

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



## В И Т Я Г

з протоколу № 1 від 27 січня 2021 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:

член-кор. НАН України Татаренко В.А., д.ф.-м.н. Фірстов Г.С., д.ф.-м.н. Лізунов В.В., д.ф.-м.н. Носенко В.К., д.ф.-м.н. Шиванюк В.М., д.ф.-м.н. Філатов О.В., д.т.н. Марковський П.Є., д.ф.-м.н. Мордюк Б.М., д.ф.-м.н., проф. Рудь О.Д., д.т.н. Тельович Р.В., д.ф.-м.н., проф. Котречко С.О., д.ф.-м.н., проф. Васильєв М.О., д.ф.-м.н. Волосевич П.Ю., д.т.н. Черепова Т.С., д.ф.-м.н. Саввакін Д.Г., д.ф.-м.н. Дехтяр О.І., д.ф.-м.н. Погорелов О.Є., д.ф.-м.н. Радченко Т.М. та інші наукові працівники Інституту, загалом 50 осіб.

## СЛУХАЛИ:

доповідь м.н.с. Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України Оришича Дениса Вікторовича за матеріалами дисертаційної роботи "Фазові та структурні перетворення при активованому воднем синтезі сплавів на основі цирконію", представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії із спеціальності 105 – прикладна фізика та наноматеріали

ПРИ ОБГОВОРЕННІ  
ПИТАННЯ ЗАДАЛИ:

член-кор. НАН України Татаренко В.А., д.ф.-м.н. Фірстов Г.С., д.ф.-м.н. Філатов О.В., д.ф.-м.н. Волосевич П.Ю., д.ф.-м.н. Шиванюк В.М., проф. Котречко С.О., д.ф.-м.н. Мордюк Б.М., д.ф.-м.н. Радченко Т.М.

**Член-кор. НАН України Татаренко В.А.**

Що Ви маєте на увазі під терміном «інтегральність», який також зустрічається у Вас на 20-ому слайді?

**Оришич Д.В.**

У даному випадку цей термін, означає збереження цілісності спресованої системи.

**Член-кор. НАН України Татаренко В.А.**

Чому ви використовуєте даний термін? Може зрозуміліше було б «суцільність» чи «цільність» системи.

**Оришич Д.В.**

Ваше зауваження доцільне, я його врахую.

**Член-кор. НАН України Татаренко В.А.**

У мене також питання до 7-го слайду. Яке значення має вираз для пружної енергії?

**Оришич Д.В.**

Модуль Юнга у гідриду цирконію і гідриду титану різний. Зокрема, у гідриду титану модуль Юнга значно менший. Внаслідок цього йде менше накопичення пружної енергії при пресуванні. І даної енергії недостатньо для порушення цілісності спресованої системи. У гідриду цирконію модуль більший і, відповідно більша енергія накопичується при пресуванні частинок. Внаслідок чого сили зчеплення цирконієвих частинок недостатньо для збереження цілісності спресованої системи, тому відбувається збільшення лінійних розмірів на початку десорбції водню.

**Член-кор. НАН України Татаренко В.А.**

Чому для порівняння двох гідридів металів ви використовуєте тільки пружний внесок у внутрішню енергію? Здається, там не тільки вона діє при стисканні одного гідриду чи іншого.

**Оришич Д.В.**

Звичайно, існує багато факторів впливу, проте при даних температурах основний внесок відіграє саме пружна енергія.

**Д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.**

Як відомо, у гідриді цирконію і гідриді титану відбуваються фазові перетворення. Чи може існувати бета фаза цирконію за даних умов?

**Оришич Д.В.**

У цирконію після десорбції ще не відбувається альфа-бета перетворення, тому дане фазове перетворення не дає вкладу у об'ємні ефекти при нагріванні.

**Д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.**

Під час стискання, деформації можливо зсунулась температура альфа-бета перетворення у гідриді цирконію. Чи спостерігали Ви даний ефект?

**Оришич Д.В.**

Ні, такого ефекту немає при даних умовах компактування та синтезу.

**Д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.**

Як відомо, у присутності водню дані ефекти посилюються, що Ви можете сказати?

**Оришич Д.В.**

Після компактування зберігається виключно гідридна фаза, для подібних фазових перетворень потрібні шалені тиски. А ми піддавали матеріал тискам 650 МПа.

**Д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.**

Чи зберігається стехіометрія 100%, чи існує область гомогенності?

**Оришич Д.В.**

Невелика область гомогенності існує, ми працюємо лише в області гідриду.

**Член-кор. НАН України Татаренко В.А.**

Чи можна нехтувати хімічними перетвореннями під час десорбції водню?

**Оришич Д.В.**

Ми не нехтуємо цим внеском. Проте, на початковому етапі перетворень не відбувається. Також було порівняно фазові перетворення, що відбуваються при десорбції водню, значення модуля Юнга, а також характеристики обох гідридів. Дані результати детально викладено у матеріалах дисертаційної роботи.

**Член-кор. НАН України Татаренко В.А.**

Питання до 1-го слайду. Скажіть, представлена назва дисертаційної роботи затверджена офіційно як тема вашої дисертаційної роботи?

**Оришич Д.В.**

Офіційно ще ні.

**Член-кор. НАН України Татаренко В.А.**

Які є зміни у назві роботи у порівнянні з тим, що було затверджено на 1-шому році аспірантури?



**Оришич Д.В.**

На 1-шому році тема роботи була пов'язана з дослідженнями цирконієвих сплавів та бінарної системи цирконій-титан.

**Член-кор. НАН України Татаренко В.А.**

Чи згадувалося у темі про вплив водню?

**Оришич Д.В.**

Так, ми завжди використовуємо гідриди металів.

**Д.ф.-м.н., проф. Котречко С.О.**

Стосовно порівняння деформації волочінням і крученням під тиском. Чи не змінюється фазовий склад внаслідок даних обробок?

**Оришич Д.В.**

При деформації волочінням фазовий склад змінюється, утворюється омега фаза, а при деформації кручення під тиском – матеріал залишається однофазним бета сплавом.

**Д.ф.-м.н., проф. Котречко С.О.**

А чим Ви це пояснюєте?

**Оришич Д.В.**

Конкретно ми цього явища не досліджували, проте воно буде більш детально досліджене разом з групою професора Бейгельзімера.

**Д.ф.-м.н., проф. Котречко С.О.**

Зверніть увагу на трактовки, оскільки при даних (різних) типах обробки можуть відбуватися різні типи деформації.

**Оришич Д.В.**

Дякую за Ваше зауваження, воно буде враховано.

**Д.ф.-м.н., проф. Котречко С.О.**

Наступне питання стосується використання Ваших матеріалів. Вони використовуються і для медицини і для ядерної енергетики. Стосовно медицини. В медицині основна проблема – це зменшений модуль пружності. На скільки максимально ви можете зменшити модуль пружності представлених сплавів у порівнянні із звичайними?

**Оришич Д.В.**

У роботі було порівняно абсолютно безпористі сплави (модуль Юнга яких приблизно 62-72 ГПа) та пористі (порядку 55-56 ГПа).

**Д.ф.-м.н., проф. Котречко С.О.**

Стосовно цирконієвих сплавів для оболонок ТВЕЛів. Для матеріалу оболонок основна вимога – протидія розпухання. Я розумію, що у вас не було змоги їх опромінювати, Ви пробували оцінити протидію розпухання даних сплавів? Який склад сплаву буде краще сприяти розпухання? Може ваші колеги з Харкова якісь дослідження проводили?

**Оришич Д.В.**

Як відомо, дані типи сплавів протидіють розпухання під час опромінення, проте таких досліджень ми не проводили.

**Д.ф.-м.н. Волосевич П.Ю.**

Скажіть будь ласка, Ви досліджували вплив кількості гідридів елементів на пороутворення?

**Оришич Д.В.**

Для синтезу даних сплавів було використано тільки гідридні порошки, що дає змогу значно зменшити пористість.

**Д.ф.-м.н. Шиванюк В.М.**

Для дилатометричних досліджень ви використовували порошок чи литий матеріал?

**Оришич Д.В.**

Було використано компактований порошок.

**Д.ф.-м.н. Шиванюк В.М.**

Як залежать об'ємні ефекти від розміру частинок?

**Оришич Д.В.**

У межах розмірів частинок, які використовувались для синтезу, відмінність об'ємних ефектів мінімальна.

**Д.ф.-м.н. Радченко Т.М.**

Ви сказали, що зниження пористості можна досягнути шляхом збільшення вмісту лінійних дефектів. Чи відбувається виграш у одних властивостях і програш у інших, оскільки відомо, що густина границь зерен сильно впливає не лише на механічні властивості, а й на ряд інших властивостей, зокрема на теплові та електричні, погіршуючи останні.

**Оришич Д.В.**

Теплові й електричні властивості ми не досліджували, оскільки вони не представляють цікавості у даних сплавах. Проте якщо ви говорите про виграш у одних властивостях і програш у інших, то як уже було сказано ми виграємо у твердості, але програємо у значеннях модуля Юнга.

**Д.ф.-м.н. Мордюк Б.М.**

У мене питання до 15 слайду. Чому ваш сплав Zr-1Nb має вищі механічні властивості? Тут також працює механізм очищення від кисню як для титанових сплавів, чи зміцнення відбувається за рахунок залишків кисню? Зокрема межа плинності - вона значно вища.

**Оришич Д.В.**

Ми вважаємо, що вищі механічні властивості пов'язані з меншою долею пор, що суттєво впливає на пластичність, але з іншого боку дисперсність пластин альфа фази також сприяє зміні механічних властивостей для даних сплавів

**Д.ф.-м.н. Мордюк Б.М.**

Чи є у вас дані стосовно кількості кисню у синтезованих Вами сплавах. До та після деформації.

**Оришич Д.В.**

Дякую за уточнення, але на жаль даних щодо вмісту кисню немає.

**Д.ф.-м.н. Філатов О. В.**

Якими методами ви досліджували дифузійні характеристики?

**Оришич Д.В.**

Дифузійні властивості для окремих елементів були взяті з літературних даних.

УХВАЛИЛИ: Прийняти рішення стосовно дисертаційної роботи м.н.с. Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова (м. Київ) Оришича Д.В. у наступному формулюванні:

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

Цирконій має високу міцність та корозійну стійкість, його атоми характеризуються малим поперечним перерізом поглинання теплових нейтронів, що робить цей метал незамінним для використання у ядерній енергетиці як конструкційний матеріал. Зокрема,  $\alpha$ -сплави цирконію леговані незначною кількістю олова та ніобію широко задіяні для виготовлення тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів). Завдяки високій корозійній стійкості та біосумісності цирконій в значній кількості також входить до ряду  $\beta$ -сплавів із зниженим модулем Юнга для медичного використання (системи легування Zr-Ti-Nb, Ti-Nb-Zr-Ta, які широко використовуються для виготовлення імплантатів).

Проте, висока активність поверхні цирконію до кисню суттєво ускладнює технології отримання сплавів на його основі. Традиційно, отримання необхідних структурно-фазових станів та, відповідно, комплексу фізико-механічних характеристик даних матеріалів досягається за допомогою складних і високовартісних технологій вакуумного лиття та термомеханічної обробки зливоків, що значно підвищує собівартість кінцевого



продукту, особливо враховуючи суттєві втрати матеріалу при переробці зливків у вироби необхідної форми. Ця проблема вимагає розробки нових методів виготовлення сплавів на основі цирконію, що забезпечать створення необхідних фазових станів, мікроструктури та комплексу характеристик відносно простими технологічними підходами. Перспективним шляхом для вирішення даної проблеми є використання порошкових методів виготовлення сплавів. Порошковий підхід, окрім зниження собівартості, має суттєві переваги з точки зору контролю розмірів зерна, уникнення сегрегацій елементів та покращення однорідності структури при недостатній взаємній розчинності компонентів сплавів. При необхідності, цей метод виготовлення дозволяє регулювати об'єм пор в синтезованих сплавах (підвищений вміст пор є корисним для зниження модуля Юнга матеріалів медичних імплантатів і для кращої їх інтеграції в біологічні тканини, проте пори знижують характеристики міцності та пластичності). Тому створення бажаних фазово-структурних станів із контрольованим вмістом пор в сплавах цирконію, синтезованих за порошковими підходами, є важливою науковою та практичною задачею. Вирішення даної задачі вимагає розробки фізичних основ керованого впливу на системи порошкових частинок для активації процесів їх спікання та перетворення в однорідні сплави цирконію із заданою мікроструктурою та фазовим складом.

В Інституті металофізики ім. Г.В.Курдюмова під керівництвом академіка НАН України О.М.Івасишина раніше було розроблено новий підхід, що використовує водень як тимчасовий легувальний елемент до металів для активації процесів синтезу сплавів з багатокомпонентних порошкових систем. На прикладі синтезу титанових сплавів було доведено користь використання гідриду титану для активації дифузійно-контрольованих процесів спікання та гомогенізації систем порошкових частинок та досягнення високих механічних характеристик синтезованих сплавів. Пізніше було встановлено, що основні фізичні механізми і переваги вказаного гідридного підходу є справедливими і при використанні гідриду цирконію для синтезу сплавів. Проте, особливості синтезу цирконієвих сплавів та вплив водню на процеси хімічної гомогенізації та активації спікання систем частинок на основі порошку гідриду цирконію, а також фазових перетворень та еволюції мікроструктури під час формування сплавів не було детально досліджено. Оскільки усі вказані особливості процесів синтезу суттєвою мірою залежать від хімічного складу сплавів, що синтезуються, та складу стартових порошків, необхідно встановити загальні закономірності впливу додавання обраних легувальних частинок до порошкового гідриду цирконію на процеси синтезу сплавів. Створення за порошковим гідридним підходом сплавів  $Zr-1,5Sn$  та  $Zr-1Nb$  для потреб ядерної енергетики та сплавів системи легування  $Zr-Ti-Nb$  для медичного використання з контрольованими фазовим станом, мікроструктурою і об'ємним вмістом пор для досягнення необхідного комплексу фізико-механічних характеристик вимагає детального розуміння процесів і механізмів, що забезпечать активоване перетворення гетерогенних сумішей на основі гідриду цирконію у сплави відповідного складу, та методів керованого впливу на ці процеси з метою їх активації та утворення бажаних структурно-фазових станів для забезпечення бажаного комплексу характеристик. Вирішення вищевказаних задач визначає актуальність теми даного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження, результати яких викладені у дисертаційній роботі, виконувались у відділі фізики міцності і пластичності неізоморфних металевих матеріалів (60) Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України згідно з індивідуальним планом роботи дисертанта. Вони узгоджуються з науковими напрямами відділу та мають змістовий зв'язок з тематикою держбюджетних науково-дослідних робіт, які фінансуються НАН України:



- «Фазові та структурні перетворення в неомогенних твердих розчинах на основі металів IVB групи, що контролюються дифузією елементів заміщення і втілення» (2012-2017 рр) № держ. реєстрації 0113U000030
- «Біосумісні низькомодульні сплави системи Zr-Ti-Nb та технологія виготовлення з них імплантатів» № держ. реєстрації 0117U006299
- «Розробка високоміцних сплавів біомедичного призначення на основі системи Ti-Zr-Nb шляхом додаткового легування танталом та іншими біоінертними елементами та економічних методів їх отримання» № держ. реєстрації 0118U006407

Мета дослідження – Встановлення загальних закономірностей синтезу сплавів цирконію з багатокомпонентних систем наводнених порошків, та факторів і механізмів впливу на процеси синтезу для отримання структурно-фазових станів, фізико-механічні характеристики яких достатні для практичного використання.

У відповідності до поставленої мети основними завданнями роботи є:

1. Встановити особливості фазових перетворень, процесів хімічної гомогенізації, еволюції пористої структури та мікроструктури гетерогенних систем на основі порошкового гідриду цирконію при їх перетворенні в сплави визначеного складу.
2. Встановити загальні закономірності об'ємних ефектів, в тому числі, викликаних десорбцією водню, при вакуумному спіканні гетерогенних сумішей наводнених порошків, в залежності від загального хімічного складу системи частинок.
3. Визначити фізичні фактори та механізми впливу на процеси формування фазово-структурних станів синтезованих сплавів з метою отримання фазово, хімічно й структурно однорідних матеріалів з мінімізованим (або регульованим) об'ємним вмістом пор.
4. Встановити вплив сформованих при синтезі фазово-структурних станів цирконієвих сплавів на їх основні механічні властивості.
5. Дослідити потенціал додаткового деформаційного впливу на модифікацію мікроструктури синтезованих сплавів з метою оптимізації їх механічних властивостей.

## **2. Особистий внесок автора в одержання наукових результатів**

Основні експериментальні дані даної роботи було отримано здобувачем особисто або за безпосередньої його участі. Зокрема, ним проведено: аналіз літературних даних, розробку методики проведення експерименту, підготовку експериментальних зразків, дилатометричні дослідження, металографічні дослідження, вимірювання модуля Юнга та твердості синтезованих сплавів. З науковим керівником було сформульовано мету, постановку задачі, методологію проведених досліджень, а також обговорено інтерпретацію отриманих експериментальних результатів. Здобувач, як співавтор, приймав активну участь в написанні статей за результатами проведених досліджень.

## **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 про закономірності синтезу низьколегованих  $\alpha$  (ГЦУ) сплавів цирконію та високолегованих  $\beta$  (ОЦК) сплавів системи Zr-Ti-Nb з наводнених порошкових систем, які можна резюмувати наступним чином:

1. Встановлено загальні закономірності фазових перетворень та формування мікроструктури сплавів систем легування Zr-Sn, Zr-Nb, Zr-Ti-Nb при їх синтезі із гетерогенних сумішей на основі гідриду цирконію. Встановлено вплив частинок, що містять легувальні елементи (Sn, Nb, Ti), на процеси формування масивних хімічно і мікроструктурно однорідних цирконієвих сплавів.

2. На прикладі синтезу сплаву Zr-1,5Sn показано, що формування рідкої фази  $\alpha$ -стабілізатора олова в процесі синтезу є механізмом утворення додаткових пор, при диспергізації стартових частинок олова більша питома поверхня пор, утворених на місці рідкої фази, сприяє їх кращому заліковуванню. При додаванні  $\beta$ -стабілізатора ніобію синтез відбувається повністю твердофазним шляхом, але проблемним моментом є низька швидкість дифузійного розчинення в цирконії частинок ніобію, що вимагає температур синтезу не нижче 1200°C для досягнення хімічної однорідності сплавів Zr-Nb.

3. При синтезі високолегованих  $\beta$  сплавів системи Zr-Ti-Nb було встановлено, що присутність значної кількості частинок ніобію в порошковій системі спричиняє підвищений вміст пор в кінцевих сплавах. В основі даного явища є невідповідність об'ємних ефектів між частинками ніобію та частинками гідридів ZrH<sub>2</sub> і TiH<sub>2</sub> на стадії десорбції водню з обох гідридів, що веде до порушення інтегральності спресованої системи частинок, та подальшому прояву ефекту Френкеля при розвитку дифузійно-контрольованої хімічної гомогенізації системи.

4. Встановлено, що шляхом зниження пористості високолегованих  $\beta$  сплавів системи Zr-Ti-Nb є використання гетерогенних сумішей, що складаються виключно з наводнених порошків, зокрема, при введенні ніобію у вигляді частинок наводнених лігатур систем Zr-Nb та Ti-Nb. Однакова поведінка наводнених частинок при їх компактуванні та подібні об'ємні ефекти під час вакуумного нагрівання на стадії десорбції водню забезпечують збереження інтегральності системи частинок та зниження об'ємної частки пор, що суттєво підвищує механічні властивості синтезованих сплавів.

5. Для досягнення повністю однорідних структурних станів із низькою об'ємною часткою пор при використанні легувальних елементів, що характеризуються низькою швидкістю дифузійного розчинення в цирконієвій матриці, або при неможливості використання достатньо дисперсних частинок, запропонована двохстадійна схема синтезу з використанням тимчасового легування матеріалу воднем, яка забезпечує отримання структурних станів з бажаною однорідністю та високою відносною густиною.

6. Показано, що в умовах розвитку коалесценції пор на фінальній стадії синтезу, отримати практично безпористі стани синтезованих сплавів на основі цирконію можна, застосовуючи додаткове холодне та гаряче деформування, що є ефективним методом для модифікації їх мікроструктури та підвищення механічних характеристик.

#### **5. Наукова та практична цінність одержаних автором результатів**

Результати досліджень, які представлено в дисертації, мають високе практичне значення, складаючи фізичні основи для формування з наводнених порошків структурно-фазових станів низьколегованих цирконієвих  $\alpha$ -сплавів для потреб ядерної енергетики та високолегованих  $\beta$ -сплавів системи Zr-Ti-Nb для біомедичних застосувань з перспективними фізико-механічними характеристиками.



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

1. Саввакін Д. Г., Оришич Д. В. Еволюція фазового складу і мікроструктури при синтезі сплаву Zr—Sn з порошків гідриду цирконію і олова. Металофізика та новітні технології. Т. 37, № 4. 2015. С. 559—569.
2. Kulagin R., Mazilkin A., Beygelzimer Y., Savvakín D., Zverkova I., Oryshych D., Hahn H. Influence of High Pressure Torsion on structure and properties of Zr-Ti-Nb alloy synthesized from TiH<sub>2</sub>, ZrH<sub>2</sub> and Nb powders. Materials Letters. Vol. 233. 2018. P. 31-34.
3. Оришич Д. В., Саввакін Д. Г., Стасюк О. О., Меламед Б. Я. Твердофазна синтеза стопів системи Zr—Ti—Nb з багатокомпонентних порошкових сумішей. Металофізика та новітні технології. т. 41, № 2. 2019 Р. 213–226.
4. Oryshych D., Markovsky P., Savvakín D., Stasiuk O., Dekhtyarenko V., Nevmerzhytskyi V. Two-stage sintering investigation of Ti-Zr-Nb biomedical alloys. Machines. Technologies. Materials. Vol. 13, № 9. 2019, p. 404-407.
5. Dekhtyar A.I., Bondarchuk V.I., Karasevska O.P., Oryshych D.V., Savvakín D.G., Skoryk M.A. Microstructure change under hot deformation in zirconium alloys synthesized by powder metallurgy. Materials Characterization. Vol. 158. 2019.
6. O.M. Ivasishin, D.G. Savvakín, D.V. Oryshych, O.O. Stasiuk, L. Yuanyuan Hydride Approach in Blended Elemental Powder Metallurgy of Beta Titanium Alloys. MATEC Web of Conferences 321, 03009
7. Д. В. Оришич, О. М. Івасишин, П. Є. Марковський, Д. Г. Саввакін, О. О. Стасюк, В. І. Бондарчук. Особливості формування поруватої структури стопів Zr—Ti—Nb під час їх синтезу із сумішей гідрованих порошків. Металофізика та новітні технології. т. 42, №12. 2020. с. 1681-1700

## **7. Матеріали дисертації доповідались на наступних конференціях:**

Основні результати дисертаційної роботи було представлено на наступних конференціях: X, XI, XII міжнар. конференціях студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» (Київ, 2017, 2018, 2019), XVI міжнародному конгресі «Машины. Технологии. Материалы. 2019» (Варна, Болгарія, 2019), «The 14th world conference on titanium» (Nantes, France, 2019), «Функціональні матеріали для інноваційної енергетики ФМІЕ-2019» (Київ 2019), IV international scientific conference «Industry 4.0» (Borovets, Bulgaria, 2019).

Опубліковані у відкритому друці результати Оришича Д.В. відповідають темі та змісту дисертаційної роботи “Фазові та структурні перетворення при активованому воднем синтезі сплавів на основі цирконію”.

За своїм змістом дисертація Оришича Д.В. є завершеною науково-дослідною роботою, виконана на високому рівні під керівництвом д.ф.-м.н., пр.н.с. відділу фізики міцності і пластичності неізотропних металевих матеріалів (60) Саввакіна Д.Г. і відповідає спеціальності 105 – прикладна фізика та наноматеріали.

Під час обговорення було висловлено наступні рекомендації та зауваження:

**РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ЗАУВАЖЕННЯ ПО РОБОТІ:**

**Д.ф.-м.н., проф. Рудь О.Д.**

Робота продовжує ідеологічний напрям, який було започатковано керівником дисертанта д.ф.-м.н. Саввакіним Д.Г. та тодішнім його керівником академіком НАН України Івасішином О. М., а саме – використання водню у якості тимчасового легувального елемента для прискорення дифузії і створення виробів порошкової металургії. Попередні роботи було виконано на титані та його сплавах, але оскільки цирконій та титан - споріднені елементи, тому можна було



очікувати, що подібний підхід буде корисним і для синтезу сплавів цирконію. У цій роботі виконано дуже великий об'єм досліджень, встановлено закономірності впливу водню як тимчасового легувального елементу на процеси фазоутворення сплавів у цих системах. Зроблено велику кількість експериментів, великий об'єм роботи виконано за час навчання. Мені дуже сподобались результати дослідження впливу олова, оскільки воно використовується для створення сплавів, які є конструкційними елементами ТВЕЛів, при цьому має місце велика різниця у температурах плавлення між цирконієм та оловом. Ще мені сподобалось, коли у потрібних системах Zr-Ti-Nb використовувався не металевий ніобій, а гідриди цих елементів. У роботі використовувались при аналізі даних фізичні моделі, у тому числі модель Ліфшица-Сльозова, можливо це не було основним моментом роботи, але її було використано. Також у роботі було використано дані теоретичного моделювання групи А.М.Тимошевського. Шляхом теоретичних розрахунків було здійснено спробу не лише отримати експериментальні дані, але й зробити їх теоретичний аналіз. З моєї точки зору, робота відповідає критеріям спеціальностей як «фізика металів», так і спеціальності, «прикладна фізика та наноматеріали». Серед недоліків слід назвати: висновки до 1-го експериментального розділу досить неконкретні, також потрібно підсилити фізичний аспект у доповіді. Взагалі дисертант зробив гарну доповідь. Він повністю володіє інформацією, матеріалом, який доповідав, тому наш семінар може рекомендувати дану роботу до захисту.

#### **Д.ф.-м.н. Шиванюк В.М.**

Хочу сказати, що мій недавній досвід роботи з цирконієвими сплавами показав, що, дійсно, є проблема виплавки даних сплавів та їх наступної обробки. З цієї точки зору актуальність роботи дисертанта дуже конкретна. У своїй роботі він застосував уже відомий підхід – використання гідридів металів для синтезу сплавів з необхідними властивостями та структурою. Крім того, він запропонував нові технологічні підходи до зниження пористості використавши наводнені лігатури, механічну обробку, інтенсивну пластичну деформацію, прокатку та двостадійний синтез. З цієї точки зору це дуже великий плюс, він добився дуже хороших результатів. Стосовно роботи я хотів би висловити декілька зауважень. По-перше, постановка проблематики, оскільки він досить здалеку починав. Проблематика – це брак розуміння механізмів. Проблематику потрібно формулювати, як брак розуміння механізмів впливу легувальних елементів на дифузійно-контрольовані процеси синтезу і т.д. По-друге, на 21-ому слайді, якщо говорити про підвищення пористості за рахунок ефекту Френкеля, необхідно привести розрахунки даного вкладу, а не просто наводити коефіцієнти дифузії при певній температурі, оскільки формула не дає уявлення на скільки ефект Френкеля впливає на пористість у даних сплавах. По-третє, стосовно об'ємного ефекту на дилатометричних кривих я б переглянув трактовку, оскільки тільки різниця у модулі Юнга не може давати такого ефекту. Як видно з цих кривих, дані об'ємні ефекти

проявляються у області дифузії водню, а водень – це такий елемент, який може знижувати температуру фазових перетворень, що було показано, зокрема, на сплавах заліза. Шлях, який проходить система на діаграмах стану, і об'ємні ефекти обумовлені фазовими перетвореннями у цих металах. І треба дуже обережно розповідати про гідрид ніобію, оскільки згідно з літературними даними, гідрид ніобію розпадається у вакуумі при температурах близько 600 °С. Гідрид ніобію досить стабільний і у нього фазові перетворення у даному інтервалі температур не відбуваються, і даний об'ємний ефект може нівелюватися у порівнянні з титаном та цирконієм. Але робота мені сподобалась. Вона є цільною, можна сказати закінченою, претендент володіє матеріалом, практично усе робив своїми руками, звичайно з допомогою колег і свого наукового керівника. Робота відповідає всім вимогам до дисертації, добре освітлена у літературі та апробована на конференціях.

**Д.ф.-м.н. Філатов О. В.**

По перше, у назві одного з розділів анонсувалося вивчення впливу дифузії, але я його не почув. По друге, стосовно ефекту Френкеля у мене 2 запитання. Ви берете порошкові матеріали, у них досить велика поверхня, які коефіцієнти дифузії ви берете – поверхневі чи об'ємні? У них значення можуть суттєво відрізнятися. Коефіцієнти дифузії металів будуть відрізнятися від відповідних коефіцієнтів за участі водню, це потрібно уточнити. А взагалі, робота мені сподобалась.

**Д.т.н. Марковський П.Є.**

Щоб ви розуміли, титановий сплав, який зараз використовується для біомедичних застосувань – це Ti-6Al-4V. У нього модуль пружності 110 ГПа. Потрійні сплави Zr-Ti-Nb, почали виготовляти декілька років назад. Одним з ініціаторів був І.О.Скиба, вони запатентували сплав BAZALM. Це приблизно 60 ГПа. І, як бачимо, різниця досить суттєва. І те, що вдалося отримати 60 ГПа за допомогою порошкових технологій – це великий крок вперед тому, що не відбувається плавлення, значна термо-механічна обробка, механічна обробка, а це приблизно 40% вартості виробу. Обидва сплави є низькомодульними, проте вони дуже пірогенні. Тобто, коли потрібно проводити термо-механічну обробку, він нормально деформується при 800 °С, але починається реакція окислення і сплав навіть може загорітися. А тут дана проблема (окислення) усувається, тому це великий крок вперед.

**Д.ф.-м.н. проф. Котречко С.О.**

Якщо цей ефект дозволяє знизити модуль у 2 рази, то це досить вагомий результат. На скільки я пам'ятаю, у роботах зниження на 10-15% – це вже добре, а тут такий результат.

**Д.ф.-м.н. Фірстов Г.С.**

У нас виникло скільки запитань, це свідчить про те, що ми заслухали дуже хорошу доповідь, яка цікава багатьом нашим колегам і кожен хоче добратися до певної суті. Тому ми можемо рекомендувати дану роботу до захисту, але із застереженнями, які було сказано:


1. Додати фізичних формулювань у постановці певних тверджень
2. Врахувати усі зауваження, які сьогодні прозвучали.




Зміна назви дисертації затверджена на засіданні Вченої ради Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України (Протокол № 10 від 21.01.2021 р., виписка додається).

Враховуючи викладене вище, семінар рекомендує дисертаційну роботу Оришича Д.В., м.н.с. відділу фізики міцності і пластичності неомогенних металевих матеріалів Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України «Фазові та структурні перетворення при активованому воднем синтезі сплавів на основі цирконію» до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – «прикладна фізика та наноматеріали» на спеціалізованій вченій раді в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України.

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

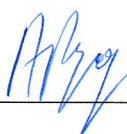
  
ФІРСТОВ Г.С.

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

  
ЛАХНИК А. М.

Рецензенти:

доктор фіз.-мат. наук, проф.

  
РУДЬ О. Д.

доктор фіз.-мат. наук, ст. д.

  
ШИВАНЮК В. М.