

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту електрофізики
і радіаційних технологій НАН України
член-кореспондент НАН України


Володимир ЛИТВИНЕНКО

2026 р.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів докторської дисертації «Фізичні основи еліпсометричної діагностики змін структури і властивостей перспективних матеріалів ядерних установок під впливом опромінення і термомеханічної обробки» докторанта Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України, кандидата фізико-математичних наук, Коленова Івана Вікторовича, представленої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - *фізика твердого тіла*

Призначені рішенням Вченої ради Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України (протокол № 11 від 17.11.2025 року) рецензенти, а саме:

Клепиков Вячеслав Федорович, радник при дирекції Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України, член-кореспондент НАН України, професор, доктор фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика;

Остапчук Павло Миколайович, провідний науковий співробітник Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України, старший науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла;

Базалєєв Микола Іванович, провідний науковий співробітник Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України, старший науковий співробітник, доктор технічних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла,

розглянувши докторську дисертацію Коленова Івана Вікторовича “Фізичні основи еліпсометричної діагностики змін структури і властивостей перспективних матеріалів ядерних установок під впливом опромінення і термомеханічної обробки” (тему дисертації затверджено на засіданні Вченої ради Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України 11.09.2025 р., протокол № 9), наукові публікації здобувача наукового ступеня доктора наук, в яких висвітлено основні результати докторської дисертації, а також за результатами наукового фахового семінару Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України (протокол № 1 від 02.01.2026 року), підготували висновок про наукову новизну, теоретичне і практичне значення результатів докторської дисертації.

1. Актуальність теми дисертації

Розробка нових матеріалів та методів їхньої діагностики є одним із важливих напрямів розвитку сучасної та перспективної ядерної і термоядерної енергетики. Актуальність цих досліджень зумовлена необхідністю підвищення ресурсу, ефективності та безпеки експлуатації ядерних установок, а також зменшення кількості радіоактивних відходів. Ефективне розв’язання зазначених завдань можливе лише за умови комплексного підходу,

що поєднує створення нових матеріалів із удосконаленням методів контролю їхнього структурного стану та фізичних властивостей на всіх етапах життєвого циклу.

Сучасні ядерні та термоядерні установки є складними багатокомпонентними системами, матеріали яких працюють в умовах інтенсивного радіаційного, термічного, механічного та електрофізичного навантаження. Такі умови призводять до деградації властивостей матеріалів, насамперед у поверхневих і приповерхневих шарах, де формуються максимальні градієнти температури, напружень і концентрації дефектів. Саме стан поверхні значною мірою визначає початкові стадії пошкодження матеріалу та подальшу еволюцію його експлуатаційних характеристик, що робить дослідження поверхні твердого тіла важливою науково-технічною задачею.

Для дослідження структурного стану та фізичних властивостей матеріалів у ядерній енергетиці традиційно використовується комплекс експериментальних методів, таких як електронна мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз, наноіндентування тощо. Однак більшість цих методів є руйнівними або потребують складної та трудомісткої підготовки зразків, а також мають обмежену чутливість до тонких поверхневих шарів. Крім того, суттєвими обмежувальними факторами є висока вартість обладнання та складність експериментальної реалізації.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розробка неруйнівних, безконтактних та високочутливих методів діагностики поверхневих шарів матеріалів. Перспективним напрямом у цьому контексті є оптична еліпсометрія, яка дозволяє з надвисокою чутливістю реєструвати зміни поляризаційних характеристик світла при взаємодії з поверхнею твердого тіла. Водночас застосування еліпсометрії до складних поверхонь обмежується необхідністю побудови адекватних фізичних моделей та труднощами розв'язання зворотної задачі еліпсометрії.

Розширення спектрального діапазону еліпсометричних досліджень у довгохвильову область, зокрема міліметровий і субміліметровий діапазони, відкриває нові можливості для діагностики шорстких, багат шарових та структурно неоднорідних поверхонь. Розвиток радіохвильової еліпсометрії дозволяє створювати ефективні модельні системи та підвищувати достовірність інтерпретації експериментальних даних оптичної еліпсометрії.

Таким чином, дана робота є актуальною та спрямована на розвиток фізичних основ еліпсометричних і споріднених оптичних методів діагностики змін структури та фізичних властивостей перспективних матеріалів ядерних і термоядерних установок під впливом опромінення та термомеханічних обробок.

2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами інституту

Дисертаційна робота Коленова І.В. виконана відповідно до пріоритетних напрямів розвитку Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України.

Основні теоретичні та прикладні результати дисертації отримано в процесі участі (як керівник чи виконавець) у виконанні низки науково-дослідних робіт, зокрема:

- «Фазові перетворення в анізотропних системах з модульованим впорядкуванням параметрів порядку під впливом опромінювання» (2011-2015) № ДР 0111U002499;
- «Фазові перетворення в перспективних матеріалах ядерно-енергетичних установок та радіаційно-стійких матеріалах для електроніки» (2016-2020) № ДР 0116U001000;

- «Розвиток комплексу спектроскопічних методів діагностики -радіаційно-стимульованих структурно-фазових перетворень в конструкційних матеріалах ядерної енергетики та удосконалення теоретичних моделей.» (2017-2021) № ДР 0117U002138, та НДР, в якій брав участь як науковий керівник;
- «Проведення експериментів з масштабного моделювання впливу локалізованих радіаційно-індукованих дефектів поверхні на результати еліпсометрії та рефлектометрії. Обробка отриманих результатів та написання остаточного звіту.» (2022). № ДР 0121U111717.

3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів

Відповідно до пунктів наукової новизни дисертаційної роботи, здобувачем зроблено такі внески:

- виконав аналіз літературних даних на тему досліджень: постановка завдання, аналіз основних теоретичних та модельних результатів виконано спільно з науковим консультантом;
- отримав основні експериментальні результати. Брав участь у обробці та аналізі отриманих результатів, теоретичних розрахунках, побудові фізичних моделей на їх основі;
- виконав підготовку більшості експериментальних зразків для досліджень. Проводив чисельну обробку та моделювання більшості експериментальних результатів;
- приймав участь у розробці та створенні терагерцевого рефлектометра-еліпсометра;
- виконав апаратну та програмну частини системи автоматизації терагерцевого рефлектометра-еліпсометра. Створив програмне забезпечення для обробки експериментальних результатів;
- ряд експериментів та інтерпретація їх результатів проведено у творчій співпраці із співавторами відповідних робіт.

4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій.

Достовірність та обґрунтованість отриманих у дисертаційній роботі результатів, розроблених фізичних основ, моделей, теоретичних і експериментальних методів, устаткування, а також сформульованих висновків і рекомендацій забезпечуються цілісною системою взаємопов'язаних теоретичних і експериментальних обґрунтувань.

Експериментальні дослідження виконано з використанням сучасних прецизійних методів і сертифікованих вимірювальних засобів, що пройшли відповідну метрологічну атестацію. Отримані результати верифіковано альтернативними експериментальними методами, що дозволило підтвердити їхню відтворюваність та мінімізувати вплив систематичних і випадкових похибок. Обробку експериментальних даних проведено із застосуванням методів математичної статистики, що забезпечило коректність кількісних оцінок і встановлених закономірностей.

Обґрунтованість інтерпретації експериментальних результатів підтверджується використанням фізично коректних моделей, побудованих на чітко визначених припущеннях і гіпотезах, які логічно узгоджуються з поставленою науковою проблемою розробки фізичних основ еліпсометричної діагностики твердих тіл. Усі базові положення дослідження формалізовано із застосуванням методів теоретичної фізики, обчислювальної математики та чисельного моделювання.

Достовірність встановлених результатів також підтверджується їх апробацією на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях, семінарах і симпозіумах, де вони обговорювалися з фахівцями відповідного профілю та отримали позитивну оцінку наукової спільноти. За результатами досліджень опубліковано наукові праці у фахових рецензованих виданнях.

Таким чином, застосовані експериментальні і теоретичні підходи, використання взаємодоповнювальних методів дослідження, статистично обґрунтована обробка результатів, а також їх апробація на наукових форумах забезпечують високий рівень достовірності та обґрунтованості висновків, сформульованих у роботі.

5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру.

У дисертаційній роботі Коленова І.В. 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. При цьому отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше застосовано комплекс оптичних та терагерцевих методик для систематичного дослідження структури та властивостей матеріалів ядерних установок, підданих різноманітним радіаційним, 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 ITER grade W призводить до стабілізації структури його поверхні і, як наслідок, оптичних характеристик, що дозволяє рекомендувати рекристалізований W у якості матеріалу перших дзеркал систем діагностики плазми ITER. Проведені комплексні дослідження радіаційних перетворень поверхні дозволили з'ясувати фізичні механізми її ерозії під впливом факторів ITER та побудувати моделі шорсткої поверхні. Вперше обґрунтовано модель існування двох типів шорсткості на поверхні W-IG та її модифікацію при рекристалізації.

3. Вперше показано, що різна чутливість оптичних еліпсометрії та рефлектометрії до різномасштабних дефектів (мікросорсткість і наносорсткість) структури поверхні полікристалічних металів пов'язана з різними фізичними принципами двох методів. Сформовано рекомендації щодо сумісного використання цих двох методів для дослідження матеріалів з різним типом шорсткості.

4. Встановлено вплив ступеня деформації при низькотемпературній квазігідроекструзії (КГЕ) на структуру та електромеханічні властивості сплаву CuCrZr. Показано, що застосування квазігідроекструзії призводить до формування вираженої анізотропної волокнистої структури матриці та включень вторинних фаз, орієнтованих уздовж напрямку екструзії, що зумовлює анізотропію фізико-механічних властивостей матеріалу. У діапазоні еквівалентних деформацій $\varepsilon_e = 40\text{--}48\%$ виявлено різку зміну структурних характеристик, зокрема щільності включень вторинних фаз та параметра кристалічної ґратки, яка супроводжується стрибкоподібною зміною електромеханічних властивостей сплаву. Запропоновано і фізично обґрунтовано механізм, згідно якого зазначений ефект зумовлений інтенсифікацією процесів генерації дефектів кристалічної ґратки за низьких температур, що,

у свою чергу, впливає на стабільність пересиченого твердого розчину. Показано, що застосування квазігідроекструзії забезпечує досягнення високих механічних характеристик сплаву CuCrZr за одночасного збереження високої електропровідності на рівні понад 80 % IACS, що підтверджує перспективність використання даного матеріалу для виготовлення конструкційних елементів ядерних установок.

5. Встановлено особливості впливу послідовного рівноканального кутового пресування при температурі 300 К та квазігідроекструзії при температурах 300 К і 77 К на формування структури дисперсійно-зміцненого сплаву CuCrZr. Показано, що РККП призводить до змін у кінетиці розпаду пересиченого твердого розчину та формування анізотропії розподілу включень вторинних фаз. Це, своєю чергою, впливає на динамічні процеси перерозподілу легуючих елементів при термічному старінні і КГЕ. Встановлено, що зразки сплаву CuCrZr, піддані послідовному рівноканальному кутовому пресуванню та квазігідроекструзії при температурі 77 К, характеризуються найвищою радіаційною стійкістю до опромінення атомами перезарядки серед досліджених зразків, що підтверджує перспективність використання даного матеріалу в умовах термоядерних установок.

6. Введено та обґрунтовано поняття «локалізований дефект» поверхні. Побудовано та експериментально підтверджено нову модель поверхні твердого тіла, характерну для радіаційного, електрофізичного та хімічного впливів. Згідно моделі, поверхня представляє собою гладку матрицю сплаву з розподіленими на ній дефектами, характерний розмір яких порівняний з довжиною хвилі зондуючого опромінення, а відстань між ними значно перевищує її розмір. Ця модель дозволила вперше 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 автоматизований спектральний терагерцевий еліпсометр-рефлектометр на базі порожнистого діелектричного променевода, що дозволяє проводити дослідження структур в діапазоні довжин хвиль 0,1-3 мм і кутах падіння 30-80°.

8. Вперше показано, що відхилення від класичної поведінки кутових залежностей еліпсометричних параметрів викликані наявністю локалізованих дефектів або їх конгломератів з розмірами більше або порядку довжини хвилі зондуючого випромінювання. 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 показано високу ефективність багатокутової суб-терагерцевої еліпсометрії для діагностики покриттів, отриманих методом мікродугового оксидування. 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 шорсткостких та сильно неоднорідних покриттів. Показано, що стандартні багатшарові планарні моделі не дозволяють з достатньою точністю описати дані експериментальної еліпсометрії для досліджуваних зразків. Вперше розроблена кускова модель для аналізу результатів багатокутової еліпсометрії, яка є більш адекватною для описання поверхневих структур з градієнтом властивостей по поверхні зразка, ніж стандартні планарні моделі.

10. Вперше показано високу чутливість терагерцевої еліпсометрії як експрес-методу для дослідження експлуатаційних характеристик (пористості і вологості) гранульованого

активованого вугілля, що використовується в системах очищення вентиляційного повітря атомних електростанцій від радіоактивних домішок. Розроблено оригінальні методи експерименту та аналізу еліпсометричних даних для дослідження гранульованих пористих зразків. Вперше запропоновано та фізично обґрунтовано модель ефективного середовища зі змінним фактором екранування $q(\theta)$, що дозволило врахувати анізотропію макроструктури зразка. Запропонований метод може використовуватись для дослідження властивостей широкого класу гранульованих пористих матеріалів.

6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації.

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати:

1. Belyaeva, A. I. Simultaneous impact of neutron irradiation and sputtering on the surface structure of self-damaged tungsten / A. I. Belyaeva, A. A. Savchenko, A. A. Galuza, **I. V. Kolenov** // AIP Advances. 2014. Vol. 4. 077121. **Q2** (Дисертант приймав участь в проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).
2. Belyaeva, A. I. Effect of quasi-hydrostatic extrusion on microhardness in CuCrCr alloy / A. I. Belyaeva, A.A. Galuza, P.A. Khaimovich, **I.V. Kolenov**, A.A. Savchenko, I.V. Ryzhkov, A.F. Shtan', S.I. Solodovchenko, N.A. Shulgin // Probl. AtomicSci. Technol., Ser. PlasmaPhys. 2015. No. 1 (95). P. 170–173. **Q3** (Дисертант приймав участь в поставленні задач дослідження, проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).
3. Belyaeva, A.I. Quasioptical scale modeling of the influence of metal surface localized defects based on the optical ellipsometry data / A.I. Belyaeva, A.A. Galuza, **I.V. Kolenov**, V.K. Kiseliiov, A.A. Savchenko, E.M. Kuleshov, S.Yu. Serebiansky // Telecommunications and Radio Engineering. 2015. No. 74 (2). P. 171–181. **Q3** (Дисертант приймав участь в поставленні задач дослідження, проводив експериментальні дослідження, обробляв експериментальні дані, приймав участь в обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).
4. Belyaeva, A. I. Role of Recrystallization of Tungsten in Formation of a Roughness of Its Surface Under Influence of Successive Action of Neutrons and Sputtering / A. I. Belyaeva, O. A. Galuza, A. O. Savchenko, **I. V. Kolenov** // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. 2016. T. 38, № 8. С. 1077–1102. **Q3** (Дисертант приймав участь в проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).
5. Belyaeva, A. I. Effect of Various Kinds of Severe Plastic Deformation on the Structure and Electromechanical Properties of Precipitation-Strengthened CuCrZr Alloy / A. I. Belyaeva, A. A. Galuza, P. A. Khaimovich, **I. V. Kolenov**, A. A. Savchenko, S. I. Solodovchenko, N. A. Shul'gin // Phys. Met. Metallogr. 2016. Vol. 117, No. 11. P. 1170–1178. **Q2** (Дисертант приймав участь в поставленні задач дослідження, проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).
6. Belyaeva, A. I. Anisotropy of structure and strength properties of high-temperature Cu-Cr-Zr composite, induced by equal-channel angular pressing / A. I. Belyaeva, A. A. Galuza, **I. V. Kolenov**, S. N. Faizova, G. I. Raab, I. A. Faizov // J. Nano-Electron. Phys. 2016. Vol. 8, No. 4(2). 04082 (6 pp). DOI: 10.21272/jnep.8(4(2)).04082. **Q3** (Дисертант приймав участь в поставленні

задач дослідження, проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

7. Galuza, A. A. Developments in THz-Range Ellipsometry: Quasi-Optical Ellipsometer / A.A. Galuza; V.K. Kiseliyov; **I.V. Kolenov**; A.I. Belyaeva; Y.M. Kuleshov // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2016. Vol. 6, No. 2. P. 183–190. **Q1** (Дисертант приймав участь в поставленні задач дослідження, приймав участь в створенні квазіоптичної схеми приладу та системи автоматизації, проводив експериментальні дослідження, приймав участь в обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

8. Belyaeva, A. I. Thermal grain boundary grooves formation in tungsten under recrystallization / A. I. Belyaeva, A. A. Galuza, **I. V. Kolenov**, A. A. Savchenko // Probl. At. Sci. Technol. 2017. № 2. P. 38–43. **Q3** (Дисертант приймав участь в проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

9. Belyaeva, A. I. Surface energy anisotropy for the low-index crystal surfaces of the textured polycrystalline bcc tungsten: experimental and theoretical analysis / A. I. Belyaeva, A. A. Galuza, A. A. Savchenko, **I. V. Kolenov** // Probl. At. Sci. Technol. 2017. № 5. P. 14–20. **Q3** (Дисертант приймав участь в проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

10. Savchenko, A. A. The role of surface energy anisotropy in the formation of a stepped relief of polycrystalline W under sputtering with Ar ions / A. A. Savchenko, A. A. Galuza, A. I. Belyaeva, **I.V. Kolenov** // J. Appl. Phys. 2019. Vol. 125. 065307. DOI: 10.1063/1.5081788. **Q2** (Дисертант приймав участь в проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

11. Дзюбенко, М.И. Лазер на эрбиевом стекле с диодной накачкой / М.И. Дзюбенко, В.П. Пелипенко, **И.В. Коленов**, Н.Ф. Дахов // Радиотехника. 2019. No. 199. С. 104–109. (Дисертант приймав участь в створенні системи керування лазером, проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

12. Dzubenko, M.I. Pulse power supply unit with microcontroller control for a laser diode array pumped erbium-ytterbium laser / M.I. Dzubenko, **I.V. Kolenov**, V.P. Pelipenko, N.F. Dakhov, A.A. Galuza // Telecommunications and Radio Engineering. 2020. Vol. 79, No. 10. P. 891–902. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i10.60. **Q3** (Дисертант приймав участь в розробці схемотехніки та програмного забезпечення блоку живлення, проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

13. Dzyubenko, M.I. Transmission of Terahertz Radiation Through One-Dimensional Wire Gratings at Different Angles of Incidence / M.I. Dzyubenko, S.A. Masalov, Yu.E. Kamenev, **I.V. Kolenov**, V.P. Pelipenko, V.P. Radionov, N.F. Dahov // Radio Phys. Radio Astron. 2020. Vol. 25, No. 3. P. 240–246. DOI: 10.15407/rpra25.03.240. (Дисертант приймав участь в створенні макету для проведення досліджень, системи керування установкою, проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

14. Дзюбенко, М.И. Импульсное джерело живлення твердотільних лазерів з діодним накачуванням / М.И. Дзюбенко, **И.В. Коленов**, В.П. Пелипенко, М.Ф. Дахов // Радиотехника.

2020. No. 201. С. 186–193. DOI: 10.30837/rt.2020.2.201.18. (Дисертант приймав участь в розробці схемотехніки та програмного забезпечення блоку живлення, проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

15. Belyaeva, A. Effect of Barocryodeformation Degree at 77 K on the Precipitation Structure in CuCrZr Alloy / A. Belyaeva, **I. Kolenov**, P. Khaimovich, A. Galuza, A. Savchenko // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. P. 271–281. **Q4** (Дисертант приймав участь в поставленні задач дослідження, проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

16. Belyaeva, A. Developments in Terahertz Ellipsometry: Portable Spectroscopic Quasi-Optical Ellipsometer-Reflectometer and Its Applications / A. Belyaeva, A. Galuza, **I. Kolenov**, S. Mizrakhy // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2021. Vol. 42, No. 2. P. 130–153. **Q2** (Дисертант приймав участь в поставленні задач дослідження, створенні квазіоптичної схеми приладу та системи автоматизації, проводив експериментальні дослідження, приймав участь в обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

17. Dzyubenko, M.I. Employment of gradient metal-film output mirrors in terahertz discharge lasers / M.I. Dzyubenko, S.O. Masalov, Y.E. Kamenev, **I.V. Kolenov**, V.P. Radionov, N.F. Dakhov, A.I. Puzak, O.I. Dmitruk // Radiofiz. elektron. 2021. Vol. 26, No. 4. P. 28–33. DOI: 10.15407/rej2021.04.028. (Дисертант приймав участь в створенні макету для проведення досліджень, системи керування установкою, проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

18. Galuza, A. Investigation of micro-arc oxidation coatings using sub-THz ellipsometry / A. Galuza, **I. Kolenov**, D. Vinnikov, S. Mizrakhy, A. Savchenko // Materials Characterization. 2022. Vol. 189. 111930. **Q1** (Дисертант приймав участь в поставленні задач дослідження, підготовці зразків до досліджень, проводив експериментальні дослідження, приймав участь в обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

19. Tikhonovsky, M. A. Developments in cryodeformation: upsetting under all-round compression / M. A. Tikhonovsky, P. A. Khaimovich, **I. V. Kolenov**, N. A. Shul'gin, V. S. Okovit // Low Temp. Phys. 2022. Vol. 48. P. 264. **Q3** (Дисертант приймав участь в поставленні задач дослідження, розробці оснастки для проведення осадки, проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

20. Belyaeva, A. I. Effect of low-temperature quasihydroextrusion on the structure and physical properties of CuCrZr alloy / A. I. Belyaeva, P. A. Khaimovich, A. A. Galuza, **I. V. Kolenov**, A. A. Savchenko // Low Temp. Phys. 2023. Vol. 49 (2). P. 238–247. **Q3** (Дисертант приймав участь в поставленні задач дослідження, проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

21. Haluza, O. Scale Modeling of the Influence of Multiple Localized Defects of Metal Surface on Optical Ellipsometry Results / O. Haluza, **I. Kolenov**, I. Gruzdo // East European J. Phys. 2024. No. 4. P. 334–340. DOI: 10.26565/2312-4334-2024-4-38. **Q3** (Дисертант приймав участь в поставленні задач дослідження, проводив експериментальні дослідження, обробляв

експериментальні дані, приймав участь в обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень).

22. Azarenkov, M. Thermographic method of activated carbon packing quality diagnostics in NPP air filters / M. Azarenkov, V. Lytvynenko, **I. Kolenov**, O. Haluza, A. Chupikov, V. Sokolenko, O. Roskoshna, M. Kanishcheva, V. Shatov // East European J. Phys. 2024. Vol. 2024 (1). P. 398–404. **Q3** (*Дисертант провів теоретичні дослідження, обробляв експериментальні дані, приймав участь в обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень*).

23. Haluza, O. Determination of Porosity and Moisture Content of Granular Activated Carbon Using Sub-Thz Ellipsometry / O. Haluza, **I. Kolenov**, V. Sokolenko, V. Lytvynenko, I. Gruzdo // J. Infrared MilliTerahz Waves. 2025. Vol. 46, No. 10. DOI: 10.1007/s10762-024-01029-1. **Q2** (*Дисертант приймав участь в поставленні задач дослідження, підготовці зразків до досліджень, проводив експериментальні дослідження, приймав участь в обробці експериментальних даних, обговоренні та узагальненні наукових результатів, розробці наукових положень*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

24. Belyaeva, A. I. Effect of the grain size of the precipitate distribution of the precipitate-strengthened CuCrZr alloy / A. I. Belyaeva, A. A. Galuza, P. A. Khaimovich, **I. V. Kolenov**, A. A. Savchenko, I. V. Ryzhkov, A. F. Shtan', S. I. Solodovchenko, N. A. Shulgin. // Plasma Phys. And Controlled Fusion: Int. Conf.-School, Book of Abstracts, Kharkiv, 2014. P. 56.

25. Беляева, А. И. Особенности формирования термических канавок на поверхности вольфрама при рекристаллизации / А. И. Беляева, **И. В. Коленов**, А. А. Савченко, П. Л. Вейцман // Физические явления в твердых телах: материалы XII Междунар. конф., Харьков, 2015. С. 80.

26. Belyaeva, A. I. Anisotropy of structure and properties of high-temperature strength CuCrZr alloy processed by ECAP / A. I. Belyaeva, **I. V. Kolenov**, A. A. Savchenko, P. L. Veitsman // Physical Phenomena in Solids: Materials XII Int. Conf., Kharkiv, 2015. P. 93.

27. Belyaeva, A. I. Applications of THz-range ellipsometry for functional materials diagnostics / A. I. Belyaeva, **I. V. Kolenov**, Ye. M. Kuleshov // Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies: 4th Russia-Japan-USA Symp., Chernogolovka, Russia, 2015. P. 135.

28. Belyaeva, A. I. THz modeling of influence of parallelepiped surface defects on optical ellipsometry measurements / A. I. Belyaeva, **I. V. Kolenov** // Proc. 9th Int. Kharkov Symp. Phys. Eng. Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, Kharkov, Ukraine, 2016. P. 1–4.

29. Belyaeva, A. I. Trends in sputtering: surface energy anisotropies / A. I. Belyaeva, A. A. Galuza, A. A. Savchenko, **I. V. Kolenov** // Problems of modern nuclear power: abstr. XIII Int. Sci. and Tech. Conf., Kharkiv, 2017. P. 21.

30. Беляева, А.И. Влияние квазигидроэктрузии на механические свойства и радиационную стойкость хром-циркониевой бронзы / А.И. Беляева, А.А. Галуза, **И.В. Коленов**, А.А. Савченко, П.А. Хаймович, Н.А. Шульгин, С.И. Солодовченко, И.В. Рыжков, А.Ф. Штань // Проблемы современной ядерной энергетике: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., Харьков, 2017. С. 60–61.

31. Galuza, A. Spectral quasi-optical terahertz ellipsometer / A. Galuza, A. Belyaeva, **I. Kolenov**, S. Mizrakhy // Proc. IEEE First Ukraine Conf. Electrical and Computer Eng., Kyiv, 2017. P. 118–122.

32. Galuza, A. Influence of parallelepiped surface defects on terahertz and optical ellipsometry measurements / A. Galuza, A. Belyaeva, **I. Kolenov** // Proc. IEEE First Ukraine Conf. Electrical and Computer Eng., Kyiv, 2017. P. 67–70.

33. Беляева, А.И. Влияние степени деформации барокриодеформированием при 77К на микроструктуру сплава БрХЦр / А.И. Беляева, П.А. Хаймович, А.А. Галуза, **И.В. Коленов**,

- А.А. Савченко, Н.А. Шульгин, С.И. Солодовченко, Е.В. Черняева // Перспективные материалы и технологии: материалы симпозиума, Брест, 2019. С. 99.
34. Belyaeva, A. I. Effect of deformation degree under quasihydroextrusion at 77K on the structure and properties of CuCrZr alloy / A.I. Belyaeva, P.A. Khaimovich, A.A. Galuza, **I.V. Kolenov**, A.A. Savchenko, N.A. Shul'gin // Physical Phenomena in Solids: Theses XIV Int. Conf., Kharkiv, 2019. P. 89.
35. Дзюбенко, М.І. Імпульсне джерело живлення лазерних світлодіодних лінійок для накачування ербієвого лазера / М.І. Дзюбенко, **І.В. Колонов**, В.П. Пилипенко, М.Ф. Дахов // XV міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології для захисту повітряного простору», Харків, Україна, 10-11 квітня, 2019.
36. Дзюбенко, М.І. Ербієвий лазер з діодною накачкою і модульованою добротністю / М.І. Дзюбенко, **І.В. Колонов**, В.П. Пилипенко, М.Ф. Дахов // XV міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології для захисту повітряного простору», Харків, Україна, 10-11 квітня, 2019. – С.503.
37. Дзюбенко, М.І. Безпечний для зору лазерний далекомір / М.І. Дзюбенко, **І.В. Колонов**, В.П. Пилипенко, М.Ф. Дахов // «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» Збірник XIX науково-технічної конференції, м.Ченігів, Україна, 5-6 вересня 2019. – С.83.
38. Belyaeva, A. I. Influence of Pit-Type Localized Defects on the Optical Ellipsometry and Reflectometry Data: Quasi-optical Scale Modeling / A.I. Belyaeva, A.A. Galuza, **I.V. Kolenov**, A.A. Savchenko // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conf. Electrical and Computer Engineering, Lviv, Ukraine. 2019. P. 56–60.
39. Dzyubenko, M. Properties of One-Dimensional Metal Gratings at Inclined Incidence of Terahertz Radiation / M. Dzyubenko, V. Radionov, S. Masalov, Yu. Kamenev, **I. Kolenov**, V. Pelipenko, N. Dakhov // Proc. IEEE 10th Int. Kharkiv Symp. Phys. Eng. Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Kharkiv, 2020. P. 893–896. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252644.
40. **Колонов, І.** Расширение возможностей криодеформирования при всестороннем сжатии / **І. Колонов**, П. Хаймович, М. Тихоновский, Н. Шульгин, А. Левенец // Високочисті матеріали: матеріали доповідей 6-ї Міжнар. конф., Харків, 2021.
41. **Kolenov, I.** Influence of Contamination with Silicone Release Agent on the Ellipsometric Parameters of CFRP Surface in the Sub-THz Range / **I. Kolenov**, A. Galuza, A. Belyaeva, S. Mizrakhy, P. Nesterov, A. Savchenko // 2021 IEEE 3rd Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2021. P. 56–59. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575665.
42. Vinnikov, D. Plasma Electrolytic Oxidation of Al: Structure and Properties of Coatings / D.Vinnikov, V. Yuferov, **I. Kolenov**, S. Mizrakhy, I. Vysekantsev, I. Buriak // 2021 IEEE 3rd Ukraine Conf. Electrical and Computer Eng. (UKRCON). 2021. P. 478–481. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575341.
43. Galuza, A. Influence of the parallelepiped form localized defects on ellipsometry data: scale modeling / A. Galuza, **I. Kolenov**, A. Savchenko // Multiscale Phenomena in Condensed Matter: Online conference for young researchers, Kraków, 5–7 July 2021.
44. Khaimovich, P. A. Cryodeformation of Metals under All-Around Compression / P. A. Khaimovich, **I. V. Kolenov**, S. B. Sapozhkov // AIP Conf. Proc. 2022. Vol. 2486. 030014.
45. Galuza, A.A. Non-destructive testing of MAO alumina coatings using sub-THz ellipsometry / A.A. Galuza, **I.V. Kolenov**, D.V. Vinnikov, S.V. Mizrakhy // XIX Int. Sci. Conf. Electronics and Applied Physics (APHYS), Kyiv, Ukraine, 2023.

7. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо.

Основні теоретичні та прикладні результати дисертаційної роботи Колонова І. В. були широко представлені та обговорені на провідних науково-практичних конференціях, симпозіумах і семінарах, зокрема:

International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop "Nano- and micro-sized structures in plasmas" (Kharkiv, Ukraine, 2014); XII Международная конференция "Физические явления в твердых телах" (Харьков, Украина, 2015); 9th Int. Kharkov Symp. On Physics and Eng. Of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkov, Ukraine, 2016); 2017 IEEE First Ukraine Conf. On Electrical and Computer engineering (Kyiv, Ukraine, 2017); XIII Международная научная и техническая конференция "Проблемы современной ядерной энергетике" (Харьков, Украина, 2017); XIII Int. Scientific and Technical Conference "Problems of modern nuclear power" (Kharkiv, Ukraine, 2017); 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (Lviv, Ukraine, 2019); XV міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології для захисту повітряного простору» (Харків, Україна, 2019); «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» Збірник XIX науково-технічної конференції (м. Чернігів, Україна, 2019); Тези доповідей XIV Міжнародної конференції "Фізичні явища в твердих тілах" (Харків, Україна, 2019); 2020 IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW) (Kharkiv, Ukraine, 2020); Multiscale Phenomena in Condensed Matter Online conference for young researchers (Kraków, Poland, 2021); 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (Ukraine, 2021); 6 Міжнародна конференція «Високочисті матеріали: отримання, застосування, властивості» (Харків, Україна, 2021); XIX international scientific conference electronics and applied physics APHYS (Kyiv, Ukraine, 2023).

8. Наукове значення виконаного дослідження із зазначенням можливих наукових галузей та розділів програм навчальних курсів, де можуть бути застосовані отримані результати.

Отримані в дисертаційній роботі результати мають важливе наукове значення для розвитку фізики твердого тіла, матеріалознавства та методів неруйнівної діагностики матеріалів, зокрема в галузі ядерної та термоядерної енергетики. У роботі розвинено фізичні основи оптичної та радіохвильової еліпсометрії для дослідження структурного стану й фізичних властивостей поверхневих і приповерхневих шарів матеріалів, що зазнають радіаційних та термомеханічних впливів. Це сприяє поглибленню сучасних уявлень про взаємодію електромагнітного випромінювання з неоднорідними та структурно складними поверхнями твердих тіл.

Розроблені фізичні моделі та підходи до розв'язання зворотних задач еліпсометрії розширюють теоретичний інструментарій оптичних і квазіоптичних методів дослідження матеріалів і можуть бути використані для аналізу широкого класу металевих, керамічних та композиційних матеріалів, у тому числі з покриттями та розвинутою шорсткістю поверхні. Отримані закономірності мають міждисциплінарний характер і є корисними для подальших фундаментальних досліджень у суміжних галузях фізики конденсованого стану та прикладної електродинаміки.

Результати роботи можуть бути використані у наукових дослідженнях і при підготовці фахівців за такими науковими галузями: фізика твердого тіла; фізика плазми та керований термоядерний синтез; матеріалознавство та інженерія матеріалів; прикладна

електродинаміка; оптика та квазіоптика; методи неруйнівного контролю; ядерна та термоядерна енергетика.

Отримані наукові результати та розроблені методичні підходи можуть бути використані при викладанні окремих розділів навчальних курсів закладів вищої освіти, зокрема:

«Фізика твердого тіла», «Оптичні методи дослідження матеріалів», «Електродинаміка та поширення електромагнітних хвиль», «Квазіоптика та терагерцова фізика», «Методи неруйнівного контролю», «Матеріалознавство для ядерної та термоядерної енергетики», «Фізичні основи діагностики матеріалів».

Таким чином, виконане дослідження робить внесок у розвиток фундаментальних і прикладних напрямів сучасної фізики та матеріалознавства, а також має освітній потенціал для формування сучасних навчальних програм і спеціалізованих курсів.

9. Практична цінність результатів дослідження із зазначенням конкретного підприємства або галузі народного господарства, де вони можуть бути застосовані.

Отримані в дисертаційній роботі результати мають практичну цінність для ядерної та термоядерної енергетики, матеріалознавства, приладобудування та галузей, пов'язаних із контролем і прогнозуванням експлуатаційного ресурсу конструкційних матеріалів в умовах екстремальних впливів. Розроблені фізичні основи, моделі та методи оптичної і радіохвильової еліпсометричної діагностики можуть бути використані для неруйнівного контролю стану поверхневих і приповерхневих шарів матеріалів, підданих радіаційним, термомеханічним та електрофізичним впливам.

Практичне застосування отриманих результатів можливе на підприємствах ядерної енергетики та в науково-технічних організаціях, що займаються розробкою, експлуатацією та продовженням ресурсу ядерних установок і термоядерних систем, зокрема при діагностиці матеріалів активної зони, першої стінки, дивертора, вакуумної камери, теплообмінного обладнання та захисних покриттів. Запропоновані методи можуть бути використані для моніторингу ефективності термомеханічних і електрофізичних обробок, контролю стану оксидних та ерозійних шарів, а також для раннього виявлення радіаційно-індукованих пошкоджень.

Результати роботи можуть бути впроваджені в діяльність науково-дослідних установ та підприємств приладобудівної галузі, що спеціалізуються на створенні засобів неруйнівного контролю та діагностичного обладнання, зокрема при розробці еліпсометричних, квазіоптичних і радіохвильових вимірювальних систем. Запропоновані підходи також є корисними для підприємств металургійної та машинобудівної галузей, де необхідний контроль стану поверхні матеріалів після термічної, механічної або плазмової обробки.

Практична цінність отриманих результатів полягає також у можливості їх використання в енергетичному машинобудуванні, авіаційно-космічній та оборонній промисловості, а також у галузях високотехнологічного виробництва, де пред'являються підвищені вимоги до надійності та довговічності матеріалів. Застосування розроблених методів сприяє підвищенню ефективності діагностики, зменшенню витрат на експериментальні дослідження та підвищенню безпеки експлуатації відповідних об'єктів.

Таким чином, результати дисертаційної роботи можуть бути використані в діяльності підприємств і установ ядерно-енергетичного комплексу, науково-дослідних організацій, а також у приладобудуванні та суміжних галузях народного господарства для вирішення практичних завдань контролю та оцінки стану матеріалів.

10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення.

Структура дисертації є обґрунтованою, послідовною та повністю відповідає вимогам, встановленим Міністерством освіти і науки України до оформлення науковокваліфікаційних робіт. Зміст дисертації охоплює всі необхідні елементи - від обґрунтування актуальності теми, формулювання мети та завдань дослідження, до опису методології, експериментальної перевірки, практичних результатів та висновків. Кожен розділ завершується окремими висновками, що забезпечує можливість цілісного сприйняття матеріалу. Дисертація містить вступ, сім розділів основного тексту, висновки, список використаних джерел і перелік публікацій. У роботі використано точну наукову термінологію, викладення матеріалу відзначається логічною структурованістю, чіткістю формулювань, академічною стилістикою та дотриманням норм української літературної мови. Таким чином, дисертація за структурою, мовою і стилем викладення повністю відповідає чинним вимогам МОН України.

11. У докторській дисертації “Фізичні основи еліпсометричної діагностики змін структури і властивостей перспективних матеріалів ядерних установок під впливом опромінення і термомеханічної обробки” матеріали кандидатської дисертації “Вплив рівноканального кутового пресування та квазігідроекструзії на розподілення включень вторинних фаз у дисперсійно-зміцненому сплаві Cu-Cr-Zr” Колонова Івана Вікторовича не використовувались.

12. Відповідність дисертації паспорту спеціальності, за якою вона представлена до захисту.

Дисертація Колонова Івана Вікторовича за метою, обсягом та змістом дослідження відповідає паспорту спеціальності 01.04.07-Фізика твердого тіла (фізико-математичні науки) (п.2: “Енергетичний спектр твердих тіл (фонони, спектри електронних збуджень, магнони та ін.) та методи його вивчення (оптична та фотоакустична спектроскопія, тощо). Оптичні властивості екситонів та інших квазічастинок, в тому числі при інтенсивному збудженні. Експериментальне та теоретичне вивчення міжквазічастинкових взаємодій.” та п.6: “Взаємодія твердих тіл з потоками частинок, іонізуючого та потужного електромагнітного опромінення. Дефекти (дефектоутворення, радіаційні дефекти, електронно-стимульовані реакції дефектів, метастабільність), домішки та їх агрегати, їх динаміка і перебудова та вплив на фізичні властивості твердих тіл”.

13. З урахуванням зазначеного,

на фаховому науковому семінарі Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України ухвалили:

13.1. Дисертаційна робота Колонова Івана Вікторовича “Фізичні основи еліпсометричної діагностики змін структури і властивостей перспективних матеріалів ядерних установок під впливом опромінення і термомеханічної обробки” є завершеною науковою працею, у якій 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.

13.2. Основні наукові положення, методичні розробки, висновки та практичні рекомендації, викладені у дисертаційній роботі, логічні, послідовні, аргументовані, достовірні, достатньо обґрунтовані. Дисертація характеризується єдністю змісту.

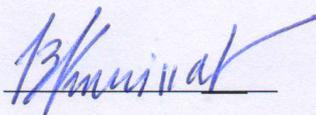
13.3. Всього за темою дисертації опубліковано 45 робіт, з них 23 статті в спеціалізованих фахових виданнях серед яких 20 індексуються в наукометричній базі даних Scopus, 11 належать до квартиля Q3, 7 належать до квартиля Q1 та Q2, 9 статей у збірниках праць міжнародних конференцій та 13 тез доповідей міжнародних наукових конференцій.

13.4. Дисертація підготовлена за спеціальністю 01.04.07–фізика твердого тіла (фізико-математичні науки), відповідає паспорту спеціальності 01.04.07 - фізика твердого тіла (фізико-математичні науки) (Перелік наукових спеціальностей, затверджений Наказом Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України 14 вересня 2011 року № 1057) та вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, п. 7 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197.

13.5. Дисертація є результатом самостійних досліджень, не містить елементів фальсифікації, компіляції, плагіату та запозичень, що констатує відсутність порушення академічної доброчесності. Використання текстів інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

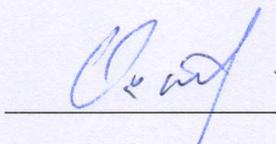
13.6. З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Колонова Івана Вікторовича, дисертаційна робота “Фізичні основи еліпсометричної діагностики змін структури і властивостей перспективних матеріалів ядерних установок під впливом опромінення і термомеханічної обробки” рекомендується для подання до розгляду у спеціалізовану вчену раду.

Рецензент,
д. ф.-м. н., професор
член-кор. НАН України



Вячеслав Клепиков

Рецензент,
д. ф.-м. н., с.н.с.



Павло ОСТАПЧУК

Рецензент,
д.т.н., с.н.с.



Микола БАЗАЛЄСВ