

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертацію
ВАТАЖУК Олени Миколаївни
«Акустична спектроскопія низькотемпературних дислокаційних процесів
у наноструктурних металах»,
представленої на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук
(спеціальність 01.04.07 – фізика твердого тіла)

Актуальність теми

Вивчення динамічних пружних і непружних властивостей металевих наноструктурних і ультрадрібнозернистих матеріалів істотно доповнює дослідження їх поведінки в умовах квазістатичних механічних навантажень і знаходиться в ряду важливих завдань сучасної фізики твердого тіла. Прецизійні низькотемпературні акустичні дослідження дають можливість отримати інформацію про механізми, що контролюють елементарні акти пластичності, переміщення точкових дефектів, взаємодія структурних дефектів з елементарними збудженнями електронної та фононної підсистем і з квазілокальними збудженнями, пов'язаними з сильними структурними спотвореннями в таких металах і сплавах.

Напрацювання та інтерпретація експериментальних даних, отриманих в області низьких і помірно низьких температур методом акустичної спектроскопії, стосовно ГЦК і ГПУ металів і сплавів з розміром зерна від мікронного масштабу до нанометрового, а також оцінка їх термічної стійкості, має не тільки велике наукове, а й прикладне значення, враховуючи можливості їх застосування в якості конструкційних матеріалів для криогенної техніки, аерокосмічної та інших галузей промисловості.

У зв'язку з цим, дисертаційна робота Ватажук Олені Миколаївни, в якій проведено порівняльні дослідження характеристик внутрішнього тертя, динамічного модуля пружності і низькотемпературних дислокаційних процесів в наноструктурних (НС), ультрадрібнозернистих (УДЗ) і крупнозернистих (КЗ) ГЦК (Cu, композит Cu-Nb) і ГПУ (Zr, Ti) металів в області температур 2...340 К, а також зміни цих характеристик при відпалів, є актуальною.

Актуальність роботи підтверджує перелік держбюджетних тем, виконаних у відділі фізики реальних кристалів ФТІНТ ім. Б.І.Веркіна НАН України, в рамках яких здобувачем були отримані основні наукові результати.

Структура дисертації, основні наукові і практичні результати і їх новизна.

Дисертація О.М. Ватажук включає анотацію українською та англійською мовами і складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних

джерел (120 джерел) та додатку. Дисертація містить 178 сторінок, 11 таблиці, 49 рисунків.

У вступі автором обґрунтовано актуальність обраної дисертаційної теми, сформульовані її мета, наукова новизна і практична цінність, наведені дані про публікації та апробацію результатів дисертаційної роботи і ін.

У першому розділі, присвяченому літературному огляду, надано коротка характеристика методів одержання НС і УДЗ металах, особливостей їх структури й механічних властивостей. Представлено аналіз сучасного стану експериментальних і теоретичних досліджень низькотемпературного дислокаційного внутрішнього тертя і динамічних модулів пружності реальних кристалічних матеріалах, включаючи сильно розупорядковані метали. Огляд завершено зазначенням завдань, які підлягають розгляду в рамках дисертації.

У другому розділі «Методика експерименту» наведено описання методів отримання досліджуваних в роботі ГЦК і ГЦП металів (Cu, волокнистий композит Cu-Nb, Zr, Hf) в різних структурних станах, визначення їх характеристик. Розділ містить опис обладнання і методики акустичних вимірювань в інтервалі температур 2...340 К.

Розділи 3-5 містять результати експериментальних і теоретичних досліджень низькотемпературних дисипативних і пружних характеристик Cu, Zr, Hf і волокнистого композита Cu-Nb в різних структурних станах, сформованих з використанням різних методів інтенсивних пластичних деформацій і відпалів.

Серед найбільш значущих результатів, здобутих в дисертації, що відповідають критерію новизни, слід зазначити наступні.

Вперше проведено низькотемпературні акустичні дослідження нанокристалічної міді і композиту мідь-ніобій з ультрадрібнозернистою структурою і виявлені піки внутрішнього тертя поблизу 90 К з сателітами поблизу 35 К, пов'язані з динамікою релаксаторів дислокаційної природи в первинному і вторинному рельєфі Пайєрлса в міді і мідної матриці (для композиту Cu-Nb). Ці піки ідентифіковано, відповідно, як піки Бордоні і Ніблетта-Уїлкса, що були спостережувані у крупнозернистій міді. Сильне спотворення кристалічної структури міді, що піддана ПД, відзеркалено в результатах статистичного аналізу енергії активації піка Бордоні. Отримані емпіричні оцінки напруження Пайєрлса, інтегральної густини внутрішньозеренних дислокацій, характеристик геометричних кінків на дислокаціях.

Встановлено, що для наноструктурного Zr, в порівнянні з крупнозернистим, характерно зміщення піку внутрішнього тертя з $T \approx 250$ К на

≈ 30 К в область більш низьких температур, сильне (в ~ 10 разів) збільшення його висоти, а також виникнення нового піку при $T \approx 80$ К. З'ясована фізична природа цих піків: термоактивованій відрив дислокацій від стопорів - локальних дефектів кристалічної ґратки і рух дислокацій за механізмом зародження парних кінків.

Спостережувана зміна акустичних аномалій досліджених НС і УДЗ металів (висоти, ширини і температури локалізації піків) в результаті відпочинку й відпалів пов'язана з недостатньою термомеханічною стійкістю їх структур, сформованих з використанням методів інтенсивних пластичних деформацій.

На температурних залежностях динамічного модуля пружності наноструктурних зразків Zr і Ti в інтервалі температур 2...20 К вперше спостережено перехід від степеневого до логарифмічного закону, що свідчить про наявність у наноструктурному стані метала склоподібної підсистеми яка є наслідком значних структурних викривлень і пов'язаних з ними квазілокальних коливань із широким статистичним розкидом параметрів.

Наукова значущість отриманих результатів полягає в тому, що вони представляють нові відомості про особливості мікроскопічних механізмів, що контролюють процеси пружної й непружної деформації в області низьких температур у ГЦК і ГЦП металах зі структурам нанометрового масштабу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що вони сприяють розробці й вдосконаленню методів механіко-термічних обробок, заснованих на цілеспрямованому керуванні структурним станом та властивостями металів і сплавів з різним типом кристалічної ґратки для одержання перспективних конструкційних матеріалів широкого застосування.

Достовірність отриманих результатів. Про високий ступінь достовірності результатів і аргументованість сформульованих висновків дисертації свідчить велика кількість експериментальних даних, отриманих при комплексному дослідженні динамічних пружних й непружних властивостей УДЗ і НС металів і сплавів з використанням, як основного, - апробованого методу складного вібратора акустичної спектроскопії, застосуванням методів рентгеноструктурного аналізу і електронної мікроскопії. При аналізі експериментальних даних використовувалися методи теоретичної фізики і чисельних розрахунків (пакет програм "Mathcad 12").

Повнота викладення основних наукових і практичних результатів в опублікованих роботах. Завершеність і стиль викладення

Основні результати роботи О.М. Ватажук опубліковано в 6 статтях у провідних фахових вітчизняних та зарубіжних наукових журналах, що індексуються у наукометричній базі даних Scopus. Результати досліджень були

представлені на багатьох міжнародних наукових конференціях і опубліковані в 30 тезах, збірках праць і матеріалах цих конференцій.

У дисертації отримано ряд нових результатів, надано їх інтерпретацію і узагальнення. Дисертація є завершеною науковою працею, написана хорошою науковою мовою і оформлена відповідно існуючим вимогам.

Автореферат відображає основний зміст і структуру дисертаційної роботи.

Тема дисертаційної роботи і суть її наукових результатів повністю відповідають паспорту спеціальності 01.04.07. - фізика твердого тіла, фізико-математичні науки.

Зауваження що до змісту дисертації та автореферату.

1. В п.1.8 на с.72 зміст речення про відсутність публікацій з тематики низькотемпературних акустичних властивостей УЗД і НК металів, по суті, повторюється в останньому реченні 3 абзацу.

2. Для досліджених в роботі зразків композиту Cu-Nb характерний поперечний розмір волокон ніобію і мідних прошарків складає 0,2-0,5 мкм, що відносить цей композит до категорії субмікросталічних матеріалів. Проте у тексті дисертації і автореферату використовується термін «нанокompозит Cu-Nb».

3. Характеризуючи досліджувані зразки НК міді, які перебували при кімнатній температурі зазначений час, використовуються різні терміни: «після витримки» (підпис до рис.3.9), «зістаренної міді» (підпис до рис.3.10), «після відпочинку» (табл.3.5), «старіння» (підпис до рис.3.11).

За прийнятою класифікацією (див., напр.: Ю.М.Лахтин. *Металловедение и термообработка металлов*. М.: *Металлургия*, 1976) при $T < 0,2T_{пл}$ протікає перша стадія процесу повернення – відпочинок, коли відбувається переміщення на стоки точкових дефектів вакансійного типу і перерозподіл дислокацій без утворення нових субграниць. Термін «старіння» характеризує розпад твердого розчину з утворенням дисперсних виділень других фаз. При цьому відомо, що в чистій міді, подібної досліджуваної в дисертації, старіння не спостерігається.

4. В п.4.4 (с.136) сказано, що температура відпалу НК цирконію $T_{ан}=425$ К знаходиться поблизу нижньої межі температури первинної рекристалізації. Далі зазначено (с.137), що підвищення температури T_p^{KH} локалізації КН-піку, що спостерігається в результаті рекристалізаційного відпалу, може свідчити про вплив середнього розміру зерна (прямо або опосередковано) на величину активаційних параметрів КН-релаксації. Однак питання про природу такого впливу в даний час залишається відкритим.

На ці висловлювання є наступні зауваження. По-перш, підкреслений мною вислів використано, мабуть, помилково, замість, наприклад, вислову «відпалу

перед рекристалізацією», про що, власне і йдеться. По-друге, для ряду металів, підданих ІПД, спостерігається відносно невеликий ефект зміцнення в результаті відпалу в інтервалі температур перед рекристалізацією [1-3]. Оскільки при такому відпалі субструктура наноматеріалів, як правило, суттєво не буде змінюватись, для пояснення ефекту зміцнення використано традиційні уявлення. Були висловлені припущення про зв'язок ефекту зміцнення з особливостями взаємодії границь зерен з домішками [1], процесами формування домішкових атмосфер навколо дислокацій [2]. Для деформованого цирконію відпали при температурах поблизу 400 К викликають міграцію з енергією активації 1,35 еВ моновакансій на дислокаційні стоки [4]. Наведені дані можуть свідчити про прямий вплив спричиненого відпалом перерозподілу точкових дефектів, зокрема вакансійного типу, на змінення досліджуваних акустичних властивостей цирконію.

1. R.Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdon, M.J. Zehetbauer, Y.T. Zhu // *JOM* 2006. - Vol. 58. - P. 33-39.

2. Zhilyaev A.P., Langdon T.G. // *Progress in Materials Science*, 2008, v.53, p.893-979.

3. V.M. Segal, I.J. Beyerlein, C.N. Tome, V.N. Chuvildeev, V.I. Kopylov // – *New York: Nova, Science Publishers*, 2010, 549 p.

4. De Salvo A., Zignani F. *Electrical resistivity study of recovery phenomena in cold-worked zirconium* // *J. Nucl. Mater.* – 1966. – Vol.20. – P.108–118.

5. Потрібно пояснити відмінність точності визначення енергії активації піків P_1 і P_2 внутрішнього тертя НК цирконію (табл.2 автореферату і табл.4.1 дисертації).

6. У підписі до рис.5.1 зазначено, що апроксимація температурної залежності модуля Юнга для крупнозернистих полікристалів цирконію описується виразом (5.1), який використовується для оцінки дефекту модуля, характерного для наноструктурного стану.

У тексті дисертації є деякі друкарські помилки і стилістичні неточності:

- с.38: межа міцності $\sigma_s \rightarrow \sigma_B$;
- с.43, 4 рядок зверху: пропущено позначення - $M_2(\omega)$;
- с.48: «граточних бар'єрів» \rightarrow «граткових бар'єрів»;
- с.68: «При температурах, що прагнуть до 0 К» \rightarrow наближаються;
- с.63, формула (1.40): $C_{дус} \rightarrow C_{дрс}$;
- с.98, перший абзац: « .. полікристалів міді після їхньої деформації» \rightarrow «після деформації»;

Зазначені зауваження не стосуються суті вирішеного завдання і не впливають на високу оцінку дисертаційної роботи в цілому.

За актуальністю, новизною, рівнем представлених наукових результатів і їх практичною значущістю дисертація «Акустична спектроскопія низькотемпературних дислокаційних процесів у наноструктурних металах» відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор – Ватажук Олена Миколаївна, безумовно, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла.

Офіційний опонент

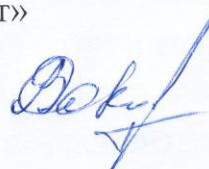
завідувач відділу фізики твердого тіла

і конденсованого стану речовини

ІНЦ «Харківський фізико-технічний інститут»

НАН України,

доктор фізико-математичних наук



В.І. Соколенко

