

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ІМФ ім. Г. В. Курдюмова
НАН України

Академік НАН України

Татаренко В.А.

"25"

06

2025 р.



В И Т Я Г

з протоколу № 7 від 25 червня 2025 р. засідання наукового семінару за науковими напрямками «Фізика міцності та пластичності металів і сплавів» і «Атомна будова металів та гетерофазних систем на їх основі» Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України

БУЛИ ПРИСУТНІ:

Академік НАН України Татаренко В.А., академік НАН України Івасишин О.М., чл.-кор. НАН України Коваль Ю.М., чл.-кор. НАН України Котречко С.О., д.ф.-м.н. Фірстов Г.С., д.ф.-м.н. Шиванюк В.М., д.ф.-м.н. Мордюк Б.М., д.т.н., проф. Гаврилюк В.Г., д.ф.-м.н. Волосевич П.Ю., д.ф.-м.н. Саввакін Д.Г., д.ф.-м.н. Філатов О.В., та інші наукові працівники Інституту, загалом 31 особа.

СЛУХАЛИ:

доповідь аспірантки Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України Галкіної Анастасії Андріївни за матеріалами дисертаційної роботи *«Пружність анізотропних і неоднорідних металевих полікристалів з кубічною ґраткою, визначена методом ультразвукового текстурного аналізу»*, представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії (фізико-математичні науки) із спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

**ПРИ ОБГОВОРЕННІ
ПИТАННЯ ЗАДАЛИ:**

академік НАН України Івасишин О.М., д.ф.-м.н. Фірстов Г.С., д.ф.-м.н. Шиванюк В.М., д.т.н., проф. Гаврилюк В.Г., д.ф.-м.н. Волосевич П.Ю., д.ф.-м.н. Саввакін Д.Г.

Проф. Гаврилюк В.Г.

У мідно-цинкових сплавах ви отримали цікавий результат — перехід від одного типу структури до іншого зі зміною температури. Як ви це пояснюєте з фізичної точки зору? Чи може причина полягати у зміні дислокаційної структури або появі двійників? Чому саме таким чином змінюється текстура?

Галкіна А.А.

Тому що при криогенній обробці більш задіяне двійникування, ніж ковзання, і це як раз веде до формування текстури типу міді.

Проф. Гаврилюк В.Г.

В останньому розділі, де йдеться про титан-цирконієві сплави, ви виявили втрату стабільності бета-фази. У чому фізична причина цього? Чому ультразвукова ударна обробка знижує стабільність бета-фази?

д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.

Я б доповнив питання, з яких експериментальних даних ви вирішили, що бета-фаза втратила стабільність?

Галкіна А.А.

На підставі зростання модуля Юнга, оскільки бета-фаза має найнижчий модуль, і його зростання може свідчити про появу інших більш високомодульних фаз.

д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.

Тільки модуля ? Ніяких структурних даних?

Галкіна А.А.

Структурних досліджень на цих сплавах ми поки що не проводили, це планується зробити в подальшому.

д.ф.-м.н. Саввакін Д.Г.

У першій задачі було вказано, що ви визначали щільність матеріалу, і зазначали, що щільність визначалася на різних ділянках. Яким методом ви міряли щільність, гідростатичним?

Галкіна А.А.

Так, гідростатичним.

д.ф.-м.н. Саввакін Д.Г.

Яким чином вам вдалося визначити зміну щільності по об'єму після обробки?

Галкіна А.А.

Ми визначали щільність на різних ділянках тільки швидкості ультразвуку, густину міряли по тільки по об'єму.

д.ф.-м.н. Волосевич П.Ю.

Ви сказали, що при криогенній обробці, у вас спостерігається текстура, але не спостерігається зміцнення. Як ви це пояснюєте?

Галкіна А.А.

Текстура у нас спостерігається і при кімнатній температурі, і при криогенній, ми не пов'язуємо напряму текстуру зі зміцненням.

д.ф.-м.н. Шиванюк В.М.

Чим ударна обробка відрізняється від ультразвукової ударної?

Галкіна А.А.

Ударна обробка – це однократний удар, а ультразвукова ударна – це повторювальні удари з частотою, в нашому випадку, 3 кГц, тобто це знакозмінна деформація.

д.ф.-м.н. Шиванюк В.М.

Чи існують в науковій літературі дані про зміни параметра ґратки у сплавах на основі міді при криогенних температурах? Тому що ТКЛР цих сплавів досить великий, і можуть бути нюанси. Ви могли обробляти матеріал у трошки іншому стані.

Галкіна А.А.

Наразі не можу відповісти на це питання.

д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.

Ви згадали, що у сплавів мідь-цинк низька енергія дефектів пакування (що відомо). Ви навели дані трансмісійної електронної мікроскопії, де дійсно видно певну площадність. Але я не побачив характерної дифракційної картини для двійникування. Низька енергія дефектів пакування має вести до утворення дефектів пакування. Але ви надаєте перевагу двійникам. Чи є у вас структурні докази, що йдеться саме про двійники? Оскільки дефекти пакування також можуть демонструвати подібну мікроструктуру. У ваших об'єктах багато дислокацій, що свідчить про серйозну пластичну деформацію.

Проф. Гаврилюк В.Г.

Це доволі типова картина для двійників.

д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.

До того ж, чисто кристалографічно, можна накопичити двійникуванням не більше 10% деформації, це максимум, що можна отримати. Я сумніваюсь, що тут ви дійшли до двійникового максимуму. А деформація у вас 11 і 18%, так?

Галкіна А.А.

Ні, 18% було після ударної обробки, на цьому етапі ми ще не спостерігали великої кількості двійників.

д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.

Добре, але все ж таки які у вас є докази, що це саме двійники?

Проф. Гаврилюк В.Г.

Я хочу заперечити щодо даного зауваження. Насправді, все залежить від матеріалу. В аустенітних сталях, особливо з високим вмістом марганцю, деформація на рівні 50% може досягатися саме за рахунок двійникування.

д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.

Але в ГЦК матеріалах двійникування не є основним механізмом.

Проф. Гаврилюк В.Г.

Але за низьких температур для такої коміркової структури, як показано, двійникування є цілком типовим механізмом деформації, і в цьому немає нічого дивного.

Галкіна А.А.

Щодо того, що двійникування доходить тільки до 10%, то в досліджених матеріалах двійникування – це наступна стадія деформації після ковзання. І спочатку приблизно до 40% деформація відбувається шляхом ковзання, і на цьому етапі формується текстура міді, а потім уже відбувається перехід до двійникування. Тому ми не стверджуємо, що двійникування проходить по всьому об'єму.

д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.

У мене питання щодо високоентропійних сплавів. І дійсно, я зустрічав у літературі згадки, що матеріали на три чи чотири елементи називають високоентропійними. Але у ваших сплавах титану 51%. Це сплав на основі титану, і називати його високоентропійним, на мою думку, некоректно. Тим більше, що ентропія у вас мала. Це звичайний сплав на основі титану.

Галкіна А.А.

Існують різні підходи до номенклатури цих сплавів. В деяких підходах запропоновано сплави з 4-х елементів називати «medium entropy alloys» або навіть «high entropy alloys», за різними параметрами підходять до вибору назви.

д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.

Суть високоентропійних сплавів полягає у багатоеlementній основі. А у вас основа одна – титан. Це хороший матеріал. Але навіщо його називати високоентропійним?

Академік НАН України Івасишин О.М.

Основне правило для високоентропійних сплавів – те, що вони повинні бути еквіатомні, навіть якщо три чи чотири елементи. Якщо у вас є переважна кількість якогось елемента, то це просто сплав.

д.ф.-м.н. Мордюк Б.М.

Але у науковій літературі зустрічається таке поняття, як «високоентропійні нееквіатомні сплави»

д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.

Справді, є такі, але в них максимальна концентрація основного елемента 30-35%.

Галкіна А.А.

Я зустрічала в літературі згадки про саме високоентропійні сплави, і в них концентрація основного елемента доходила до 38 і 40%. Але ми врахуємо ваше зауваження, можливо, переглянемо назву.

Академік НАН України Івасишин О.М.

У своїх дослідженнях Ви проводите поверхневу обробку і при цьому міряєте текстуру. Це загальна текстура зразка, чи це текстура саме поверхневого шару? Як ви її визначаєте?

Галкіна А.А.

Ультразвукова ударна обробка на наших зразках діє на весь об'єм, і це продемонстровано і в інших попередніх роботах, які не увійшли в дисертацію. Ми змінюємо текстуру в усьому об'ємі і аналізуємо її також по усьому об'єму.

Академік НАН України Івасишин О.М.

Ну весь об'єм – це умовне поняття. Для зразка товщиною 1 мм – це може бути весь об'єм, а для зразка дійсно масивного це буде поверхневий шар. Класичними методами текстура міряється на зразках великих розмірів. Якщо ваш метод дозволяє оцінити текстуру локально, це дуже добре. Що і з чим ви порівнюєте?

Галкіна А.А.

У нас розмір масивних зразків до 1 см. Ми аналізуємо за допомогою ультразвуку певну об'ємну ділянку, не поверхневу, і на цій ділянці аналізуємо стан текстури.

Академік НАН України Івасишин О.М.

Але ж ви розумієте, що там буде градієнт всіх змін.

Галкіна А.А.

Ми і досліджуємо градієнт. Ми визначаємо текстуру на трьох ділянках по висоті зразків – на поверхневій, центральній та на ділянці біля опорної пластини. На слайдах наведено тільки полюсні фігури для центральної ділянки, оскільки всі вони однотипні.

УХВАЛИЛИ: Прийняти рішення стосовно дисертаційної роботи аспірантки Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова (м. Київ) Галкіної А.А. у наступному формулюванні:

1. Актуальність теми та її зв'язок з планом основних науково-дослідних робіт

Більшість промислових матеріалів у процесі виробництва піддаються різноманітним спрямованим термомеханічним обробкам, що можуть призводити до формування структурної неоднорідності, зокрема, текстури, що може зумовлювати анізотропію пружних властивостей матеріалу, що є фундаментальними характеристиками твердих тіл, та пов'язані безпосередньо або опосередковано з іншими фізико-механічними характеристиками матеріалів.

Аналіз текстурного та пружного стану матеріалів, а також оцінка його неоднорідності й анізотропії є необхідними для забезпечення стабільності роботи конструкцій та запобігання аварійним ситуаціям. Розуміння взаємозв'язку між текстурою та пружними властивостями дозволяє прогнозувати поведінку матеріалів у різних геометричних напрямках, що продемонстровано в роботах за участю автора.

Отримання такої комплексної інформації за допомогою традиційних методів можливе лише шляхом окремого аналізу пружних і текстурних характеристик. Найпоширенішими підходами до визначення пружних параметрів (ПП) є механічні випробування та наноіндентування. Однак ці методи є руйнівними, потребують значних затрат часу та зусиль, а у випадку наноіндентування – надають дані лише з приповерхневих шарів. Крім того, оцінка анізотропії та неоднорідності ПП вимагає багаторазового застосування цих методів на зразках з різними орієнтаціями, що ще більше ускладнює процес і збільшує тривалість дослідження.

Оцінка текстурного стану можлива за допомогою класичних методів визначення текстури, таких як рентгенівська або нейтронна дифракція. Однак, зазначені методи також є руйнівними, трудомісткими, довготривалими та дорогими, а також найчастіше не дають можливості аналізувати об'єм матеріалу. Більше того, пошарове дослідження потребує підготовки великої кількості зразків. Залежність пружних параметрів від текстури можна отримати лише шляхом комбінування цих методів з уже згаданими методами дослідження ПП.

У цьому контексті метод ультразвукового текстурного аналізу (УЗТА) є перспективним інструментом для отримання комплексної інформації про текстуру та пружні властивості матеріалів, а також їхню неоднорідність та анізотропію без залучення додаткових методик. Враховуючи той факт, що комплексних досліджень текстури та пружних властивостей у сучасній науковій літературі є дуже обмежена кількість, ймовірно, через високу складність їх отримання, розвиток відносно простого, неруйнівного та експресного методу УЗТА, а також отримання довідкових даних про текстурні та пружні параметри важливих промислових матеріалів є актуальним питанням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких викладені у дисертаційній роботі, виконувалися у відділі «Фізичних основ інженерії поверхні» (№ 29) Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України згідно з індивідуальним планом роботи дисертанта. Вони узгоджуються з науковими напрямами відділу та пов'язані з тематикою проекту 0120U000160 «Високоміцні стани як результат специфічної міжатомної взаємодії у високоентропійних твердих розчинах з мартенситним перетворенням».

Метою даної роботи є вивчення за допомогою УЗ досліджень та методу УЗТА текстури, пружних і механічних властивостей, їхньої просторової неоднорідності та анізотропії, а також оцінка впливу різних технологічних чинників на зазначені характеристики для наступних матеріалів:

1. Модельний сплав Cu-37Zn у вигляді прямокутних паралелепіпедів розмірами $(4-6) \times (5-8) \times (7-10)$ мм³ у вихідному (текстурованому) стані, після двох послідовних однократних ударів (ударна обробка – УО) до 11.02% та 18.8% деформації, а також після наступної ультразвукової ударної обробки (УЗУО) при кімнатній та криогенній температурах.

2. Модельний сплав Cu-37Zn у вигляді тонких пластин розмірами $7 \times 7 \times 0.38$ мм³ у вихідному (ізотропному) стані та після УЗУО при кімнатній та криогенній температурах

3. Сплави медичного призначення 51Ti31Zr18Nb, 51Ti31Zr10Nb8Ta, 31Ti51Zr18Nb, 31Ti51Zr10Nb8Ta у вигляді масивних зразків та тонких пластин у вихідному стані та УЗУО.

4. Дроти малого діаметру ($d < 1\text{мм}$) суперсплаву Inconel 718, піддані комплексним впливам електрохімічного наводнювання та ультразвукової ударної обробки.

У відповідності до поставленої мети основними завданнями роботи є:

1. Прецизійні вимірювання густини матеріалу (ρ) та об'ємних ультразвукових швидкостей були виконані у вихідному стані та після застосованих обробок. УЗ швидкості додатково вимірювалися на різних ділянках зразків з метою оцінки локальних варіацій.

2. На основі отриманих значень *швидкості ультразвуку та густини*, розраховано ефективні пружні коефіцієнти, а також значення, неоднорідність та анізотропію модуля Юнга (E), модуля зсуву (G), об'ємного модуля (B), коефіцієнта Пуассона (η) та співвідношення П'ю (B/G) в ортогональних напрямках на різних ділянках зразків.

3. Для масивних зразків сплавів Cu-37Zn та Inconel 718 на основі значень *швидкості ультразвуку, густини* та ефективних пружних коефіцієнтів, було обчислено коефіцієнти розподілу орієнтацій кристалітів і побудовано полюсні фігури (ПФ) для основних кристалографічних напрямків. У випадках, коли побудова ПФ за результатами УЗ вимірювань була неможливою, застосовувалися додаткові методи характеристики текстури, такі як рентгенівський дифракційний аналіз та/або EBSD.

4. Сформульовано висновки щодо впливу досліджуваних технологічних режимів на текстурні, пружні та деякі механічні характеристики досліджуваних матеріалів.

2. Особистий внесок автора в одержання наукових результатів

Основні експериментальні дані даної роботи було отримано здобувачем особисто або за безпосередньої його участі. аналіз наукової літератури, взято участь у експериментальних ультразвукових дослідженнях, обробці отриманих даних, підготовці публікацій та конференційних доповідях. Під час міжнародного наукового стажування у Франції за стипендіальною програмою «Надія» здобувачка брала безпосередню участь в EBSD-аналізі дротів зі сплаву Inconel 718. У роботах, опублікованих у співавторстві, автором особисто здійснено:

- визначення типу текстури пластин зі сплаву Cu-37Zn у вихідному та деформованому стані на основі аналізу полюсних фігур, отриманих методом рентгенівського дифракційного аналізу;
- розрахунок пружних та механічних характеристик на основі ультразвукових даних;
- підготовку ілюстративного матеріалу стосовно змін вищеназваних параметрів та англomовну версію публікації;
- розрахунки текстурних та пружних характеристик сплаву на основі УЗ вимірювань;
- формулювання висновків щодо впливу структурних та, зокрема, текстурних, чинників на виявлені зміни;
- написання оригінального тексту публікацій та їх переклад англійською мовою.

3. Ступінь достовірності результатів, обґрунтованість наукових положень та висновків, сформульованих в дисертації

Одержані в роботі результати є достовірними, що обумовлено використанням для вирішення поставлених задач різних фізичних методів дослідження, які взаємодоповнюють та забезпечують отримання всебічної інформації про об'єкти дослідження.

Сформульовані в дисертаційній роботі наукові положення та висновки є обґрунтованими і аргументованими і не суперечать сучасним науковим положенням.

4. Ступінь новизни результатів, одержаних в дисертації

В дисертаційній роботі одержані нові дані, які можна узагальнити наступним чином:

1. Вперше зафіксовано аномальний зворотний текстурний перехід від типу латуні до типу міді внаслідок УЗУО масивних зразків сплаву Cu-37Zn при кімнатній температурі. Даний ефект пов'язаний із впливом знакозмінної компоненти УЗУО, яка полегшує рух зафіксованих сегментів дислокацій, зриваючи їх з точок фіксації. Дослідження показує можливість отримання необхідного текстурного та пружного стану матеріалу шляхом поєднання методів високошвидкісної динамічної обробки.

2. Показано перспективність застосування УЗУО для зниження анізотропії та неоднорідності пружних і механічних властивостей медичних сплавів на основі Ti-Zr.

3. Вперше показано ефективність методу УЗТА для дослідження пружних, текстурних та головних механічних властивостей аксіально-текстурованих дротяних зразків сплавів типу Inconel 718.

4. Показано, що текстурний фактор відіграє ключову роль у зміні пружних властивостей тонкого дроту сплаву Inconel 718, підданого наводнюванню та/або УЗУО.

5. Показано перспективність застосування УЗУО як засобу підвищення стійкості матеріалів до водневого окрихчення поверхонь матеріалів

5. Наукова та практична цінність одержаних автором результатів

Встановлено, що використання УЗУО ініціювати зворотний текстурний перехід латунь-мідь у сплаві Cu-37Zn у масивному стані. Це відкриває нові можливості для формування заданого текстурного й пружного стану матеріалу, що є перспективним для керування механічними властивостями в інженерних застосуваннях.

Надані узагальнені довідкові характеристики пружних і механічних властивостей медичних β -сплавів Ti-Zr-Nb-Ta різного складу, що можуть бути використані для порівняння з теоретичними розрахунками. Показано, що застосування УЗУО дозволяє знижувати ступінь пружної анізотропії та неоднорідності в сплавах даного класу, що є важливим для підвищення функціональної надійності імплантатів. Зростання модулів E, G та твердості HV у Ta-вмісних сплавах після УЗУО може свідчити про зміну фазової стабільності, що доцільно враховувати при розробці технологій термомеханічної обробки.

Показано ефективність методу УЗТА як інструменту для швидкої та інформативної оцінки текстурного та пружного стану складних інженерних матеріалів, зокрема в напрямках, недоступних для прямих УЗ вимірювань. Показано необхідність врахування текстурного фактору як одного з ключових параметрів, що впливають на пружні характеристики тонкого дроту зі сплаву Inconel 718 після комплексних впливів наводнювання УЗУО. Це відкриває можливості цілеспрямованого формування текстури матеріалу з метою досягнення заданих пружних та механічних властивостей, зокрема, з метою підвищення стійкості до деградації в умовах водневмісних середовищ.

6. Перелік робіт, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. O.I. Zaporozhets, B.N. Mordyuk, V.A. Mykhailovskyi, A.A. Halkina, M.O. Dordienko, A.P. Burmak, E. Langi, L.G. Zhao, Tailoring elastic, mechanical and texture properties of Cu-37Zn brass by ultrasonic impact treatment applied at ambient and cryogenic temperatures, *Materials Today Communications* 38 (2024) 108325, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108325>.

2. O.I. Zaporozhets, B.N. Mordyuk, V.A. Mykhailovskyi, A.A. Halkina, V.F. Mazanko, S.P. Vorona, Ultrasonic nondestructive evaluation of texture and elastic properties of Cu-

37Zn brass subjected to shock compression and ultrasonic impact treatment, *Materials Characterization* 226 (2025) 115223. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2025.115223>.

7. Матеріали дисертації доповідались на наступних конференціях:

Основні результати дисертаційної роботи було представлено на наступних конференціях:

1. Запорожець О.І., Мордюк Б.Н., Михайловський В.А., Галкіна А.А., Дордієнко М.О. Еволюція текстури та зміни пружних параметрів сплаву Cu-37%Zn після ультразвукової та імпульсної швидкісної ударних обробок, Матеріали конференції «Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем» (25-27 травня 2021 р.). – Київ, Україна, 2021. – С. 33.

2. Запорожець О.І., Мордюк Б.Н., Михайловський В.А., Галкіна А.А., Дордієнко М.О. Пружні властивості сплавів 51Ti31Zr18Nb, 51Ti31Zr10Nb8Ta, 51Zr31Ti18Nb та 51Zr31Ti10Nb8Ta у похідному стані та після ультразвукової ударної обробки, Матеріали конференції «Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем» (25-27 травня 2021 р.). – Київ, Україна, 2021. – С. 34.

3. O.I. Zaporozhets, B.M. Mordyuk, V.A. Mykhailovskyi, A.A. Halkina, M.O. Dordienko, A.P. Burmak, E. Langi, L.G. Zhao. The influence of temperature regimes of ultrasonic impact treatment on elastic, texture and mechanical properties of Cu–37Zn brass alloy plates, *Functional Materials for Innovative Energy (FMIE-2023)*. Тези доповідей конференції (20-21 вересня 2023 р.). – Київ, 2023. – С. 75.

Опубліковані у відкритому друці результати Галкіної А.А. відповідають темі та змісту дисертаційної роботи *“Пружність анізотропних і неоднорідних металевих полікристалів з кубічною ґраткою, визначена методом ультразвукового текстурного аналізу”*.

За своїм змістом дисертація Галкіної А.А. є завершеною науково-дослідною роботою, виконана на високому рівні під керівництвом к.ф.-м.н., ст.н.с. відділу «Фізичних основ інженерії поверхні» Запорожця О.І. і відповідає спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Під час обговорення було висловлено наступні рекомендації та зауваження:

РЕКОМЕНДАЦІЇ
ТА
ЗАУВАЖЕННЯ
ПО РОБОТІ:

Член-кореспондент НАН України Коваль Ю.М.

Представлена нам дисертаційна робота складна за змістом. В ній досліджено вплив ударної та ультразвукової ударної обробки на різні матеріали — латунь, інконель, а також титанові сплави медичного призначення — зокрема на їх модулі пружності та пов'язані з ними механічні властивості тощо. Це складні об'єкти, і ультразвукові експерименти проведено дуже ретельно, але, що важливо, автори використали також інші методи — рентгенівські, механічні випробування, тощо. Тож отримані результати є достовірними. Крім того, властивості досліджуваних об'єктів просторово розподілені неоднорідно, але, попри це, вдалося отримати переконливі результати. Мене особливо вразив результат, пов'язаний із оборотністю текстури типу латуні після ультразвукової ударної обробки: виключно механічним шляхом вдалося відновити текстуру, подібну до мідної, або ж навпаки — типову для латуні. Автори сумлінно це зафіксували й довели, хоча бажано провести більш глибокий фізичний аналіз пояснення механізмів формування текстури (якщо вони побажають це додати). Ще один момент — це результати ультразвукового текстурного аналізу отримані на дротах діаметром менш як один міліметр після наводнювання. Це вже

майже мистецтво, оскільки подібні результати у цьому відділі демонструються вперше. Отримані результати на таких об'єктах – це результати дуже високого рівня. Також заслуговують на увагу результати, отримані на медичних сплавах. Вони повністю відповідають завданням, які виконувалися у відділі. Ми працювали зі сплавами Ti-Zr-Nb і з'ясували, що додавання танталу, попри його хорошу біосумісність, може бути потенційно небезпечним для медичних застосувань. Це лише три ключові результати, хоча насправді їх значно більше, і всі вони описані доволі надійно. За результатами роботи дві публікації, але, оскільки ці статті опубліковані у виданнях першого та другого кварталів, то це не дві, а чотири публікації. Тож і з погляду змістовного наповнення, обсягу наукових результатів — дисертація цілком готова для захисту на ступінь доктора філософії. Вважаю, що цю роботу безумовно можна рекомендувати до захисту.

Д.ф.-м.н., проф. Філатов О.В.

У мене немає сумнівів стосовно достатньої кваліфікації Анастасії Андріївни. Я хочу винести на обговорення семінару ті питання, які можуть бути або корисні, або цікаві для широкого загалу. В назві фігурує слово «пружність», однак в роботі досліджується не тільки пружність, а й інші механічні характеристики, тому, можливо, якимось розширити назву. Але, звісно, це залишається на розсуд автора. В роботі стверджується, що ультразвукова діагностика, яка використовується, це неруйнівний експрес контроль. Стосовно «неруйнівного» - може, але те що це «експрес-контроль» - сумніваюся. Можливо, все-таки потрібна якась підготовка зразків, щоб був забезпечений контакт. Стосовно деяких результатів. Стверджується, що наводнювання дроту збільшує твердість, і наводиться цифра, що «збільшено на 5%», але при цьому не наводиться, яка ж точність вимірювань і для якої кількості зразків це було зроблено. Є недоречні висловлювання, наприклад, «точність є достатньою», що не фізично. Стосовно мети роботи. В формулюванні мети присутня фраза: «мета роботи – це вивчення текстури». Вивчення не може бути метою, оскільки, в принципі, вся наука займається вивченням. На мою думку, варто перефразувати мету. Найцікавішим питанням, яке я дуже бажав винести на обговорення на семінарі, є висловлювання «знакозмінна компонента ультразвукової ударної обробки». Як я зрозумів, стверджується, що під час ультразвукової ударної обробки змінюється знак деформації, тобто є деформація стиску і розтягу. Я зміг запропонувати тільки один механізм, коли це може спостерігатися. Як ви розумієте, коли бойок б'є по зразку, то зразок стискається, це зрозуміло. Потім бойок відскакує, і нібито пружна деформація повинна повертати зразок у майже вихідний стан. Але чи є зміна напружень – це питання. В мене з'явилась тільки одна модель, що є два зерна, в яких дуже вдало спрямовані системи ковзання, які дуже сильно деформуються, а між цими двома зернами, наприклад, є інше зерно, яке дуже сповільнено деформується, і воно може витягуватись назустріч тій деформації, що була в момент удару. Тобто тільки таким чином, що в одних зернах є деформація стиску, а в інших розтягувальна. В одному з

висновків я побачив наступне: «перспективність УЗУО для підвищення стійкості до водневого окрихчення поверхні матеріалів», детально було розглянуто, як впливає ультразвукова ударна обробка на стійкість до такого окрихчення, але тільки на одному матеріалі. Чи є можливість узагальнити на матеріали взагалі? Варто або замінити формулювання, або навести якісь підтвердження цього твердження для інших матеріалів. Також у «положеннях, які виносяться на захист» фразу: «анізотропія модуля становить - 8.95%». Постає питання, а з якою точністю відбувається вимірювання модуля, якщо п'ять сотих – це достовірна величина? Є чисто технічні зауваження стосовно формул. Якщо наводяться формули, то мають бути пояснення, що туди входить. Деякі твердження, наприклад, «з формули (1.9) видно, що швидкість ультразвуку пов'язана з пружними коефіцієнтами», я не побачив цього. «Похибка швидкості вимірювань 10^{-3} одиниць», одиниць чого? «Диференційне гідростатичне зважування за допомогою кварцового стандарту забезпечує точність 10^{-3} одиниць», те саме, одиниць чого? Додайте одиниці виміру. Застосовується частота ультразвукового генератора 21 кГц, але він безпосередньо, як ви розумієте, не б'є по зразку, він б'є по бойку. Бойок має значну масу, і він рухається між ультразвуковим генератором і поверхнею зразка, частота там зовсім інша, близько одного кГц. І тому ми маємо дві криві, 21кГц і приблизно 1 кГц. І коли співпадають у фазі ці коливання, то буде підсилюватися дія цього бойка на поверхню, а коли не співпадає – то буде зменшуватися. У цьому випадку немає гармонічних коливань, а є ангармонічні коливання. І тому може бути досить цікаво поспостерігати і спробувати зрозуміти, як розподіляється амплітуда і напруження впродовж часу обробки, тому що я не зустрічав робіт стосовно прогальності. Бажано пояснити, як відбувається зміна напружень під час обробки. В роботі також я не побачив, як відбувається деформація зразків. Як ви, напевно, знаєте, зразки можуть деформуватися у вигляді «подушки» або «бочки» за рахунок того, що у нас можуть змінюватися тертя на поверхні в залежності від того, чи ми використовуємо мастило, чи ні. Якщо нема мастила, то бойок притримує поверхню, і зразок деформується у вигляді «бочки», тобто середина розширюється більше. Якщо є мастило, то тоді верхня і нижня поверхні будуть деформуватись значно більше. У роботі не було вказано, як саме деформуються зразки і чи використовується мастило. Також зустрічаються помилки в номерах малюнків. І твердження: «Ультразвуковий текстурний аналіз дозволяє проводити пошаровий аналіз». Необхідно пояснити, про що йдеться, оскільки пошаровий аналіз – це якщо ми можемо мікрон за мікроном знімати шари матеріалу, або дати розподіл по глибині. Як я зрозумів з наведених рисунків, існує можливість локалізувати вимірювання у верхній частині, на середині зразка і внизу, якщо зразок досить великий. Це необхідно вказати в тексті дисертації.

д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.

Кілька заключних моментів. Я ознайомився з текстом дисертації. Мені впало в око декілька речей. По-перше, питання стосовно формули 10, яка використовується для визначення твердості за

Вікерсом. Розмірність даного виразу не відповідає розмірності твердості. Я мав розмову з науковим керівником дисертантки, з Богданом Миколайовичем. Згадана формула стосується постулату Юлія Вікторовича Мільмана, який запропонував певну теоретичну пластичність. Є чудовий огляд в журналі «Успіхи фізики металів», але у ньому подібної формули нема. Можливо, це спроба апроксимувати, щось на кшталт максимально можливої твердості. Але, в будь-якому випадку, бажання авторів за рахунок модулів обчислити навіть твердість, вважаю неправильним. Твердість обчислювати не треба, якщо це є в тексті дисертації, будь-ласка, приберіть. Є певні моменти у дисертаційній роботі, які потрібно «відшліфувати». По-друге, я змушений повторити ще раз, що домінуючим механізмом деформації двійникування не може бути. У тексті дисертаційної роботи також присутнє це твердження, але воно не відповідає дійсності. Те, що двійникування посилюється, кількість двійників зростає – це правда, це правильно, але воно не є домінуючим механізмом. Тому велике прохання змінити це формулювання.

Д.ф.-м.н., проф. Філатов О.В.

Я займаюся деформацією під час імпульсних впливів, і тому дуже часто спостерігаю, як матеріали деформуються за допомогою двійникування. Тому, необхідно проаналізувати, за яких саме умов проводяться експерименти, оскільки двійникування спостерігається доволі часто.

Чл.-кор. НАН України Котречко С.О.

І в яких матеріалах: ГЦК, ОЦК? Там різні механізми.

Д.ф.-м.н., проф. Філатов О.В.

Необхідно аналізувати, і треба розділити ГЦК і ОЦК, тому що там різні умови деформації.

Д.ф.-м.н., Мордюк Б.М.

Стосовно формули щодо твердості. Ми користувалися результатами роботи, опублікованої в Intermetallics, в якій проаналізовано від 30 до 50 різних матеріалів, в тому числі сплави, інтерметаліди та інші. І на основі цього аналізу була отримана подібна формула в дисертації Анастасії, яка була модифікована на основі порівняння з експериментальними даними, були скориговані коефіцієнти і показники степеня. Повністю її видаляти, на мою думку, немає потреби. Стосовно зауваження Олександра Валентиновича. По-перше, коли йшлося про деформування «діжкою» або «зворотною діжкою», то там ви казали про те, що є чи нема змащування. Особливість ультразвукової ударної обробки полягає в тому, що високочастотний контакт між зразком, бойком і концентратором і призводить до того, що коефіцієнт тертя зменшується і змащування непотрібно. І тому завжди, коли ми деформуємо ультразвуковою ударною обробкою у нас утворюється зворотна діжка. Я думаю, що ми це обов'язково вкажемо. І друге питання про знакозмінну складову ультразвукової ударної обробки. Ми останнім часом це застосовуємо, оскільки вважаємо, що в момент, коли у нас

концентратор притискає бойок до зразка, тобто система стиснена, в цей момент відбуваються ультразвукові коливання частотою в 21 кГц крізь зразок, крізь всю систему. Звичайно, запропонований вами механізм теж цікавий (стосовно зерен, орієнтованих певним чином, сприятливо для деформування або ні), але під час проходження ультразвукової хвилі вже є знакозмінне напруження в цій хвилі, в матеріалі, аналогічно тому, як відбувається, наприклад, ультразвукове оброблення без удару, коли зразки жорстко з'єднувались з концентратором ультразвуковим, і коли хвиля проходить крізь зразок, напруження стає в певних точках нульове, а потім змінює знак.

д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.

Я пропоную рекомендувати роботу до захисту. Нема тих, хто з цим не погоджується? Нема. Тому виносимо це рішення з проханням дотриматися всіх вимог, котрі пов'язані з присудженням ступеня доктора філософії.

Академік НАН України Татаренко В.А.

Я хотів би почути, хто рецензенти, і хто опоненти?

д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.

Голова Ради Олександр Дмитрович Рудь, рецензенти Олександр Валентинович Філатов та Юрій Миколайович Коваль, а хто опоненти, пані Анастасія?

Галкіна А.А.

Один опонент з інституту електрозварювання – Устінів Анатолій Іванович, доктор фіз.-мат. наук, і другий опонент з інституту проблем матеріалознавства Вдовиченко Олександр Васильович, доктор технічних наук.

Назва дисертації затверджена на засіданні Вченої ради Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України (Протокол № 11 від 25.11.2021 р., виписка додається).

Враховуючи викладене вище, семінар рекомендує дисертаційну роботу Галкіної А.А., аспірантки відділу «Фізичних основ інженерії поверхні» Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України «*Пружність анізотропних і неоднорідних металевих полікристалів з кубічною ґраткою, визначена методом ультразвукового текстурного аналізу*» до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії (фізико-математичні науки) за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» на разовій спеціалізованій вченій раді в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України.

Голова семінару
доктор фіз.-мат. наук, ст. н. с.

 ФІРСТОВ Г.С.

Секретар семінару
канд. фіз.-мат. наук, ст. н. с.

 ЛАХНИК А. М.