

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Ватажук Олени Миколаївни «Акустична спектроскопія низькотемпературних дислокаційних процесів у наноструктурних металах»**, представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Ультрадрібнозернисті та наноструктурні метали й сплави викликають значний інтерес в фізиці твердого тіла як об'єкти для вивчення механізмів руху дислокацій в умовах високої щільності ефективних перешкод. Джерелом цінної інформації про параметри дислокаційної структури металів є експериментальне вивчення їх динамічних пружних і непружних властивостей у широкому інтервалі температур методами акустичної спектроскопії, які мають високу чутливість до зміни структурних параметрів, вибірковістю, відтворюваністю й до того ж носять неруйнівний характер вимірювань. Пружні й непружні властивості наноструктурних матеріалів при низьких температурах, а також фізичні механізми, що їх визначають, дотепер залишаються мало вивченими. Першорядний інтерес викликає питання про вплив подрібнення зернової структури на низькотемпературні релаксаційні резонанси, що спостерігаються у крупнозернистих металах. Слід очікувати, що велика кількість границь розділу, сильне розупорядкування кристалічної ґратки у випадку одержання наноструктурних матеріалів методами інтенсивної пластичної деформації суттєво вплине на динамічну поведінку дефектів структури в кристалах при низьких температурах. Можна також припустити, що сильний статистичний розкид геометричних і енергетичних характеристик дефектів у наноструктурних матеріалах наближає їх властивості до властивостей стекол.

До початку виконання даної роботи повністю були відсутні експериментальні дані досліджень за допомогою ультразвуку руху дислокацій у первинному і вторинному рельєфі Пайєрлса в наноструктурних металах. Також не були досліджені питання взаємодії дислокацій із домішковими центрами й квазілокальними збудженнями в металах. Важливим слід вважати спеціальний акцент на вивченні проблеми стабільності нерівноважних структур наноматеріалів, виготовлених різними способами. Перелічені проблеми визначають безумовну **актуальність** виконаної роботи.

Актуальність дисертаційної роботи підтверджується також тим, що результати дослідження були одержані в ході виконання планових науководослідних робіт за відомчою тематикою, у яких Ватажук О. М. брала участь як відповідальний виконавець: “Нові закономірності й механізми непружної

деформації твердих тіл в умовах помірного й глибокого охолодження” (№ держреєстрації 0107U000943, шифр 1.4.10.8.9, 2007-2011 рр.), “Фізико-механічні властивості нанокристалічних, ультрадрібнозернистих і аморфних твердих тіл в умовах низьких і наднизьких температур” (№ держреєстрації 0112U002638, шифр 1.4.10.8.10, 2012-2014 рр.), «Дослідження закономірностей і механізмів низькотемпературної деформації сучасних структурно модифікованих матеріалів» (№ держреєстрації 0115U001160, шифр 1.4.10.8.11, 2015-2017 рр.), «Фізичні механізми непружної деформації наноструктурних кристалічних матеріалів, високоентропійних сплавів і полімерних композицій в умовах помірного й глибокого охолодження» (№ держреєстрації 0118U003109, шифр 1.4.10.8.12, 2018 - 2020 рр.).

Для вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань був використаний один з методів низькотемпературної акустичної спектроскопії – метод складеного вібратора, що зарекомендував себе найбільш відповідним методом для вивчення низькотемпературних динамічних властивостей дислокацій. Виміри проводилися в широкому інтервалі температур із застосуванням різних охолоджуючих рідин у якості холодоагенту. Результати акустичних вимірювань були доповнені структурними дослідженнями за допомогою рентгеноструктурного аналізу та трансмісійної електронної мікроскопії. Експериментальні дані, отримані за допомогою різних методів, добре узгоджені як між собою, так і з сучасними уявленнями про розповсюдження та поглинання ультразвуку у конденсованому середовищі. Теоретичний аналіз одержаних результатів був проведений з використанням найбільш відомих та апробованих моделей фізики твердого тіла та фізичної акустики. Усе це стало запорукою **достовірності** отриманих результатів та **обґрунтованості** зроблених у дисертації висновків і рекомендацій.

Дисертаційна робота Ватажук О.М. містить низку **нових важливих** результатів, серед яких особливо слід відзначити наступні:

1. Встановлено, що виявлені в наноструктурних Cu й волокнистому композиті Cu-32об.%Nb піки внутрішнього тертя обумовлені низькотемпературною динамікою руху дислокаційних сегментів у первинному й вторинному рельєфах Пайєрлса міді й мідної матриці. Це підтверджується отриманими значеннями активаційних параметрів, які близькі до параметрів низькотемпературного піка Бордоні і його сателіта (піка Ніблетта-Уілкса), виявлених раніше в крупнозернистій міді.

2. Вперше виконаний статистичний аналіз активаційних параметрів піка Бордоні в наноструктурній міді на основі припущення, що причиною уширення піка є випадковий розкид значень енергії активації елементарних

релаксаторів внаслідок сильного спотворення кристалічної структури. Встановлено, що експериментальні результати можуть бути добре інтерпретовані в рамках теорії Зегера, яка розглядає в якості релаксаторів для піка Бордоні термічно активоване зародження парних кінків на дислокаційних сегментах, що лежать у долинах потенціального рельєфу Пайерлса. В роботі отримані емпіричні оцінки напруження Пайерлса, інтегральної щільності внутрішньозеренних дислокацій та характеристик геометричних кінків на дислокаціях.

3. Вперше встановлено, що виявлений раніше у відпаленому крупнозернистому цирконії релаксаційний пік внутрішнього тертя поблизу 250 К зберігається після інтенсивної пластичної деформації у наноструктурному Zr, але його висота збільшується приблизно в 10 разів, а температура локалізації зсувається в бік низьких температур. Крім того, після інтенсивної пластичної деформації у наноструктурному Zr вперше зареєстрований новий пік внутрішнього тертя в зоні помірно низьких температур поблизу 80 К. Отримані оцінки активаційних параметрів спостережуваних піків у наноструктурному Zr і показано, що вони обумовлені різними термоактивованими дислокаційними процесами: взаємодією дислокацій з домішками й утворенням пар кінків на дислокаціях.

4. Встановлено, що в результаті витримування при кімнатній температурі (старіння) і високотемпературного відпалу зразків основні параметри виявлених акустичних аномалій (висота, ширина й температура локалізації піків) суттєво змінюються, що є відображенням нестабільності структур сильнофрагментованих зразків, створених шляхом застосування різних схем інтенсивної пластичної деформації.

5. На температурних залежностях модуля Юнга $E(T)$ наноструктурних зразків Ti і Zr в інтервалі температур $2 < T < 20$ К вперше виявлена склоподібна особливість – перехід від степеневого до логарифмічного закону з температурою кросовера $T_c \approx 7$ К, що є характерним для стекел та може свідчити про наявність у наноструктурному металі підсистеми або «фази» скла. Показано, що ця особливість обумовлена наявністю в дрібних зернах фрагментів дислокаційних ліній нанометрових розмірів із широким статистичним розподілом їх параметрів.

Результати дисертаційної роботи є **новими** і відповідають світовому рівню досліджень в галузі фізичного матеріалознавства. Їх **наукова значимість** полягає в тому, що вони доповнюють існуючі фундаментальні уявлення низькотемпературної фізики твердого тіла щодо механізмів пружної та непружної деформації, зокрема, істотно розширюють і поглиблюють уявлен-

ня про фізику механічних процесів у твердих тілах при низьких температурах.

Одержані в дисертаційній роботі довідкові дані про фізико-механічні властивості металів і сплавів в умовах глибокого охолодження можуть знайти **практичне застосування** при конструкторських розробках криогенної та космічної техніки. Вони можуть бути використані для прогнозування поведінки функціональних матеріалів в екстремальних умовах їх експлуатації, а також можуть бути закладені в наукову основу технологій створення нових сучасних матеріалів.

Основні результати дисертаційної роботи Ватажук О. М. **в повному обсязі й вчасно** опубліковані у 36 наукових працях, з них 6 наукових статей у фахових журналах та 30 – у збірках матеріалів та тез докладів міжнародних наукових конференцій. Серед робіт, опублікованих за темою дисертації, немає публікацій ідентичних за змістом. Дисертаційна робота не містить ознак академічного плагіату.

Автореферат в цілому **повно** та **точно** відображає зміст дисертації.

По змісту та оформленню дисертації і автореферату належить зробити декілька **зауважень**:

1. Автореферат не містить жодних даних про структуру досліджених зразків, що були одержані різними методами інтенсивної пластичної деформації. У тексті дисертації ці дані приведені в розділі 2 «Методика експерименту».

2. В авторефераті в табл.1 вказані значення періоду спроб процесу утворення пар кінків на дислокаціях у міді та мідному композиті. В той же час, у дисертації в табл. 3.3 наведені інші значення цих величин. Це ймовірно технічна помилка.

3. В авторефераті відсутні результати статистичного аналізу експериментальних результатів в НС Cu та Zr. У тексті дисертації ці дані наведені в розділах 3 і 4.

4. У дисертаційній роботі зустрічаються помилки в написанні деяких слів (частково, пов'язані з недосконалістю перекладу українською мовою), наприклад: позитивний знак – додатний знак, густина дислокацій – щільність дислокацій.

Зазначені зауваження, загалом, не знижують високої наукової та практичної цінності роботи Ватажук О. М.

Отримані результати можуть бути використані у фундаментальних наукових дослідженнях, що ведуться у Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України (м. Харків), Харківському націо-

