

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора фізико-математичних наук, професора

**Яновського Володимира Володимировича** на дисертацію

**Коленова Івана Вікторовича** «Фізичні основи еліпсометричної діагностики змін структури і властивостей перспективних матеріалів ядерних установок під впливом опромінення і термомеханічної обробки», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

**Актуальність теми дослідження.** Актуальність дисертаційної роботи зумовлена як фундаментальними, так і прикладними проблемами фізики твердого тіла. Так, термомеханічні, радіаційні та інші електрофізичні впливи призводять до формування складної дефектної структури, еволюції фазового складу, модифікації поверхневих і приповерхневих шарів, що істотно впливає на фізико-механічні властивості матеріалів.

Процеси генерації, міграції та кластеризації радіаційно-індукованих дефектів, а також їх взаємодія з термомеханічними напруженнями мають нелінійний характер і можуть супроводжуватися формуванням багатомасштабних дефектних структур.

Еліпсометрія, як високочутливий, безконтактний та неруйнівний метод діагностики, є ефективним інструментом дослідження змін оптичних параметрів, пов'язаних із модифікацією дефектного стану, фазового складу та морфології поверхні широкого спектру матеріалів. Водночас вимірювані еліпсометричні параметри  $\Psi$  та  $\Delta\epsilon$  інтегральним оптичним відгуком, ускладнює фізичну інтерпретацію експериментальних даних отриманих при дослідженні багатомасштабних дефектних структур.

Виникає проблема створення фізичних основ для діагностики подібних структур. Розробка ланки моделей та методів діагностики для вирішення описаної проблеми є актуальною. У цьому контексті масштабне моделювання

виступає необхідним інструментом для встановлення взаємозв'язку між хаотичною динамікою формування дефектів і шорсткості, ефективними діелектричними функціями та експериментально спостережуваними еліпсометричними параметрами. Поєднання еліпсометрії та масштабного моделювання забезпечує фізично обґрунтований підхід до діагностики радіаційно- та термомеханічно модифікованих матеріалів, який дозволяє перейти від емпіричного опису до глибокого розуміння механізмів зміни їх структури і властивостей.

**Зміст роботи відповідає формулі спеціальності**, оскільки проблема, що в ній вирішується, присвячена встановленню фізичних основ еліпсометричної діагностики змін структури і властивостей перспективних матеріалів ядерних установок під впливом опромінення і термомеханічної обробки.

Робота виконана згідно з **науковою тематикою установи** – місця виконання, що підтверджується зареєстрованими в належному порядку НДР.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, їхня достовірність.** Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі, є в повній мірі обґрунтованими та достовірними з огляду на те, що:

- постановка проблеми ґрунтується на сучасних уявленнях фізики твердого тіла, фізики радіаційних пошкоджень та оптики неоднорідних середовищ і спрямована на вирішення актуального науково-прикладного завдання діагностики змін структури, дефектного стану та властивостей матеріалів ядерних установок в умовах радіаційного та термомеханічного впливу;
- теоретичні положення базуються на використанні фізично обґрунтованих моделей взаємодії електромагнітного випромінювання з багаточаровими, дефектними та шорсткими структурами;
- експериментальні дослідження виконані з використанням сучасних еліпсометричних методів діагностики в поєднанні з незалежними структурними

та морфологічними методами контролю, що забезпечує коректність інтерпретації еліпсометричних результатів і підтвердження встановлених закономірностей;

- достовірність отриманих результатів підтверджується їхньою відтворюваністю, узгодженістю з відомими теоретичними та експериментальними даними, а також відповідністю сучасному рівню розвитку еліпсометрії та фізики матеріалів ядерного призначення;
- основні результати досліджень опубліковані у фахових вітчизняних та міжнародних рецензованих наукових виданнях, що свідчить про їх наукову новизну, апробацію та визнання науковою спільнотою.

**Наукова новизна результатів дисертації** не викликає сумнівів і полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано комплексний підхід до дослідження матеріалів ядерних установок, що поєднує оптичні та терагерцеві методи, який дозволяє простежувати зміни структури і властивостей поверхні під дією радіаційних, термомеханічних та електрофізичних факторів.
2. Вперше встановлено, що рекристалізація ITER grade W забезпечує стабільність морфології поверхні та її оптичного відгуку в умовах впливів, характерних для ITER. Обгрунтовано доцільність використання рекристалізованого W як матеріалу перших дзеркал і запропоновано узагальнену модель багатокомпонентної шорсткості його поверхні.
3. Вперше показано, що різна інформативність еліпсометрії та рефлектометрії щодо дефектів різного просторового масштабу зумовлена фізичними відмінностями методів. Це дало змогу сформулювати підхід до їх комбінованого застосування при аналізі поверхонь полікристалічних металів.
4. Вперше виявлено закономірний зв'язок між рівнем деформації при низькотемпературній квазігідроекструзії та еволюцією структури й електромеханічних характеристик сплаву CuCrZr. Встановлено критичний

інтервал деформацій, у якому відбувається різка перебудова дефектної структури та зміна властивостей матеріалу.

5. Вперше досліджено вплив комбінованої інтенсивної пластичної деформації (РККП та КГЕ) на формування структури дисперсійно-зміцненого сплаву CuCrZr. Показано, що поєднання рівноканального кутового пресування та квазігідроекструзії за криогенних температур забезпечує підвищені механічні властивості та радіаційну стійкість матеріалу.

6. Вперше запропоновано концепцію локалізованого поверхневого дефекту та розроблено модель поверхні, характерну для матеріалів після радіаційного та електрофізичного впливу. Показано, що врахування таких дефектів є ключовим для коректної інтерпретації нетипових еліпсометричних залежностей.

7. Вперше розроблено та реалізовано автоматизований терагерцевий еліпсометр-рефлектометр для дослідження складних багатошарових і дефектних структур.

8. Вперше встановлено, що порушення класичного характеру кутових залежностей еліпсометричних параметрів виникають лише за наявності просторово локалізованих дефектів із характерними розмірами, співмірними з довжиною хвилі зондуючого випромінювання.

9. Вперше обґрунтовано застосування багатокутової субтерагерцевої еліпсометрії для аналізу покриттів, сформованих методом мікродугового оксидування. Запропоновано кускову одношарову модель поверхні для коректної обробки експериментальних еліпсометричних даних, отриманих для градієнтних шарів.

10. Вперше продемонстровано можливість використання терагерцевої еліпсометрії у якості методу оцінки пористості й вологості гранульованих матеріалів, що застосовуються в системах очищення повітря АЕС. Розроблений еліпсометричний метод враховує анізотропію макроструктури та є універсальним для широкого класу пористих середовищ.

## **Оцінка змісту дисертації, її завершеність.**

**Перший розділ** дисертаційної роботи присвячений аналізу літератури, що стосується вибору та обґрунтування матеріалів для елементів термоядерних установок. Узагальнено відомості про поведінку вольфрамових матеріалів і сплаву CuCrZr в умовах радіаційного впливу та наведено оцінку їх структурної і функціональної стабільності. Окремо висвітлено можливості використання сучасних методів діагностики поверхні, зокрема оптичної й терагерцової еліпсометрії, для виявлення радіаційно зумовлених змін у металах, покриттях, отриманих методом МДО, а також у матеріалах, що застосовуються в допоміжних системах АЕС.

Проведений аналіз дозволив автору чітко окреслити наукову проблему та сформулювати завдання подальших досліджень.

У **другому розділі** дисертації наведено результати експериментального аналізу еволюції поверхневого стану та оптичних характеристик двох типів вольфраму з різною мікроструктурою за умов, що імітують вплив умов робочого середовища термоядерної установки ITER. Автором досліджено послідовну дію опромінення нейтронами та атомами перезарядки, що дозволило розділити внесок окремих факторів у формування поверхневого рельєфу.

Показано, що для W-IG характерний розвиток багатомасштабної шорсткості, зумовленої відмінностями швидкостей розпилення конгломератів зерен, так і зерен в середині конгломератів, із різною кристалографічною орієнтацією, тоді як у рекристалізованому матеріалі W-гс формується переважно ступінчастий рельєф. Комплексне застосування оптичної еліпсометрії, рефлектометрії та мікроскопічних методів дало змогу обґрунтувати фізичні механізми ерозійних процесів і оцінити межі чутливості оптичних методів до різних типів шорсткості.

На підставі порівняльного аналізу встановлено, що рекристалізація вольфраму призводить до стабілізації його структури та оптичних властивостей

за комбінованої дії факторів ITER, а внесок нейтронного опромінення у формування поверхневих змін є другорядним порівняно з впливом атомів перезарядки. Отримані результати мають важливе значення для обґрунтування вибору матеріалів, звернених до плазми, компонентів термоядерних реакторів.

У **третьому розділі** дисертації наведено результати комплексного дослідження структурно-фазового стану та фізико-механічних характеристик сплаву CuCrZr після комбінованої термомеханічної обробки за схемою SAcWA з використанням квазігідроекструзії та рівноканального кутового пресування.

Показано, що варіювання режимів квазігідроекструзії суттєво впливає на характер розпаду пересиченого твердого розчину, дефектну структуру матриці та морфологію вторинних фаз, що, у свою чергу, визначає рівень мікротвердості, електропровідності й анізотропії властивостей. На основі аналізу структурних і фізичних даних запропоновано узагальнене трактування кінетики динамічного старіння, зокрема в умовах низькотемпературної пластичної деформації.

Встановлено, що послідовне проведення рівноканального кутового пресування та квазігідроекструзії, особливо за температури рідкого азоту, забезпечує формування більш дрібнодисперсної та структурно стабільної мікроструктури з підвищеними механічними властивостями та зниженою швидкістю розпилення поверхні. Результати досліджень із використанням електронної мікроскопії, інтерферометрії та багатокутової еліпсометрії свідчать про високу чутливість оптичних методів до радіаційно-індукованих змін морфології поверхні.

Показано, що традиційні планарні моделі ефективного середовища є недостатніми для коректної інтерпретації еліпсометричних даних у разі формування складного крупномасштабного (порівняно з довжиною хвилі зонduючого випромінювання) рельєфу. У зв'язку з цим в роботі запропоновано фізично обґрунтовану модель поверхні, яка враховує внесок дефектів різної

природи та масштабу.

Отримані результати мають практичне значення для оптимізації режимів обробки сплавів CuCrZr, що застосовуються в конструкційних компонентах ядерних та термоядерних установок.

**Четвертий розділ** присвячений портативному квазіоптичному ТГц спектроскопічному еліпсометру-рефлектометру. Прилад побудований на базі порожнистого діелектричного променеводу та відповідних променеводних компонентів, що забезпечують роботу в діапазоні частот 0,1–1 ТГц. Розглянуто конструкцію та систему керування приладом, проведено його атестацію на різних матеріалах і структурах.

Тестування показало, що точність вимірювання еліпсометричних параметрів складає:  $\Psi \approx 0,05^\circ$ ,  $\Delta \approx 0,1^\circ$ , коефіцієнт відбиття -  $R \approx 1\%$ . Прилад демонструє потенціал для наукових досліджень та промислового застосування для аналізу характеристик матеріалів і поверхневих шарів.

**П'ятий розділ** присвячений масштабному моделюванню впливу різних дефектів поверхні, характерних для радіаційних пошкоджень, на результати еліпсометрії. Для дослідження використано терагерцовий еліпсометр (довжина хвилі 1–2 мм), що дозволив створювати дефекти різної форми та розмірів у міліметровому масштабі і аналізувати їх вплив на еліпсометричні параметри.

Результати показали, що дефекти менші за довжину хвилі стають «невидимими» для еліпсометрії, хоча впливають на коефіцієнт відбиття, отриманий методом рефлектометрії. Локалізовані дефекти розміром порядку довжини хвилі або більше викликають некласичну поведінку кутових залежностей  $\Psi(\theta)$  та  $\Delta(\theta)$ , що виявлено для дефектів різних типів. Показано, що якщо відстань між дефектами більша за певну критичну, то дефекти можуть розглядатися як локалізовані.

Отримані результати в розділі є важливими для створення еліпсометричних моделей дефектних структур і коректної обробки

експериментальних результатів.

**В шостому розділі** розглянуто застосування субтерагерцевої еліпсометрії для дослідження сильношорстких оксидних покриттів, сформованих методом мікроплазменного оксидування. Показано, що в суб-ТГц діапазоні рефлектометрія при нормальному куті падіння випромінювання практично нечутлива до таких плівок через високі оптичні константи металевої підкладки, тоді як еліпсометрія демонструє високу чутливість до зміни морфології, товщини та складу покриття.

На основі мікроскопічних і дифракційних даних запропоновано фізично обґрунтовану модель, яка враховує неоднорідність товщини та складу покриттів по поверхні зразків. Установлено, що зі збільшенням часу обробки зменшується структурна та оптична неоднорідність плівок, що проявляється в стабілізації оптичних параметрів по площині.

Практична цінність дослідження досить висока і полягає в демонстрації можливості неруйнівного контролю товстих і шорстких оксидних покриттів на металевих підкладках методами субтерагерцевої еліпсометрії. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації режимів мікроплазменного оксидування та для контролю якості функціональних захисних покриттів у матеріалознавстві й інженерних застосуваннях.

**В сьомому розділі** продемонстровано можливості субтерагерцевої багатокутової еліпсометрії для визначення пористості та вологості гранул активованого вугілля. Завдяки великій довжині хвилі зондуючого випромінювання досліджувана поверхня коректно описується в наближенні ефективного середовища, що дозволяє пов'язати еліпсометричні параметри з об'ємними характеристиками структури.

На основі узагальненої моделі ефективного середовища розроблено підхід для одночасного визначення пористості та об'ємного вмісту води в гранулах. Практична значущість роботи полягає в демонстрації можливості швидкого та

неруйнівного контролю структурних і сорбційних характеристик активованого вугілля методами субтерагерцової еліпсометрії, що є перспективним для моніторингу стану сорбентів у промислових та екологічних застосуваннях.

**Повнота викладу в опублікованих працях.** Результати дисертації опубліковані в провідних вітчизняних та зарубіжних виданнях. Опубліковано 23 статті в спеціалізованих фахових виданнях, серед яких 20 індексуються в наукометричній базі даних Scopus, 11 належать до квартиля Q3, 7 належать до квартиля Q1 та Q2. Реферат повністю відображає зміст дисертаційної роботи.

**Зауваження до роботи наступні:**

1. В другому розділі не пояснено, яким чином іони вольфраму імітують нейтронне опромінення. Не обґрунтовано вибір флюєнсу при моделюванні впливу атомів перезарядки. Ці методи потрібно було описати більш детально.
2. На с.103 описується вплив окисного шару на еліпсометричні параметри. Але в моделі ефективного середовища входили дві компоненти: вольфрам та оточуюче середовище. Тобто, в моделі не врахований матеріал оксиду вольфраму. Це потребувало б додаткового пояснення.
3. В розділі 3 відсутні структурні дослідження після проведення старіння. Це створило б більш повне уявлення про вплив режимів ПІД на результуючі властивості і структуру матеріалу.
4. Принципові схеми в розділі 4 важко сприймаються. Можливо, варто було б перенести їх у додатки зі збільшеним масштабом.
5. В авторефераті присутня технічна помилка: рис. 19 і 21 візуально однакові. Співставляючи зміст автореферату та дисертації, з'ясуємо, що рис. 19 дійсно відповідає змісту супровідного тексту, а рис. 21 автореферату повинен відповідати рис. 6.7 дисертації. Враховуючи те, що версії автореферату і дисертації, а також відзиви опонентів доступні на сайті, інші читачі за потреби зможуть з цим розібратися.
6. В роботі зустрічаються і інші технічні похибки. Наприклад, на рис. 5.2 і

5.3 «мм» написані кирилицею і латиницею.

Разом з тим, вважаю, що зазначені зауваження не впливають на загальне позитивне враження від роботи і не знижують її наукову цінність.

### **Висновок**

В роботі вирішено важливу проблему фізики твердого тіла, а саме створення фізичних основ еліпсометричної діагностики перетворень структури та властивостей перспективних матеріалів ядерних установок під впливом опромінення, термомеханічних та електрофізичних методів обробки. Дисертація «Фізичні основи еліпсометричної діагностики змін структури і властивостей перспективних матеріалів ядерних установок під впливом опромінення і термомеханічної обробки» відповідає вимогам МОН України, які висуваються до робіт на здобуття ступеня доктора наук, зокрема п. 7 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктор наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року №1197, а її автор, Коленов Іван Вікторович, безумовно, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,  
завідувач відділу теорії конденсованого стану речовини  
Інституту монокристалів НАН України  
доктор фізико-математичних наук,  
професор

Володимир ЯНОВСЬКИЙ

Підпис д.ф.-м.н., проф. В.В. Яновського засвідчую:

Вчений секретар

Інституту монокристалів НАН України,  
кандидат фізико-математичних наук



10.03.2026

Костянтин КУЛИК