

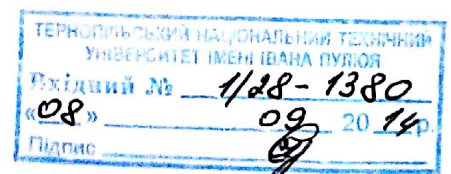
**ВІДГУК**  
**офіційного опонента на дисертаційну роботу**  
**Березіна Валентина Борисовича**  
**«Вплив ударно-коливального навантаження на кінетику поля деформацій та**  
**механічні властивості металів»,**  
**представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук**  
**за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла**

**Актуальність теми дисертації**

Класичні уявлення про деформування матеріалів при розтягу з урахуванням впливу швидкості навантаження вказують на те, що превалює зростання опору деформуванню зі зростанням швидкості деформації (за відсутності фазових перетворень), внаслідок зростання в'язкої складової опору і зменшення часу для розвитку процесу її релаксації. Відповідно, до зміни пластичних властивостей матеріалів при зростанні швидкості деформації в літературі є суперечливі дані. Часто існує зв'язок між структурними параметрами матеріалу та його полем деформацій, або між фізичним процесом і відповідним полем деформацій. Ці аспекти можуть слугувати аргументом для вибору моделі механічної поведінки матеріалів чи оцінки фізичних механізмів процесу деформування. Причому поле деформацій це джерело інформації, яке дозволяє виявити найдрібніші аспекти у механічній поведінці матеріалу.

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

За своїм науковим спрямуванням усі дослідження по темі дисертації виконувалися в межах наукової бюджетної теми №110/313-пр «Дослідити динамічні процеси середовищ та механічних систем при імпульсному вводі енергії» (номер держресстрації 0109U003214, 2009-2011), в якій автор приймав участь як виконавець.



### **Наукова новизна результатів досліджень**

Можна цілком погодитися із автором, що у дисертації отримано низку нових, важливих для механіки деформівного тіла та інженерних застосувань наукових результатів. Особливої уваги заслуговують такі основні положення:

1. Теоретично і експериментально обґрунтовано доцільність використання методу кореляції цифрових зображень для оцінки кінетики поля деформації металів при ударних навантаженнях.
2. 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»).
3. Проведено попередню оцінку взаємозв'язку структурного стану алюмінієвого сплаву Д16 та поля деформації на поверхні сплаву після реалізації ДНП.

### **Практичне значення результатів досліджень**

Практична цінність теоретичних результатів дисертаційної роботи полягає у тому, що автором 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, викликані ударно-коливальними навантаженнями. 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.



**Обґрунтованість і достовірність  
наукових положень, висновків та рекомендацій дисертації**

Основні положення і висновки дисертації сумніву не викликають, оскільки при їхньому одержанні грамотно використовувався апробований математичний апарат. 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).

**Повнота викладу основних результатів дисертації  
в опублікованих працях та авторефераті**

Результати дисертації опубліковані у 18 друкованих працях, з них – 9 статей у фахових наукових виданнях, 3 статті у виданнях, внесених до міжнародної наукометричної бази “SCOPUS”, 1 патент на винахід України.

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.

Текст дисертації і автореферат написані державною мовою, грамотно, зрозуміло для фахівців у галузі механіки деформівного твердого тіла. Оформлення дисертації і автореферату цілком відповідає вимогам чинного законодавства України. Автореферат дисертації правильно і достатньо повно дає уяву про зміст та методи проведених досліджень. Його зміст відображає усі основні положення дисертації.

### **Оцінка основного змісту дисертації**

Структура дисертації добре продумана і збалансована. Матеріал викладено у п'яти розділах. У **першому** з них зроблено докладний огляд робіт з розглядом основних методів для дослідження поля деформації матеріалів. Проведений аналіз свідчить, що на даний момент існує цілий ряд методів дослідження поля деформацій: фото еластичність/пластичність, муар-інтерферометрія, голографія, спекл-методи та метод кореляції цифрових зображень.

В якості основного висновку можна зазначити, що метод кореляції цифрових зображень володіє найбільш широкими можливостями при визначенні поля деформацій і має мінімальні вимоги до наявного устаткування. Він відрізняється дешевизною устаткування, простотою, та достатньою точністю – до 0,004% абсолютної похибки при визначенні деформації і дає можливість аналізу швидкоплинних явищ при деформацій матеріалу за допомогою високошвидкісної камери. Можна відмітити його універсальність, в порівнянні з іншими методами. Основний його недолік — середня точність визначення деформації легко компенсується використанням камер високої роздільної здатності. Також в даному розділі проаналізовано наявні результати експериментальних досліджень по оцінці поля деформацій матеріалів методом кореляції цифрових зображень при різних швидкостях деформації, що реалізуються при різних схемах навантаження. Основна увага зверталась на ті роботи, які присвячені оцінці поля деформацій матеріалів, що володіють суттєво різною деформаційною поведінкою як при статичному, так і при динамічному навантаженні. Це, в першу чергу, відноситься до матеріалів, що не схильні до локалізації пластичної деформації, наприклад, нержавіючі сталі, і, матеріалів, що проявляють специфічну деформаційну



поведінку при навантаженні, наприклад, алюмінієві сплави. Показано, що механічна поведінка матеріалів при різних типах навантаження, включаючи і динамічне навантаження, може бути достовірно оцінена лише за допомогою поля деформацій на всій робочій поверхні зразка. Особливо це стосується досліджень із впливу імпульсних підвантажень на процеси деформування пластичних матеріалів. В даному випадку за рахунок динамічного коливального перерозподілу навантаження в механічній системі заданої жорсткості можуть протікати такі процеси деформування, які однозначно можна віднести до практично не досліджених. Аналіз літературних джерел показує, що не зважаючи на широке застосування методу кореляції цифрових зображень для аналізу поля деформацій матеріалів в лабораторіях розвинутих країн світу, власні програмні комплекси для дослідження поля деформацій методом кореляції цифрових зображень при складних режимах навантаження в Україні, нажаль, практично відсутні. У висновку розділу сформульовані основні задачі і етапи дослідження.

Це дає можливість переконливо сформулювати мету дослідження та наукові завдання, які при цьому треба вирішити.

У другому розділі дисертації, є, на мою думку, стрижнем роботи, який визначає увесь подальший хід виконання досліджень та загальну методологію щодо розглядуваного кола задач і отримання основних результатів, де описано власний розроблений програмний комплекс для дослідження поля деформацій методом кореляції цифрових зображень. В якості критерію відповідності для розробленого комплексу обрано квадратичне відхилення, так як воно забезпечує найбільшу швидкість роботи, але з деякими змінами, спрямованими на підвищення ефективності роботи комплексу. З метою покращення точності та швидкості роботи методу розроблено алгоритм роботи комплексу: отримано головну діагональ матриці жорсткості сітки, використовуючи якобіан елементів; оптимізувано параметри елементів методом Левенберга-Марквардта, використовуючи головну діагональ матриці жорсткості в якості її наближення. На основі аналізу роботи програмного комплексу по синтетичним зображенням, представлено вираз для похибки визначення деформацій із імовірністю в 95%, при

фільтрації з розміром вікна 5x5 елементів базового поля та кроком сітки 10 пікселів методом плаваючих найменших квадратів. Розроблений програмний комплекс в даній роботі оснащався 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). Він складається з трьох модулів – препроцесору, модуля розв'язку та постпроцесору. Така схема забезпечує гнучкість при доданні нових можливостей у відповідні програми.

У **третьому** розділі описано методику механічних випробувань при ударно-коливальному навантаженні пластичних матеріалів при високочастотному, високошвидкісному коливальному процесі (динамічний незрівноважений процес (ДНП)). Методика випробувань реалізована на базі модифікованої гідравлічної установки для статичних випробувань ZD-100Pu. Вибір випробовуваних матеріалів в даній роботі був обумовлений задачею порівняння кінетик поля деформацій матеріалів з явно вираженим хвильовим процесом пластичного деформування – алюмінієві сплави Д16 і 2024-Т3 та матеріалу з відносно однорідним і пропорційним процесом пластичного деформування – нержавіюча сталь 12Х17. В дослідях з реалізації ДНП руйнівне зусилля крихких проб було в межах: на нержавіючій сталі – 60...160 кН; на великих зразках із алюмінієвих сплавів – 75...120 кН, на малих – 40...100 кН; на високоміцній корпусній сталі – 80...190 кН. Імпульсне підвантаження при статичному розтягу алюмінієвих сплавів накладалося при деформації 1,8...7%; нержавіючої сталі при деформації 5...8%; високоміцної корпусної сталі при деформації 0,05...0,25%.

У **четвертому** розділі наведено результати оцінки еволюції поля деформацій на поверхні листових алюмінієвих сплавів Д16 та 2024-Т3 при різних режимах навантаження. Ці дані співпадають з відомими літературними даними, і тим самим, ще раз підтверджують роботоздатність розробленого програмного комплексу та достовірність отриманих при його використанні експериментальних даних. Дослідженнями 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. 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-T3 та Д16. 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-T3. Результати досліджень виділяють тенденцію переважного (першочергового) утворення нової дисипативної структури в менш деформованих, при попередньому статичному деформуванні, зонах. Також встановлено наявність двох етапів деформування в процесі реалізації ДНП в алюмінієвих сплавах Д16 та 2024-T3 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.

Визначена частота додаткового циклічного навантаження, яке накладається на процес високошвидкісного деформування. Для випробувальної машини, що використовується, вона складас 1-2 кГц.

У п'ятому розділі наведено результати оцінки еволюції поля деформацій на поверхні листових сталей: нержавіючої 12Х17 та високоміцної корпусної, при різних режимах навантаження.

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. Виявлено рух найбільш інтенсивно zdeформованої частини поля деформації сталі 12Х17 до центру після ДНП – появу яскраво вираженої кінетики в процесі деформування. 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.

Дослідженнями також 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. Виявлено вплив релаксаційних процесів на процес деформування сталі 12Х17 після ДНП. Їх вплив призводить до зміни кінетики деформування. 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.

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». Виявлено, що поле деформації високоміцної сталі після ДНП володіє значною неоднорідністю. Встановлено, що високоміцна корпусна сталь під дією ДНП проявляє значну схильність до пластифікації за рахунок структурних перетворень.

Показано, що ДНП можна використовувати для збільшення ударної в'язкості високоміцної корпусної сталі. 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).



Завершується змістовна частина тексту дисертації формулюванням девяти доволі інформативних висновків.

### **Основні зауваження**

Ознайомлення з дисертаційною роботою дає підстави для таких зауважень:

1. Об'єкт та предмет дослідження сформульовано надто загально, як для кандидатської дисертації, тому бажано було б конкретизувати та уточнити вказані позиції.
2. Розробка програмного комплексу з метою аналізу поля деформацій в деформівних середовищах має ґрунтуватись на відповідних алгоритмах та сформульованих моделях на базі основ теорії пружності, пластичності і повзучості з урахуванням явищ повзучості та релаксації. В роботі даний аспект вирішення поставленої проблеми відображено надто розпливчато.
3. Локально-зосереджені джерела, обумовлені полями різної фізичної природи, мають свої особливості. Тому значний інтерес становить виявлення відповідних ефектів перебігу досліджуваного явища, що бажано виділити окремо.
4. В передостанньому абзаці автореферату на стор. 1 не зовсім зрозумілий термін «... деформацій на поверхні листових пластичних матеріалів».
5. У підписах до рисунків, зокрема рис. 14 автореферату, вживається не зовсім гладкий в орфографічному сенсі вираз «... після імпульсного введення енергії», і далі неодноразово цей термін зустрічається часто.

Зроблені зауваження жодною мірою не заперечують в цілому високої оцінки наукової та практичної цінності дисертаційної роботи і мають більше характер побажань.

### **Загальні висновки, щодо відповідності дисертації**

#### **встановленим вимогам**

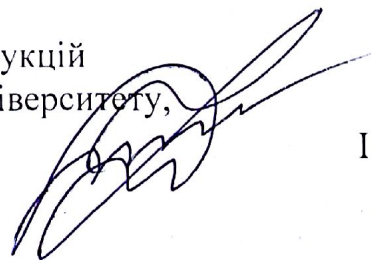
У цілому дисертація є завершеною цілісною комплексною науковою роботою, яка розв'язує актуальну та важливу наукову задачу оцінки поля деформації металів різних класів при та після ударно-коливального навантаження («динамічний

незрівноважений процес») та дає можливість зробити попередню оцінку взаємозв'язку між полем деформації та структурним станом матеріалу.

Результати роботи пройшли хорошу апробацію. Вони доповідалися на численних наукових конференціях з механіки деформівного твердого тіла, в тому числі міжнародних. Результати досліджень достатньо повно опубліковані у виданнях, затверджених ДАК. Кількість таких публікацій істотно перевищує вимоги ДАК. Дисертант впровадив свої результати під час реалізації важливих інженерних проектів. Автореферат належно повно й правильно відображає зміст дисертації. Сукупність результатів, що містяться в роботі можна кваліфікувати як досягнення у розвитку механіки твердого деформівного тіла.

Таким чином, за обсягом виконаних досліджень, новизною, науковою і практичною значимістю, рівнем обґрунтованості, мірою впровадження результатів і апробації дисертаційна робота В.Б.Березіна «Вплив ударно-коливального навантаження на кінетику поля деформацій та механічні властивості металів» цілком відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла. У ній отримано нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності можна кваліфікувати як вирішення важливих наукових задач механіки деформівного твердого тіла і вважати, що В.Б.Березін заслуговує надання йому наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент,  
завідувач кафедри будівельних конструкцій  
Львівського національного аграрного університету,  
доктор технічних наук, професор



І.М.Добрянський

2 вересня 2014 року

Підпис Добрянського І.М. підтверджую:

Головний вчений секретар ЛНАУ  
к.б.н., доцент



С.А.Різель