статичного деформування при розвантаженні матеріалу на рівні 5,1% і подальшим швидкісним деформуванням зі швидкістю 60%/с. Таким, чином поведінку поля деформації алюмінієвого сплаву 2024-T3 в діапазоні швидкостей, що відповідає початковому етапу деформування при ДНП можна вважати простим, та використовувати відхилення від кінетики статичного деформування в якості індикатора відхилень від монотонного процесу деформування.

Проаналізуємо деформування даного сплаву при ДНП. На рис. 4.7 нульовий (опорний) кадр відповідає різному рівню деформації матеріалу в межах 2,2-4,5%. Ще раз слід відмітити, що зміни в кінетиці процесу деформування, що видні на цих рисунках, не можуть бути викликані вибором одного чи іншого кадру в якості опорного. Більше того, така заміна акцентує увагу на відхиленнях у процесі деформування при ДНП.

При випробуванні партії зразків в кількості 22 штуки із сплаву 2024-T3 було виявлено три характерні види деформування при ДНП (рис. 4.7). Їх можна охарактеризувати наступним чином:

- збільшення площі смуги неоднорідності, сформованої при статичному деформуванні, із зміною орієнтації її фронту неоднорідності на  $\sim 90^\circ$  [215] (рис. 4.7,а);
- розрив смуги неоднорідності на дві смуги, що рухаються у протилежних напрямках (рис. 4.7,б);

- розрив смуги неоднорідності на дві смуги з подальшою їхньою взаємодією з утворенням нової смуги (рис. 4.7,в).

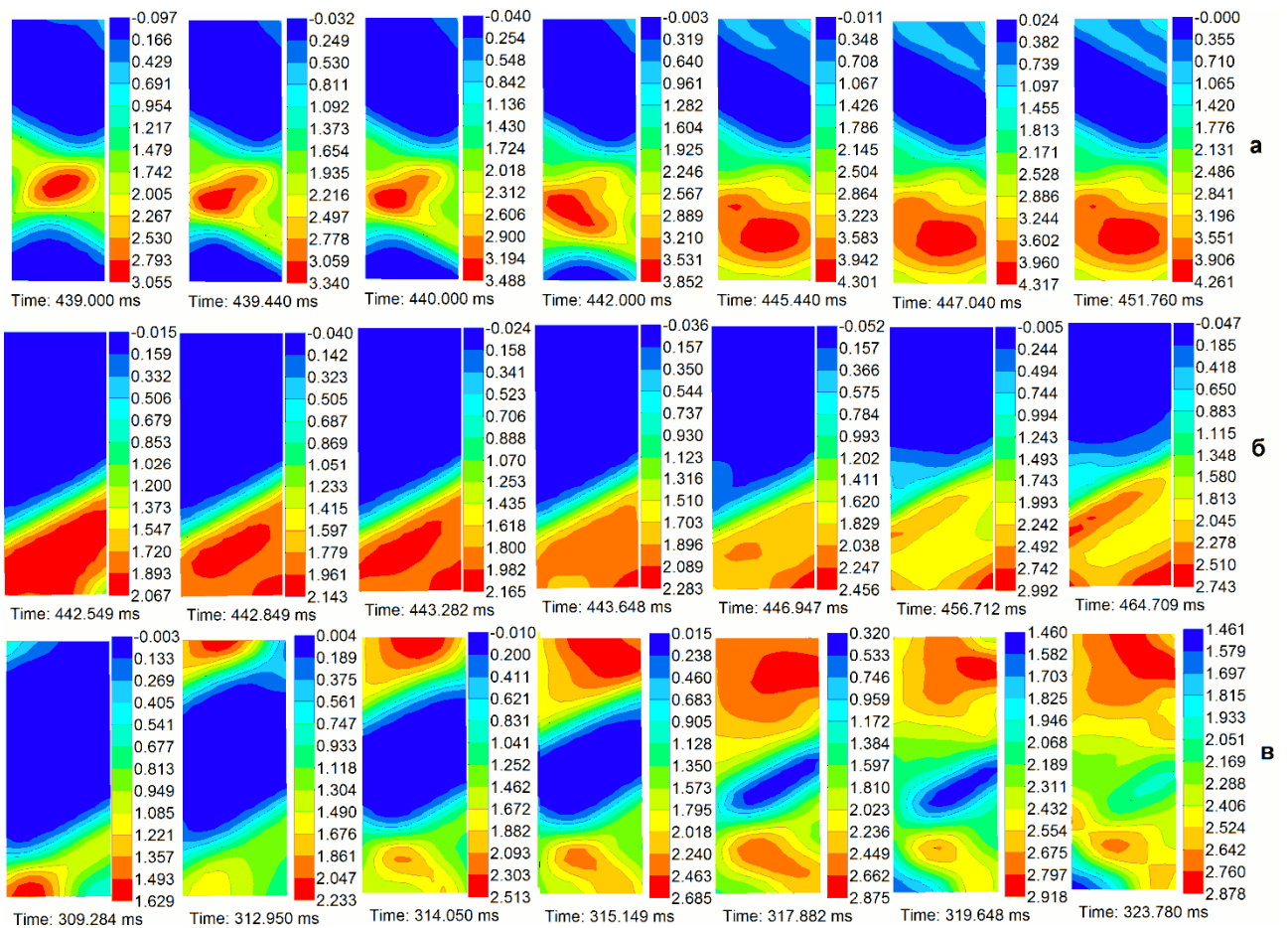


Рис. 4.7. Кінетики поля деформації при ДНП сплаву 2024-Т3 (максимальна головна деформація, базовий кадр відповідає деякому рівню деформації): а – зміна орієнтації смуги фронту неоднорідності; б – розрив смуги неоднорідної деформації; в – взаємодія смуг неоднорідної деформації

Не дивлячись на наявність таких різко відмінних режимів процесів деформування сплаву при ДНП, відмічаються і спільні характерні особливості процесу деформування при ДНП. Зокрема, спостерігається випадковість розподілу коливальних процесів локальної деформації по поверхні зразків в процесі ДНП; існує тенденція різкого зростання рівня деформації у нових ядрах, що зароджуються в менш деформованих зонах зразків; під час ДНП практично у всіх точках фіксується короткострокове зменшення поздовжньої

деформації, причому в деяких випадках має місце ярко виражений процес зростання і зменшення максимальної головної деформації.

Поле мінімальної головної деформації в цілому має такий самий характер як і поле максимальної головної деформації.

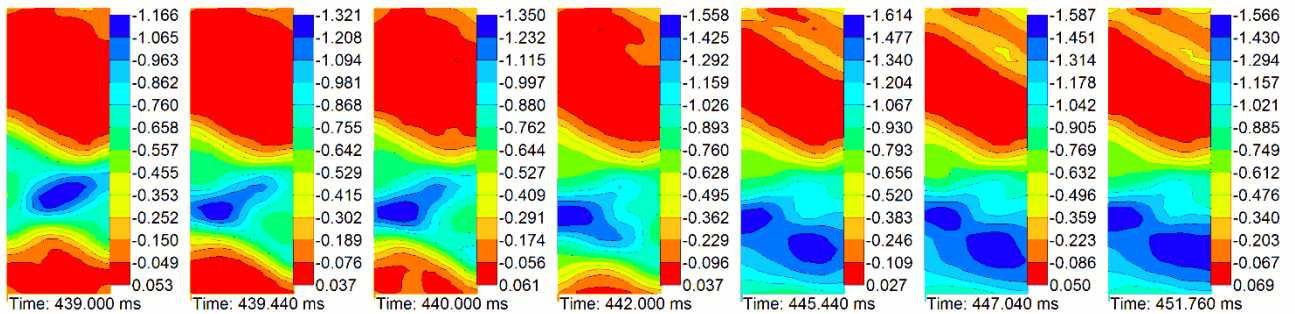


Рис. 4.8. Кінетика поля деформації при ДНП сплаву 2024-Т3 (мінімальна головна деформація, базовий кадр відповідає деякому рівню деформації), режим зміни орієнтації смуги неоднорідності

При випробуваннях практично для кожного великого зразка фіксувалась картина розподілу коливальних процесів по робочій частині (рис. 4.9).

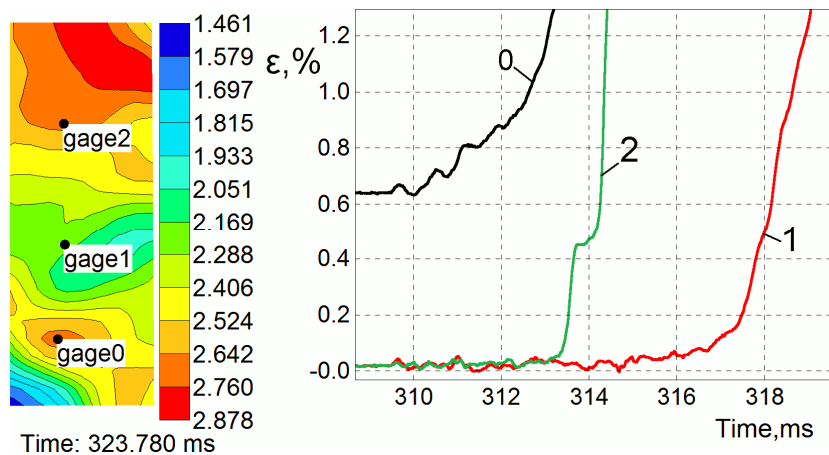


Рис. 4.9. Коливальна поведінка максимальної головної деформації (локальної) при ДНП, базовий кадр відповідає деякій деформації, для режиму взаємодії смуг неоднорідної деформації

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 підходить для повного аналізу процесу деформування по всій поверхні [217, 218]. Однак, такі діаграми все одно мають практичний інтерес, оскільки вони показують загальну тенденцію впливу ДНП на зміну механічних властивостей матеріалів, наприклад, при збільшенні інтенсивності імпульсних підвантажень. На рис. 4.10, 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.

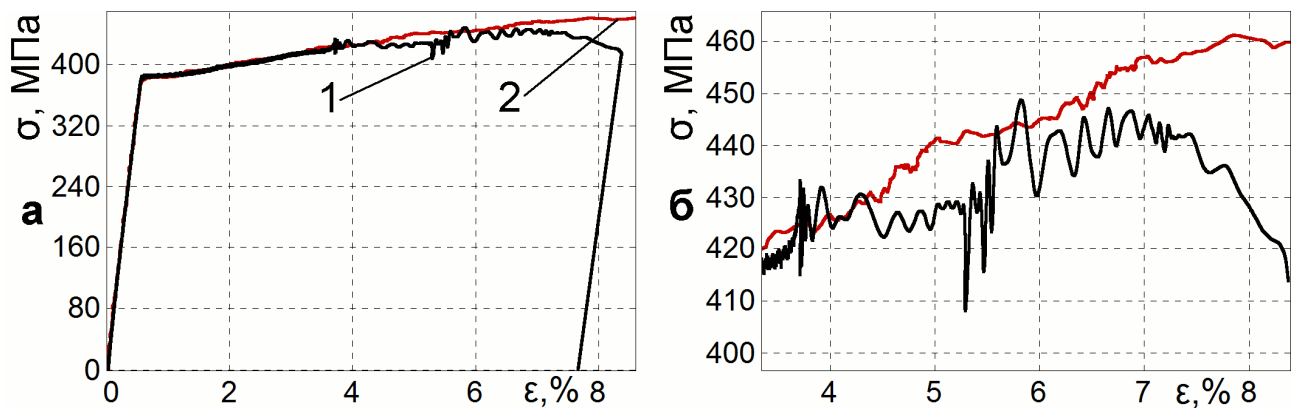


Рис. 4.10. Діаграма деформування алюмінієвого сплаву 2024-T3, записана тензорезистором для великих деформацій (малий зразок, величина імпульсного підвантаження 99,1 кН); а – загальний вигляд: 1 – ДНП, 2 – статика; б – збільшена ділянка з ДНП

З рис. 4.10 видно коливальний характер навантаження, що передається на зразок та падіння міцності, якщо виміряти частоту коливань деформації у часі на такій діаграмі та порівняти з результатами по полю деформації то ці величини співпадуть, що підтверджує правильність і доцільність використання такого типу діаграм. Крім того, оскільки це усереднена діаграма, то її зручно використовувати, наприклад, для порівняння діаграм деформування різних зразків.

На рис. 4.11 представлена кінетика поля деформації алюмінієвого сплаву Д16 при реалізації ДНП також для трьох виявлених характерних режимів процесу деформування. Ці режими аналогічні виявленим у 2024-ТЗ: збільшення площі смуги неоднорідності, сформованої при статичному деформуванні, із зміною орієнтації її фронту неоднорідності на  $\sim 90^\circ$  (а); розрив смуги неоднорідності на дві смуги, що рухаються у протилежних напрямках (б); розрив смуги неоднорідності на дві смуги з подальшою їхньою взаємодією з утворенням нової смуги (в).

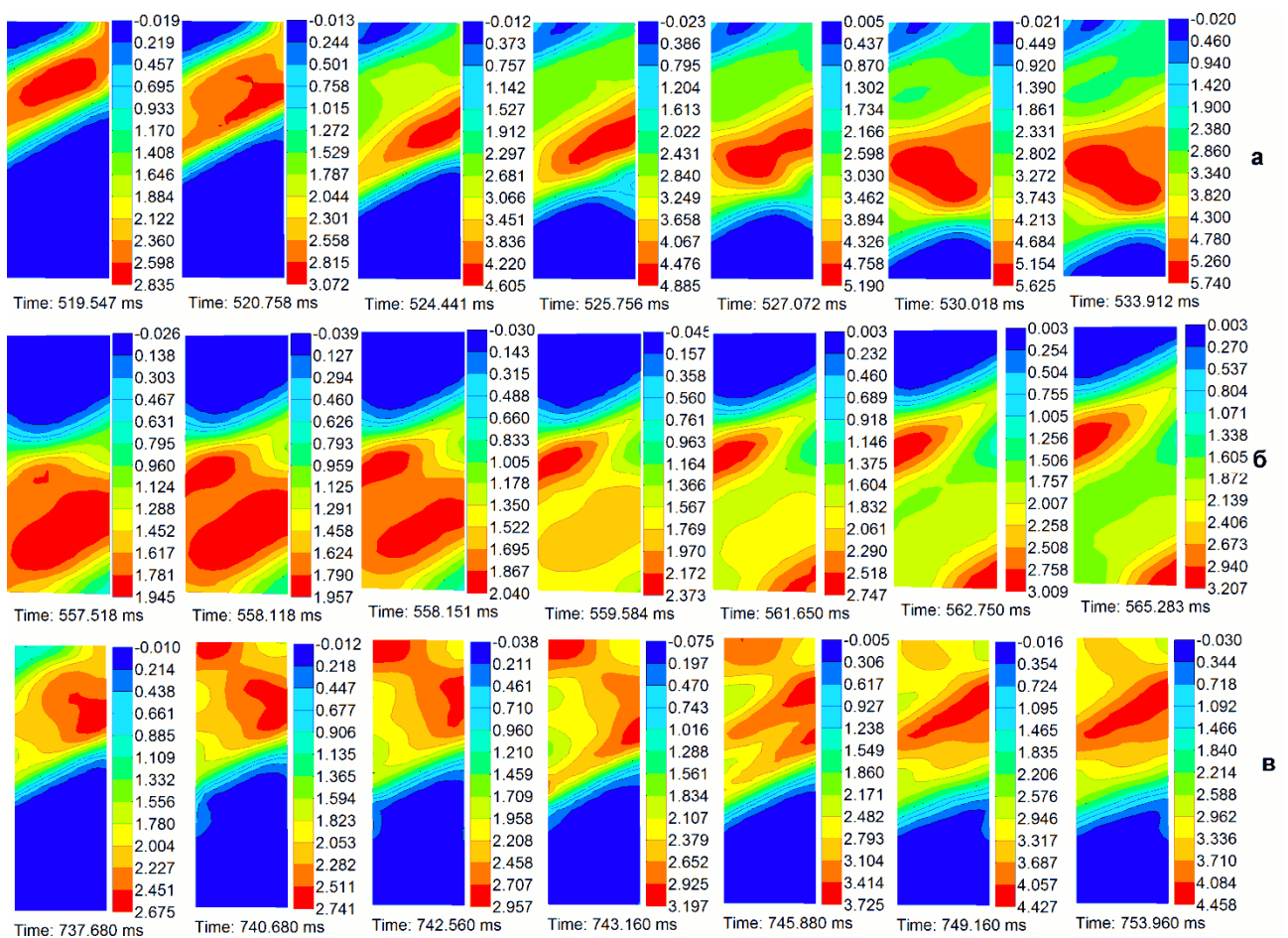


Рис. 4.11. Кінетики поля деформації при ДНП сплаву Д16 (максимальна головна деформація, базовий відповідає деякому рівню деформації): а – зміна орієнтації смуги фронту неоднорідності; б – розрив смуги неоднорідної деформації; в – взаємодія смуг неоднорідної деформації



Кут нахилу максимальної головної осі деформації при ДНП відносно поздовжньої осі зразка лежить в межах  $\pm 3^\circ$ , а при статичних випробуваннях  $\pm 2^\circ$ .

Поведінка поля мінімальної головної деформації в цілому повторює поведінку поля максимальної головної деформації сплаву 2024-T3. Підкреслимо, що не встановлено кардинальних відмінностей в поведінці алюмінієвих сплавів Д16 та 2024-T3 при ДНП та статиці.

Хоча, слід відмітити, що процес статичного деформування сплаву Д16 протікає менш монотонно і рух та фронт локалізованої смуги деформації не настільки очевидні як у сплаві 2024-T3. Проте у даного сплаву описані види кінетики деформування були явно більше виражені, що можна чітко бачити порівнявши рис. 4.7 і рис. 4.11. Крім, того важливо порівняти відповідні види процесів у часі у цих алюмінієвих сплавах. Початок і кінець ДНП визначали за максимальним значенням деформації, а саме – за тривалістю процесу високошвидкісного деформування. Схематично це показано на рис. 4.12.

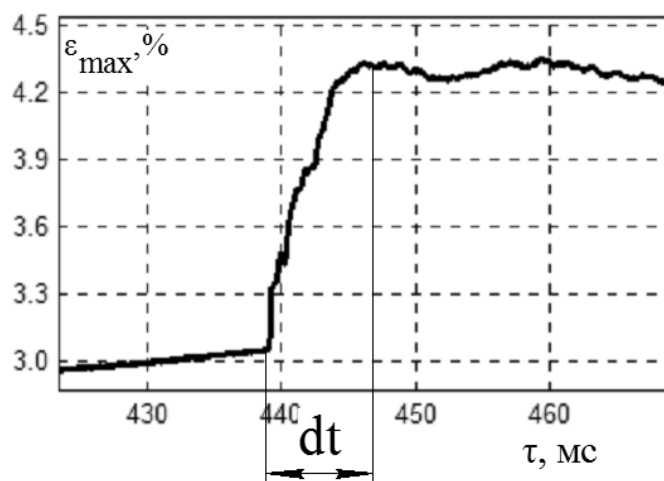


Рис. 4.12. Схема для визначення тривалості режиму ДНП, розгортка максимуму максимальної головної деформації у часі

Як видно з табл. 4.1, час, що витрачається на відповідний режим ДНП для алюмінієвого сплаву Д16 практично у 1,5 рази більше, в порівнянні зі сплавом 2024-T3. Цей факт можна пояснити тим, що поведінка поля деформації для



даного сплаву більш плавна і однорідна. Це, імовірно, викликано тим, що при ДНП в даному сплаві дисипативна структура утворюється більш плавно і однорідно, що в свою чергу, викликає затримку процесу шийкоутворення сплаву Д16 (цей факт буде висвітлено у пункті 4.3), а в сплаві 2024-Т3 така затримка відсутня.

Таблиця 4.1.

## Час необхідний для реалізації режиму ДНП

Режим процесу	Час для 2024-Т3,мс	Час для Д16, мс
зміна орієнтації смуги фронту неоднорідності	7,2	11,9
розрив смуги неоднорідної деформації	6,3	10,0
взаємодія смуг неоднорідної деформації	7,4	10,8

Також, з метою аналізу зв'язку структурного стану з полем деформації, що формується в результаті ДНП, після випробувань було зроблено ТЕМ структури на одному із зразків сплаву Д16 [197].

На основі порівняння ТЕМ структур і поля деформації (рис. 4.13) можна зробити висновок, що на ділянці з найбільш інтенсивною деформацією тонко-смугова структура розвивається найбільше, що безпосередньо впливає на пластифікацію матеріалу та рух дислокацій через цю область. На ділянках зразка з меншим рівнем деформації спостерігаються лише окремі частини, що морфологічно являють собою тонко-смугову структуру. Можна зробити припущення, що «білі» частини ТЕМ структур (див. рис. 4.13) представляють собою неповністю сформовані тонко-смугові дисипативні структури після рекристалізації. Фізично вони являють собою рекристалізовані зерна, сформовані із зародків мікросмуг та мікрозерен [219, 220], що виростили в процесі пластичного деформування. Таким чином, підтверджується той факт, що існує безпосередній зв'язок поля деформації на поверхні зразка з утвореною дисипативною структурою в об'ємі матеріалу.

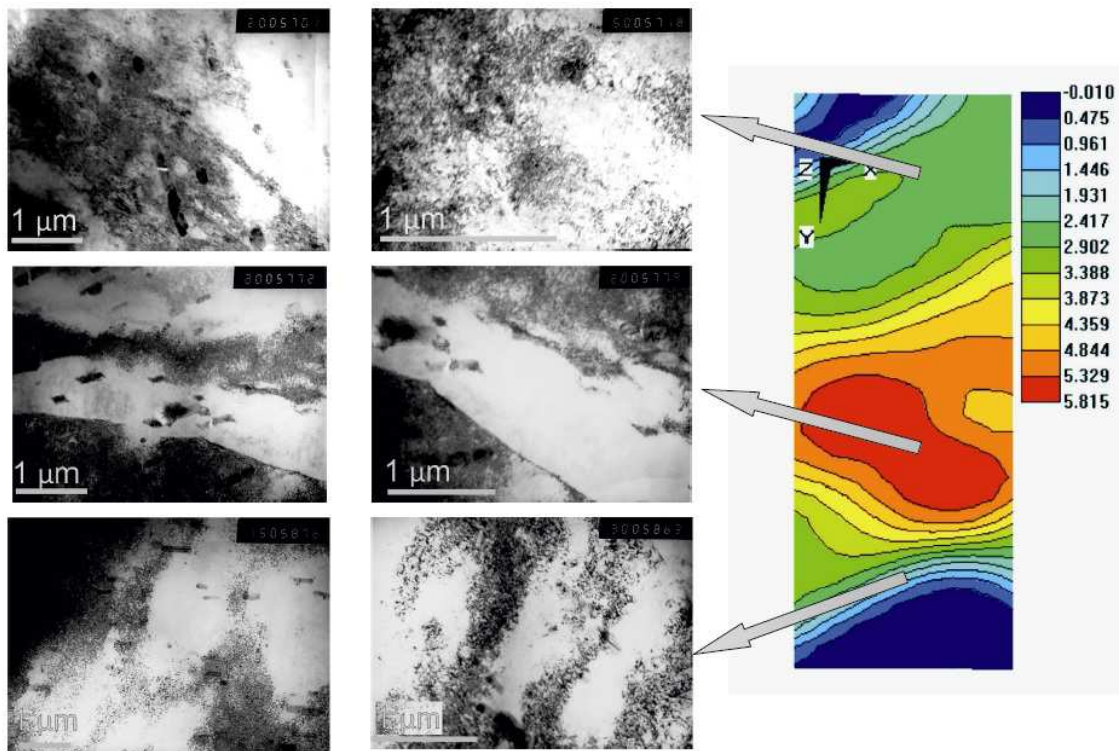


Рис. 4.13. Взаємозв'язок структури алюмінієвого сплаву Д16 з полем деформації при ДНП (поле деформації – максимальна головна деформація, нульовий кадр із деякою деформацією)

### 4.3. Кінетика поля деформації та механічна поведінка алюмінієвих сплавів Д16 та 2024-Т3 після ДНП

Поведінка алюмінієвих сплавів Д16 та 2024-Т3 після ДНП має дуже багато спільних моментів, тому доцільно розглядати їх одночасно. Оскільки раніше нами було виявлено, що витримка в цілому призводить до зменшення вираженості прояви ефекту ДНП, то повторні статичні випробування проводились практично одразу ж після реалізації ДНП. Тут, в першу чергу, слід звернути увагу на той факт, що після ДНП відбувається зміна як кінетики поля деформації, так і значень самих механічних характеристик. Так, сплаву 2024-Т3 після ДНП властиве збільшення на 3-10% ступеня локальної деформації в точці, де відбудеться руйнування матеріалу (рис. 4.15). В той же час для сплаву Д16 властива затримка процесу шийкоутворення на рівні 8-15%, причому така затримка не притаманна сплаву 2024-Т3. Це підтверджує раніше встановлений

факт, що ДНП, реалізовані на висхідній ділянці стандартної статичної діаграми деформування матеріалів, як правило, сприяють пластифікації матеріалів [19, 192].

Безсумнівно, що утворена в об'ємі матеріалу тонко-смугова дисипативна структура може по-різному впливати на механічні характеристики матеріалів. Так, наприклад, утворена структура практично не впливає на поведінку коефіцієнта поперечної деформації (рис. 4.14). Крім того оцінювалась кінетика процесу накопичення пошкодженості в сплаві. Для цього використовувалася модель [221, 222]. Ця модель дуже зручна для використання в сукупності із полем деформації, так як відповідні компоненти деформації для визначення пошкодженості визначаються безпосередньо із поля деформації. Виходячи із результатів, отриманих за допомогою даної моделі, видно, що кінетика накопичення пошкодженості в матеріалі також практично не змінюється, змінюється лише величина критичної пошкодженості (рис. 4.14б,в) Основуючись на цих даних можна зробити висновок, що сам механізм деформування не змінюється після утворення дисипативної структури, імовірно, даний вид структури змінює лише кінетику розповсюдження дислокацій по об'єму матеріалу.

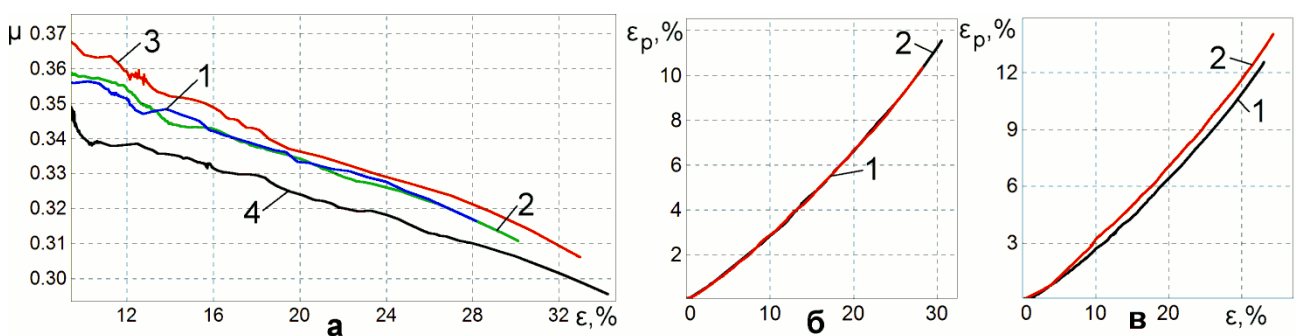


Рис. 4.14. Порівняння поведінки характерних величин в точці, де відбудеться руйнування зразка; а – поведінка коефіцієнта поперечної деформації: 1 – 2024-Т3 у статиці, 2 – 2024-Т3 у статиці після ДНП, 3 – Д16 у статиці, 4 – Д16 у статиці після ДНП; б – кінетика накопичення пошкодженості (деформація

розпушення) сплаву 2024-T3: 1 – статика, 2 – після ДНП; в – кінетика накопичення пошкодженості (деформація розпушення) сплаву Д16: 1 – статика, 2 – після ДНП

Тут хотілося б відмітити стабільне, але не значне падіння міцності на ~10-30 МПа у алюмінієвого сплаву Д16 після ДНП (див. рис. 4.15 б), при цьому падіння міцності у сплаві 2024-T3 не спостерігається [215]. На цей факт, імовірно, впливає технологічна обробка цих матеріалів, так як за своїм хімічним складом вони практично ідентичні.

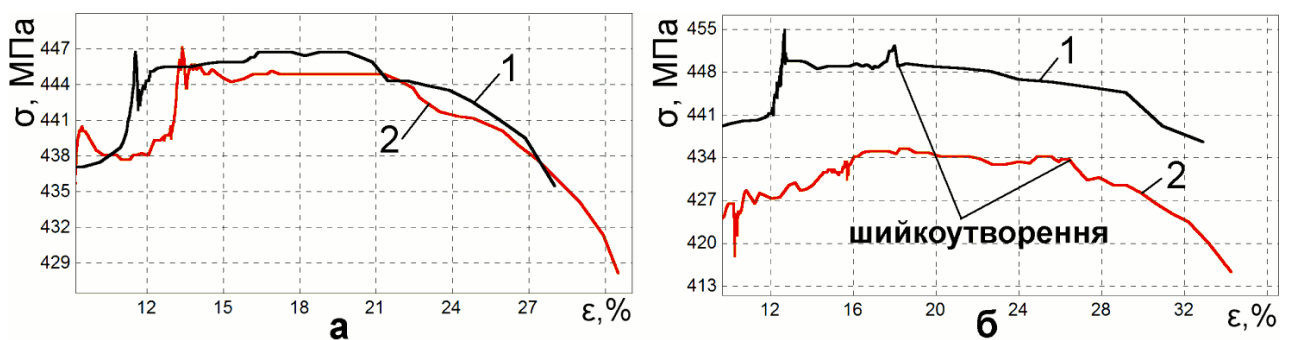


Рис. 4.15. Діаграми статичного деформування (локальна максимальна головна деформація – напруження); а – алюмінієвий сплав 2024-T3: 1 – статика, 2 – після ДНП; б – алюмінієвий сплав Д16: 1 – статика, 2 – після ДНП

Окремої уваги заслуговують результати по оцінці кінетики поля деформації алюмінієвих сплавів при повторному статичному розтягу після реалізації ДНП. Поведінка поля деформації після ДНП для випробовуваних алюмінієвих сплавів у значній мірі подібна за своїм характером. Як видно з рис. 4.16 та рис. 4.17 подальше статичне деформування після ДНП призводить до початку руху смуги неоднорідної деформації, як і при статичному розтязі, проте як тільки ця смуга доходить до неоднорідності, викликаной ДНП, починається перехідний процес. По-перше, смуга затримується, а по-друге, вона змінює свою форму і значно збільшує площу, що призводить до більш однорідного поля деформації. Також слід відмітити, що відбувається розмиття (втрата) чіткої структури фронту попередньо сформованої смуги локалізованої

деформації. Причому, у процесі деформування при проходженні смуги неоднорідної деформації утворюються чітко виражені «островки» інтенсивно деформованих областей.

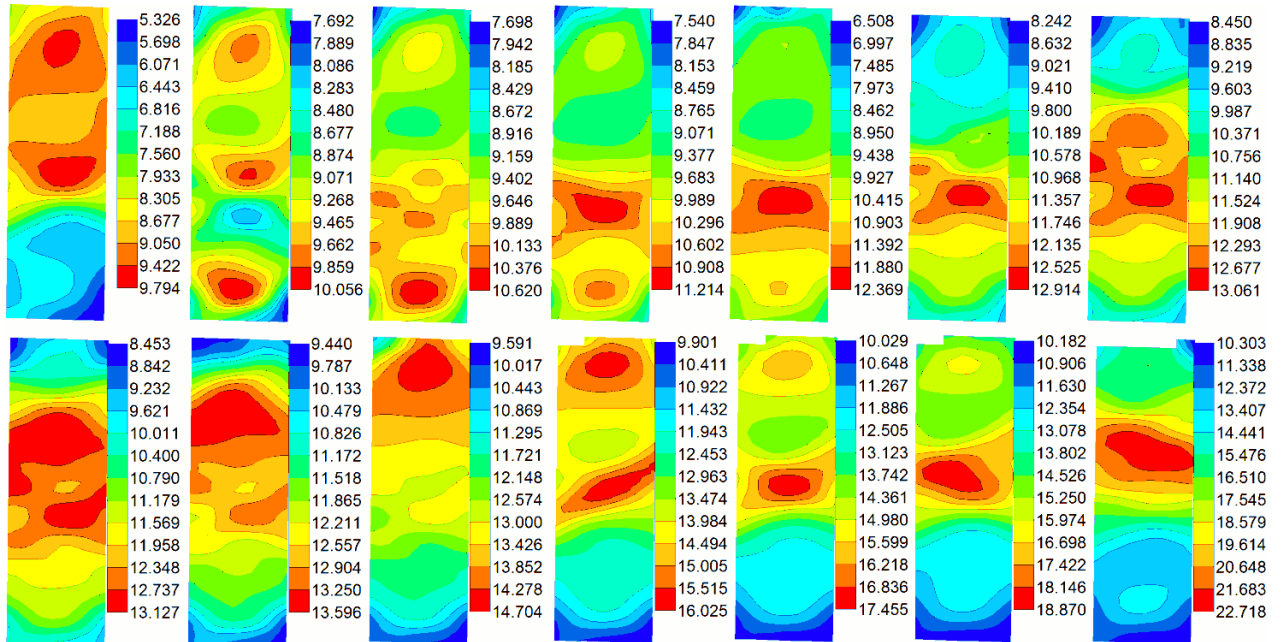


Рис. 4.16. Кінетика поля деформації алюмінієвого сплаву 2024-Т3 при статичному розтязі після ДНП, максимальна головна деформація

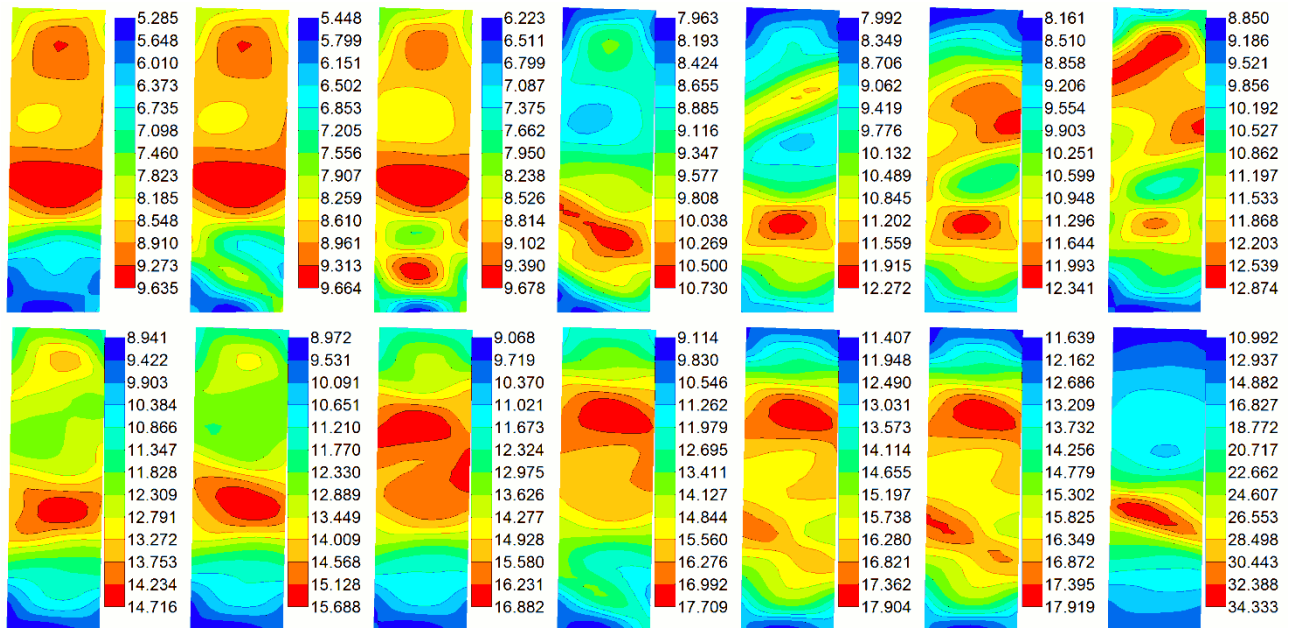


Рис. 4.17. Кінетика поля деформації алюмінієвого сплаву Д16 при статичному розтязі після ДНП, максимальна головна деформація

Таким чином, ДНП позитивно впливає як на однорідність процесу деформування (відбувається розбивання смуги неоднорідної деформації), так і на подальші механічні властивості після ДНП. Проте, слід звернути увагу на особливості, які відбуваються з площею однорідної деформації на поверхні зразка (рис. 4.18, 4.19).

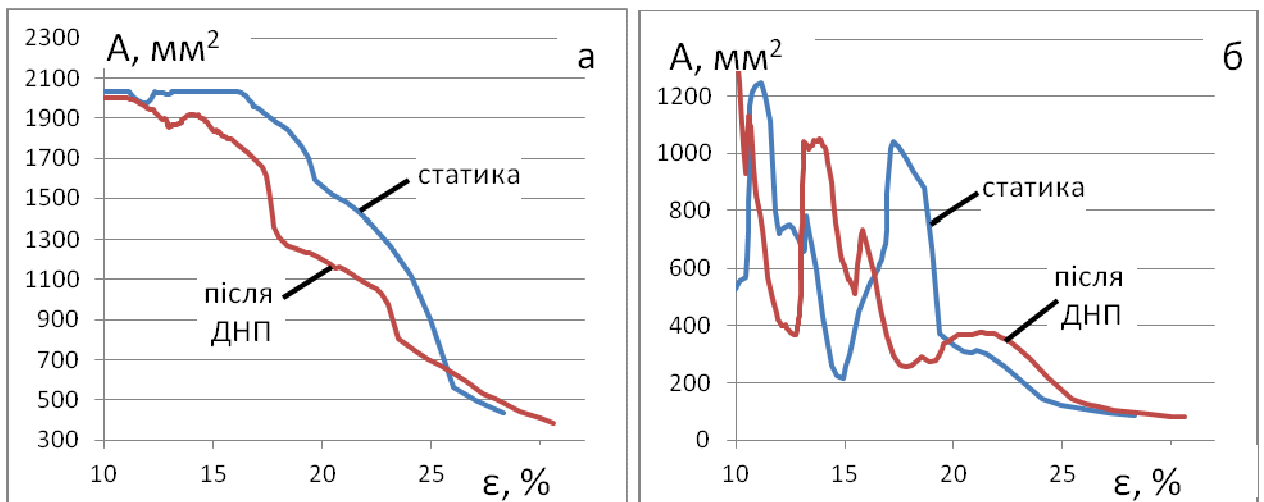


Рис. 4.18. Залежність однорідності поля деформації алюмінієвого сплаву 2024-Т3 після ДНП. По осі абсцис – поточна максимальна деформація, по осі ординат – поточна площа однорідної деформації: а – площа з допуском 30% в різниці максимального і мінімального значень деформації; б – площа з допуском 10% в різниці максимального і мінімального значень деформації

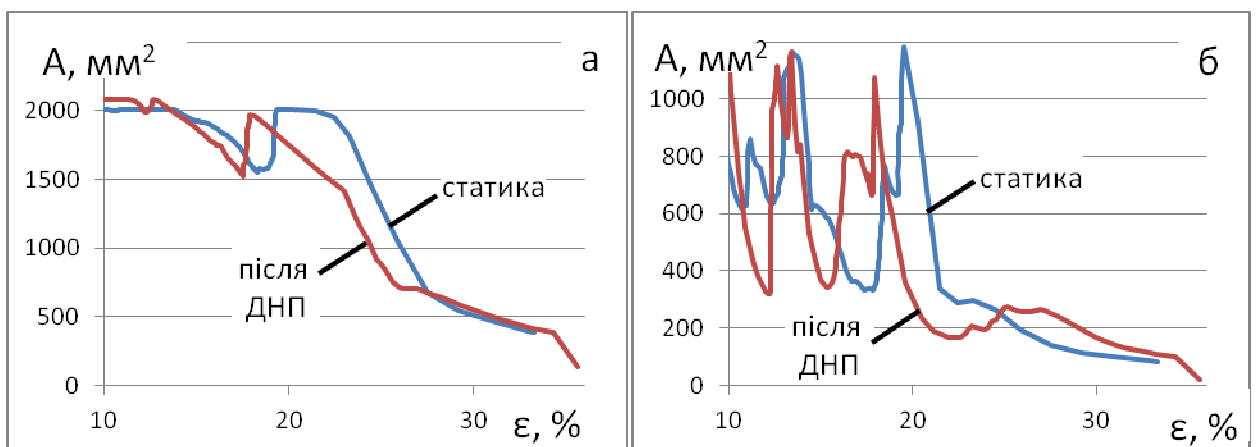


Рис. 4.19. Залежність однорідності поля деформації алюмінієвого сплаву Д16 після ДНП. По осі абсцис – поточна максимальна деформація, по осі ординат –

поточна площа однорідної деформації: а – площа з допуском 30% в різниці максимального і мінімального значень деформації; б – площа з допуском 10% в різниці максимального і мінімального значень деформації

Як видно з рис. 4.18 та рис. 4.19 площа однорідної деформації після ДНП у алюмінієвих сплавах падає, що і не дивно, так як смуга неоднорідного деформування розпадається. Більш цікавим є факт збільшення частоти коливань площі однорідної деформації (рис. 4.18 б, рис. 4.19 б). Це означає, що фактично смуга неоднорідного деформування рухається швидше в порівнянні із статикою. Цей момент вказує на утворення коридору, що дозволяє рухатись дислокаціям по об'єму зразка [223]. Крім того, слід звернути увагу на значно менш різке падіння площі однорідності після ДНП в період після останнього коливання, та менше кінцеве значення однорідності в момент руйнування. Це свідчить про те, що дисипативна структура підвищує здатність опиратися руйнуванню матеріалу на прикінцевих стадіях деформування, і, як наслідок, тріщиностійкість матеріалу зростає, що не одноразово фіксувалося в роботах по впливу ДНП на механічні властивості матеріалів, які проводяться на кафедрі механіки та опору матеріалів НУБіП України [193].

Покращення механічних властивостей, внаслідок впливу ДНП, притаманне алюмінієвим сплавам Д16 та 2024-Т3. Крім того, слід відмітити, що в алюмінієвому сплаві 2024-Т3 загальною рисою для такого виду дисипативної структури виступає масштабно-інваріантна рекристалізація зерен [197]. Утворена смуга неоднорідної деформації в результаті ДНП, очевидно, слугує свого роду бар'єром для такої самої смуги, що утворюється в процесі подальшого статичного деформування. Це призводить до значної зміни кінетики деформування матеріалу після ДНП (рис. 4.16, 4.17). Така зміна, найбільш імовірно, може бути викликана більш інтенсивним утворенням тонко-смугової структури в ділянці з підвищеною деформацією. На користь цього факту свідчать результати металографічних досліджень, показані на рис. 4.13. Природнім буде запитання, яким чином дана структура може впливати на рух



дислокацій, щоб викликати такі зміни в кінетиці деформування? Скоріш за все, утворена тонко-смугова структура в результаті ДНП може впливати на дислокації різноманітними способами: слугувати акумулятором для дислокацій, чим забезпечує їх затримку; утворювати ділянки із зменшеним опором руху дислокацій, тим самим зтягуючи їх у свій коридор; слугувати безпосереднім бар'єром для руху дислокацій. Таким чином, така поведінка матеріалу ставить ряд нових питань, пов'язаних з наявністю дисипативної структури і її впливом на подальший процес деформування після ДНП.

Оскільки картини полів деформації громіздкі самі по собі та їх складно аналізувати, то з метою економії часу та в якості експрес-методики оцінки розбіжностей у поведінці матеріалів доцільно використати специфічний вид діаграм. Даний тип діаграм відрізняється значною інформативністю для матеріалів, що володіють ярко вираженою кінетикою деформування, наприклад, коли в алюмінієвих сплавах смуга неоднорідної деформації рухається вздовж осі зразка. Для таких діаграм по осі абсцис відкладається значення деформації в точці де відбудеться руйнування. За цю точку приймають таку, в якій буде найбільше значення деформації на зображенні, що передує руйнуванню. По осі ординат відкладається положення точки (координата) на поздовжній осі зразка з поточним максимальним значенням деформації (рис. 4.20б). Цей тип діаграм дозволяє ідентифікувати проскоки смуги неоднорідної деформації, а також її кінетику (рис. 4.20а). Крім того, вона зручна для наочної демонстрації відхилень від статичного процесу деформування (рис. 4.20а) та ідентифікації моменту початку шийкоутворення. Особливо зручно використовувати такі діаграми при змінах в швидкості деформування, пов'язаних як з поведінкою матеріалу, так і з характеристикою механічної системи, тому що вони дають прив'язку до деякого характерного механічного параметру досліджуваного зразка.



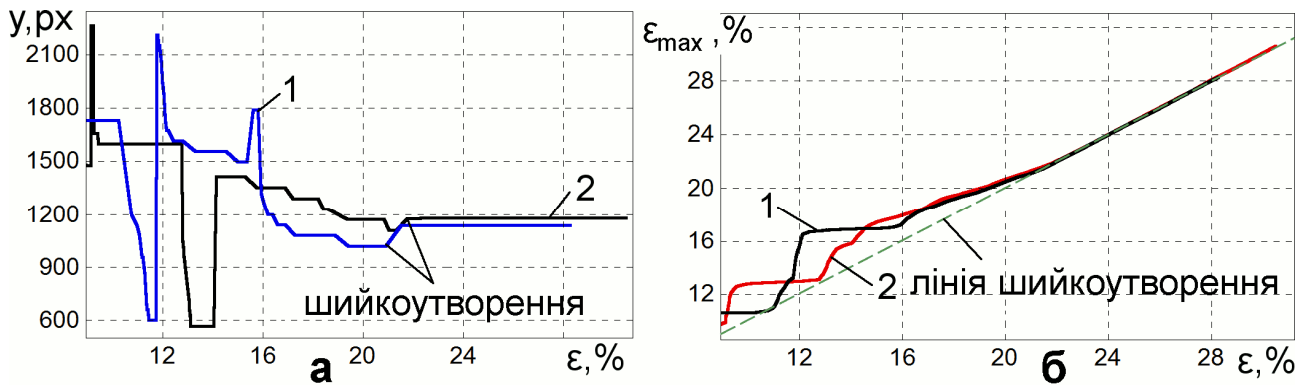


Рис. 4.20. Експрес-методика оцінки відмінностей у поведінці матеріалів на основі інформації про поле деформації (2024-Т3): а – ідентифікація проскоків смуги деформування за допомогою координати точки на поздовжній осі зразку, що володіє найбільшим значенням деформації (1-статика, 2- після ДНП); б – ідентифікація моменту шийкоутворення (1-статика, 2- після ДНП)

Так, виходячи з рис. 4.20а можна бачити відхилення коливального процесу, а також приблизно оцінити момент початку шийкоутворення, так як в дійсності положення точки з максимальною деформацією може і не зафіксуватись на якомусь конкретному значенні. Ступінчастість цього графіка викликана використанням чотирьох-точкового ізопараметричного елемента (Q4). Також з цього ж рисунка видно зменшення частоти руху смуги неоднорідності та збільшення часу перебування її у своїх екстремальних положеннях. Цей факт може свідчити про те, що утворена в результаті ДНП структура призводить до затримок в русі, чи перерозподілу дислокацій. За допомогою графіка на рис. 4.20б можна точно ідентифікувати момент початку шийкоутворення, перетинаючи відповідні графіки із лінією  $\epsilon_{max} = \epsilon$ . З цього ж рисунку можна зробити висновок, що амплітуда деформаційних коливань суттєво нижче після ДНП, а як наслідок, і «різкість» процесу деформування.

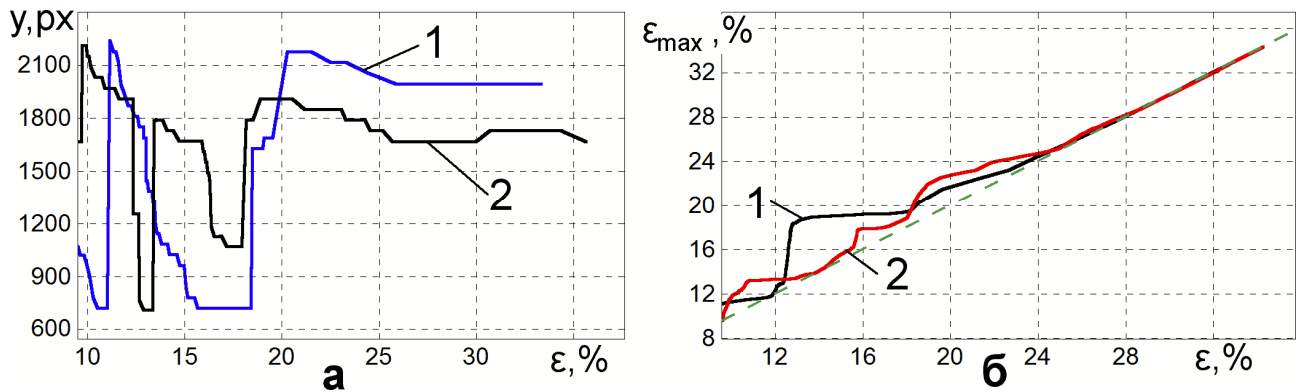


Рис. 4.21. Експрес методика оцінки відмінностей у поведінці матеріалів на основі інформації про поле деформації (Д16): а – ідентифікація проскоків смуги деформування за допомогою координати точки на поздовжній осі зразку, що володіє найбільшим значенням деформації (1-статика, 2- після ДНП); б – ідентифікація моменту шийкоутворення (1-статика, 2- після ДНП)

Аналізуючи рис. 4.21 можна бачити, що єдиною відмінністю у поведінці Д16, в порівнянні з 2024-Т3, є зменшення часу знаходження у крайніх положеннях, що імовірно призводить до затримки шийкоутворення, так як ядро інтенсивної деформації в основному знаходиться не у центральній частині зразка. Також, слід відмітити, що даний тип діаграм виявився в значній мірі чутливий, до змін, що відбулися з полем деформації внаслідок реалізації ДНП.

Із вище приведеного можна зробити основний висновок – кінетика поля деформації на поверхні зразків відображає структурні зміни, що відбуваються в процесі та після реалізації ДНП.

#### 4.4. Оцінка механічних параметрів, при яких реалізується ДНП в алюмінієвих сплавах

Для аналізу процесу деформування важливою є оцінка параметрів, за яких реалізується ДНП в досліджуваних алюмінієвих сплавах. Одним із основних параметрів, що задає режим ДНП, є швидкість падіння навантаження в системі, викликана руйнуванням крихких зразків-супутників. Оскільки даний вид випробувань можна реалізувати на будь-якій гідравлічній машині, то

однією із задач даної роботи було встановлення достовірних значень швидкості спадання навантаження при ДНП. В результаті спеціально проведених досліджень з використанням високошвидкісної камери Phantom v711 встановлено, що швидкість спадання навантаження в випробувальній системі складає 300-500 МН/с при неодночасності руйнування крихких проб 3-4 мс. При руйнуванні крихких проб, внаслідок їх неодночасного руйнування, кут повороту траверси не перевищував  $0,5^\circ$ , тому ця величина повністю компенсувалася за рахунок сферичних опор в системі кріплення зразка.

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, ймовірно, відбувається розповсюдження утвореної дисипативної структури по об'єму досліджуваного зразка, відмічається різке збільшення швидкості деформування в локальних зонах до 5000-6000%/с [199, 215].

Крім того, проводився аналіз частоти коливань, що накладаються на процес динамічного деформування сплаву, якій викликаний імпульсним підвантаженням зразка. Для кожного зразка виділялося 3-4 періоди високочастотних коливань, і на основі значень цих величин обраховувалось середнє арифметичне. В результаті на основі даних по всім випробуваним зразкам з імовірністю 95% було встановлено, що частота даного коливального навантаження лежить в діапазоні 1-2 кГц. Такий діапазон значень відповідає частоті коливань внутрішнього контуру навантажуючої системи. Амплітуда цих коливань сильно залежить від локальних значень деформації, що сильно проявлялось на алюмінієвих сплавах, тому її не визначали. Тут слід відмітити, що на значення амплітуди будуть сильно впливати просторові коливання рами навантажуючої системи, початкові фази яких випадкові. Проте, така випадковість значень не призводила до значних відмінностей у полях

деформації отриманих при одному і тому самому значенні початкової деформації матеріалу. Характерна кінетика поля деформації найбільш сильно залежала від початкової картини поля деформації, для даного виду матеріалів.

#### 4.5. Висновки

1. Встановлено, що кінетика процесу деформування алюмінієвих сплавів Д16 та 2024-Т3 після ДНП кардинально відрізняється в порівнянні із стандартним процесом статичного розтягу. Дане явище пов'язане з утворенням в результаті дії ДНП нової, специфічної тонко-смугової структури в сплавах.
2. Встановлено, що зміни в кінетиці поля деформації на поверхні алюмінієвих зразків після ДНП являють собою важливий індикатор, який указує на утворення дисипативної структури в алюмінієвих сплавах 2024-Т3 та Д16.
3. Виявлено, що в результаті реалізації ДНП відбувається пластифікація алюмінієвих сплавів [201]. 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-Т3.
4. В процесі реалізації ДНП виявлено три характерні режими кінетики поля деформації:
  - 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.
5. Виділяється тенденція переважного (першочергового) утворення нової дисипативної структури в менш деформованих, при попередньому статичному деформуванні, зонах.

6. Встановлено наявність двох етапів деформування в процесі реалізації ДНП в алюмінієвих сплавах Д16 та 2024-Т3 і достовірно визначені їх швидкості деформування: на початковому етапі 100-300%/с, на другому етапі – 5000-6000%/с. Зроблено припущення, що перший етап відповідає за ініціацію структурних змін в матеріалі , а другий – за розповсюдження дисипативної структури по об'єму матеріалу.
7. Визначена частота додаткового циклічного навантаження, яке накладається на процес високошвидкісного деформування. Для випробувальної машини, що використовується, вона складає 1-2 кГц.

## Розділ 5. Еволюція поля деформації на плоскій поверхні сталей при різних режимах навантаження

### 5.1. Кінетика поля деформації нержавіючої сталі 12Х17 при статичному розтягу

Як вже відмічалось раніше [25, 115, 157, 159, 161], при статичному навантаженні нержавіючих сталей, як правило, фіксується однорідний, монотонний процес статичного деформування, який не супроводжується хвилеподібною зміною форми поля деформації. В цьому деформаційна поведінка нержавіючих сталей суттєво відрізняється від поведінки алюмінієвих сталей. Тому дуже цікаво дослідити особливості деформування матеріалу подібного класу безпосередньо в процесі реалізації ДНП а також, як впливає цей короткочасний процес на повторний статичний розтяг сталі.

В якості дослідного матеріалу вибрана нержавіюча сталь 12Х17. При статичних випробуваннях у всіх дослідах знімали усю робочу частину зразка (рис. 5.1), причому камера встановлювалася на відстані 2 м, що дає похибку у 0,05% значення повздовжній деформації при значенні поперечної деформації 30%. Ця точність більш ніж достатня для аналізу кінетики поля деформації.

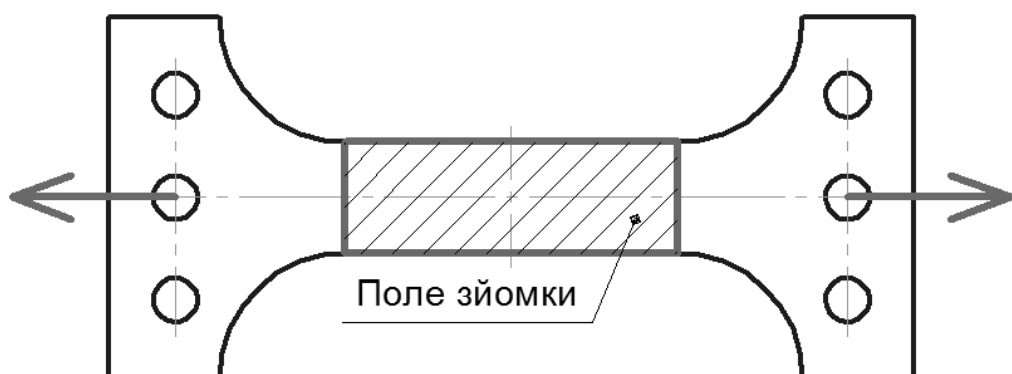


Рис. 5.1. Фізичне положення поля зйомки на зразку у статисти

Нижче на рис. 5.2 наведено діаграму деформацій сталі, а також серію попарно згрупованих полів деформації у статиці – максимальної і мінімальної головної деформації.

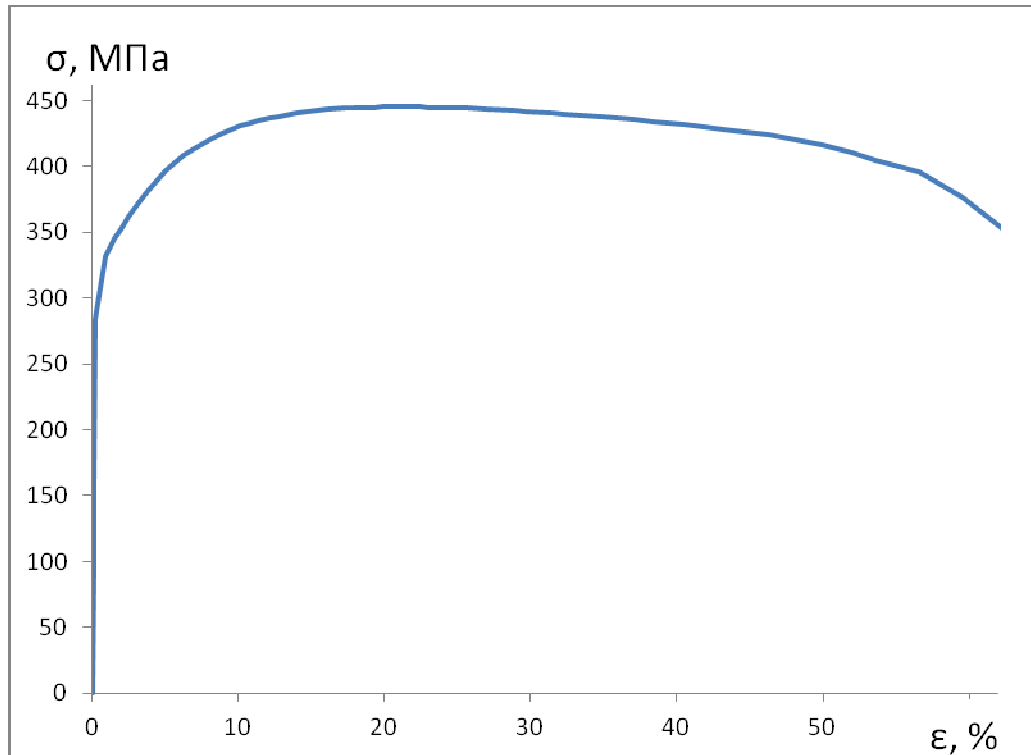
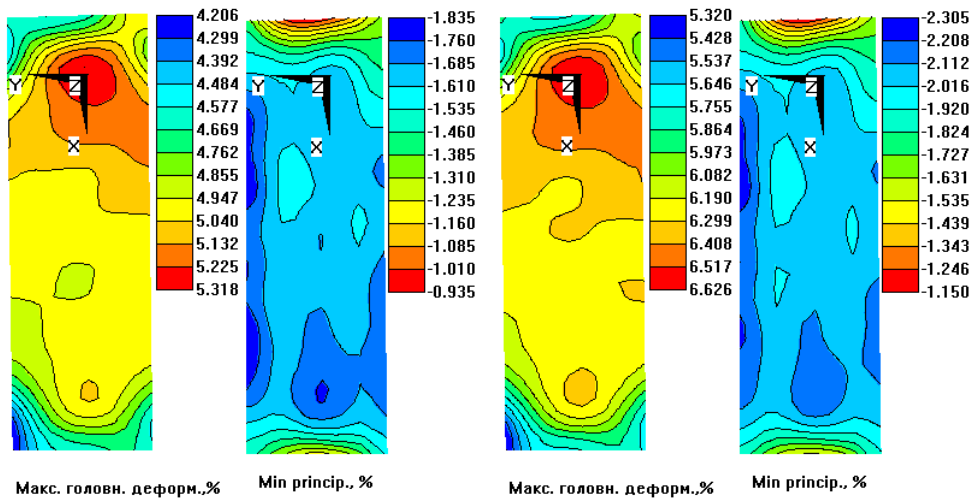
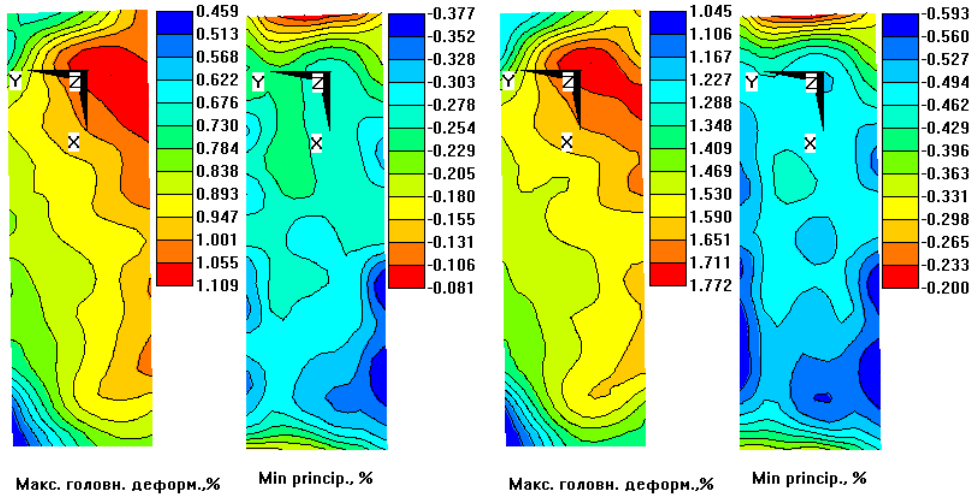
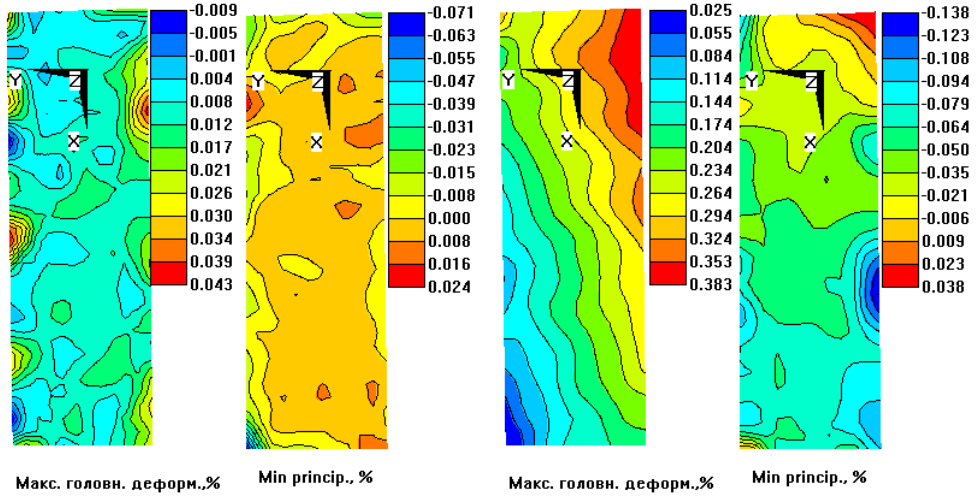


Рис. 5.2. Крива деформацій нержавіючої сталі 12Х17 при статичному розтязі у координатах: максимальна головна деформація у точці руйнування, взята у віртуальній базі 5 мм – напруження

Аналіз рис. 5.3 показує, що розвиток поля деформації на плоскій поверхні нержавіючої сталі 12Х17 при статичному розтягу проходить дійсно монотонно, а не хвилеподібно, як в алюмінієвих сплавах. Слід відмітити, що використання безконтактного методу дозволяє значно більш точно відмічати відхилення у поведінці матеріалів після настання шийкоутворення у місці локалізованого деформування, що й характеризує фактичну пластичність матеріалу і процеси, що проходять на заключній стадії деформування матеріалів.

Також слід відмітити високу однорідність поля деформації на робочій частині всіх випробуваних зразків (див. рис. 5.3) до моменту шийкоутворення (20% деформації).





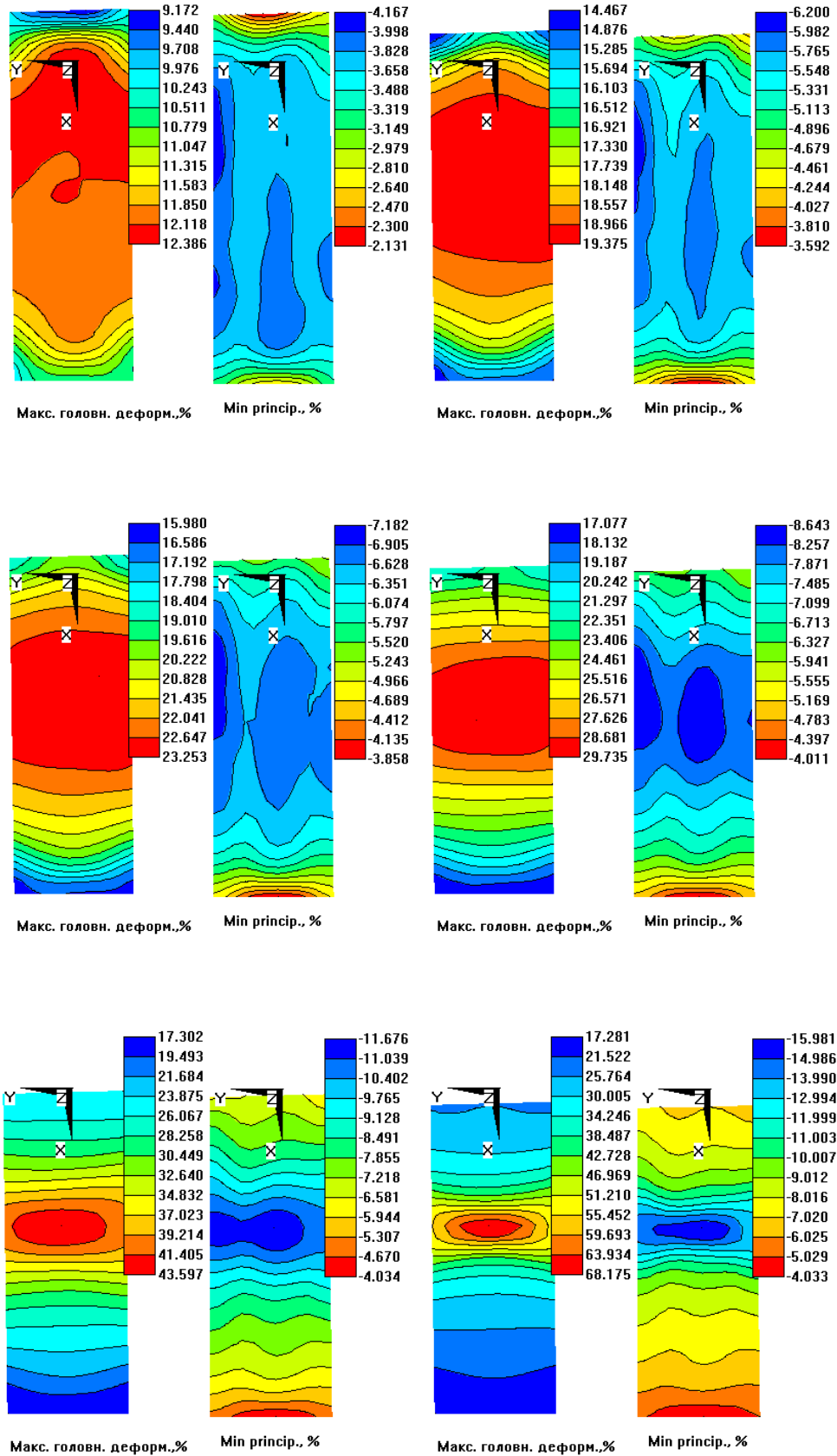


Рис. 5.3. Кінетика поля деформації нержавіючої сталі 12X17 при статичному розтязі

## 5.2. Кінетика поля деформації нержавіючої сталі 12Х17 при ДНП

При оцінці поля деформації нержавіючої сталі 12Х17 при ДНП проводилась зйомка частини робочої області зразка (рис. 5.4).

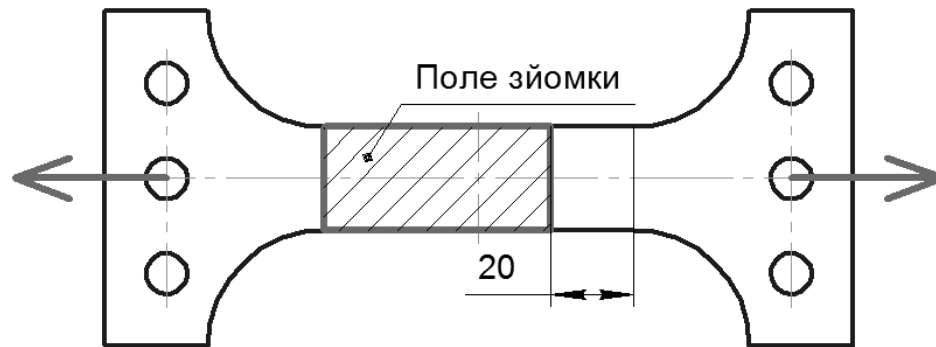


Рис. 5.4. Фізичне положення поля зйомки на зразку при ДНП

Таке специфічне положення області зйомки при ДНП було викликано необхідністю встановлення одиночного екстензометра, з метою побудови діаграми деформацій сталі на заданій базі вимірювань (11 мм). Камера в даних досліджах встановлювалася на відстані 1,5 м, щоб компенсувати переміщення траверси, яке не перевищує 0,5 мм. В даному випадку, за рахунок зменшення відстані камери до зразка, похибка зменшується до 0,033% значення деформації.

Так як в даній роботі всі імпульсні підвантаження здійснювали на висхідній ділянці діаграми деформування, то важливо, щоб залишкові деформації після складного режиму навантаження «статичний розтяг – ДНП» не перевищували деформацію шийкоутворення сталі 12Х17 при стандартному статичному розтягу (20%).

В даному параграфі розглядаються результати реалізації ДНП в сталі 12Х17 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. 5.5, для прикладу, представлено експериментальні результати в випадку, коли імпульсне підвантаження  $F_{\text{імп}} = 94,1$  кН здійснювалось практично на пружній

ділянці деформування. Для наочності, на цьому ж рисунку приведено криву деформування при статичному розтязі (крива 2).

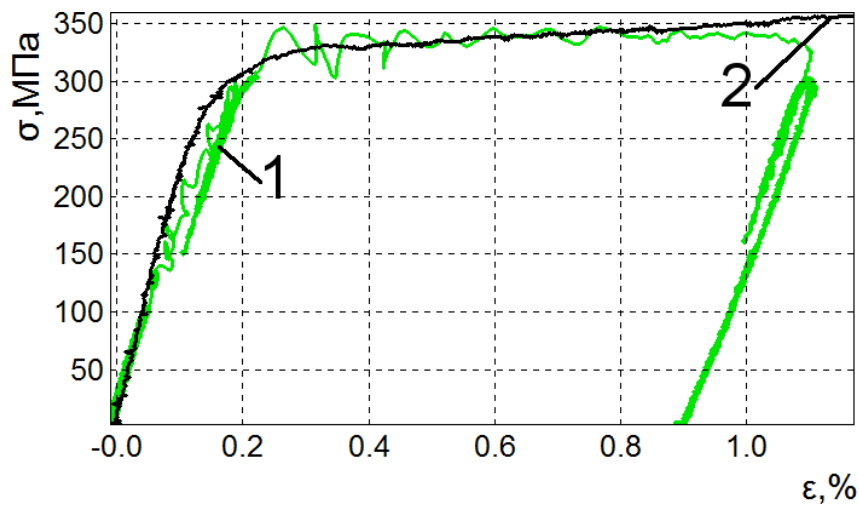
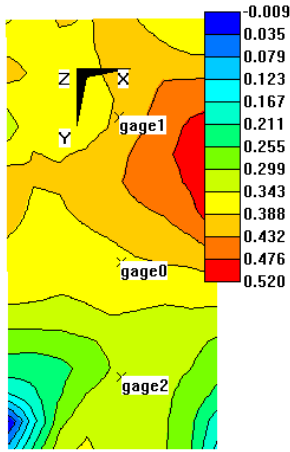


Рис. 5.5. Процес статичного деформування та ДНП нержавіючої сталі 12Х17 (величина імпульсного підвантаження 94,1 кН): 1 – крива ДНП; 2 – крива статичного деформування

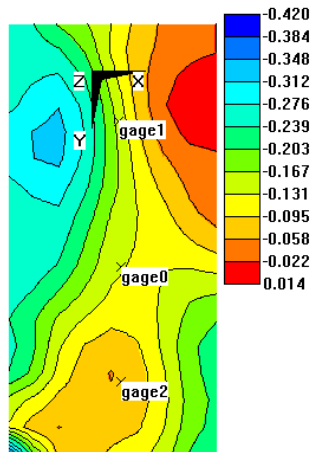
Слід відмітити, що криві деформацій при статиці і ДНП в значній мірі співпадають, і суттєве відхилення спостерігається лише наприкінці реалізації ДНП. Це може свідчити про той факт, що дисипативна структура утворюється переважно на заключному етапі такого специфічного швидкісного коливального деформування. Також слід звернути увагу на той факт, що при реалізації ДНП на макрорівні поведінка сталі практично не зміцнюється.

На відміну від випробуваних алюмінієвих сплавів (див. рис. 4.7, 4.11), графіки локальної деформації сталі при ДНП свідчать про значну однорідність поля деформації (по-точково) (рис. 5.6). Завдяки такій однорідності поля деформації достовірно визначена частота високочастотних коливань сталі при ДНП (1,2...2,4 кГц), яка залежить від випадкових факторів, які пов'язані з просторовими коливаннями рами випробувальної машини, а також швидкість деформування сталі в процесі реалізації ДНП (2...10 с<sup>-1</sup>).

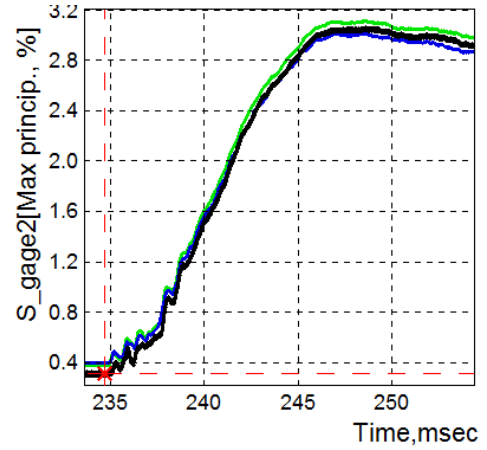
Характер поля мінімальної головної деформації практично не змінюється при порівнянні зі статичним розтягом.



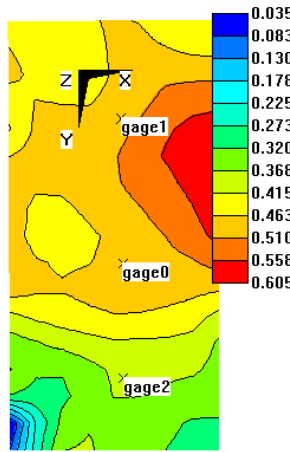
Макс. головн. деформ.,%  
Кадр:10562  
Час: 234.695 msec



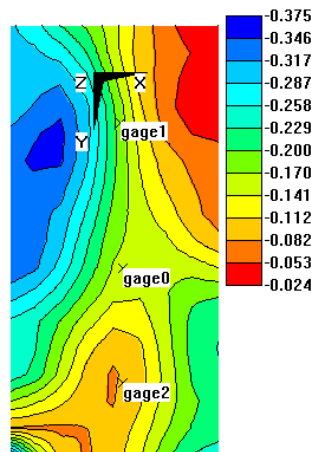
Min princip., %



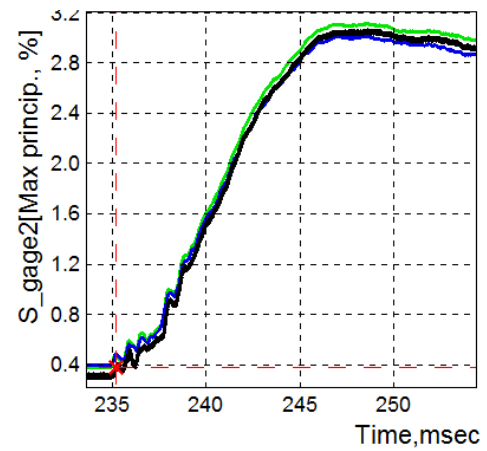
Time,msec - S\_gage0[Max princip., %]  
Time,msec - S\_gage1[Max princip., %]  
[A]Time,msec - S\_gage2[Max princip., %]



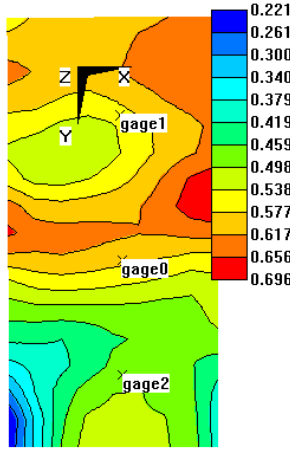
Макс. головн. деформ.,%  
Кадр:10584  
Час: 235.184 msec



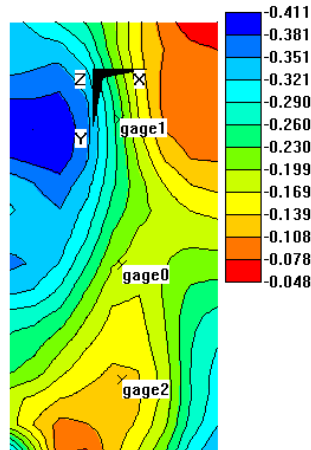
Min princip., %



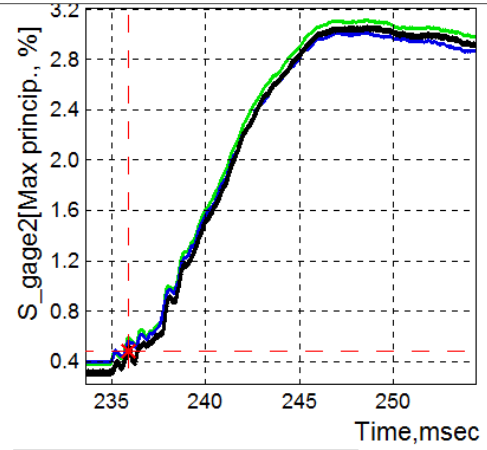
Time,msec - S\_gage0[Max princip., %]  
Time,msec - S\_gage1[Max princip., %]  
[A]Time,msec - S\_gage2[Max princip., %]



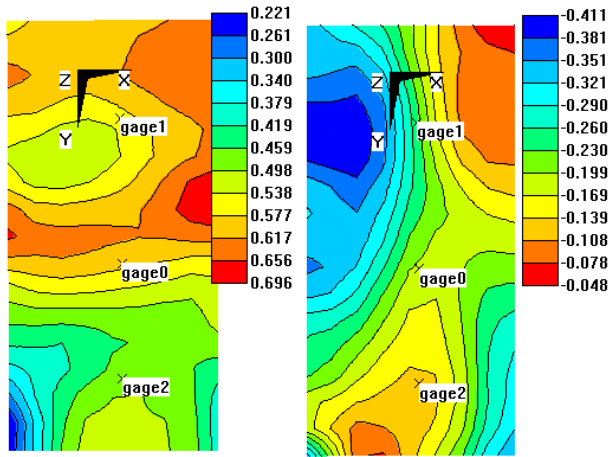
Макс. головн. деформ.,%  
Кадр:10614  
Час: 235.851 msec



Min princip., %

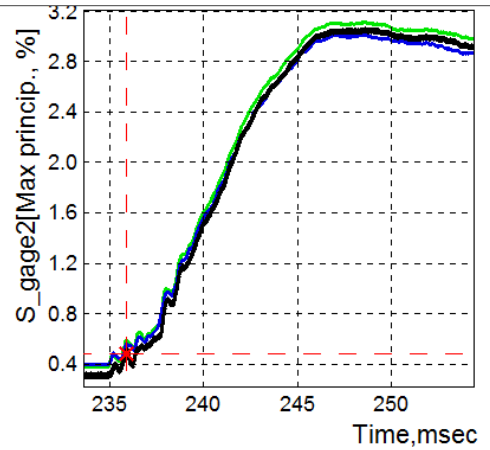


Time,msec - S\_gage0[Max princip., %]  
Time,msec - S\_gage1[Max princip., %]  
[A]Time,msec - S\_gage2[Max princip., %]

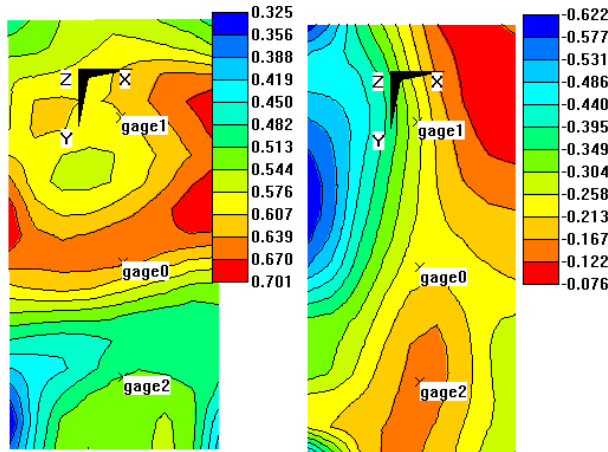


Макс. головн. деформ.,%  
Кадр:10614  
Час: 235.851 msec

Min princip., %

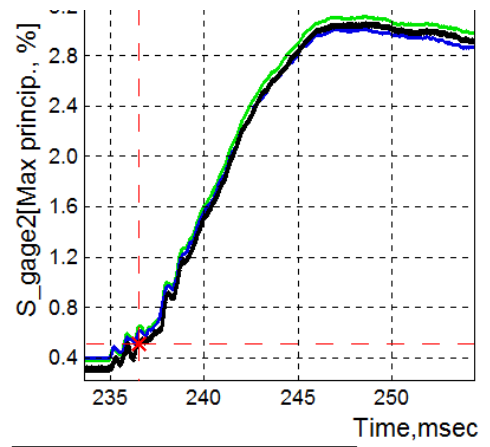


Time,msec - S\_gage0[Max princip., %]  
Time,msec - S\_gage1[Max princip., %]  
[A]Time,msec - S\_gage2[Max princip., %]

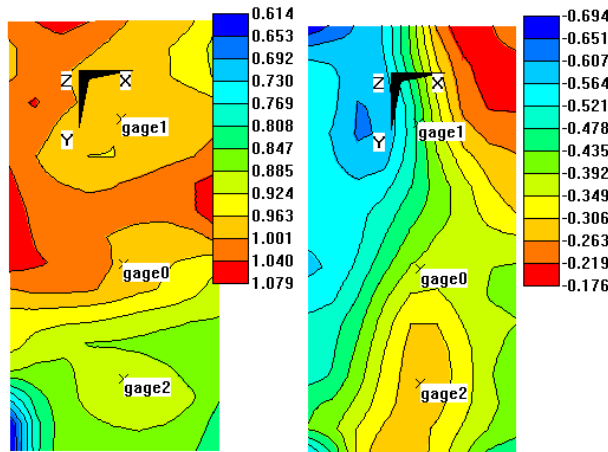


Макс. головн. деформ.,%  
Кадр:10643  
Час: 236.495 msec

Min princip., %

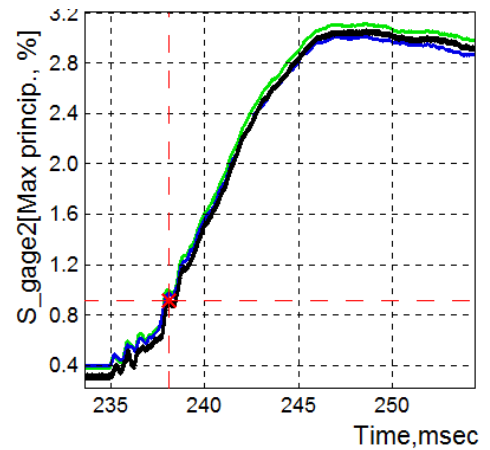


Time,msec - S\_gage0[Max princip., %]  
Time,msec - S\_gage1[Max princip., %]  
[A]Time,msec - S\_gage2[Max princip., %]



Макс. головн. деформ.,%  
Кадр:10714  
Час: 238.073 msec

Min princip., %



Time,msec - S\_gage0[Max princip., %]  
Time,msec - S\_gage1[Max princip., %]  
[A]Time,msec - S\_gage2[Max princip., %]

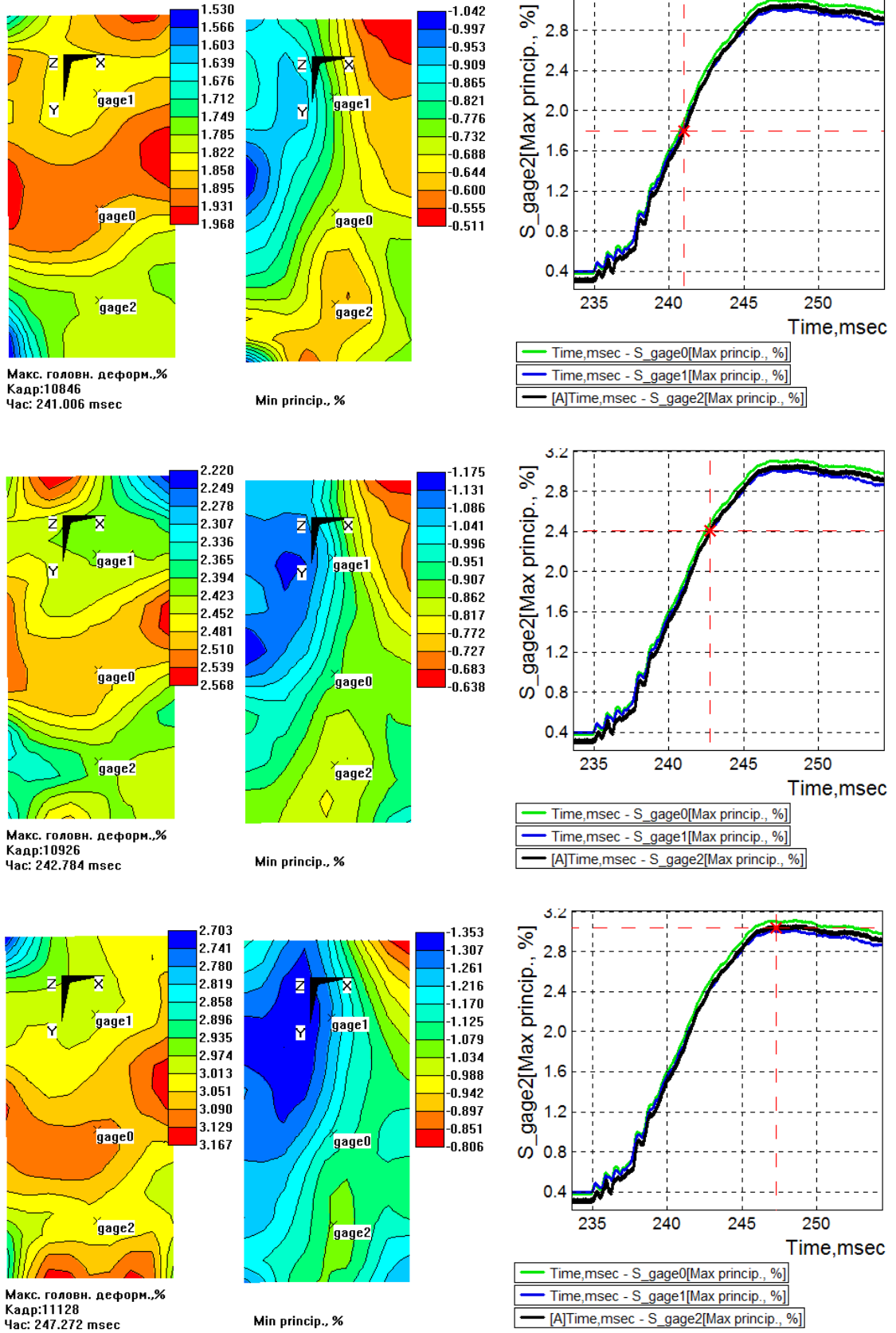


Рис. 5.6. Типова кінетика деформування нержавіючої сталі при ДНП, у базі нульового кадру

Аналізуючи рис. 5.6 слід звернути увагу на свого роду хвилю, що проходить на поверхні зразка при ДНП, що ілюструє поле максимальної головної деформації [217]. Фронт цієї «хвилі» рухається з невисокою швидкістю 0,3-0,7 м/с. Така різниця між полем максимальної і мінімальної деформацій наводить на висновок, що до структурної зміни може бути чутливим коефіцієнт поперечної деформації, проте щоб його підтвердити потрібні детальні металофізичні дослідження у реальному часі ДНП (10-20 мс), що на жаль, на теперішній час не можливо. Крім того на рис. 5.6 чітко видно коливальний процес навантаження, особливо, на початковій ділянці процесу. Ці коливання мають частоту 1,2-2 кГц і викликані внутрішнім навантажуючим контуром машини, так як цей діапазон частот відповідає його власній частоті. Їх розкид викликано просторовими коливаннями рами, які являють собою основний елемент випадковості при даних випробуваннях. В процесі ДНП максимум деформації прямує до центральної частини зразка, проте після розвантаження і подальшому деформуванні він зміщується до периферії. Його рух не однорідний і траєкторія зазвичай має серповидний вигляд. Крім цих зазначених особливостей процес деформування під час ДНП особливо нічим не відрізняється від процесу статичного деформування.

### **5.3. Кінетика поля деформації нержавіючої сталі 12Х17 після ДНП**

Для виявлення особливостей процесу статичного деформування сталі 12Х17 після реалізації ДНП оптимально зіставити цю кінетику поля деформації з кінетикою стандартного статичного розтягу.

Як видно з рис. 5.7 кінетика процесу статичного деформування після ДНП дещо змінюється, проте ці зміни не значні. Так, поле деформації 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.

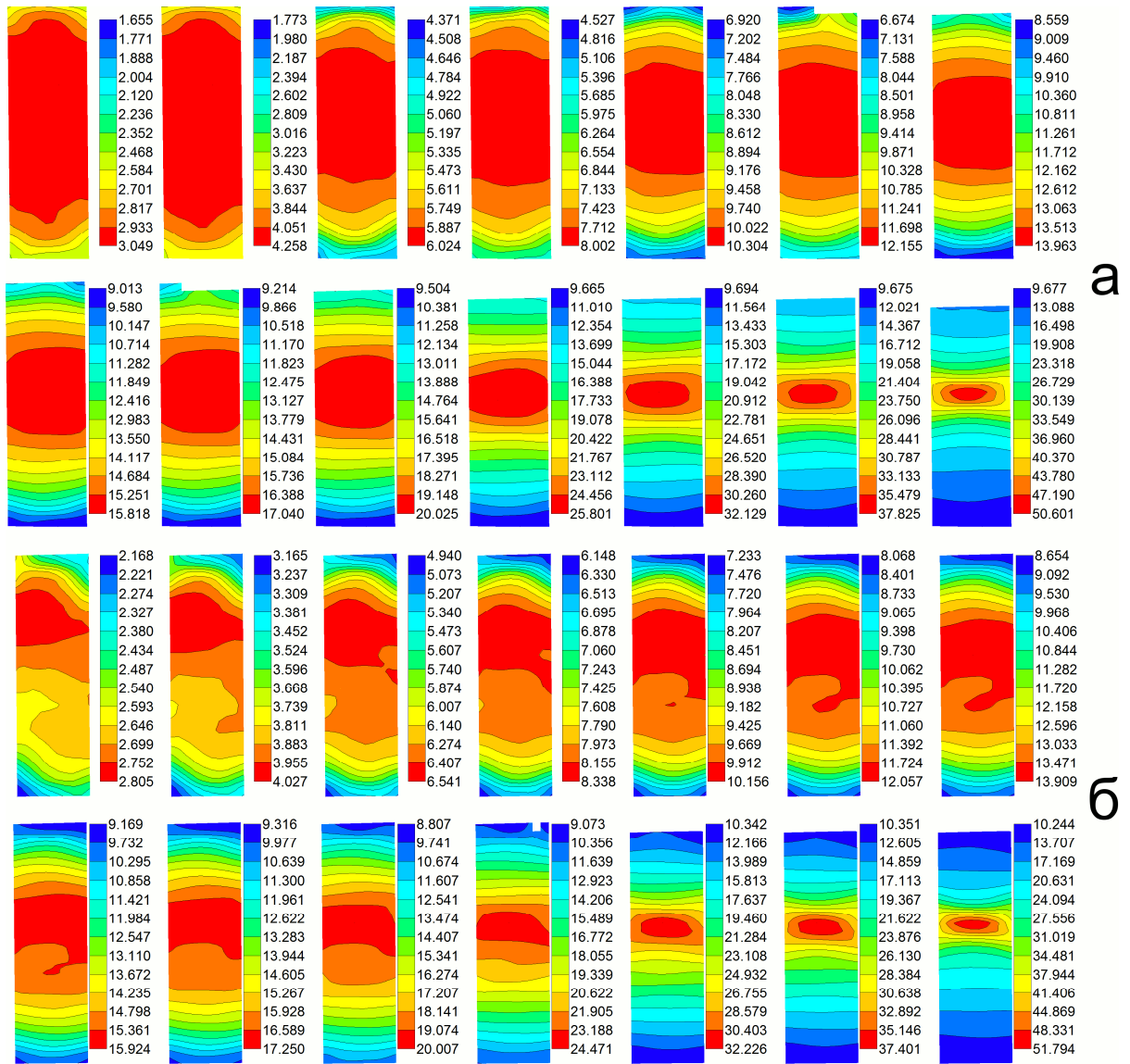


Рис. 5.7. Порівняння процесу статичного деформування, для обох процесів встановлено однакову базу – базу нульового кадру після ДНП: а – поля деформації при статичному деформуванні; б – поля деформації при статичному деформуванні після ДНП



Подальший аналіз проводився з метою виявлення відмінностей у поведінці окремих механічних характеристик сталі після ДНП. 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 12Х17. Момент початку шийкоутворення оцінювався як класичним методом – визначався максимумом на діаграмі деформація-зусилля, так і специфічним методом кореляції цифрових зображень, який використовує все поле деформацій. Між значеннями, отриманими різними методами, було встановлено чітку відповідність, що засвідчило ефективність використання інформації по полю деформації.

На рис. 5.8 наведено залежність початку шийкоутворення від локальної руйнівної деформації, даний графік явно свідчить про затримку процесу утворення шийки, викликану дією ДНП.

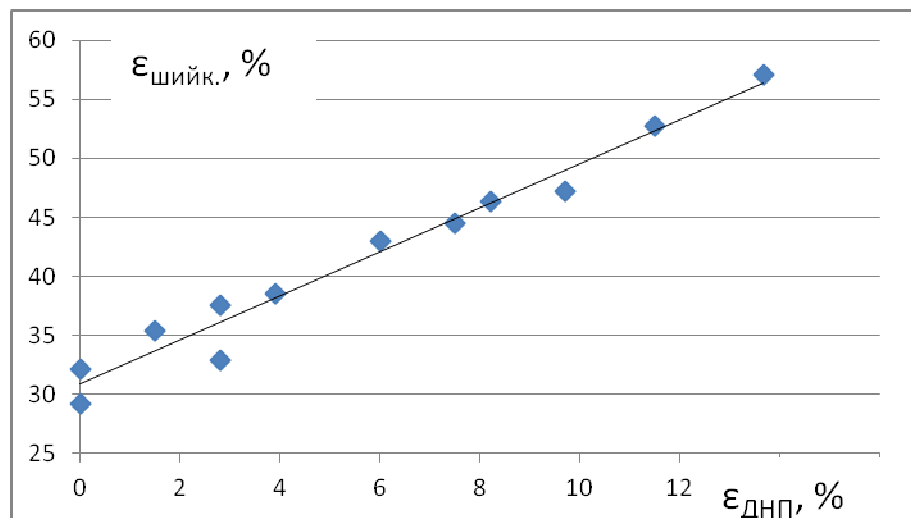


Рис. 5.8. Залежність початку шийкоутворення у відсотках до локальної руйнівної деформації від величини деформації отриманої внаслідок ДНП (різниця між початковим і кінцевим значеннями) в порівнянні зі статикою

Така затримка може бути викликана акумуляцією дислокацій у смуговій структурі, тобто одна смуга пропускає дислокації (смуга-коридор), а інша чинить опір їх руху (смуга-бар'єр). Опір цієї структури руху дислокацій при

подальшому деформуванні після ДНП, імовірно, призводить до зменшення їхньої концентрації у смугах-коридорах. В той же час смуги-бар'єри насичуються дислокаціями, що й забезпечує затримку шийкоутворення до моменту penetрації смуг-бар'єрів дислокаціями. З рис. 5.9 чітко видно падіння пластичності після ДНП для даного матеріалу.

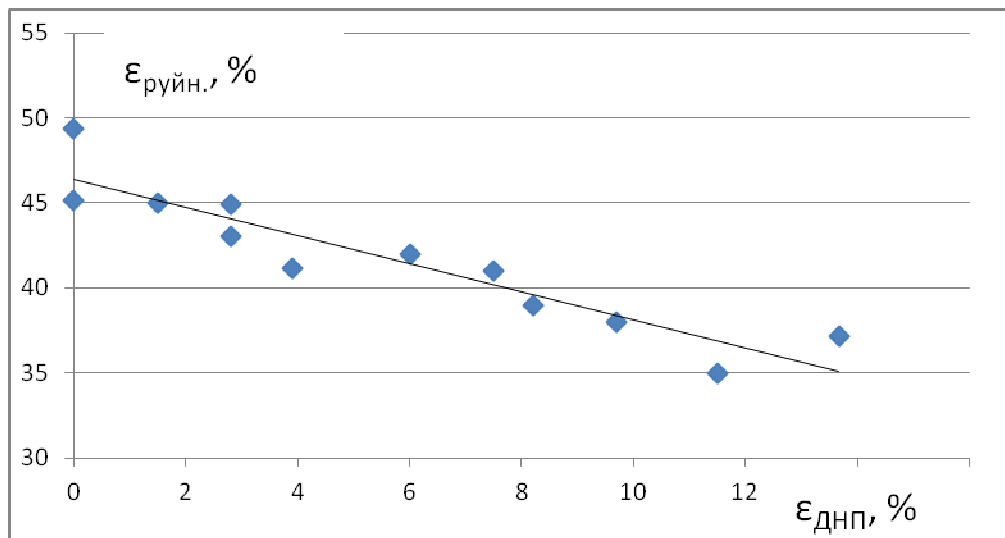


Рис. 5.9. Залежність руйнівної деформації по віртуальній базі 2 мм від величини деформації отриманої внаслідок ДНП (різниця між початковим і кінцевим значеннями), в порівнянні зі статикою

Це явище знову ж можна пояснити подібним чином – у смугах-коридорах процес утворення пористості проходить значно інтенсивніше ніж у базовому матеріалі, що викликано зменшеною щільністю дислокацій, тому утворені пори мають більший розмір і процеси їх злиття пришвидшуються. Таким чином, вищезазначені графіки можуть свідчити про збільшення однорідності механічних властивостей в даному виді матеріалу після ДНП.

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.

На рис. 5.10 показана картина процесу ДНП та подальше статичне деформування матеріалу. Для порівняння на цей графік накладена крива статичного деформування.

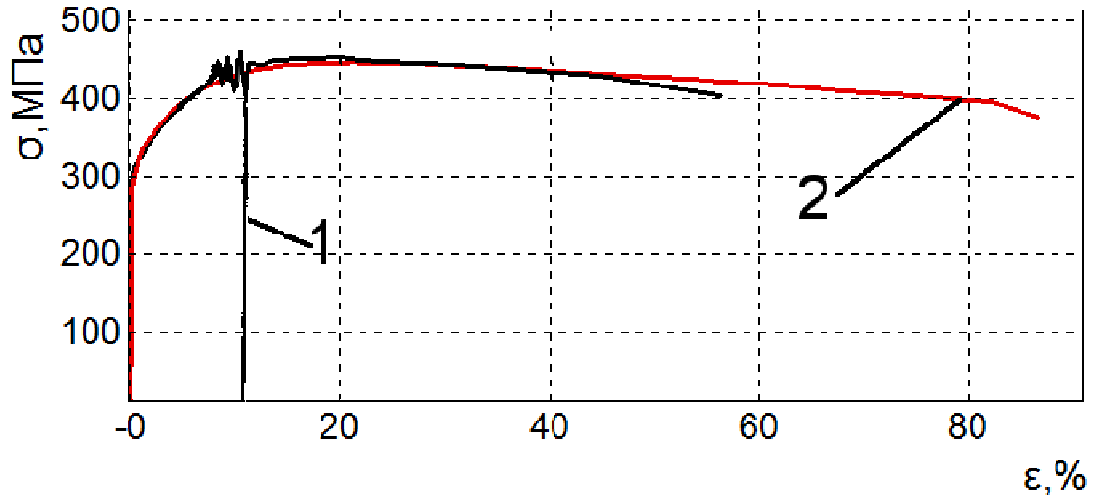


Рис. 5.10. Типова картина впливу ДНП на міцність та пластичність нержавіючої сталі в короткотривалому інтервалі часу витримки після ДНП (до 1 тижня) у координатах «локальна максимальна головна деформація у точці руйнування – напруження»: 1 – після ДНП; 2 – статика

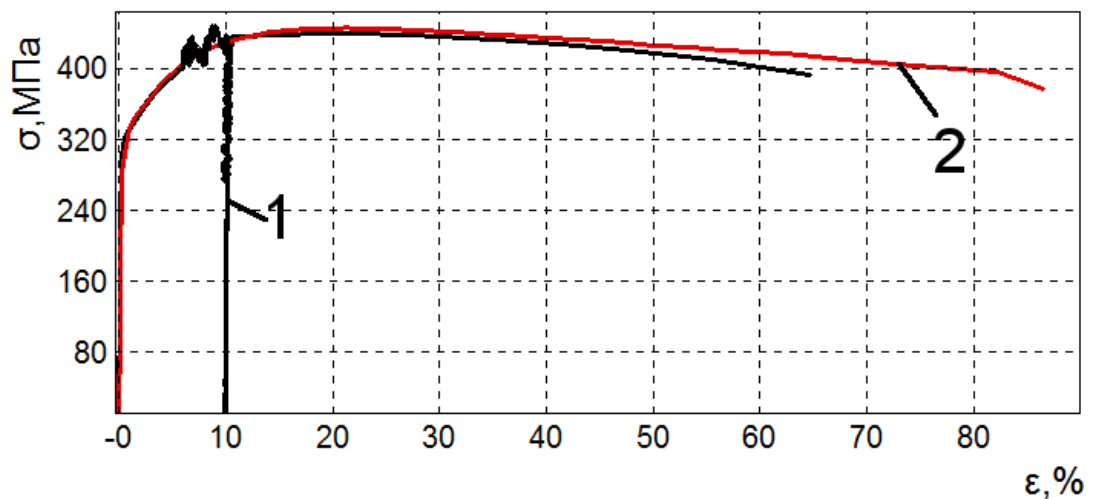


Рис. 5.11. Типова картина впливу ДНП на міцність та пластичність нержавіючої сталі в короткотривалому інтервалі часу витримки після ДНП (3 місяці) у координатах «локальна максимальна головна деформація у точці руйнування – напруження»: 1 – після ДНП; 2 – статика

Загалом при короткотривалій витримці фіксується зміна кривизни діаграми напруження-деформація в ділянці «шийкоутворення» та падіння пластичності на 20-30%. При довготривалій витримці не фіксується суттєвої зміни кривизни графіка, лише відмічається падіння пластичності на 15-35%. Цей факт опосередковано свідчить про наявність релаксаційних процесів на макрорівні, вплив яких необхідно враховувати при побудові моделей поведінки матеріалів при таких складних режимах навантаження та оцінок коефіцієнтів запасу міцності.

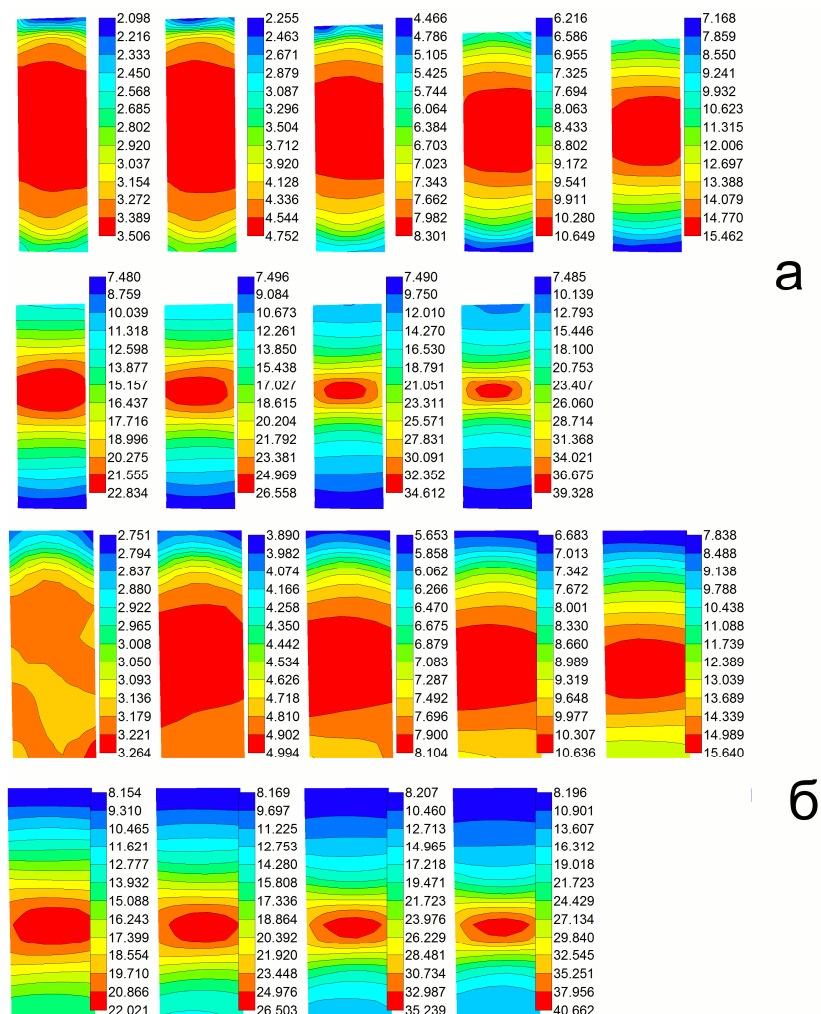


Рис. 5.12. Порівняння процесу статичного деформування, для обох процесів встановлено однакову базу – базу нульового кадру після ДНП: а – поля деформації при статичному деформуванні; б – поля деформації при статичному деформуванні після ДНП, з витримкою 3 місяці

Як видно з рис. 5.12 витримка тривалістю у 3 місяці призводить до змін в поведінці поля деформації, що підтверджує гіпотезу про наявність релаксаційних процесів у матеріалі. Також, знову проступає «розмазаність» та не симетричність поля деформації після ДНП, та видно, що максимум поля деформації знову рухається від периферії до центральної частини, затримуючи при цьому утворення шийки. Проте, після витримки після реалізації ДНП поле деформації 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. Тому, імовірно, рівень пластичності після витримки не зростає в порівнянні із рівнем без витримки. Крім того менша вираженість процесу руху поля деформації свідчить про менші затримки у русі дислокацій, що вказує на те, що після релаксації якісні і кількісні характеристики структури матеріалу значно змінюються.

Для більш детального аналізу поля деформації після витримки, необхідно оцінити неоднорідність поля деформації при статиці. Це необхідно зробити для того, щоб оцінити помилку викликану зміною базового кадру при відокремленні зразка від випробувальної машини, і відповідно, зміни проекції зразка, оскільки не можливо попасти в абсолютно те саме положення. Тобто, необхідно відповісти на питання - чи можливо використовувати середнє значення деформації для перерахунку у нову базу? Оскільки всі імпульсні підвантаження реалізовували при деформації не більше ніж 10%, то аналіз будемо проводити лише для цього інтервалу. Шийкоутворення і руйнування відбувалося у межах центральної частини зразка – квадратної області розміром 25x25 мм. Тому для аналізу кінетики однорідності деформування зразка, обмежимося областю 50 мм по довжині зразка і шириною із зразок, розташованою у центрі. Величину неоднорідності будемо оцінювати на основі різниці максимальної і мінімальної деформації по цьому полю.

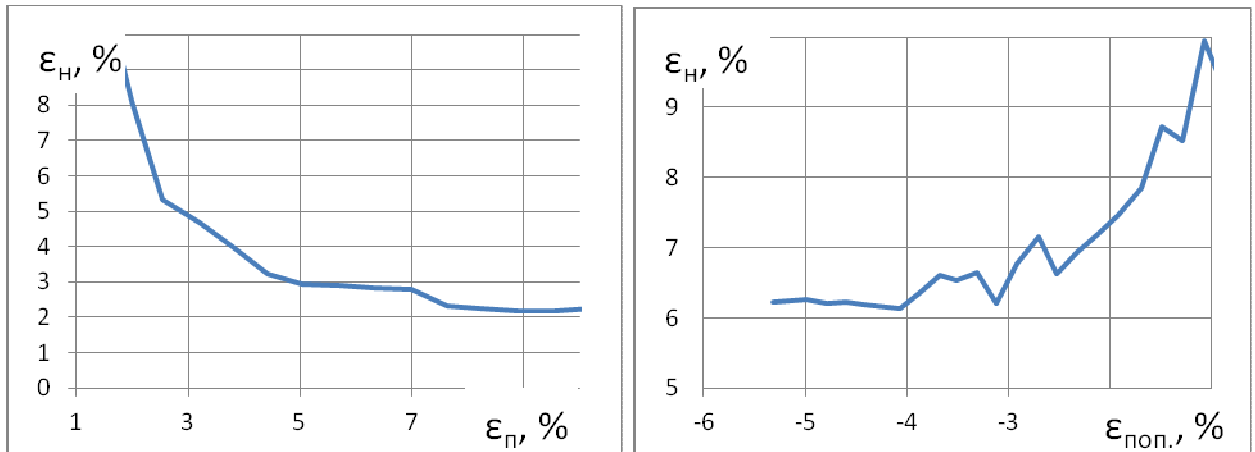


Рис. 5.13. Відносна неоднорідність деформації при статичному деформуванні:  
 а-поздовжня деформація – її неоднорідність; б-поперечна деформація – її  
 неоднорідність

Таким чином, як видно з рис. 5.13, можна зробити висновок, що цілком можливо просто використати відповідні значення статичної деформації, для переходу у базу зміненого кадру. Такий перехід не внесе великої похибки у результат. Крім того, для підвищення точності результатів перерахуємо поле деформування у статиці до відповідних значень після ДНП. Для оцінки величини однорідності будемо оцінювати площу, яку займає максимальна головна деформація від свого максимального значення з допуском на неоднорідність в 30% і 10% від повного розмаху неоднорідності. Таким чином отримаємо криві, зображені на рис. 5.14, що відповідають значенням одразу після ДНП та криві на рис. 5.15, які відповідають значенням з витримкою після ДНП величиною у три місяці. В такий спосіб можна буде оцінити вплив релаксаційних процесів на однорідність деформування матеріалу, крім того цей спосіб визначення однорідності процесу деформування можна вважати достатньо точним, оскільки величина площі визначається за допомогою розробленого програмного пакету, що виключає людський фактор. Крім того це достатньо монотонна величина, тому будь-які відхилення в її значенні свідчить про наявність внутрішніх фізичних факторів, що викликають ці зміни.

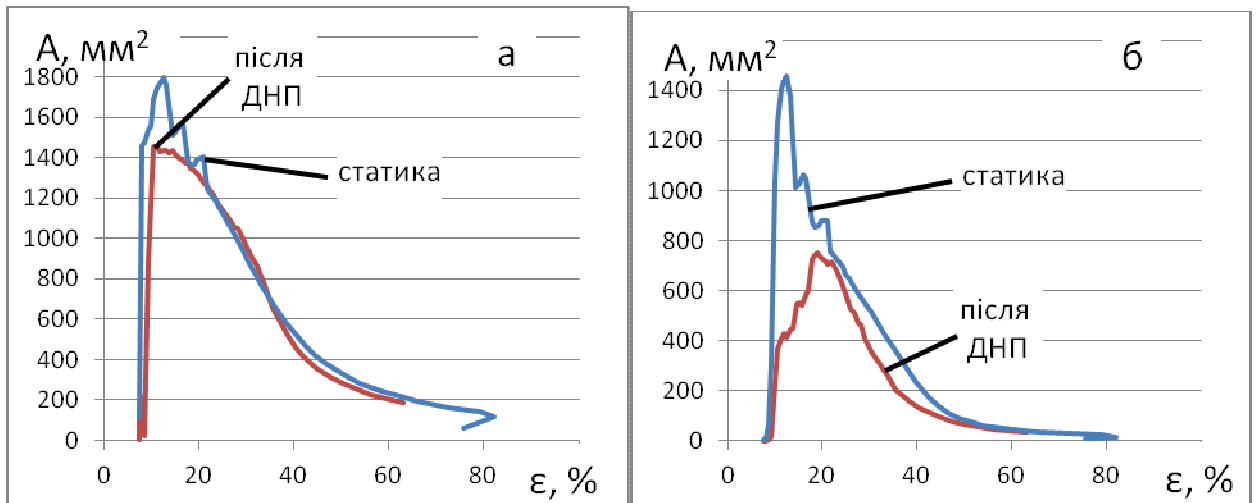


Рис. 5.14. Залежність однорідності поля деформації одразу після ДНП. По осі абсцис – поточна максимальна деформація, по осі ординат – поточна площа однорідної деформації. а – площа з допуском 30% в різниці максимального і мінімального значень деформації; б – площа з допуском 10% в різниці максимального і мінімального значень деформації

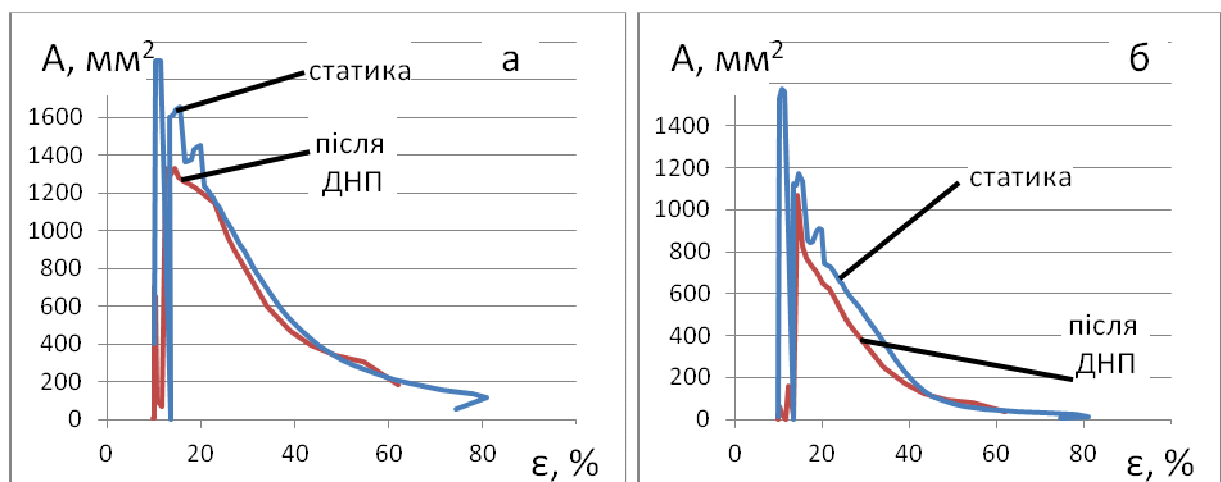


Рис. 5.15. Залежність однорідності поля деформації через три місяці ДНП. По осі абсцис – поточна максимальна деформація, по осі ординат – поточна площа однорідної деформації. а – площа з допуском 30% в різниці максимального і мінімального значень деформації; б – площа з допуском 10% в різниці максимального і мінімального значень деформації

З рис. 5.14, 5.15 чітко видно вплив релаксаційних процесів. Так, при великому значенні допуску процеси деформування протікають практично

однаково як до, так і після витримки. Значення площі однорідності дещо зменшується в порівнянні зі статикою, проте це зменшення не набагато перевищує статистичну похибку. Тут слід зазначити, що максимуми значень однорідності площі не відповідають моменту вираженого шийкоутворення, тобто, в даному випадку шийкоутворення супроводжується приростом зусилля на діаграмі деформування матеріалу «зусилля-видовження». Особливо слід звернути увагу на рис. 5.14б, на ньому видно затримку не вираженого шийкоутворення і в той же час падіння абсолютного значення площі однорідного поля деформації. Таким чином одразу ж після ДНП матеріал отримує можливість витримати більшу неоднорідність поля деформування протягом довшого періоду деформування. В той же час, матеріал після релаксаційних процесів все ще має затримку не вираженого шийкоутворення і практичну ту саму величину однорідної площі деформуванні, що й при статистиці. Таке явище можливо в випадку збільшення однорідності механічних властивостей матеріалу. Оскільки матеріал набуває здатність витримувати більшу неоднорідність поля деформації, тому його опір руйнування при утворенні тріщини може зростати. Це підтверджують попередні дослідження поведінки матеріалу після ДНП при утворенні у ньому тріщини [200]. Отже, дисипативна структура збільшує тріщиностійкість матеріалу за рахунок підвищення здатності матеріалу витримувати неоднорідну деформацію, яка, власне, має місце в околі тріщини.

Для підтвердження цього факту було додатково проведено контроль якості структурного стану поверхні досліджуваних зразків.

#### **5.4. Контроль якості структурного стану нержавіючої сталі після складного режиму навантаження (статичний розтяг – ДНП)**

Оцінку структурного стану проводили з використанням відомого ЛМ-методу, розробленого в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України [224, 225]. Даний метод дозволяє робити судження про зміни



структурного стану за допомогою параметру, що характеризує ступінь розсіювання характеристик твердості по поверхні матеріалу. В даній роботі за параметр розсіювання було прийнято коефіцієнт гомогенності  $m$ , що розраховується за формулою Гумбеля [226]. Очевидно, що більшим значенням коефіцієнта  $m$  відповідає низький рівень розсіювання характеристик твердості, і, відповідно, краща структурна організація матеріалу. Дослідження проводили в три етапи. На першому етапі 4 зразки розтягували до певного значення статичної деформації (6,68;8,03;11,68;14,42%) і піддавали впливу ДНП. На другому етапі чотири аналогічні зразки розтягували статично до рівня залишкових деформацій, зареєстрованих при складному режимі навантаженні «статичний розтяг - ДНП» (9,64;11,36;14,64;18,20%).

На заключному, третьому етапі, всі випробувані зразки, включаючи один повністю не деформований, полірували з одного боку і наносили на поліровану частину сітку із 12 однакових прямокутників (рис. 5.16). Після чого на переносному твердомірі «Computest SC» швейцарського виробництва в кожному з прямокутників було зроблено не менше 27 проб твердості по шкалі НВ (див. рис. 5.16).

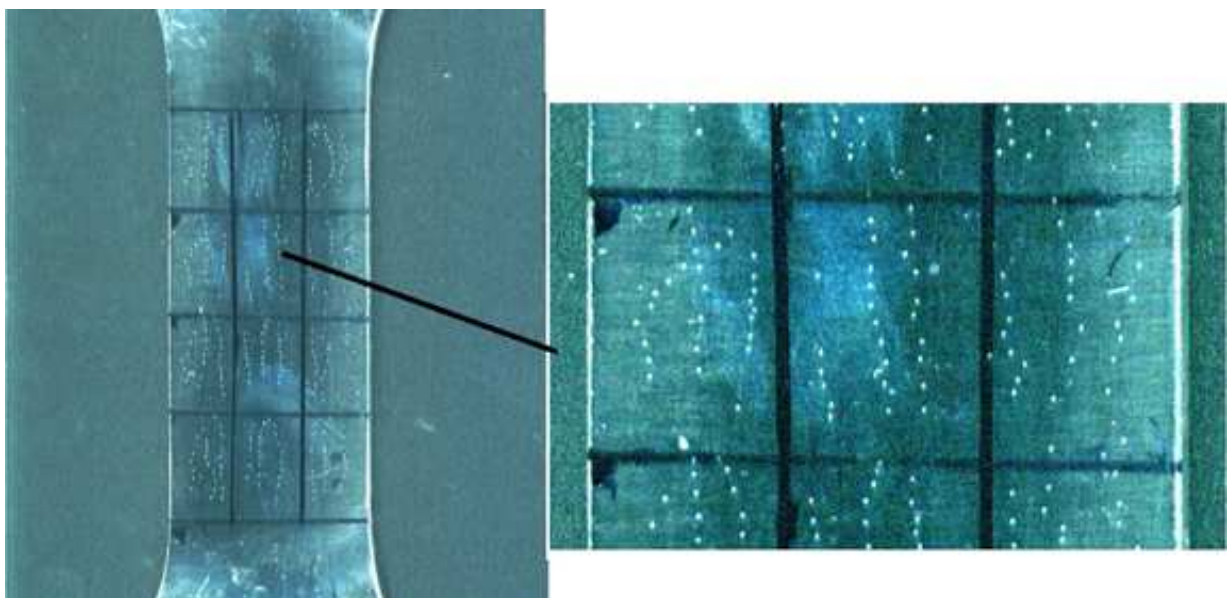


Рис. 5.16. Сітка на зразку для вимірювання твердості і місце розташування уколів

На основі цих даних було проведено порівняння поля залишкової деформації після ДНП з розподілом коефіцієнта гомогенності [227]. Центральній частині прямокутника присвоювалося середнє значення коефіцієнта гомогенності,  $i$ , базуючись на цих значеннях, будувалася інтерполяція за допомогою ермітових сплайнів на все поле зразка (рис. 5.17).

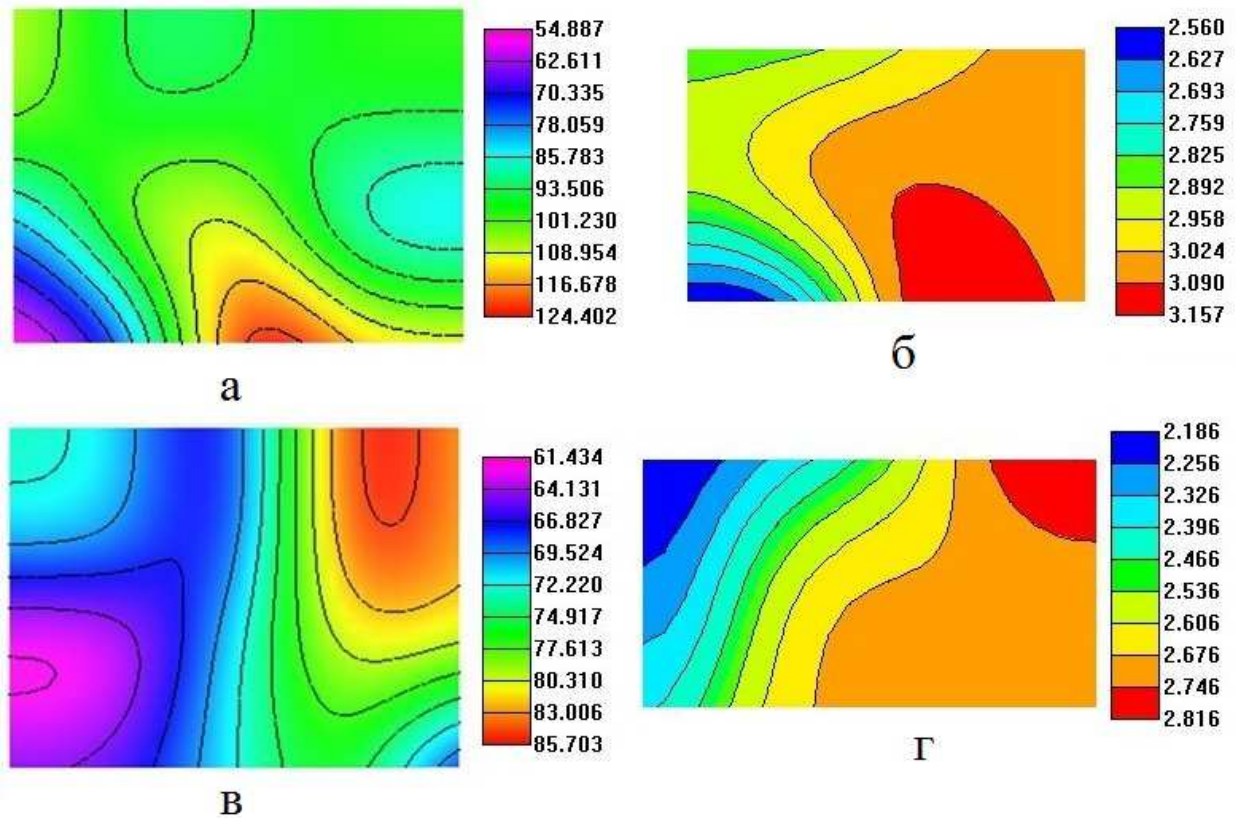


Рис. 5.17. Поля залишкової поздовжньої деформації і коефіцієнта гомогенності  $m$  на поверхні розвантажених зразків (деформацію обчислено відносно кадру, що відповідає моменту ввімкнення камери): а,б – зразок №3 (коефіцієнт гомогенності і поле деформації, відповідно); в,г – зразок №4 (коефіцієнт гомогенності і поле деформації, відповідно)

З рис. 5.17 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 гомогенності в залежності від залишкової деформації. Аналіз проводився як для всієї робочої області зразка так і для центрального прямокутника на зразку. Це дозволило

відслідкувати як локальні відмінності, що можуть бути пов'язані із неоднорідним розподілом залишкових напружень у матеріалі після реалізації ДНП, так і усереднені характеристики по всій робочій зоні зразка.

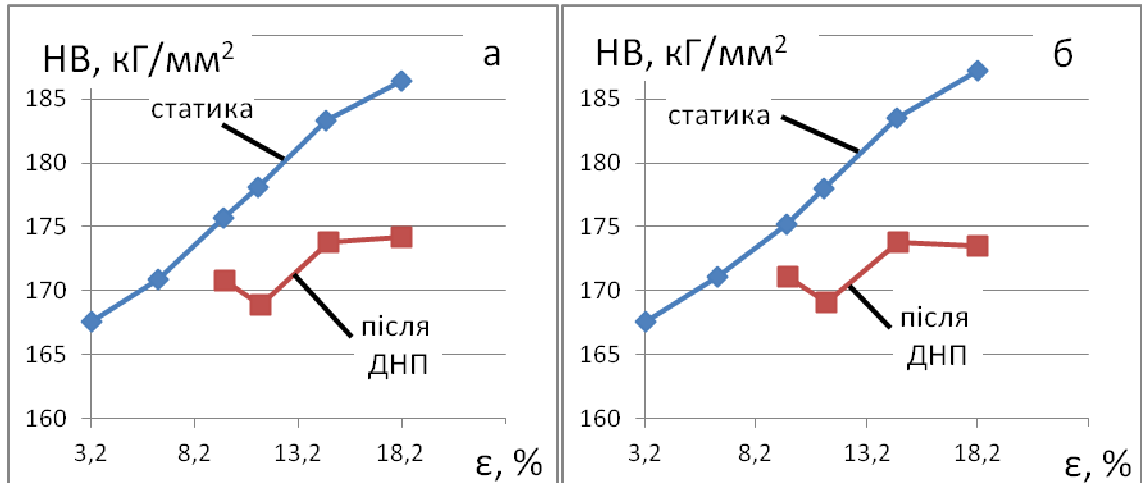


Рис. 5.18. Розподіл твердості в залежності від залишкової деформації: а – середня величина по всій робочій ділянці зразка; б – середня величина по центральному прямокутнику

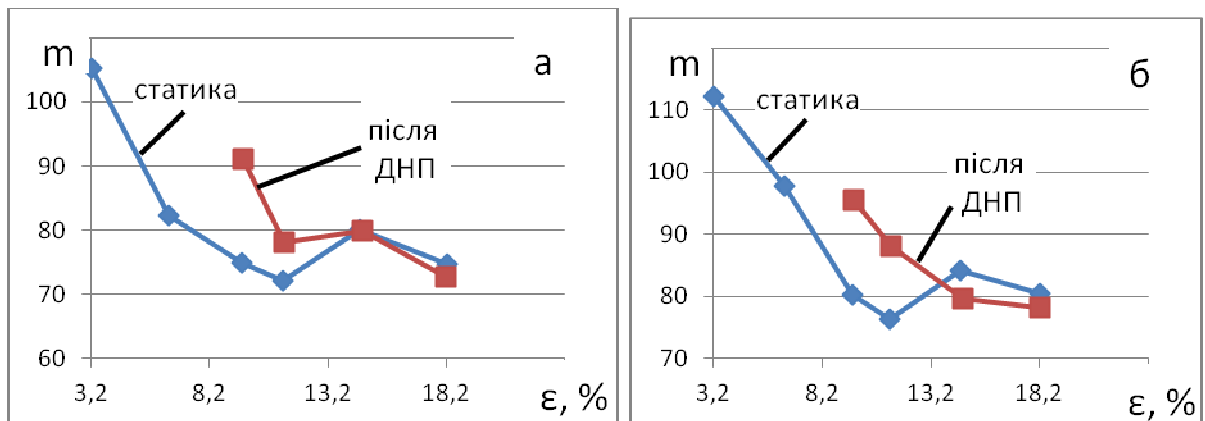


Рис. 5.19. Розподіл коефіцієнта гомогенності  $m$  в залежності від залишкової деформації: а – середня величина по всій робочій ділянці зразка; б – середня величина по центральному прямокутнику

З рис. 5.18 видно суттєве падіння твердості після реалізації ДНП, особливо при більших значеннях деформації. В той же час яке-небудь значне падіння міцності відсутнє. Це явище лише підтверджує відомий факт [189], що

реалізація ДНП на ділянці деформування близькій до утворення шийки і далі значно погіршує механічні властивості матеріалу. Крім того, вузький діапазон твердості 170-175НВ,  $\text{кГ/мм}^2$  після ДНП у широкому діапазоні деформацій свідчить про домінуючий вплив утвореної структури в результаті ДНП на твердість. При подальшому статичному деформуванні після ДНП поведінка матеріалу прямує до притаманної йому при статиці, що чітко видно з рис. 5.12. В той же час поведінка коефіцієнта гомогенності чітко вказує на збільшення однорідності механічних властивостей матеріалу після ДНП, хоча знову ж таки, в діапазоні близькому до шийкоутворення однорідність прямує до значень при статиці. Таким чином, структурні зміни у матеріалі, що відбуваються внаслідок ДНП, значно впливають на макро характеристики процесу деформування нержавіючої сталі [227, 228].

### 5.5. Дослідження поля деформації високоміцної корпусної сталі після ДНП

Випробування проводили на плоских зразках шириною 6,5 та товщиною 4,8 мм (рис. 5.20).

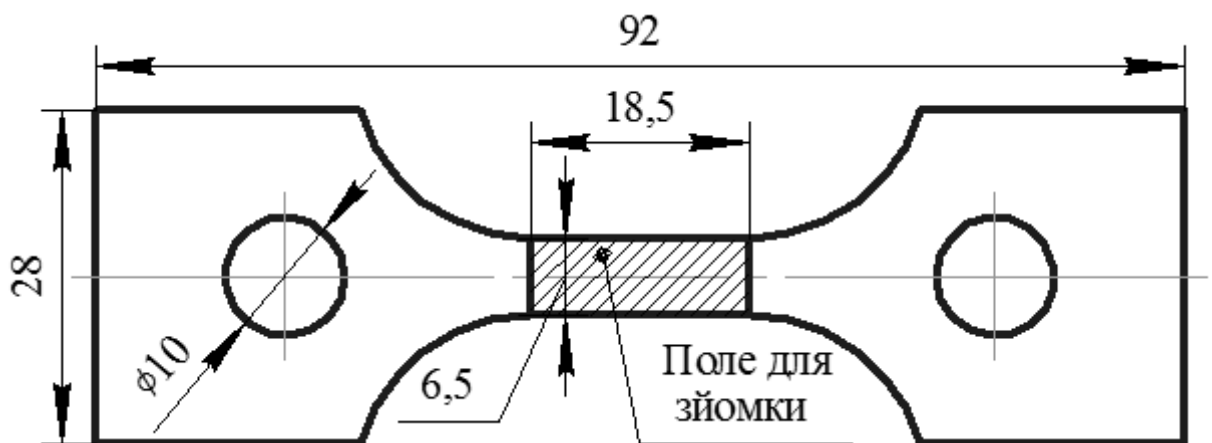


Рис. 5.20. Зразок для випробувань високоміцної сталі та фізичне положення його поля деформації

Схема вирізки зразків з плитки розмірами 150x150x10 мм показана на рис. 5.21. Така схема вирізки забезпечує мінімальну можливу варіацію механічних властивостей, пов'язану із конструктивними вимогами.

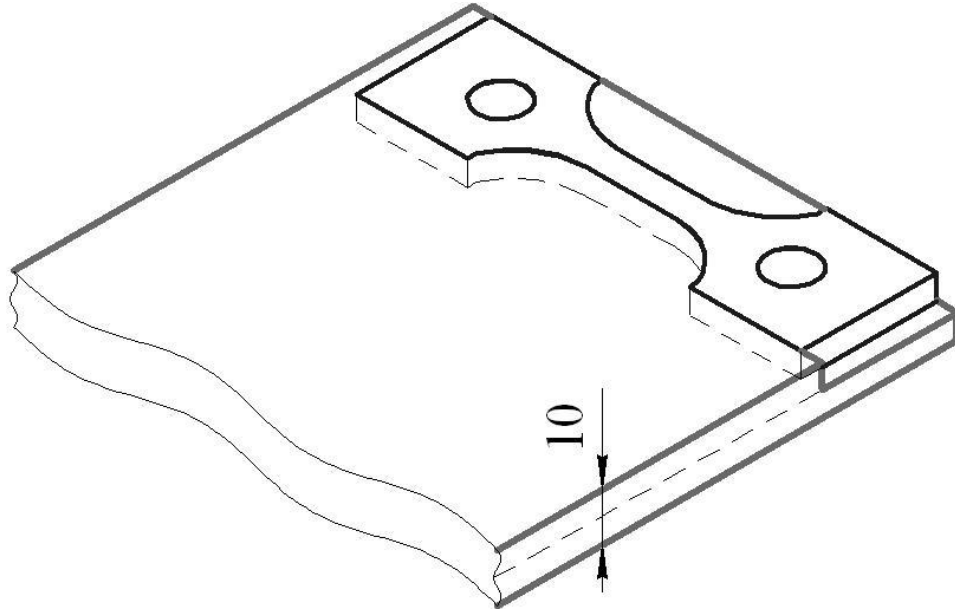


Рис. 5.21. Схема вирізки зразків з вихідної плитки

Випробування 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, випробувані при складному режимі навантаження (статичний розтяг – ДНП), включаючи і один у вихідному стані наносили однаковий концентратор (рис. 5.22), а потім на ударному копрі PSW-30 оцінювали ударну в'язкість сталі в залежності від рівня залишкової деформації після імпульсного введення енергії у матеріал. Задля забезпечення стабільності форми і розмірів концентратора, механічна обробка зразків проводилася у пакеті. Концентратор наносився на всіх зразках з однієї сторони відносно краю плитки вихідного матеріалу.



Рис. 5.22. Вигляд зразка для оцінки ударної в'язкості сталі

На рис. 5.23, для прикладу, представлені типові криві деформування сталі після імпульсного введення енергії у матеріал при режимах низької і високої залишкової деформації, відповідно для зразків №3,6. Тут же, для порівняння, приведено стандартну криву деформування сталі при статичному розтязі (крива 1). 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 на зразку фіксувалася залишкова деформація стиску. Це може свідчити тільки про те, що при імпульсному введенні енергії утворюється дисипативна структура, при цьому більша частина об'єму матеріалу, що знаходиться між цією новою структурою, піддається інтенсивному стиску.

Інтенсивний стиск можна пояснити імовірним утворенням дисипативної структури в окремих шарах матеріалу, які, внаслідок, розширення стискають оточуючий матеріал. Зокрема, на користь цього пояснення може свідчити факт утворення макрогофру у матеріалі при дослідженні його поведінки при специфічному режимі реалізації ДНП [194]. Так утворення такого гофру відбувалося при загальній деформації розтягу, проте, сам факт його утворення свідчить про наявність у матеріалі стискаючих напружень. Утворення такого гофру досягалося за рахунок наявності згину на досліджуваному зразку, хоча макронапруження не були від'ємними. При випробуванні високоміцної сталі, деформація стиску утворилася саме за рахунок градієнтальності його



механічних властивостей, так як напруження згину викликані дією зовнішньої навантажуючої системи в даному випадку відсутні.

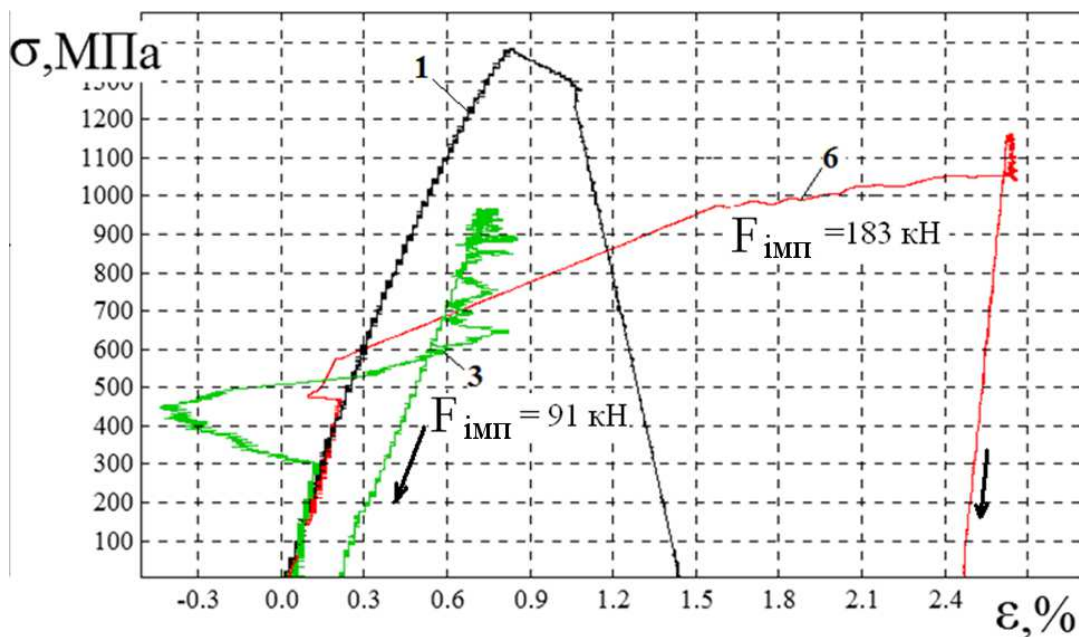


Рис. 5.23. Діаграми деформування сталі: 1 – статичний розтяг; криві 3,6 – після імпульсного введення енергії різноманітної інтенсивності при різних заданих рівнях статичної деформації

Причому слід відмітити, що спостерігається значна неоднорідність поля залишкової деформації на робочій частині зразків після імпульсного введення енергії у матеріал [229] (рис. 5.24). Також, слід відмітити значну відмінність у положенні мінімуму та максимуму поперечної і поздовжньої деформації відповідно, що вказує на непропорційність між ними. Даний ефект, також, можна пояснити складним режимом технологічної обробки при виготовленні даної сталі, що забезпечує градієнтальність механічних властивостей по товщині вихідної плити. Таким чином, вплив таких складних процесів як ДНП, на матеріал, що володіє неоднорідними механічними властивостями суттєво відрізняється від його впливу на звичайні, однорідні конструкційні матеріали.

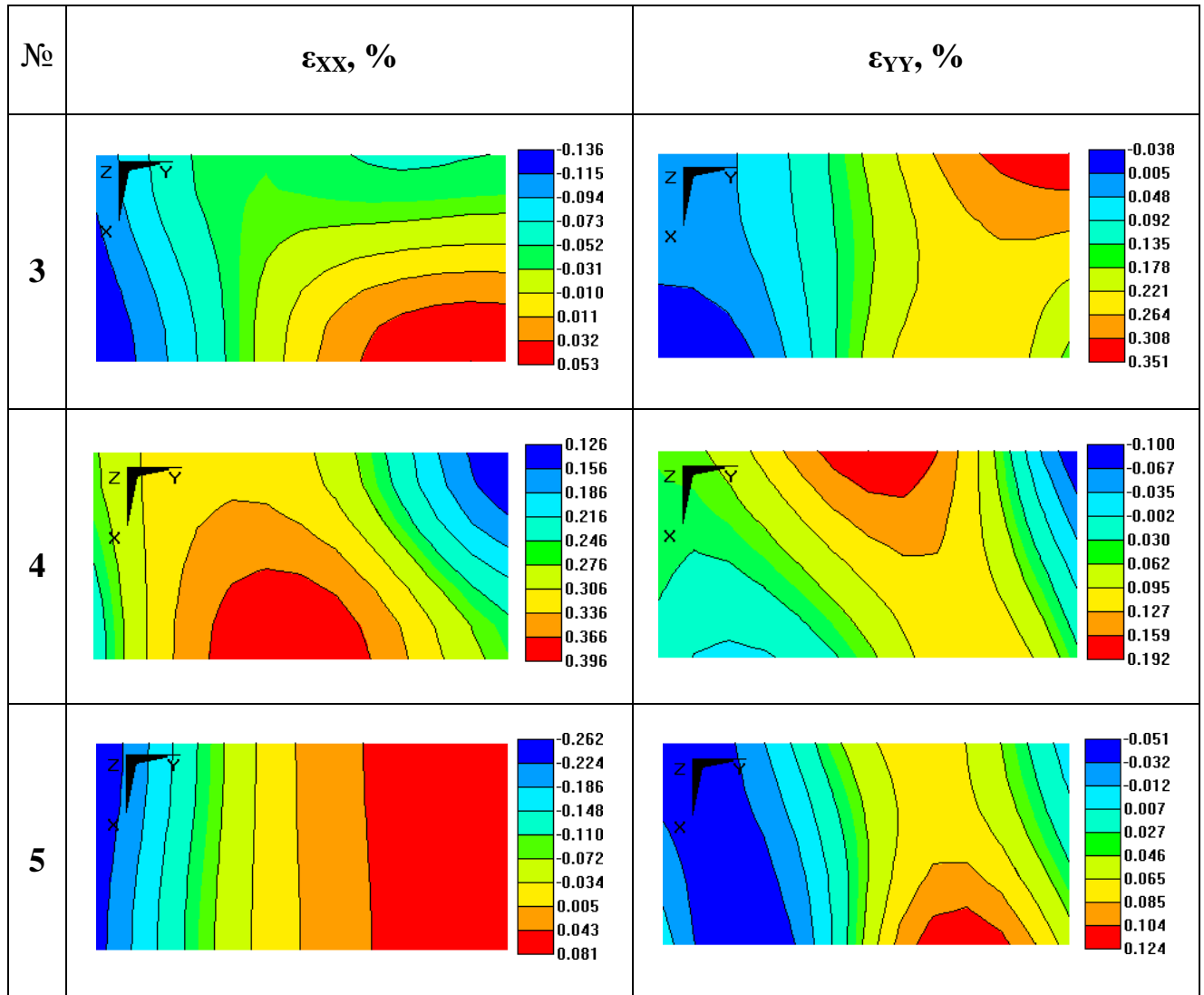


Рис. 5.24. Поля залишкової деформації після імпульсного введення енергії до сталі. Напрямок розтягу – вісь у. 3,4,5 – номери випробуваних зразків

На рис. 5.25 представлено дані по оцінці ударної в'язкості сталі в залежності від режиму імпульсного введення енергії у матеріал (заданого рівня попередньої пружної деформації, при якому здійснювались імпульсні підвантаження і заданої інтенсивності імпульсних підвантажень). 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.



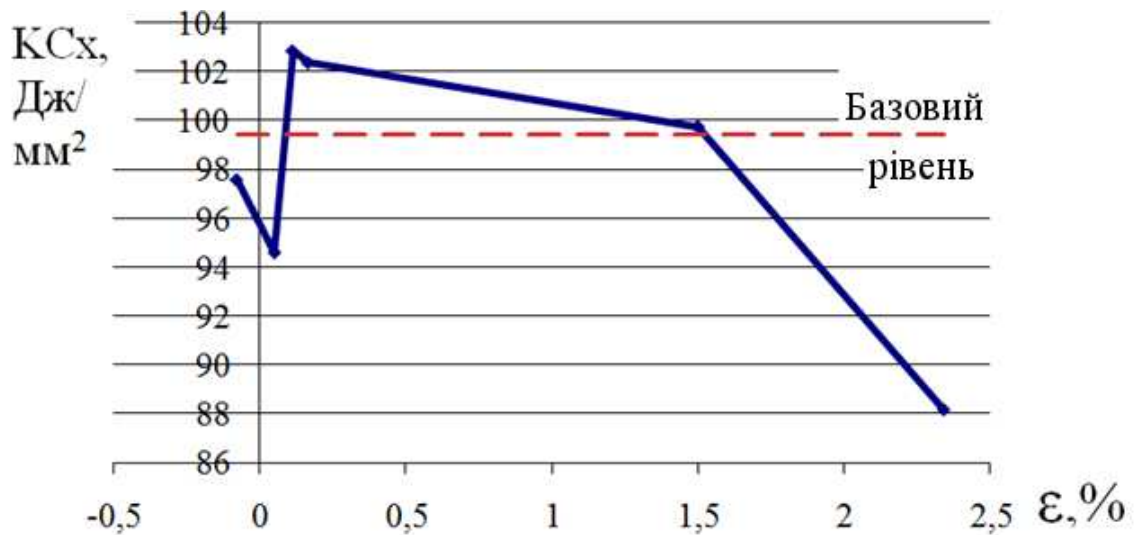


Рис. 5.25. Ударна в'язкість сталі в залежності від рівня залишкової деформації після ДНП. Базовий рівень – вихідний, недеформований матеріал

Така зміна ударної в'язкості при значному зростанні пластичності вказує на різку зміну механічних властивостей матеріалу при підвищених швидкостях деформування, а той факт, що ударна в'язкість значно знизилась при значному рівні залишкової деформації після ДНП пов'язаний із неоднорідністю поля залишкової деформації матеріалу, викликаною як дією ДНП так і технологічною неоднорідністю властивостей матеріалу. Зменшення ж ударної в'язкості при великій деформації, імовірно, пов'язане із утворенням пошкодженості внаслідок ДНП, що характерне для всіх видів досліджених нами металів.

Таким чином, високоміцна корпусна сталь під дією ДНП проявляє значну схильність до пластифікації, імовірно, за рахунок структурних перетворень. Як видно з рис. 5.25 ДНП можна ефективно використовувати для регулювання ударної в'язкості високоміцної сталі. Також слід відмітити суттєву непропорційність між полем поперечної і поздовжньої деформації, що вказує на неоднорідний розподіл напружень, викликаний утворенням дисипативної структури при ДНП.

## 5.6. Висновки

В результаті проведених дослідів виявлені особливості поля деформації на поверхні нержавіючої сталі 12Х17 і високоміцної корпусної сталі в процесі і після реалізації ДНП:

1. Закономірності кінетики поля деформації сталі 12Х17 при ДНП не суттєво відрізняються від кінетики поля деформації сталі при статичному розтягу. Показано типову кінетику поля деформації та наявність «хвилі», що рухається по зразку із швидкістю 0,3-0,7 м/с.
2. Виявлено рух найбільш інтенсивно zdeформованої частини поля деформації сталі 12Х17 до центру після ДНП – появу яскраво вираженої кінетики в процесі деформування.
3. Встановлено вплив ДНП на кінетику поля деформації сталі 12Х17 при подальшому статичному деформуванні. Зокрема, виявлено причину затримки шийкоутворення, пов'язану з рухом найбільш інтенсивно zdeформованої частини зразка до центру.
4. Встановлено якісну подібність між коефіцієнтом гомогенності  $m$  та полем деформації сталі 12Х17. Підтверджено факт, що реалізація ДНП на початковій ділянці деформування покращує однорідність механічних властивостей матеріалу.
5. Виявлено вплив релаксаційних процесів на процес деформування сталі 12Х17 після ДНП. Їх вплив призводить до зміни кінетики деформування.
6. Показано, що ДНП призводить до зменшення площі однорідної деформації в сталі 12Х17, проте викликає суттєву затримку в процесі шийкоутворення. Це найбільше виражено одразу ж після ДНП при найжорсткішому допуску на однорідність.
7. Зафіксований факт «розм'якшення» сталі 12Х17 після ДНП, що проявляється в падінні твердості на макрорівні, однак це не супроводжується падінням міцності сталі, що може свідчити про значну

неоднорідність механічних властивостей сталі у «смугах-коридорах» і «смугах-бар'єрах».

8. Виявлено, що поле деформації високоміцної сталі після ДНП володіє значною неоднорідністю.
9. Встановлено, що високоміцна корпусна сталь під дією ДНП проявляє значну схильність до пластифікації за рахунок структурних перетворень.
10. Показано, що ДНП можна використовувати для збільшення ударної в'язкості високоміцної корпусної сталі.
11. Виявлено наявність двох стадій процесу низької і високої швидкості, що відповідають за формування і розвиток дисипативної структури в сталі 12Х17. Середня швидкість деформування на першій стадії процесу становить 100-200%/с. На другій стадії відмічається різке збільшення швидкості деформування в локальних зонах до 600-1000%/с. Встановлено, що частота коливального навантаження, яка реалізується при ударно – коливальному режимі навантаження сталі 12Х17, аналогічна випробуванням алюмінієвих сплавів (діапазон 1-2 кГц).

## Загальні висновки

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

Найбільш важливі науково-практичні результати та висновки:

1. Проведено аналіз відомих методів оцінки поля деформації 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 деформації 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 деформації матеріалів, що володіють схильністю до неоднорідного процесу деформування (алюмінієві сплави Д16 і 2024-Т3) та з монотонним процесом деформування (нержавіюча сталь 12Х17). Для алюмінієвих сплавів в процесі реалізації ДНП виявлено три характерні режими кінетики поля деформації:
  - 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 деформації нержавіючої сталі 12Х17 при ДНП не суттєво відрізняються від кінетики поля деформації даної сталі при статичному розтягу. Встановлено рух найбільш інтенсивно zdeформованої частини поля деформації сталі 12Х17 до центру зразка після

ДНП – появу яскраво вираженої кінетики в процесі деформування при складному режимі навантаження. Показано типову кінетику поля деформації сталі 12Х17 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 деформації на поверхні зразку. Виявлено, що на ділянках зразка з найбільш інтенсивною деформацією тонко-смугова дисипативна структура в сплаві розвивається найбільше. На менш деформованих 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-Т3.
7. Виявлено вплив релаксаційних процесів на подальше деформування сталі 12Х17 після ДНП. Їх вплив призводить до зміни кінетики деформування. Загалом при короткотривалій витримці фіксується зростання міцності на 5-11% та значне падіння пластичності на 20-30%. При довготривалій витримці не фіксується суттєвого приросту міцності, 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-Т3 та 100-200%/с для нержавіючої сталі 12Х17. 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-Т3, та до 600-1000%/с для нержавіючої сталі 12Х17. 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 при подальшому статичному розтягу зростає у 2,5 рази. Виявлено можливість збільшення ударної в'язкості високоміцної корпусної сталі за рахунок ДНП.

## Література

1. Климов Д.М. Вязкопластические течения: динамический хаос, устойчивость, перемешивание / Климов Д.М., Петров А.Г., Георгиевский Д.В. – М.: Наука, 2005. – 394 с.
2. Магницкий Н.А. Новые методы хаотической динамики / Магницкий Н.А., Сидоров С.В. – М.: УРСС, 2004. – 320 с.
3. Заславский Г.М. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса / Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. – М.: Наука, 1988. – 368 с.
4. Слабый хаос и квазирегулярные структуры / [Заславский Г.М., Сагдеев Р.З., Усиков Д.А., Черников А.А. ] – М.: Наука, 1991. – 235 с.
5. Ерофеев В.И. Волновые процессы в твердых телах с микроструктурой / Ерофеев В.И. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999. – 328 с.
6. Ерофеев В.И. Макромеханическое моделирование упругой и вязкоупругой сред Коссера / Ерофеев В.И., Кажаяев В.В., Семерикова Н.П. // Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. – Т. 2, №2. – С. 40 – 47.
7. Лихтенберг А. Регулярная и стохастическая динамика / Лихтенберг А., Либерман М. – М.: Мир, 1984. – 528 с.
8. Эглит М.Э. Об усредненном описании процессов в периодических упруго-пластических средах / Эглит М.Э. // Механика композитных материалов. – 1984. – №5. – С. 825 – 831.
9. Лихачев В.А. Структурно-аналитическая теория прочности / Лихачев В.А., Малинин В.Г. – М.: Наука, 1993. – 470 с.
10. Панин В.Е. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации / Панин В.Е., Засимчук В.Э., Немошкаленко В.В. – К.: Наукова думка, 1989. – 320 с.
11. Панин В.Е. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода /

- Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, №3. – С. 9 – 22.
12. Владимирова В.И. Физическая природа разрушения металлов / Владимирова В.И. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
13. Степанов Г.В. Упруго-пластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок / Степанов Г.В. – К.: Наукова думка, 1979. – 268 с.
14. Иванова В.С. Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов / Иванова В.С. – М.: Наука, 1992. – 158 с.
15. Особенности формирования дислокационной субструктуры при ползучести алюминия в условиях приложенного потенциала / Столбоушкина О.А., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. [и др.] // Перспективные материалы. – 2011. – №1. – С. 48 – 48.
16. Макаров П.В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред / Макаров П.В. // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, №3. – С. 19 – 35.
17. Китаева Д.А. О приложениях методов нелинейной динамики в механике материалов / Китаева Д.А., Пазылов Ш.Т., Рудаев Я.И. // Моделирование систем и процессов. Сборник научных трудов. – 2007. – №15. – С. 46 – 70.
18. Особенности трансформации структуры пластичных материалов в процессе резких смен в режиме нагружения / Засимчук Е.Э., Маркашова Л.И., Турчак Т.В. [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12. – С. 77 – 82.
19. Чаусов М.Г. Дослідження процесу прояви площадок текучості при імпульсних підвантаженнях алюмінієвих сплавів / Чаусов М.Г., Засимчук О.Е., Волянська К.М. // Вісник Національного технічного університету України "Київський Політехнічний Інститут". Серія: Машинобудування. – 2011. – Т. 63. – С. 244 – 248.
20. Чаусов Н.Г. Закономерности деформирования листовых алюминиевых сплавов при динамических неравновесных процессах / Чаусов Н.Г.,



Волянская Е.М. // Тезисы докладов V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», 24-28 апреля 2011 г., Екатеринбург, Россия.

21. Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах / Чаусов Н.Г., Засимчук Е.Э., Маркашова Л.И. [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – Т. 75, №6. – С. 52 – 59.
22. On the Occurrence of Portevin–Le Châtelier Instabilities in Ultrafine-Grained 5083 Aluminum Alloys / Joshi S.P., Eberl C., Cao B. [et al.] // Experimental mechanics. – 2009. – V. 49, №2. – P. 207 – 218.
23. Halim H. The Portevin–Le Chatelier (PLC) effect and shear band formation in an AA5754 alloy / Halim H., Wilkinson D.S., Niewczas M. // Acta materialia. – 2007. – V. 55, №12. – P. 4151 – 4160.
24. Numerical aspects in the finite element simulation of the Portevin–Le Chatelier effect / Mazière M., Besson J., Forest S. [et al.] // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2010. – V. 199, №9. – P. 734 – 754.
25. Boyce B.L. The constitutive behavior of laser welds in 304L stainless steel determined by digital image correlation / Boyce B.L., Reu P.L., Robino C.V. // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2006. – V. 37, №8. – P. 2481 – 2492.
26. Experimental setup for fully coupled kinematic and thermal measurements at the microstructure scale of an AISI 316L steel / Bodelot L., Sabatier L., Charkaluk E. [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2009. – V. 501, №1. – P. 52 – 60.
27. Lockwood W.D. Mechanical response of friction stir welded AA2024: experiment and modeling / Lockwood W.D., Tomaz B., Reynolds A.P. // Materials Science and Engineering: A. – 2002. – V. 323, №1. – P. 348 – 353. – DOI: 10.1016/s0921-5093(01)01385-5.

28. Monitoring the fatigue-induced damage evolution in ultrafine-grained interstitial-free steel utilizing digital image correlation / Niendorf T., Dadda J., Canadinc D. [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – V. 517, №1. – P. 225 – 234. – DOI: 10.1016/j.msea.2009.04.053.
29. Microstructural effects of AZ31 magnesium alloy on its tensile deformation and failure behaviors / Marya M., Hector L.G., Verma R. [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2006. – V. 418, №1. – P. 341 – 356. – DOI: 10.1016/j.msea.2005.12.003.
30. Genevois C. Comparative study on local and global mechanical properties of 2024 T351, 2024 T6 and 5251 O friction stir welds / Genevois C., Deschamps A., Vacher P. // *Materials Science and Engineering: A*. – 2006. – V. 415, №1. – P. 162 – 170. – DOI: 10.1016/j.msea.2005.09.032.
31. Effects of heat treatment on the compressive deformation behavior of open cell aluminum foams / Zhou J., Gao Z., Cuitino A.M. [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2004. – V. 386, №1. – P. 118 – 128. – DOI: 10.1016/j.msea.2004.07.042.
32. Local plastic strain evolution in a high strength dual-phase steel / Ghadbeigi H., Pinna C., Celotto S. [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2010. – V. 527, №18. – P. 5026 – 5032. – DOI: 10.1016/j.msea.2010.04.052.
33. Deformation inhomogeneity in large-grained AA5754 sheets / Zhu G., Hu X., Kang J. [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – V. 528, №12. – P. 4187 – 4198. – DOI: 10.1016/j.msea.2011.02.017.
34. Quantification of damage evolution in a 7075 aluminum alloy using an acoustic emission technique / Lugo M., Jordon J.B., Horstemeyer M.F. [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – V. 528, №22. – P. 6708 – 6714. – DOI: 10.1016/j.msea.2011.05.017.
35. Measuring the thermal expansion coefficient of tubular steel specimens with digital image correlation techniques / De Strycker M., Schueremans L., Van

- Paeppegem W. [et al.] // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2010. – V. 48, №10. – P. 978 – 986. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2010.05.008.
36. Renard K. Characterisation of the Portevin-Le Châtelier effect affecting an austenitic TWIP steel based on digital image correlation / Renard K., Ryelandt S., Jacques P.J. // *Materials Science and Engineering: A*. – 2010. – V. 527, №12. – P. 2969 – 2977. – DOI: 10.1016/j.msea.2010.01.037.
37. Study Of Lüders Phenomena In Reactor Pressure Vessel Steels / Beardsmore D., da Fonseca J.Q., Romero J. [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – V. 588. – P. 151 – 166. – DOI: 10.1016/j.msea.2013.05.021.
38. Analysis of strain localization during tensile tests by digital image correlation / Wattrisse B., Chrysochoos A., Muracciole J.M. [et al.] // *Experimental Mechanics*. – 2001. – V. 41, №1. – P. 29 – 39. – DOI: 10.1007/bf02323101.
39. Investigation of Non-Linear Springback for High Strength Steel Sheets by ESPI / Dudescu C., Naumann J., Stockmann M. [et al.] // *Strain*. – 2011. – V. 47. – P. 8 – 18. – DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00729.x.
40. Petit J. Localisation Phenomenon Investigation on SMATed Stainless Steel Samples by Speckle Interferometry / Petit J., Montay G., François M. // *Strain*. – 2011. – V. 47, №4. – P. 363 – 371. – DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00726.x.
41. Application of Moiré Interferometry to Study Residual Deformation in Lap-Welded Steel Plates / Xie H.M., Wang Y.F., Tang M.J. [et al.] // *Strain*. – 2011. – V. 47. – P. 311 – 319. – DOI: 10.1111/j.1475-1305.2010.00771.x.
42. Башков О.В. Исследование влияния толщины азотированного поверхностного слоя на стадийность деформации и разрушения стали 12Х18Н10Т методом акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и анализа диаграмм нагружения / Башков О.В., Панин С.В., Бяков А.В. // *Физическая мезомеханика*. – 2010. – Т. 13, №6. – С. 53 – 72.
43. Залишкові напруження у зварних з'єднаннях високоміцних сталей / Лобанов Л., Позняков В., Півторак В. [та ін.] // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2009. – №6. – С. 13 – 22.

44. Ясній П.В. Автоматизована оцінка полів деформацій методом координатних сіток / Ясній П.В., Коноваленко І.В., Марущак П.О. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2009. – №2. – С. 130 – 136.
45. Sutton M.A. Three-dimensional digital image correlation to quantify deformation and crack-opening displacement in ductile aluminum under mixed-mode I/III loading / Sutton M.A. // Optical Engineering. – 2007. – V. 46, №5. – P. 51003 – 51003. – DOI: 10.1117/1.2741279.
46. Deformation and dissipated energies for high cycle fatigue of 2024-T3 aluminium alloy / Giancane S., Chrysochoos A., Dattoma V. [et al.] // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2009. – V. 52, №2. – P. 117 – 121. – DOI: 10.1016/j.tafmec.2009.08.004.
47. Evaluation Using Digital Image Correlation of Stress Intensity Factors in an Aerospace Panel / Du Y., Díaz F.A., Burguete R.L. [et al.] // Experimental Mechanics. – 2010. – V. 51, №1. – P. 45 – 57. – DOI: 10.1007/s11340-010-9335-5.
48. Backman D. Analysis of the effects of cold expansion of holes using thermoelasticity and image correlation / Backman D., Cowal C., Patterson E.A. // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2010. – V. 33, №12. – P. 859 – 870. – DOI: 10.1111/j.1460-2695.2010.01472.x.
49. Fedele R. Extended Identification of Mechanical Parameters and Boundary Conditions by Digital Image Correlation / Fedele R., Santoro R. // Procedia IUTAM. – 2012. – V. 4. – P. 40 – 47. – DOI: 10.1016/j.piutam.2012.05.005.
50. Identification of hardening parameters using finite element models and full-field measurements: some case studies / Robert L., Velay V., Decultot N. [et al.] // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 2011. – V. 47, №1. – P. 3 – 17. – DOI: 10.1177/0309324711430022.
51. Bodermann B. Opto-mechanical modelling and experimental approach to the measurement of aerospace materials using shearography and thermal loading /

- Bodermann B., Corso Krutul E., Groves R.M. // Proceedings of the SPIE Optical Metrology III – 2011. – V. 8083. – P. 80831. – DOI: 10.1117/12.889457.
52. Zuccarello B. Numerical-experimental Method for the Analysis of Residual Stresses in Cold-expanded Holes / Zuccarello B., Di Franco G. // Experimental Mechanics. – 2012. – V. 53, №4. – P. 673 – 686. – DOI: 10.1007/s11340-012-9669-2.
53. Многомасштабное исследование стадийности локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ с надрезами акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами / Панин С.В., Бяков А.В., Гренке В.В. [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, №6. – С. 63 – 72.
54. Calamaz M. Strain Field Measurement in Orthogonal Machining of a Titanium Alloy / Calamaz M., Coupard D., Girot F. // Advanced Materials Research. – 2012. – V. 498. – P. 237 – 242. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.498.237.
55. Efstathiou C. Multiscale strain measurements of plastically deforming polycrystalline titanium: Role of deformation heterogeneities / Efstathiou C., Sehitoglu H., Lambros J. // International Journal of Plasticity. – 2010. – V. 26, №1. – P. 93 – 106. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2009.04.006.
56. Experimental and finite-element analysis of the anisotropic response of high-purity  $\alpha$ -titanium in bending / Nixon M.E., Lebensohn R.A., Cazacu O. [et al.] // Acta Materialia. – 2010. – V. 58, №17. – P. 5759 – 5767. – DOI: 10.1016/j.actamat.2010.06.051.
57. Ramulu M. Elastic–plastic stress/strain response of friction stir-welded titanium butt joints using moiré interferometry / Ramulu M., Labossiere P., Greenwell T. // Optics and Lasers in Engineering. – 2010. – V. 48, №3. – P. 385 – 392. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.10.003.

58. Compression Test for Metal Characterization using Digital Image Correlation and Inverse Modeling / Tuninetti V., Gilles G., Péron-Lühns V. [et al.] // *Procedia IUTAM*. – 2012. – V. 4. – P. 206 – 214. – DOI: 10.1016/j.piutam.2012.05.022.
59. Identification of Johnson-Cook's Viscoplastic Model Parameters Using the Virtual Fields Method: Application to Titanium Alloy Ti6Al4V / Notta-Cuvier D., Langrand B., Markiewicz E. [et al.] // *Strain*. – 2013. – V. 49, №1. – P. 22 – 45. – DOI: 10.1111/str.12010.
60. Determination of the Properties of Composite Materials Thanks to Digital Image Correlation Measurements / Laurin F., Charrier J.S., Lévêque D. [et al.] // *Procedia IUTAM*. – 2012. – V. 4. – P. 106 – 115. – DOI: 10.1016/j.piutam.2012.05.012.
61. Measurement of resistance curves in the longitudinal failure of composites using digital image correlation / Catalanotti G., Camanho P.P., Xavier J. [et al.] // *Composites Science and Technology*. – 2010. – V. 70, №13. – P. 1986 – 1993. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.07.022.
62. Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation / Caminero M.A., Lopez-Pedrosa M., Pinna C. [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. – 2013. – V. 53. – P. 76 – 91. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.04.050.
63. Mechanical behavior of wood-plastic composites investigated by 3D digital image correlation / Mbarek T.B., Robert L., Hugot F. [et al.] // *Journal of Composite Materials*. – 2011. – V. 45, №26. – P. 2751 – 2764. – DOI: 10.1177/0021998311410466.
64. Application of digital image correlation at the microscale in fiber-reinforced composites / Canal L.P., González C., Molina-Aldareguía J.M. [et al.] // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2012. – V. 43, №10. – P. 1630 – 1638. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.07.014.
65. Characterizing Weave Geometry in Textile Ceramic Composites Using Digital Image Correlation / Rossol M.N., Shaw J.H., Bale H. [et al.] // *Journal of the*

- American Ceramic Society. – 2013. – V. 96, №8. – P. 2362 – 2365. – DOI: 10.1111/jace.12468.
66. Influence of additives on the global mechanical behavior and the microscopic strain localization in wood reinforced polypropylene composites during tensile deformation investigated using digital image correlation / Godara A., Raabe D., Bergmann I. [et al.] // *Composites Science and Technology*. – 2009. – V. 69, №2. – P. 139 – 146. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.08.031.
67. Shen B. Identification of cohesive zone model and elastic parameters of fiber-reinforced cementitious composites using digital image correlation and a hybrid inverse technique / Shen B., Paulino G.H. // *Cement and Concrete Composites*. – 2011. – V. 33, №5. – P. 572 – 585. – DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.01.005.
68. Characterising the behaviour of composite single lap bonded joints using digital image correlation / Comer A.J., Katnam K.B., Stanley W.F. [et al.] // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2013. – V. 40. – P. 215 – 223. – DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2012.08.010.
69. He Y. Characterization of nonlinear shear properties for composite materials using digital image correlation and finite element analysis / He Y., Makeev A., Shonkwiler B. // *Composites Science and Technology*. – 2012. – V. 73. – P. 64 – 71. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2012.09.010.
70. Исследование локализованной деформации при нагружении образцов из углерод-углеродного композиционного материала с различными концентраторами напряжений по данным акусто-эмиссии, метода корреляции цифровых изображений и тензометрии / Панин С.В., Бурков М.В., Бяков А.В. [и др.] // *Перспективные материалы*. – 2011. – Т. 1. – С. 129 – 138.
71. Стадийность деформации и разрушения при испытании на срез образцов углерод-углеродного композиционного материала по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии / Панин С.В.,

- Бурков М.В., Бяков А.В. [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, №5. – С. 228 – 233.
72. Сапожников С.Б. Использование композитных материалов на основе поликарбоната в защитных структурах / Сапожников С.Б., Левинский А.А. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2012. – Т. 271, №12. – С. 187 – 193.
73. Визначення енергії руйнування композиту з використанням методу цифрової спекл-кореляції / Іваницький Я.Л., Муравський Л.І., Гембара О.В. [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – №3. – С. 85 – 91.
74. Characterisation of concrete and mortar cracking by digital image correlation and acoustic emission / Rouchier S., Woloszyn M., Foray G. [et al.] // European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2013. – V. 17, №6. – P. 467 – 477. – DOI: 10.1080/19648189.2013.787179.
75. Damage monitoring in fibre reinforced mortar by combined digital image correlation and acoustic emission / Rouchier S., Foray G., Godin N. [et al.] // Construction and Building Materials. – 2013. – V. 38. – P. 371 – 380. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.106.
76. Thamboo J.A. Flexural and shear bond characteristics of thin layer polymer cement mortared concrete masonry / Thamboo J.A., Dhanasekar M., Yan C. // Construction and Building Materials. – 2013. – V. 46. – P. 104 – 113. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.002.
77. Characterization of fracture patterns and hygric properties for moisture flow modelling in cracked concrete / Rouchier S., Janssen H., Rode C. [et al.] // Construction and Building Materials. – 2012. – V. 34. – P. 54 – 62. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.047.
78. Shih M. Application of Digital Image Correlation Technique to Monitor Dynamic Response of Building Under Earthquake Excitation / Shih M., Sung W., Chen S. // Advanced Science Letters. – 2012. – V. 5, №2. – P. 963 – 966. – DOI: 10.1166/asl.2012.1828.



79. Alam S.Y. Monitoring size effect on crack opening in concrete by digital image correlation / Alam S.Y., Loukili A., Grondin F. // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2012. – V. 16, №7. – P. 818 – 836. – DOI: 10.1080/19648189.2012.672211.
80. Chen H.H. Tension softening curves of plain concrete / Chen H.H., Su R.K. // *Construction and Building Materials*. – 2013. – V. 44. – P. 440 – 451. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.040.
81. Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних попередньо напружених балок методом цифрової кореляції зображень / Коваль П.М., Іваницький Я.Л., Мольков Ю.В. [та ін.] // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. – 2012. – №3. – С. 75 – 79.
82. Fracture mechanisms in soft rock: Identification and quantification of evolving displacement discontinuities by extended digital image correlation / Nguyen T.L., Hall S.A., Vacher P. [et al.] // *Tectonophysics*. – 2011. – V. 503, №1. – P. 117 – 128. – DOI: 10.1016/j.tecto.2010.09.024.
83. Non-invasive 3D analysis of local soil deformation under mechanical and hydraulic stresses by  $\mu$ CT and digital image correlation / Peth S., Nellesen J., Fischer G. [et al.] // *Soil and Tillage Research*. – 2010. – V. 111, №1. – P. 3 – 18. – DOI: 10.1016/j.still.2010.02.007.
84. Experimental investigation of deformation and failure mechanisms in rock under indentation by digital image correlation / Zhang H., Huang G., Song H. [et al.] // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2012. – V. 96. – P. 667 – 675. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2012.09.012.
85. Experimental study on damage evolution of rock under uniform and concentrated loading conditions using digital image correlation / Song H., Zhang H., Fu D. [et al.] // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2013. – V. 36, №8. – P. 760 – 768. – DOI: 10.1111/ffe.12043.

- 86.Helm J. Measuring Soil-structure Interaction on Laterally Loaded Piles with Digital Image Correlation / Helm J., Suleiman M. // *Procedia IUTAM*. – 2012. – V. 4. – P. 66 – 72. – DOI: 10.1016/j.piutam.2012.05.008.
- 87.Haggerty M. Observing Deformation and Fracture of Rock with Speckle Patterns / Haggerty M., Lin Q., Labuz J.F. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2009. – V. 43,№4. – P. 417 – 426. – DOI: 10.1007/s00603-009-0055-z.
- 88.Plé O. 3-Dimensional Digital Image Correlation for Strains Determination in Clayey Soil / Plé O., Tourabi A., Abuaisha M.S. // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – V. 353. – P. 463 – 466. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.463.
- 89.Biolzi L. A problem of scaling in fracture of damaged rock / Biolzi L., Labuz J.F., Muciaccia G. // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2011. – V. 48,№3. – P. 451 – 457. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.10.002.
- 90.Bésuelle P. Characterization of the Strain Localization in a Porous Rock in Plane Strain Condition Using a New True-Triaxial Apparatus / Bésuelle P., Hall S.A. // *Advances in Bifurcation and Degradation in Geomaterials* / [eds. Bonelli S. et al.]. – [Netherlands]: Springer, 2011. – V. 11. – P. 345 – 352. – DOI: 10.1007/978-94-007-1421-2\_46.
- 91.Gao Z. Estimating zero-strain states of very soft tissue under gravity loading using digital image correlation / Gao Z., Desai J.P. // *Medical image analysis*. – 2010. – V. 14,№2. – P. 126 – 163. – DOI: 10.1016/j.media.2009.11.002.
- 92.Digital image correlation and finite element modelling as a method to determine mechanical properties of human soft tissue in vivo / Moerman K.M., Holt C.A., Evans S.L. [et al.] // *Journal of biomechanics*. – 2009. – V. 42,№8. – P. 1150 – 1153. – DOI: 10.1016/j.jbiomech.2009.02.016.
- 93.A computational method for determining tissue material properties in ovine fracture calluses using electronic speckle pattern interferometry and finite element analysis / Steiner M., Claes L., Simon U. [et al.] // *Medical engineering & physics*.

- 2012. – V. 34, №10. – P. 1521 – 1526. – DOI: 10.1016/j.medengphy.2012.09.013.
94. Tissue deformation analysis using a laser based digital image correlation technique / Kerl J., Parittotokkaporn T., Frasson L. [et al.] // *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. – 2012. – V. 6. – P. 159 – 224. – DOI: 10.1016/j.jmbbm.2011.10.007.
95. Characterisation of failure in human aortic tissue using digital image correlation / Kim J.H., Badel P., Duprey A. [et al.] // *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. – 2011. – V. 14. – P. 73 – 74. – DOI: 10.1080/10255842.2011.592368.
96. Libertiaux V. Experimental verification of brain tissue incompressibility using digital image correlation / Libertiaux V., Pascon F., Cescotto S. // *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. – 2011. – V. 4, №7. – P. 1177 – 1262. – DOI: 10.1016/j.jmbbm.2011.03.028.
97. Milosevic M. Digital image correlation analysis of biomaterials / Milosevic M., Mitrovic N., Sedmak A. // *Proceedings of the 15th International conference on Intelligent Engineering Systems (INES) – IEEE, 2011*. – P. 421 – 425.
98. Investigation of Dental Biomaterials under Load Using a Digital Image Correlation System / Lemic A.M., Sojic L.T., Tanasic I. [et al.] // *Advanced Materials Research*. – 2013. – V. 633. – P. 181 – 185. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.633.181.
99. Using digital image correlation to determine bone surface strains during loading and after adaptation of the mouse tibia / Sztefek P., Vanleene M., Olsson R. [et al.] // *Journal of biomechanics*. – 2010. – V. 43, №4. – P. 599 – 605. – DOI: 10.1016/j.jbiomech.2009.10.042.
100. Local and global strains and strain ratios in shape memory alloys using digital image correlation / Bewerse C., Gall K.R., McFarland G.J. [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – V. 568. – P. 134 – 142. – DOI: 10.1016/j.msea.2013.01.030.

101. Tips and Tricks for Characterizing Shape Memory Wire Part 5: Full-Field Strain Measurement by Digital Image Correlation / Reedlunn B., Daly S., Hector L. [et al.] // *Experimental Techniques*. – 2013. – V. 37, №3. – P. 62 – 78. – DOI: 10.1111/j.1747-1567.2011.00717.x.
102. Non-contact technique for characterizing full-field surface deformation of shape memory polymers at elevated and room temperatures / McClung A.J., Tandon G.P., Goecke K.E. [et al.] // *Polymer Testing*. – 2011. – V. 30, №1. – P. 140 – 149. – DOI: 10.1016/j.polymertesting.2010.11.010.
103. Determination of the Characteristic Parameters of Tension-Compression Asymmetry of Shape Memory Alloys Using Full-Field Measurements / Chemisky Y., Echchorfi R., Meraghni F. [et al.] // *Materials Science Forum*. – 2013. – V. 738. – P. 281 – 286. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.281.
104. Winiarski B. Surface Decoration for Improving the Accuracy of Displacement Measurements by Digital Image Correlation in SEM / Winiarski B., Schajer G.S., Withers P.J. // *Experimental Mechanics*. – 2011. – V. 52, №7. – P. 793 – 804. – DOI: 10.1007/s11340-011-9568-y.
105. Micro-mechanical analysis of the confined amorphous phase in semi-crystalline polymers / Pinto J., Castagnet S., Nadot-Martin C. [et al.] // *Procedia Engineering*. – 2011. – V. 10. – P. 3140 – 3145. – DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.520.
106. Hygroscopic and thermal micro deformations of plastic substrates for flexible electronics using digital image correlation / van den Berg D., Barink M., Giesen P. [et al.] // *Polymer Testing*. – 2011. – V. 30, №2. – P. 188 – 194. – DOI: 10.1016/j.polymertesting.2010.11.012.
107. Assessment of stress relaxation experiments on diamond coatings analyzed by digital image correlation and micro-Raman spectroscopy / Ahmed F., Krottenthaler M., Schmid C. [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – V. 237. – P. 255 – 260. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.07.025.

108. Influence of application technology on the erosion resistance of DLC coatings / Depner-Miller U., Ellermeier J., Scheerer H. [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – V. 237. – P. 284 – 291. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.07.043.
109. Mapping Residual-Stress Distributions in a Laser-Peened Vit-105 Bulk-Metallic Glass Using the Focused-Ion-Beam Micro-Slitting Method / Winiarski B., Wang G., Xie X. [et al.] // *MRS Proceedings*. – 2011. – V. 1300. – DOI: 10.1557/opl.2011.329.
110. Heinz S.R. Uniaxial compression analysis of glassy polymer networks using digital image correlation / Heinz S.R., Wiggins J.S. // *Polymer Testing*. – 2010. – V. 29, №8. – P. 925 – 932. – DOI: 10.1016/j.polymertesting.2010.08.001.
111. Yadegari Dehnavi M.R. Investigation of fracture parameters of edge V-notches in a polymer material using digital image correlation / Yadegari Dehnavi M.R., Eshraghi I., Soltani N. // *Polymer Testing*. – 2013. – V. 32, №4. – P. 778 – 784. – DOI: 10.1016/j.polymertesting.2013.03.012.
112. Использование спекл-интерферометрии для исследования локализации пластической деформации / Данилов В.И., Зуев Л.Б., Горбатенко В.В. [та ін.] // *Зав. лаб.* – 2006. – Т. 72, №12. – С. 40 – 45.
113. Damage and fracture prediction of plastic-bonded explosive by digital image correlation processing / Li M., Zhang J., Xiong C.Y. [et al.] // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2005. – V. 43, №8. – P. 856 – 868. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2004.09.003.
114. A Comparison of Contact Stiffness Measurements Obtained by the Digital Image Correlation and Ultrasound Techniques / Mulvihill D.M., Brunskill H., Kartal M.E. [et al.] // *Experimental Mechanics*. – 2013. – V. 53, №7. – P. 1245 – 1263. – DOI: 10.1007/s11340-013-9718-5.
115. Cullen G.W. Ductility of 304 stainless steel under pulsed uniaxial loading / Cullen G.W., Korkolis Y.P. // *International Journal of Solids and Structures*. – 2013. – V. 50, №10. – P. 1621 – 1633. – DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.01.020.

116. Mohr D. A New Experimental Technique for the Multi-axial Testing of Advanced High Strength Steel Sheets / Mohr D., Oswald M. // *Experimental Mechanics*. – 2007. – V. 48, №1. – P. 65 – 77. – DOI: 10.1007/s11340-007-9053-9.
117. Application of 3D image correlation for full-field transient plate deformation measurements during blast loading / Tiwari V., Sutton M.A., McNeill S.R. [et al.] // *International Journal of Impact Engineering*. – 2009. – V. 36, №6. – P. 862 – 874. – DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.09.010.
118. Третьякова Т.В. Исследование развития трещин при сложных режимах нагружения методом корреляции цифровых изображений / Третьякова Т.В., Вильдеман В.Э. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2012. – Т. 78, №6. – С. 54 – 58.
119. Sharpe Jr W.N. Springer handbook of experimental solid mechanics / Sharpe Jr W.N., Sharpe J., William N. – [USA]: Springer, 2008. – 1098 p.
120. Славин О.К. Современное состояние и перспективы развития методов фотомеханики / Славин О.К. // *Расчеты на прочность*. М.: Машиностроение. – 1984. – №25. – С. 50 – 66.
121. Золотухин Н.М. К решению объемной задачи фотопластичности / Золотухин Н.М., Тышкевич А.В. // *Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия*. – 1969. – №5. – С. 102 – 106.
122. Bradley W.B. An investigation of propagating cracks by dynamic photoelasticity / Bradley W.B., Kobayashi A.S. // *Experimental Mechanics*. – 1970. – V. 10, №3. – P. 106 – 113.
123. Ajovalasit A. Towards RGB photoelasticity: full-field automated photoelasticity in white light / Ajovalasit A., Barone S., Petrucci G. // *Experimental Mechanics*. – 1995. – V. 35, №3. – P. 193 – 200.
124. Asundi A. Phase shifting in photoelasticity / Asundi A. // *Experimental Techniques*. – 1993. – V. 17, №1. – P. 19 – 23.

125. Han B. Geometric moiré methods with enhanced sensitivity by optical/digital fringe multiplication / Han B., Ifju P., Post D. // *Experimental mechanics*. – 1993. – V. 33, №3. – P. 195 – 200.
126. Ragulskis M. Applicability of time average geometric moiré for vibrating elastic structures / Ragulskis M., Ragulskis L., Maskelianas R. // *Experimental Techniques*. – 2004. – V. 28, №4. – P. 27 – 30.
127. Chona R. Application of high resolution geometric moire method to fracture problems / Chona R., Khanna S.K., Kmiec K.J. // *Experimental Techniques*. – 1995. – V. 19, №6. – P. 10 – 13.
128. Скроцкий Г.В. Голографическая интерферометрия / Скроцкий Г.В. // *Успехи физических наук*. – 1980. – Т. 131, №7. – С. 528 – 529.
129. Точность определения перемещений в голографических интерферометрах / Борыняк Л.А., Краснопевцев Е.А., Логинов А.В. [и др.] // *Автометрия*. – 1992. – Т. 6. – С. 62 – 74.
130. Борыняк Л. Голографический интерферометр для определения деформационных полей перемещений в изделиях микроэлектроники / Борыняк Л., Непочатов Ю. // *Технологии в электронной промышленности*. – 2007. – №3. – С. 82 – 88.
131. Improved Moiré interferometry and applications in fracture mechanics, residual stress and damaged composites / McDonach A., McKelvie J., MacKenzie P. [et al.] // *Experimental Techniques*. – 1983. – V. 7, №6. – P. 20 – 24.
132. Han B. Higher sensitivity moiré interferometry for micromechanics studies / Han B. // *Optical Engineering*. – 1992. – V. 31, №7. – P. 1517 – 1526.
133. Vikhagen E. Nondestructive testing by use of TV holography and deformation phase gradient calculation / Vikhagen E. // *Applied optics*. – 1990. – V. 29, №1. – P. 137 – 144.
134. Оперативний контроль якості елементів авіаційних конструкцій методом електронної широкографії / Лобанов Л.М., Бичков С.А., Півторак В.А. [та ін.] // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2009. – №3. – С. 37 – 42.

135. Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии / Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В. [и др.] // Автоматическая сварка. – 2006. – №1. – С. 25 – 30.
136. Електронна спекл-інтерферометрія та спекл-кореляція для визначення просторових полів мікропереміщень поверхонь / Вороняк Т., Кметь А., Максименко О. [та ін.] // Електроніка та інформаційні технології. – 2011. – №1. – С. 156 – 165.
137. Sjödaahl M. Electronic speckle photography: increased accuracy by nonintegral pixel shifting / Sjödaahl M. // Applied Optics. – 1994. – V. 33, №28. – P. 6667 – 6673.
138. Baker L.R. Thermoelastic stress analysis / Baker L.R., Webber J.M. // Journal of Modern Optics. – 1982. – V. 29, №4. – P. 555 – 563.
139. Stanley P. The application of thermoelastic stress analysis techniques to composite materials / Stanley P., Chan W.K. // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 1988. – V. 23, №3. – P. 137 – 143.
140. Pitarresi G. A review of the general theory of thermoelastic stress analysis / Pitarresi G., Patterson E.A. // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 2003. – V. 38, №5. – P. 405 – 417.
141. Dulieu-Barton J.M. Introduction to thermoelastic stress analysis / Dulieu-Barton J.M. // Strain. – 1999. – V. 35, №2. – P. 35 – 39.
142. Zener C. Internal friction in solids II. General theory of thermoelastic internal friction / Zener C. // Physical Review. – 1938. – V. 53, №1. – P. 90 – 90.
143. Zener C. Internal friction in solids / Zener C. // Proceedings of the Physical Society. – 1940. – V. 52, №1. – P. 152 – 152.
144. Sutton M.A. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications / Sutton M.A., Orteu J.-., Schreier H.W. – [USA]: Springer, 2009. – 322 p.



145. Панин С.В. Оценка деформации твердых тел по изображениям поверхности / Панин С.В., Сырякин В.И., Любутин П.С. // *Автометрия*. – 2005. – Т. 41, №2. – С. 44 – 58.
146. Березін В.Б. Дослідження поля деформації плоскої поверхні зразків матеріалів методом кореляції цифрових зображень. (Статичне навантаження) / Березін В.Б., Чаусов М.Г. // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2011. – №2. – С. 15 – 20.
147. Березін В.Б. Оптичний комплекс для безконтактного дослідження поля деформації плоскої поверхні методом кореляції цифрових зображень / Березін В.Б., Чаусов М.Г., Лучко Й.Й. // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. – 2011. – Т. 41. – С. 30 – 39.
148. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction / Bruck H.A., McNeill S.R., Sutton M.A. [et al.] // *Experimental Mechanics*. – 1989. – V. 29, №3. – P. 261 – 267. – DOI: 10.1007/bf02321405.
149. Hild F. Digital image correlation / Hild F., Roux S. // *Optical Methods for Solid Mechanics. A Full-Field Approach* / [eds. Pramod K.R. et al.]. – [USA]: Wiley, 2013. – P. 183 – 228.
150. Modern stress and strain analysis: a state of the art guide to measurement techniques / [eds. Eaton Evans J. et al.]. – London: Findlay Media, 2009. – 41 p.
151. Post D. High sensitivity moiré: experimental analysis for mechanics and materials / Post D., Han B., Ifju P. – New York: Springer US, 1997. – 444 p.
152. Patterson E.A. Digital photoelasticity: principles, practice and potential / Patterson E.A. // *Strain*. – 2002. – V. 38, №1. – P. 27 – 39.
153. Stanley P. Devices for the experimental determination of individual stresses from thermoelastic data / Stanley P., Dulieu-Smith J.M. // *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. – 1996. – V. 31, №1. – P. 53 – 63.
154. Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods / [eds. Kreis T. ]. – [Germany]: Wiley-VCH Verlag, 2004. – DOI: 10.1002/3527604154.

155. Estimation of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation and an interaction integral / Rethore J., Gravouil A., Morestin F. [et al.] // *International Journal of Fracture*. – 2005. – V. 132, №1. – P. 65 – 79.
156. Can a new experimental and numerical study improve metal blanking? / Goijaerts A.M., Stegeman Y.W., Govaert L.E. [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – V. 103, №1. – P. 44 – 50.
157. Identification and probabilistic modeling of mesocrack initiations in 304L stainless steel / Rupil J., Vincent L., Hild F. [et al.] // *International Journal for Multiscale Computational Engineering*. – 2011. – V. 9, №4. – P. 445 – 458.
158. An approach to calculate the J-integral by digital image correlation displacement field measurement / Becker T.H., Mostafavi M., Tait R.B. [et al.] // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2012. – V. 35, №10. – P. 971 – 984.
159. Wu T. Strain Localisation and Damage Measurement by Full 3D Digital Image Correlation: Application to 15-5PH Stainless Steel / Wu T., Coret M., Combescure A. // *Strain*. – 2011. – V. 47, №1. – P. 49 – 61.
160. Sheet-Metal Assessment at Medium Strain-Rates by Digital Image Correlation / Broggiato G.B., Ferrari D., Fischer M. [et al.] // *Strain*. – 2010. – V. 46, №4. – P. 396 – 403.
161. Biaxial High Cycle Fatigue of a type 304L stainless steel: Cyclic strains and crack initiation detection by digital image correlation / Poncelet M., Barbier G., Raka B. [et al.] // *European Journal of Mechanics-A/Solids*. – 2010. – V. 29, №5. – P. 810 – 825.
162. Effect of ductile damage evolution in sheet metal forming: experimental and numerical investigations / Mistou S., Pantalé O., Abbassi F. [et al.] // *Key Engineering Materials*. – 2010. – V. 446. – P. 157 – 169.
163. Identification of mechanical material behavior through inverse modeling and DIC / Cooreman S., Lecompte D., Sol H. [et al.] // *Experimental Mechanics*. – 2008. – V. 48, №4. – P. 421 – 433.

164. King J.E. Serrated yielding and the localized shear failure mode in aluminium alloys / King J.E., You C.P., Knott J.F. // *Acta Metallurgica*. – 1981. – V. 29, №9. – P. 1553 – 1566.
165. An experimental and numerical investigation of the behaviour of AA5083 aluminium alloy in presence of the Portevin–Le Chatelier effect / Benallal A., Berstad T., Børvik T. [et al.] // *International Journal of Plasticity*. – 2008. – V. 24, №10. – P. 1916 – 1945.
166. Rizzi E. On the Portevin–Le Chatelier effect: theoretical modeling and numerical results / Rizzi E., Hähner P. // *International Journal of Plasticity*. – 2004. – V. 20, №1. – P. 121 – 165.
167. Thermographic study of nucleation and propagation of Portevin-Le Châtelier bands / Zielke R., Crostack H., Feng X. [et al.] // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. – 2008. – V. 5, №2. – P. 231 – 248.
168. Heterogeneity in plastic deformation / Wilkinson D.S., Beaudoin A.J., Kang J.D. [et al.] // *Proceedings of the Materials science forum – Trans Tech Publ*, 2006. – V. 519. – P. 85 – 92.
169. Tong W. Notch-Tip Strain Fields in an Aluminum Sheet with Serrated Plasticity / Tong W., Xuan Y. // *Proceedings of the 12th International Conference on Fracture, 12-17 July 2009, Ottawa, Canada*.
170. Digital Image Correlation investigation of Portevin–Le Chatelier effect in an aluminium alloy / Zdunek J., Brynk T., Mizera J. [et al.] // *Materials Characterization*. – 2008. – V. 59, №10. – P. 1429 – 1433.
171. Tong W. On serrated plastic flow in an AA5052-H32 sheet / Tong W., Zhang N. // *Journal of engineering materials and technology*. – 2007. – V. 129, №2. – P. 332 – 332.
172. Effects of strain rate on the characteristics of PLC deformation bands for AA5083-H116 aluminium alloy / Benallal A., Berstad T., Børvik T. [et al.] // *Philosophical Magazine*. – 2008. – V. 88, №28. – P. 3311 – 3338.

173. Shear localization and damage in AA5754 aluminum alloy sheets / Kang J., Wilkinson D.S., Bruhis M. [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2008. – V. 17, №3. – P. 395 – 401.
174. Ait-Amokhtar H. Crossover from continuous to discontinuous propagation in the Portevin–Le Chatelier effect / Ait-Amokhtar H., Fressengeas C. // *Acta Materialia*. – 2010. – V. 58, №4. – P. 1342 – 1349.
175. Experimental and numerical investigation of fracture in a cast aluminium alloy / Fagerholt E., Dørum C., Børvik T. [et al.] // *International Journal of Solids and Structures*. – 2010. – V. 47, №24. – P. 3352 – 3365.
176. Kinematic Fields and Acoustic Emission Observations Associated with the Portevin Le Châtelier Effect on an Al–Mg Alloy / Louche H., Bouabdallah K., Vacher P. [et al.] // *Experimental mechanics*. – 2008. – V. 48, №6. – P. 741 – 751.
177. Time-resolved strain mapping measurements of individual Portevin–Le Chatelier deformation bands / Tong W., Tao H., Zhang N. [et al.] // *Scripta materialia*. – 2005. – V. 53, №1. – P. 87 – 92.
178. Time-resolved deformation measurements of the Portevin–Le Chatelier bands / Xiang G.F., Zhang Q.C., Liu H.W. [et al.] // *Scripta materialia*. – 2007. – V. 56, №8. – P. 721 – 724.
179. A study of localisation in dual-phase high-strength steels under dynamic loading using digital image correlation and FE analysis / Tarigopula V., Hopperstad O.S., Langseth M. [et al.] // *International Journal of Solids and Structures*. – 2008. – V. 45, №2. – P. 601 – 619. – DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2007.08.021.
180. Towards high velocity deformation characterisation of metals and composites using Digital Image Correlation / Eriksen R., Berggreen C., Boyd S.W. [et al.] // *14th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM 14), Poitiers, France*. – V. 6. – P. 31013.
181. Identification of elasto-visco-plastic parameters and characterization of Lüders behavior using digital image correlation and the virtual fields method / Avril S.,

- Pierron F., Sutton M.A. [et al.] // *Mechanics of Materials*. – 2008. – V. 40, №9. – P. 729 – 742.
182. Characterization of High-Strain Rate Mechanical Behavior of AZ31 Magnesium Alloy Using 3D Digital Image Correlation / Wang Y., Xu H., Erdman D.L. [et al.] // *Advanced Engineering Materials*. – 2011. – V. 13, №10. – P. 943 – 948.
183. Miller T.J. The application of high-speed digital image correlation / Miller T.J., Reu P.L. // *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. – 2008. – V. 43, №8. – P. 673 – 688. – DOI: 10.1243/03093247jsa414.
184. High Strain Rate Torsion Properties of Ultrafine-Grained Aluminum / Hokka M., Kokkonen J., Seidt J. [et al.] // *Experimental Mechanics*. – 2011. – V. 52, №2. – P. 195 – 203. – DOI: 10.1007/s11340-011-9511-2.
185. Kumar P. Effect of Curvature on Shock Loading Response of Aluminum Panels / Kumar P., LeBlanc J., Shukla A. // *Dynamic Behavior of Materials, Volume 1* / [eds. Proulx T. ]. – New York: Springer, 2011. – P. 369 – 374. – DOI: 10.1007/978-1-4614-0216-9\_51.
186. Determining the stress–strain behaviour at large strains from high strain rate tensile and shear experiments / Peirs J., Verleysen P., Van Paepegem W. [et al.] // *International Journal of Impact Engineering*. – 2011. – V. 38, №5. – P. 406 – 415. – DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.01.004.
187. Experimental characterization of sheet metal deformation during electrohydraulic forming / Rohatgi A., Stephens E.V., Soulamy A. [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – V. 211, №11. – P. 1824 – 1833. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.06.005.
188. Experimental and numerical study on effect of forming rate on AA5086 sheet formability / Zhang C., Leotoing L., Guines D. [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2010. – V. 527, №4. – P. 967 – 972. – DOI: 10.1016/j.msea.2009.09.013.

189. Пилипенко А.П. Використання повної діаграми деформування для оцінки граничної пошкодженості матеріалу при складних умовах навантаження / Пилипенко А.П., Параца В.М. // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2009. – Т. 14, №4. – С. 45 – 52.
190. Прочность материалов и конструкций / [за ред. Трощенко В. ]. – К.: Академперіодика, 2005. – 1088 с.
191. Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / [за ред. Панасюка В. ]. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2004. – 912 с.
192. Самоорганизация структур листовых материалов при динамических неравновесных процессах / Чаусов Н.Г., Засимчук Е.Э., Пилипенко А.П. [и др.] // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2010. – Т. 15, №3. – С. 892 – 894.
193. Чаусов Н.Г. Комплексная оценка поврежденности пластичных материалов при различных режимах нагружения / Чаусов Н.Г., Недосека С.А., Пилипенко А.П. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – №3. – С. 16 – 21.
194. Влияние вида напряженного состояния на деформирование нержавеющей стали при импульсных подгрузках / Чаусов Н.Г., Пилипенко А.П., Березин В.Б. [и др.] // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – №39. – С. 208 – 211.
195. Методика виявлення змін структурного стану пластичних матеріалів в процесі раптових змін в режимі навантаження / Чаусов М.Г., Пилипенко А.П., Бондар М.М. [та ін.] // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2008. – №3. – С. 7 – 14.
196. Чаусов М.Г. Особенности деформирования материалов в упругой области при динамических неравновесных процессах / Чаусов М.Г., Березин В.Б., Бондар М.Н. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2009. – №3. – С. 24 – 27.

197. Influence of Combined Loading on Microstructure and Properties of Aluminum Alloy 2024-T3 / Zasimchuk E., Markashova L., Baskova O. [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2013. – V. 22, №11. – P. 3421 – 3429. – DOI: 10.1007/s11665-013-0630-z.
198. Peculiarities of structural transformation in plastic materials under abrupt changes in loading conditions / Zasimchuk E.E., Markashova L.I., Turchak T.V. [et al.] // *Physical Mesomechanics*. – 2009. – V. 12, №3. – P. 175 – 179. – DOI: 10.1016/j.physme.2009.07.010.
199. Strength analysis of mechanical systems at dynamic non-equilibrium processes / Hutsaylyuk V., Chausov M., Berezin V. [et al.] // *Engineering Failure Analysis*. – 2013. – V. 35. – P. 636 – 644. – DOI : 10.1016/j.engfailanal.2013.06.005.
200. Chausov N.G. Influence of dynamic overloading on fracture kinetics of metals at the final stages of deformation / Chausov N.G., Pilipenko A.P. // *Mechanika*. – 2004. – V. 48. – P. 13 – 18.
201. Патент України № 91389 Спосіб реалізації над пластичного стану матеріалу у процесі деформування / Чаусов М.Г., Пилипенко А.П., Параца В.М. та ін. / Заявлено 25.06.2008; Опубліковано 26.07.2010. – Бюл. №14.
202. Самоорганізація структури листового алюмінієвого сплаву при динамічних незрівноважених процесах / Чаусов Н.Г., Засимчук О.Е., Березін В.Б. [та ін.] // *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. – 2009. – №4. – С. 67 – 73.
203. Extended three-dimensional digital image correlation (X3D-DIC) / Réthoré J., Tinnes J., Roux S. [et al.] // *Comptes Rendus Mécanique*. – 2008. – V. 336, №8. – P. 643 – 649. – DOI: 10.1016/j.crme.2008.06.006.
204. Full Three-Dimensional Strain Measurements on Wood Exposed to Three-Point Bending: Analysis by Use of Digital Volume Correlation Applied to Synchrotron Radiation Micro-Computed Tomography Image Data / Forsberg F., Sjö Dahl M., Mooser R. [et al.] // *Strain*. – 2010. – V. 46, №1. – P. 47 – 60. – DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00687.x.

205. Experimental characterisation of shear and compaction band mechanisms in porous sandstone by a combination of AE and 3D-DIC / Charalampidou E.M., Stephen H., Sergei S. [et al.] // EPJ Web of Conferences. – 2010. – V. 6. – P. 22009. – DOI: 10.1051/epjconf/20100622009.
206. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review / Pan B., Qian K., Xie H. [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2009. – V. 20, №6. – P. 62001. – DOI: 10.1088/0957-0233/20/6/062001.
207. Moré J.J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory / Moré J.J. // Numerical analysis / Moré J.J. – Berlin: Springer, 1978. – P. 105 – 116.
208. Reu P.L. Experimental validation of 2D uncertainty quantification for digital image correlation / Reu P.L. // Proceedings of the EPJ Web of Conferences – EDP Sciences, 2010. – V. 6. – P. 31003.
209. Cleveland W.S. Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting / Cleveland W.S., Devlin S.J. // Journal of the American Statistical Association. – 1988. – V. 83, №403. – P. 596 – 610.
210. Séquin C.H. Fair, G<sup>2</sup>-and C<sup>2</sup>-continuous circle splines for the interpolation of sparse data points / Séquin C.H., Lee K., Yen J. // Computer-Aided Design. – 2005. – V. 37, №2. – P. 201 – 211.
211. Hild F. Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties—a review / Hild F., Roux S. // Strain. – 2006. – V. 42, №2. – P. 69 – 80.
212. Franklin S. Portevin–Le Chatelier effect / Franklin S., Mertens F., Marder M. // Physical Review E. – 2000. – V. 62, №6. – P. 8195 – 8206. – DOI: 10.1103/PhysRevE.62.8195.
213. Fracture kinetics of aluminum alloys sheets by taking into the account the pulsing load / Chausov M., Hutsaylyuk V., Zasymchuk E. [et al.] // Proceedings of



the 19th European Conference on Fracture (ECF19), (26-31 August 2012), Kazan, Russia.

214. Влияние импульсного ввода энергии и высокой температуры на пластификацию алюминиевого сплава Д16 / Чаусов Н.Г., Пилипенко А.П., Березин В.Б. [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – №4. – С. 143 – 156.
215. Influence of dissipative structures formed by impulsed loads on the processes of deformation and fracture / Hutsaylyuk V., Chausov M., Berezin V. [et al.] // Key Engineering Materials. – 2014. – V. 577. – P. 273 – 276. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.577-578.273.
216. Ranc N. Experimental study by pyrometry of Portevin–Le Châtelier plastic instabilities—Type A to type B transition / Ranc N., Wagner D. // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – V. 474, №1. – P. 188 – 196.
217. Chausov M.G. Evolution of the deformation field on the surface of sheet plastic materials at dynamic nonequilibrium processes / Chausov M.G., Berezin V.B., Pylypenko A.P. // 13<sup>th</sup> int'l. sci. conf., 13–16 may 2013 yr., Moscow, Russia : conf. proc. – M., 2013. – P. 72 – 79.
218. The danger of self-organizing structures in materials subjected to dynamical non-equilibrium processes / Hutsaylyuk V., Śnieżek L., Chausov M. [et al.] // Key Engineering Materials. – 2014. – V. 577. – P. 525 – 528. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.577-578.525.
219. Influence of pre-combined loading on mechanical properties and fracture mechanism of aluminum alloy 2024-T3 / Hutsaylyuk V., Chausov M., Śnieżek L. [et al.] // 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.
220. Structural modifications of the aluminum alloy in conditions of additional shock impulse load / Hutsaylyuk V., Chausov M., Śnieżek L. [et al.] // 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.
221. Lebedev A.A. Assessment of limiting damage in materials under static loading with the account of a stress state / Lebedev A.A., Chausov N.G., Bogdanovich A.Z. // Strength of materials. – 2002. – V. 34, №2. – P. 131 – 134. – DOI: 10.1023/A:1015354224871.
222. Model of damage cumulation in metallic materials under static tension / Lebedev A.A., Chausov N.G., Nedoseka S.A. [et al.] // Strength of Materials. – 1995. – V. 27, №7. – P. 379 – 386. – DOI: 10.1007/bf02209362.
223. Influence of additional force impulse at the monotonic load on the deformation of 2024-T3 aluminum alloy / Hutsaylyuk V., Śniezek L., Torzewski J. [et al.] // Defensive technologies : 5<sup>th</sup> int'l. sci. conf., 18–19 sept. 2012 yr., Belgrade, Serbia : conf. proc. – Belgrade, 2012. – P. 648 – 654.
224. Lebedev A.A. Assessment of damage in structural steels by the parameters of scatter of hardness characteristics in loaded and unloaded states / Lebedev A.A., Shvets V.P. // Strength of Materials. – 2008. – V. 40, №3. – P. 302 – 307.
225. Лебедев А.А. Новые характеристики деградации материала на стадии развития рассеянных повреждений / Лебедев А.А. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – №4. – С. 35 – 45.
226. Gumbel E.J. Statistics of extremes / Gumbel E.J. – New York: Columbia University Press, 1958. – 400 p.
227. Чаусов Н.Г. Эволюция поля деформации на поверхности листовой нержавеющей стали при динамических неравновесных процессах / Чаусов Н.Г., Березин В.Б. // Вісник Національного технічного університету України "Київський Політехнічний Інститут". Серія: Машинобудування. – 2011. – №63. – С. 253 – 257.
228. Чаусов Н.Г. Эволюция поля деформации на поверхности листовой нержавеющей стали при динамических неравновесных процессах / Чаусов Н.Г., Березин В.Б. // "Прогресивна техніка і технологія – 2011" : XII міжнар.

наук.-практ. конф., 20–24 черв. 2011 р., м. Севастополь : тези доп. – К., 2011. – С. 20.

229. Чаусов Н.Г. Влияние динамических неравновесных процессов на механические свойства высокопрочной стали / Чаусов Н.Г., Хитрик В.О., Березин В.Б. // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: збірник наукових праць / [ред. Лучко Й.Й. ]. – Львів: Каменяр, 2012. – Т. 9. – С. 271 – 279.

## Додатки

---

# Comfort House

---

International Property Management

---

04070, м. Київ, вул. Г.Сковороди, 1 літ «Г» тел.: 044 257 30 59 тел./ факс: 044 257 30 57;  
e-mail: – comforthouse – @ukr.net

## Довідка

Видана про те, що згідно Акту впровадження № 17/44 від 26.07.2011 року, результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри механіки та опору матеріалів Національного університету біоресурсів і природокористування України Березіна Валентина Борисовича на тему «Вплив ударно-коливального навантаження на кінетику поля деформацій та механічні властивості металів» в частині розробленого програмного комплексу для дослідження поля деформації плоскої поверхні зразків матеріалів методом кореляції цифрових зображень використовується в ТОВ «Комфортна Оселя» для оцінки поля деформації і, відповідно, навантаженості несучих конструкцій висотних будівель в процесі їх будівництва.

Генеральний директор  
ТОВ «Комфортна Оселя»

