

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Трощенко Дар'ї Сергіївни  
« **Нерівноважна еволюційна термодинаміка фрагментації металів**

**з урахуванням стохастичності**»,

подану на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

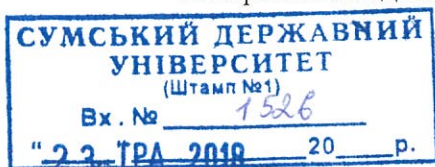
за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

Дисертаційна робота присвячена розвитку теоретичних моделей, що дозволяють якісно описати процес фрагментації металевої структури при інтенсивній пластичній деформації та встановити необхідні умови для формування рівноважних субмікроструктур чи нанокристалічних структур з високими фізико-механічними властивостями.

#### **Актуальність обраної теми**

Вивчення фізичних властивостей таких структур важливе з огляду на можливість їхнього практичного застосування, зокрема стійкості до руйнування при великих циклічних навантаженнях. Незважаючи на досить значний теоретичний та експериментальний доробок при вивченні процесів подрібнення зернистої структури за допомогою методів інтенсивної пластичної деформації, сьогодні ще немає повного уявлення про фізичні явища, що виникають у структурі матеріалу під час обробки. Крім того, є чимало питань стосовно інтенсивної пластичної деформації, які залишилися поза увагою. Дослідження процесу фрагментації металів чи сплавів під час інтенсивної пластичної деформації має високу актуальність, зокрема дисертаційна робота Трощенко Д. С. в рамках єдиного підходу нерівноважної еволюційної термодинаміки розвиває запропоновану Метловим Л. С. феноменологічну модель, що однозначно встановлює перебіг сильно нерівноважних процесів та дозволяє описати специфіку формування стаціонарної структури матеріалу під час подрібнення полікристалічної структури металів. Одержані результати в цілому добре пояснюють експериментальні дані та дають можливість прогнозувати наперед визначені властивості речовин. Це становить інтерес як для експериментальних досліджень і практичних застосувань, так і для розвитку теоретичних моделей. Тому актуальність наукової роботи Трощенко Д.С. не викликає сумніву.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі прикладної математики та моделювання складних систем Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України. Рукопис складається зі вступу, трьох оригінальних розділів, основних висновків та переліку використаних джерел. Зміст дисертації викладено на 189 сторінках друкованого тексту, з них 137 сторінок – основний текст. Список використаних джерел містить 178 найменувань.



**У першому розділі** проведено літературний огляд, в якому розглянуті відомі методи отримання ультрадрібнозернистих структур, зокрема основна увага зосереджена на методах інтенсивної пластичної деформації, показано перспективність та переваги їх застосування. Подано сучасний стан та результати експериментальних досліджень, обґрунтовано актуальність проблеми, вказано об'єкт досліджень, викладено мету і завдання досліджень, описано методи отримання наноструктурних матеріалів та процеси інтенсивної пластичної деформації. Значну увагу приділено також теоретичним методам представлення процесу фрагментації твердих тіл та моделюванню інтенсивної пластичної деформації, а також зв'язку нерівноважної еволюційної термодинаміки і теорії фазових переходів Ландау.

**Другий розділ** присвячений формулюванню модернізованої феноменологічної моделі фрагментації металів чи сплавів при інтенсивній пластичній деформації, яка досліджується впродовж всієї дисертаційної роботи. Реальний процес фрагментації є досить складним, оскільки в процесі обробки беруть участь усі рівні структурних дефектів: точкові (вакансії й міжвузлові атоми), лінійні (дислокації та дисклинації), плоскі та об'ємні дефекти (мікропори, мікротріщини та кластери). При теоретичному моделюванні автор обмежився спрощеною моделлю, де враховані лише два типи дефектів, які відіграють найбільш істотну роль у формуванні дрібнозернистої структури і значно впливають на фізико-механічні властивості матеріалу: межі зерен та дислокації. Керуючими параметрами моделі є значення першого і другого інваріантів тензора пружних деформацій. Загалом, вибір значень основних постійних теорії здійснюється феноменологічно, виходячи з необхідності формування стаціонарних субмікрокристалічних або нанокристалічних структур, які спостерігаються у ряді експериментальних робіт. У таблиці 2 наведені величини 16 параметрів дводефектної моделі.

Важливим результатом досліджень цього розділу є фазова діаграма режимів фрагментації. В адіабатичному наближенні (час релаксації меж зерен суттєво перевищує час релаксації дислокацій) встановлено, що вона поєднує області формування двох та однієї граничних структур, що дозволяє у загальному вигляді зобразити можливі сценарії та режими поведінки системи еволюційних рівнянь.

На завершення розділу вивчена кінетика дводефектної підструктури при інтенсивній пластичній деформації без використання адіабатичного наближення виконана з використанням числового розрахунку. Одержані результати демонструють високу збіжність і підтверджують правомірність розгляду адіабатичного підходу у ході вивчення процесів фрагментації матеріалів чи сплавів під час інтенсивної пластичної деформації.

У **третьому розділі** досліджено фазову кінетику процесу фрагментації. Вона доповнює результати, отримані в попередньому розділі, і ґрунтується на аналізі рівняння Ландау-Халатнікова. Одержано залежність швидкості змін густини меж зерен під час інтенсивної пластичної деформації, що дозволило однозначно встановити вплив пружних деформацій на процес виникнення та характер наближення до рівноважного стану системи. Побудовано фазові портрети дводефектної системи, отримано загальний вираз для показників Ляпунова, що характеризують в цілому поведінку динамічної системи у фазовому просторі. Встановлено наявність особливих ділянок, більш відомих як “русло великої річки”, до яких, незалежно від початкових умов, швидко еволюціонують всі фазові траєкторії. Знайдено критичні умови для керувальних параметрів та побудовано діаграму, що визначає стійкість сформованих станів системи. Виявлено, що процес фрагментації металу чи сплаву під час інтенсивної пластичної деформації здійснюється в два етапи: на першому відбувається швидка еволюція густини структурних дефектів до певної притягувальної ділянки та на другому - подальший повільний розвиток уздовж неї.

**Четвертий** розділ присвячений вивченню впливу флуктуацій нерівноважних параметрів на еволюцію системи і її властивості. Отримані тут результати дозволяють більш якісно представити можливі режими фрагментації та описати супроводжувальні самоорганізовані процеси, які неможливо відобразити, застосовуючи детерміністичне наближення. Проведено дослідження умов формування стаціонарних станів системи та визначено можливі сценарії і режими процесу фрагментації полікристалічної структури. Побудовано розподіли реалізацій густин меж зерен, які дозволили кількісно та якісно оцінити склад зернистої структури в об'ємі металевого зразка. З аналізу часових залежностей густин меж зерен визначено вигляд автокореляційної функції та виявлено частотні характеристики процесу фрагментації.

Підсумовуючи сказане вище, можна констатувати, що в дисертації отримано цілу низку нових і цікавих наукових результатів. Авторкою вдало вибрані об'єкти дослідження, вперше визначено умови формування граничних структур при зміні початкових значень та значень керувальних параметрів (пружних зсувних і стискальних деформацій). Встановлено вплив ступеня взаємодії двох дефектних підсистем на кінетику процесу. З'ясовано вплив часів релаксації густини дефектів на фазову динаміку нерівноважних змінних.

Авторкою вперше досліджено процес фрагментації матеріалу під час інтенсивної пластичної деформації з урахуванням адитивного гаусівського шуму основних змінних (густин меж зерен та дислокацій), що дозволило передбачити можливість виникнення принципово нових режимів фрагментації і відповідно, формування дрібнозернистих структур із заданими властивостями. Також побудовано

фазові діаграми, що демонструють умови формування граничних структур різних типів з урахуванням стохастичності процесу.

Усе сказане вище свідчить про те, що в дисертаційній роботі Д. С. Трощенко розв'язано важливу задачу, що пов'язана з вивчення закономірностей процесу фрагментації твердих тіл, підданих обробці методами інтенсивної пластичної деформації.

**Практичне значення результатів дисертаційної роботи для науки і практики** визначається тим, що вони можуть бути використані в прикладних дослідженнях та розробках. Зокрема проведені дослідження вказують на конкретні параметри, що мають визначальний вплив на утворення дрібнозернистих структур.

**Достовірність результатів та ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків.** Про достовірність та обґрунтованість основних наукових положень та висновків свідчить застосування адекватних теоретичних моделей, запропонованих Л.С. Метловим, використання математичного апарату апробованих методів теоретичних досліджень: класичних рівнянь Ландау-Халатнікова, Ланжевена, рівняння Фоккера-Планка, методу фазової площини та стійкості Ляпунова. Також використовувались стандартні числові та чисельно-аналітичні методи, у тому числі метод швидкого перетворення Фур'є. З огляду на це, маю всі підстави вважати результати дисертаційної роботи Д. С. Трощенко достовірними та обґрунтованими.

**Апробація та повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.** На мою думку, опубліковані роботи достатньо повно відображають зміст дисертації, результати досліджень та висновки, що висунуті на захист. Всі наукові положення обговорені на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях, про що свідчать опубліковані тези доповідей. Таким чином вважаю, що основні результати дисертації достатньо повно апробовані. Повнота відображення результатів дисертаційних досліджень і кількість публікацій відповідають вимогам, встановленим Міністерством освіти і науки України.

#### **Зауваження щодо змісту дисертаційної роботи та автореферату.**

1. На жаль, у роботі не враховано неоднорідність розподілу у просторі основних параметрів, також відсутня геометрія досліджуваного зразка (співвідношення (1) і (12) автореферату та (2.1) і (4.1) дисертації є континуальними, відсутні будь-які обмеження). Це далеко від реальних умов, оскільки устаткування для обробки має чіткі розміри та визначену пропускну здатність, крім того, реальна структура матеріалу, разом з досліджуваними межами зерен та дислокаціям, містить велику

кількість структурних дефектів інших рівнів, що впливає на розподіл та характер еволюції структурних дефектів під час оброблення. Бажано було вивчити просторову неоднорідність системи в об'ємі зразка у ході оброблення.

2. У ході ознайомлення з роботою стало зрозуміло, що основне співвідношення для густини внутрішньої енергії (співвідношення (1), (12) автореферату та (2.1), (4.1) дисертації) у випадку дислокацій обмежується тільки першими двома вкладками (тобто розглядається квадратичне наближення), проте залишається поза увагою фізичне обґрунтування такого наближення. Крім того, не зрозуміло, навіщо взагалі було наводити значення для коефіцієнтів  $\varphi_{2D} = 0$  Дж·м<sup>3</sup>,  $\varphi_{3D} = 0$  Дж·м<sup>5</sup> (таб. 2.1 на ст. 63 та таб. 4.1 на ст. 124), якщо вони відсутні в подальших рівняннях. Маю зазначити, що в авторефераті взагалі не наведені значення параметрів.
3. У висновках до дисертації бажано прописувати округлені значення розмірів зерен, а не точні величини, наприклад 63 нм, 57 нм, 714 нм і т. д., або навести обґрунтування числових значень параметрів, при яких реалізується саме таке значення розмірів зерен.
4. Деякі висновки до окремих розділів подані в анотаційному вигляді.

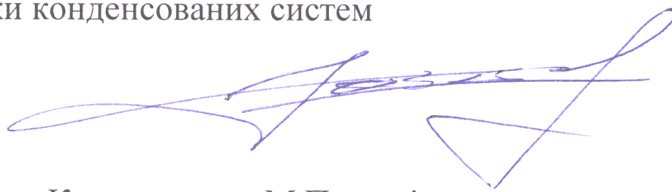
Однак наведені вище зауваження не мають принципового характеру та не знижують цінності отриманих у дисертації результатів, їх практичної доцільності та не ставлять під сумнів достовірність та обґрунтованість основних положень, що виносяться на захист. Загалом, дисертаційна робота написана на високому науковому рівні, грамотно, із зрозумілими висновками.

**Відповідність встановленим вимогам МОН України щодо кандидатських дисертацій.** Вважаю, що дисертаційна робота Трощенко Д. С. є завершеним теоретичним дослідженням, що виконане на високому науковому рівні та представляє як науковий, так і практичний інтерес. Основні результати дисертації викладено у 22 наукових працях, з яких 6 статей опубліковано у фахових вітчизняних та іноземних наукових журналах, з них 2 статті індексуються наукометричною базою даних Scopus. Аналіз публікацій дає підставу стверджувати, що всі основні положення дисертації повною мірою опубліковано й апробовано на вітчизняних і міжнародних конференціях. Зміст автореферату повністю відповідає основним положенням дисертації. Структура дисертації та автореферату повною мірою відповідає вимогам

МОН України щодо кандидатських дисертацій та спеціальності 01.04.07 – «фізика твердого тіла».

На підставі викладеного вище можна стверджувати, що дисертаційна робота Трошенко Дар'ї Сергіївни «Нерівноважна еволюційна термодинаміка фрагментації металів з урахуванням стохастичності» за актуальністю, новизною, практичним значенням, обсягом та завершеністю виконаних досліджень відповідає всім вимогам МОН України щодо кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує присвоєння наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Доктор фізико-математичних наук, професор,  
головний науковий співробітник відділу  
статистичної теорії конденсованих систем  
Інституту фізики конденсованих систем  
НАН України,



М. П. Козловський

Підпис професора Козловського М.П. засвідчую:

Вчений секретар Інституту фізики  
конденсованих систем НАН України,  
кандидат фіз.-мат. наук



Р.С.Мельник

22.05.2018 р.