

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора Чугая Олега Миколайовича на дисертаційну роботу Коленова Івана Вікторовича «Фізичні основи еліпсометричної діагностики змін структури і властивостей перспективних матеріалів ядерних установок під впливом опромінення і термомеханічної обробки», подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Актуальність теми.

Останнім часом людство зіткнулося з низкою викликів, подолання яких є критично важливим для його розвитку і навіть існування. До таких викликів можна віднести енергетичний та екологічний. Одним зі шляхів подолання цих викликів є створення термоядерної енергетики. Разом з тим розробка та впровадження в експлуатацію термоядерних реакторів піднімає на новий рівень вимоги до властивостей матеріалів та їхньої стійкості до інтенсивного нейтронного випромінювання в умовах високих (до 1000°C) температур. Варто зазначити, що створення нових матеріалів термоядерної енергетики є комплексною проблемою, вирішення якої включає не лише дослідження впливу нейтронного випромінювання на структуру та властивості матеріалів, але й розробку ефективних методів їхньої діагностики. З огляду на вищезазначене дисертаційна робота Коленова І.В. є актуальною.

Актуальність теми дисертації підтверджується її зв'язком з низкою держбюджетних тем досліджень.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, що викладені в дисертації Коленова І.В., базується на його інформованості про сучасний світовий рівень теоретичних знань і технічних розробок за тематики дисертації, а також на всебічному підході до вивчення визначених об'єктів з використанням новітніх математичних та експериментальних методів дослідження з використанням сучасних технічних засобів.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дослідження впливу опромінення, термомеханічної та електрофізичної обробки на структуру й властивостей матеріалів ядерно-енергетичного призначення підтверджується тим, що ці результати узгоджуються зі сучасними уявленнями щодо модифікації структури та зміни властивостей металів під дією відповідних чинників. Крім того, достовірність результатів забезпечується їхніми доповідями та обговоренням на міжнародних конференціях,

публікаціями в провідних зарубіжних журналах та розробкою обладнання, за допомогою якого реалізуються запропоновані в дисертації методи дослідження матеріалів.

До основних наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

1. Вперше реалізовано комплексне застосування оптичних та терагерцових методів для системного дослідження структури й властивостей матеріалів ядерно-енергетичного призначення після опромінення, термомеханічної та електрофізичної обробок. Встановлено, що еліпсометрія забезпечує високу чутливість до початкових стадій радіаційно-індукованих перетворень, а терагерцова еліпсометрія може бути як самостійним так і верифікаційним методом діагностики.

2. Вперше експериментально доведено, що рекристалізація вольфраму технічної чистоти (W-IG) стабілізує морфологічну структуру поверхні, забезпечуючи сталість оптичних характеристик матеріалу під впливом факторів ІТЕР. Виявлено фізичні механізми ерозії не рекристалізованого W-IG під дією факторів ІТЕР, розроблено моделі шорсткої поверхні з урахуванням двомасштабної шорсткості та її еволюції під час рекристалізації.

3. Комплексом оптичних методів встановлено, що рекристалізований W-IG характеризується підвищеною радіаційною стійкістю та є перспективним матеріалом для конструкційних елементів першої стінки та перших дзеркал термоядерних установок.

4. Виявлено закономірності впливу ступеня деформації при низькотемпературній квазігідроекструзії (КГЕ) на формування структури та електромеханічних властивостей сплаву CuCrZr. Обґрунтовано, що КГЕ сприяє формуванню анізотропної волокнистої структури матриці й вторинних фаз, що зумовлює анізотропію властивостей. У діапазоні $\epsilon_c = 40\text{--}48\%$ зафіксовано стрибкоподібну зміну структурно-фізичних характеристик, що інтерпретовано як наслідок дискретного утворення дефектів у матриці за низьких температур.

5. Установлено особливості структуроутворення дисперсійно-зміцненого сплаву CuCrZr при послідовному рівноканальному кутовому пресуванні (РККП) і КГЕ при 300 та 77 К. Показано, що РККП змінює кінетику розпаду пересиченого твердого розчину, спричиняючи анізотропію розподілу вторинних фаз і впливаючи на механізми перерозподілу легуючих елементів.

6. Вперше введено та науково обґрунтовано поняття «локалізований дефект», на основі якого побудовано нову модель поверхні твердого тіла. Експериментально підтверджено її адекватність методом терагерцової еліпсометрії. Модель дозволяє інтерпретувати аномальні кутові залежності еліпсометричних параметрів та усунути розбіжності між результатами еліпсометрії й рефлектометрії на поверхнях із локалізованими дефектами.

7. Розроблено й створено спектральний терагерцовий еліпсометр-рефлектометр на основі порожнистого діелектричного променеводу. Розроблено та

виготовлену систему управління приладом та спеціалізоване програмне забезпечення.

8. Експериментально підтверджено можливість масштабного фізичного моделювання сильношорстких поверхонь для верифікації моделей оптичної еліпсометрії. Встановлено, що відхилення від класичних кутових залежностей еліпсометричних параметрів обумовлені наявністю локалізованих дефектів або їхніх конгломератів, тоді як статистично однорідні дефектні шари не зумовлюють якісних змін у поведінці еліпсометричних характеристик.

9. Вперше досліджено можливості застосування багатокутової субтерагерцевої еліпсометрії для неруйнівної діагностики МПО-покриттів. Показано, що традиційні багаточарові планарні моделі є недостатньо точними для опису експериментальних даних, натомість уперше запропонована кускова модель забезпечує адекватний опис поверхонь із градієнтним розподілом оптичних властивостей.

10. Вперше доведено доцільність використання терагерцевої еліпсометрії як експрес-методу визначення характеристик гранул активованого вугілля (пористості та вологості), що застосовуються у фільтраційних системах. Розроблено оригінальні методики аналітичної обробки даних і вперше обґрунтовано модель ефективного середовища зі змінним фактором екранування $q(\theta)$, яка враховує анізотропію, зумовлену геометрією гранул.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше застосовано комплекс оптичних та терагерцевих методик для систематичного дослідження структури та властивостей матеріалів ядерних установок, підданих опроміненню, термомеханічним та електрофізичним обробкам. Показано, що оптична еліпсометрія дає змогу ефективно досліджувати процеси розвитку радіаційно-індукованих перетворень на поверхнях матеріалів навіть на ранніх стадіях. Показано, що терагерцеві методи, зокрема еліпсометрія, можуть використовуватися як самостійні, так і доповнювати або верифікувати дані оптичної еліпсометрії.

2. Вперше доведено, що рекристалізація W-IG призводить до стабілізації структури його поверхні і, як наслідок, оптичних характеристик. Проведені комплексні дослідження радіаційних перетворень поверхні дозволили з'ясувати фізичні механізми її ерозії під впливом факторів ІТЕР та побудувати моделі шорсткої поверхні. Вперше обґрунтовано модель існування двох типів шорсткості на поверхні W-IG та її модифікацію при рекристалізації.

3. Методами еліпсометрії підтверджено, що рекристалізований W-IG може розглядатися як кращий матеріал для ПЗ, оскільки його оптичні характеристики стабільні до модифікації поверхні під впливом факторів ІТЕР.

4. Встановлено, що вплив ступеня деформації при низькотемпературній КГЕ на структуру та електромеханічні властивості сплаву CuCrZr. КГЕ призводить до

формування вираженої анізотропної (волокнистої) структури матриці та включень вторинних фаз, орієнтованих уздовж напрямку екструзії. Відповідно, це призводить до анізотропії властивостей матеріалу. У діапазоні $\epsilon_c = 40-48\%$ спостерігається стрибок як структурних характеристик (щільності включень вторинних фаз, параметра решітки), так і фізичних властивостей матеріалу. Висловлено припущення, що цей ефект пов'язаний з відомим механізмом стрибкоподібного утворення (генерації) дефектів матриці за низьких температур, що знижує розпад пересиченого твердого розчину. КГЕ дозволяє отримати високі механічні властивості сплаву CuCrZr за збереження високої ($> 80\%$ IACS) електропровідності.

5. Встановлено особливості послідовного РКУП при 300K та КГЕ при 300K та 77K на формування структури дисперсійно-зміцненого сплаву CuCrZr. Як інструмент для дослідження структури сплаву та його радіаційної стійкості до атомів перезарядки використано розпилення сплаву іонами дейтерію. Показано, що РКУП призводить до змін у кінетиці розпаду пересиченого твердого розчину та формування анізотропії розподілу включень вторинних фаз. Це, своєю чергою, впливає динамічні процеси перерозподілу легуючих елементів при РКУП і КГЕ.

6. Введено та обґрунтовано поняття «локалізований дефект», побудовано і потім експериментально перевірено методом ТГц еліпсометрії нову модель поверхні твердого тіла. Модель поверхні являє собою гладку матрицю сплаву з розподіленими на ній дефектами, характерний розмір яких можна порівняти з довжиною хвилі зондуючого опромінення, а відстань між ними значно перевищує її розмір. Застосування цієї моделі має велике значення, тому що вперше дозволило інтерпретувати аномальні кутові залежності еліпсометричних параметрів та усунути розбіжності в результатах, які отримуються при використанні еліпсометрії та рефлектометрії на поверхнях з локалізованими дефектами.

7. Створено спектральний терагерцевий еліпсометр-рефлектометр на базі порожнистого діелектричного променевода.

8. Підтверджено можливість масштабного моделювання сильношорстких поверхонь для верифікації моделей оптичної еліпсометрії. Проведено дослідження впливу на кутові залежності еліпсометричних параметрів низки шорстких структур. Показано, що відхилення від класичної поведінки кутових залежностей еліпсометричних параметрів дають підставу припускати наявність локалізованих дефектів або конгломератів дефектів. При цьому статистично однорідні дефектні шари (такі як шорсткість, перехідні шари тощо) ніколи не призводять до якісних відхилень від класичних кутових залежностей еліпсометричних параметрів.

9. Вперше досліджено можливості багатокутової суб-терагерцевої еліпсометрії для діагностики МПО-покриттів. Субтерагерцевий діапазон обрано через довжину хвилі зондуючого випромінювання (2,14 мм), яка значно перевищує розміри шорсткості досліджуваних об'єктів. Це дозволило використовувати наближення ефективного середовища для моделювання шорсткості та сильно неоднорідності покриттів. Показано, що стандартні багаточарові планарні моделі не дозволяють з

достатньою точністю описати дані експериментальної еліпсометрії для досліджуваних зразків. Вперше запропоновано кускова модель для аналізу результатів багатокутової еліпсометрії. Показано, що ця модель дає змогу більш адекватно описувати поверхневі структури з градієнтом властивостей по поверхні зразка, ніж стандартні планарні моделі.

10. Вперше досліджено можливість застосування терагерцевої еліпсометрії у якості експрес-методу для дослідження характеристик (пористості та вологості) гранул активованого вугілля як робочого середовища повітряних фільтрів. Розроблено оригінальний методів аналізу даних експериментальної еліпсометрії. Для розрахунку ефективних оптичних констант активованого вугілля вперше запропоновано та фізично обґрунтовано модель ефективного середовища зі змінним фактором екранування $q(\theta)$, що дозволило врахувати анізотропію зразка, спричинену своєю геометрією.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено низку оптичних та терагерцевих методів для діагностики структури та властивостей матеріалів ядерної енергетики після радіаційних, термомеханічних та електрофізичних впливів.
2. Показано, що оптичні властивості рекристалізованого W-IG більш стійкі до дії нейтронів та атомів перезарядження порівняно з W-IG. У зв'язку з цим рекристалізований W-IG може бути рекомендований для виготовлення перших дзеркал систем діагностики термоядерних установок.
3. Проведення КГЕ сплаву CuCrZr після відпалу та гартування дозволяє отримати поєднання високих значень механічних та електричних властивостей. Шляхом зміни ступеня деформації КГЕ можна отримати необхідне поєднання механічних та електрофізичних властивостей матеріалу. Послідовне проведення РКУП після відпалу і гартування сплаву CuCrZr, старіння та КГЕ дозволяють досягти більш однорідного розподілу включень вторинних фаз, більш високих механічних властивостей та стійкості до розпилення атомами дейтерію.
4. Створення терагерцевого комплексу методів не тільки розширює можливості неруйнівного контролю матеріалів, а і дозволяє проводити подальше дослідження оптичної еліпсометрії.
5. Створення та розвиток експериментального терагерцевого методу масштабного моделювання дозволяє верифікувати і вдосконалювати моделі поверхонь оптичної еліпсометрії та може бути використаний для відпрацювання методів оптичного експрес-контролю поверхонь матеріалів.
6. Розроблений метод контролю МАО покриттів може бути використаний у якості експрес-методу як для налагодження технологічних процесів синтезу покриттів, так і діагностики стану покриттів у процесі їх експлуатації.

7. Терагерцова еліпсометрія може використовуватись у якості експрес-методу для одночасного визначення пористості та вмісту вологи в поверхневому шарі гранул активованого вугілля.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Результати досліджень було представлено та обговорено на 21 міжнародній конференції й опубліковано в 23 статтях в провідних наукових виданнях. Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації. Дисертаційна робота відповідає вимогам Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника.

Оцінка змісту дисертації.

Дисертація Колонова І.В. складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків та списку використаної літератури.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показана її наукова і практична цінність, сформульовані мета та задачі дослідження, описано зв'язок дисертації з науковими планами та темами, наведені дані щодо апробації дисертації та публікації її результатів в наукових виданнях.

В розділі 1 виконано огляд перспективних матеріалів для виготовлення компонентів термоядерних установок. Розглянуто перспективні методи аналізу радіаційно-індукованих змін на поверхні металів та сплавів. На основі аналізу наведених літературних даних сформульовано постановку проблем та завдання досліджень.

В розділі 2 наведено результати дослідження модифікації поверхневої структури та зміни оптичних властивостей двох типів вольфраму (W-IG і W-rc) під дією факторів, що відтворюють умови експлуатації в термоядерних установках. Досліджено послідовний вплив на властивості нейтронного опромінення та атомів перезарядки. Методами оптичної еліпсометрії та рефлектометрії досліджено радіаційно-індуковані зміни поверхні матеріалів.

В розділі 3 представлено результати дослідження структури та властивостей сплаву CuCrZr. У якості додаткової холодної деформації використовувались квазігідроекструзія (КГЕ) при азотній температурі, та рівноканальне кутове пресування (РКУП) при кімнатній температурі. Після РКУП та старіння було проведено КГЕ при кімнатній температурі та температурі рідкого азота. Проведено комплексні дослідження структури та властивостей сплаву в залежності від процедури обробки. Запропоновано фізичні механізми кінетики розпаду пересиченого твердого розчину.

В розділі 4 описано портативний спектроскопічний квазіоптичний еліпсометр-рефлектометр терагерцового діапазону. Розглянуто конструкцію, принцип роботи та систему управління цим приладом. Проведено атестацію створеного приладу за допомогою ряду матеріалів і структур.

В розділі 5 наведено результати масштабного моделювання впливу дефектів різного типу та розмірів, характерних для поверхні зразків дисперсійно-зміцненого

сплаву Cu–Cr–Zr та вольфраму (W), які піддавалися іонному розпиленню, на результати еліпсометричного експерименту в оптичному діапазоні. Для масштабного моделювання було використано терагерцовий еліпсометр, який працює як у монохроматичному режимі (робоча довжина хвилі $\lambda = 2,14$ мм), так і в спектральному діапазоні 0,17–0,22 ТГц.

В розділі 6 наведено результати діагностики сильношорстких поверхонь покриттів, отриманих за допомогою мікроплазменного оксидування, з використанням субтерагерцевої еліпсометрії (2,14 мм).

В розділі 7 досліджуються можливості субтерагерцевої багатокутової еліпсометрії для визначення пористості і вологості гранул активованого вугілля.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані чітко і відповідають змісту дисертації.

Список використаних джерел із 394-ти найменувань є повним і включає переважно зарубіжні публікації світового рівня.

Автореферат відображає основний зміст дисертації та в повній мірі розкриває наукові результати й практичну цінність роботи.

Академічна доброчесність.

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, в яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно й містяться в опублікованих ним роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків дисертанта.

По дисертації можна зробити наступні зауваження:

1. Подекуди в тексті дисертації зустрічаються неточні або невдалі вислови: «з середини 20 століття було проведено безліч досліджень» стор. 38; «за рахунок підвищення гідростатичних умов» стор. 56; «додаткові концентрації напружень» (стор. 129).
2. На сторінці 83 (останній абзац) наведені майже однакові за змістом твердження: «TD прилади дозволяють отримувати еліпсометричні дані в широкій спектральній смузі (до кількох ТГц)» і «Прилади TD дозволяють отримувати еліпсометричні дані в широкому спектральному діапазоні, що зазвичай охоплює кілька ТГц,...».
3. Допущена помилка в визначенні терміну «швидкість розпилення» (стор. 111) – «Швидкість розпилення, що визначається як відношення числа вибитих атомів до числа іонів, що падають на мішень».
4. В авторефераті допущена технічна помилка. Згідно з текстом, рис. 21 автореферату повинен відповідати рисунку 6.7 дисертації.

5. Для кращого сприйняття принципові схеми еліпсометра-рефлектометра (розділ 4) цю схему потрібно було б збільшити, або перенести в додатки.

Разом з тим, перелічені недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи. Дисертація є актуальною і має високу наукову цінність та практичну значущість.

ВИСНОВОК

Вважаю, що за актуальністю, новизною, науковим рівнем та обсягом проведених досліджень дисертаційна робота роботу Коленова Івана Вікторовича «Фізичні основи еліпсометричної діагностики змін структури і властивостей перспективних матеріалів ядерних установок під впливом опромінення і термомеханічної обробки», подана на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла, повністю відповідає всім вимогам до докторської дисертації за цією спеціальністю, а її автор, Коленов Іван Вікторович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук,

завідувач кафедри фізики

Національного аерокосмічного університету

"Харківський авіаційний інститут" МОН України

Олег ЧУГАЙ

Підпис Чугая О.М. засвідчую.

Вчений секретар Національного
аерокосмічного університету



Тетяна БОНДАРЄВА

13.03.2026