

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Поліщука Сергія Станіславовича

СТРУКТУРА І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ З КВАЗІКРИСТАЛІЧНИМИ ТА АПРОКСИМАНТНИМИ ФАЗАМИ,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.13 – фізика металів

1. Актуальність теми дисертації

Створення новітніх функціональних матеріалів на основі сплавів зі складною кристалічною будовою (СКБ) та керованими електрофізичними і механічними параметрами на сьогодні є одним з важливих напрямів у фізиці металів та фізичному матеріалознавстві. Перспективними серед таких матеріалів є квазікристали (кристали з квазіперіодичним дальнім порядком) та апроксиманти (періодичні кристали зі спорідненим до квазікристалів локальним упакуванням атомів), оскільки вони поєднують високі механічні характеристики та корозійну стійкість з малою електропровідністю та низьким змочуванням. У системах на основі вказаних матеріалів може бути забезпечене кероване варіювання механічних та електричних параметрів у широкому діапазоні як при створенні різних типів покриттів та плівок, так і об'ємних функціональних матеріалів різного призначення.

Однак, необхідно відзначити, що ряд важливих питань щодо умов та механізмів формування атомно-просторової структури СКБ на основі квазікристалів та апроксимантів, зокрема, у системах на основі алюмінію, потребує подальших активних досліджень. Серед них значна група питань пов'язана з визначенням оптимальних умов отримання квазікристалів та апроксимантів на основі алюмінію (Al-Cu-Fe, Al-Cr-Fe, Al-Co) через осадження парової фази на підкладці та шляхом твердофазних реакцій. При цьому потребують з'ясування залежності електромеханічних характеристик утворених систем від хімічного складу та структурної досконалості матеріалів, зокрема, вплив розміру структурних компонентів фаз СКБ на їх механічні властивості, а саме, на формування залишкових напружень та їх релаксацію. Важливим є і пов'язане з цим питання щодо визначення умов осадження, за яких реалізується утворення поверхонь, що не містять тріщин та характеризуються високою адгезією до підкладок. Взагалі, можливості практичного застосування структур на основі квазікристалів та апроксимантів значною мірою визначаються здатністю отримання механічно стійких СКБ-покриттів з контрольованою міцністю, тріщиностійкістю та низьким

механічним зношування. Відтак, нагальною є потреба і у створенні комплексу експериментальних методів контролю механічного стану СКБ-покриттів на всіх етапах формування кристалічних покриттів та плівок на підкладках.

Зважаючи на викладене, тема дисертаційної роботи Поліщука С.С. «Структура і фізико-механічні властивості покриттів на основі алюмінію з квазікристалічними та апроксимантними фазами» є **актуальною**, оскільки передбачає як вирішення ряду фундаментальних задач з фізики формування покриттів на основі квазікристалічних та апроксимантних структур на заданих поверхнях, так і розгляд можливостей практичного застосування покриттів та плівок з такими фазами як елементів новітніх функціональних матеріалів.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами темами

Дисертаційна робота Поліщука С.С. виконувалася відповідно до тематики наукових досліджень відділів будови та властивостей твердих розчинів та фізики дисперсних систем Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України. Дослідження, представлені в роботі, було проведено в рамках виконання наукових тем з держбюджетним фінансуванням: «Структурно-фазовий стан і фізико-механічні властивості гетерофазних систем на основі елементів з обмеженою взаємною розчинністю» (№055/06, 2006-2010 рр; «Вплив інтенсивної пластичної деформації на формування структурно-фазових станів і фізико-механічні властивості металевих матеріалів на основі Al, Fe, Cu, Mg» (№ 055/11, 2011-2015); «Закономірності формування твердих розчинів та інтерметалідних фаз в багатокомпонентних металічних системах в умовах дії термосилових обробок і в результаті фазових перетворень» (№055/16, 2016-2020). Крім того, частина результатів дисертації була отримана під час досліджень, виконаних дисертантом в Інституті Жана Ламура (м. Нансі, Франція, 2009-2011 рр.) при роботі над міжнародним проєктом «Development of wear resistant coatings based on complex metallic alloys for functional applications».

3. Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

У результаті виконання дисертаційного дослідження Поліщуком С.С. було отримано ряд наукових результатів, які встановлюють нові фізичні закономірності процесів формування квазікристалічної та апроксимантної фаз в гомогенних та гетерогенних матеріалах систем Al-Cu-Fe, Al-Cr-Fe, Al-Co, отриманих методами фізичного осадження у вакуумі. Серед них найбільш значущими вважаю наступні:

- визначено фізичні умови формування квазікристалічних та апроксимантних структур в процесі фізичного осадження парової фази на прикладі систем Al-Cu-Fe, Al-Cr-Fe, Al-Co та визначено вплив температури осадження на параметри мікроструктури і структурну досконалість квазікристалів та апроксимантів;

- вперше експериментально визначено комплекс механічних, трибологічних, дисипативних та електрофізичних характеристик гомогенних та гетерогенних покриттів систем Al-Cu-Fe та Al-Cr-Fe, що містять квазікристалічну або апроксимантну фази. З'ясовано механізми дисипації енергії в наноструктурованих та гетерогенних покриттях Al-Cu-Fe та Al-Cr-Fe, що містять квазікристалічну або апроксимантну фази;

- показано, що основним механізмом релаксації напружень у квазікристалічних покриттях Al-Cu-Fe є наскрізне розтріскування і визначено значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень матеріалу квазікристалічного покриття;

- побудовано модель розподілу залишкових напружень у покриттях та визначено вплив коефіцієнтів температурного розширення матеріалів підкладок та різних типів буферних шарів на величину напружень у квазікристалічних покриттях системи Al-Cu-Fe;

- встановлено, що зменшення розміру зерен в квазікристалічних та апроксимантних матеріалах до наномасштабних величин призводить до значного зростання їх власної демпфуючої здатності при підвищених температурах. Показано, що температурна залежність демпфуючої здатності в наноструктурованих СКБ-матеріалах має пороговий характер;

- вперше розроблено методику оцінки макронапружень у квазікристалічних покриттях рентгенівським методом.

Нові наукові результати, отримані в роботі Поліщука С.С., є важливими для подальшого розвитку методів створення покриттів та плівок на основі гомогенних та гетерогенних систем Al-Cu-Fe, Al-Cr-Fe, Al-Co Al-Cu-Fe та Al-Cr-Fe з квазікристалічними та апроксимантними фазами.

4. Практичне значення одержаних результатів

У практичному аспекті наукові результати, одержані в дисертаційній роботі Поліщука С.С., закладають фізико-хімічні принципи розробки методів створення новітніх функціональних покриттів та плівок на основі квазікристалічних та апроксимантних структур шляхом фізичного осадження. Зокрема, можливості таких розробок відкривають встановлені в роботі закономірності формування квазікристалічних та апроксимантних структур в

процесі фізичного осадження парової фази систем Al-Cu-Fe, Al-Cr-Fe, Al-Co, визначені умови формування бездефектних покриттів із квазікристалічною структурою, запропонована модель розподілу залишкових напружень у покриттях та комплекс експериментальних методів оцінки макронапруг у квазікристалічних покриттях.

Одержані в роботі результати також можуть бути використані в навчальному процесі при викладанні дисциплін «Кристалічна будова твердих тіл», «Квантова теорія твердого тіла» за освітньо-професійною програмою «Фізика» (бакалаврат) та дисципліни «Експериментальні методи дослідження наносистем» за освітньо-науковою програмою «Фізика наносистем» (магістратура) на фізичному факультеті Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

5. Структура за зміст дисертації, її завершеність та відповідність встановленим вимогам

Дисертаційна робота Поліщука С.С. складається зі вступу, 6 розділів, висновків та списку літератури, що включає 312 найменувань. Робота складає 320 сторінок тексту, 128 рисунків, 15 таблиць.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету, об'єкт та предмет дослідження, визначено наукову новизну отриманих результатів та їх практичну цінність. Вказано задачі, які вирішувалися в ході виконання дисертаційної роботи та методи досліджень. Визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію роботи та публікації автора.

У **першому розділі** виконано аналіз літературних джерел, в яких розглянуто особливості атомно-просторової структури квазікристалів та апроксимантів, закономірності її формування в системах на основі алюмінію, представлено дані щодо стабільності таких систем та їх фізико-механічних характеристик. Наведено наявні дані щодо методів пошуку нових систем квазікристалів та основні принципи кластерного підходу щодо визначення оптимального хімічного складу квазікристалічних фаз в системах на основі алюмінію. Проаналізовано фізичні методи створення квазіперіодичних та апроксимантних структур при осадженні парової фази, основні чинники, що визначають стабільність утворених покриттів, зокрема, хімічний склад, додаткові кристалічні фази, макронапруги та розміри структурних елементів.

Виконаний огляд літературних джерел дозволив автору окреслити коло питань, які на момент початку виконання роботи були досліджені недостатньо і потребували подальшого розгляду. В першу чергу, це стосується визначення

умов, за яких можливий синтез стійких, механічно міцних та тріщиностійких квазіперіодичних та апроксимантних структур. На основі критичного аналізу наявної в літературі інформації щодо структури, властивостей та методів створення квазіперіодичних та апроксимантних систем автором було сформульовано задачі власного дослідження.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено розгляду комплексу методичних питань, пов'язаних з виконанням та забезпеченням експериментальних досліджень. Зокрема, розглянуто методи формування покриттів через електронно-променеве фізичне осадження у вакуумі та магнетронне розпилення. Описано експериментальні методи, які залучалися для визначення структурних характеристик покриттів, кристалографічної текстури, залишкових напруг, наведено характеристики та режими роботи рентгенівських дифрактометрів. Розглянуто методи визначення мікротвердості та пластичності, трибологічних характеристик та дисипативних властивостей покриттів. Крім того, представлено методику вимірювання електрофізичних характеристик покриттів у мікрохвильовому діапазоні, яка використовувалася у роботі. Необхідно відзначити, що по кожній з наведених експериментальних методик розглянуто робочі режими відповідних приладів, вказано діапазони зміни керованих параметрів, проаналізовано джерела можливих випадкових та систематичних похибок. Залучені методи синтезу покриттів з квазіперіодичними або апроксимантними фазами та дослідження їх фізичних характеристик є взаємодоповнюючими, що дозволяє отримати достовірну інформацію про фізичні процеси на усіх етапах формування та тестування отриманих матеріалів.

У **третьому розділі** виконано дослідження впливу температури підкладки на формування квазікристалічної структури при осадженні парової фази. Зокрема, для систем Al-Cu-Fe та Al-Cr-Fe встановлено, що зниження температури підкладки в процесі осадження призводить до зменшення середнього розміру блоків квазікристалічної фази з 500-600 нм до нанорозмірів 30-40 нм, тобто відбувається наноструктурування покриттів. Показано, що в системі Al-Co при фізичному осадженні парової фази формуються як квазікристалічна, так і ряд апроксимантних фаз, причому як і в системах Al-Cu-Fe та Al-Cr-Fe зниження температури підкладки спричиняє зменшення розмірів кристалітів до наномасштабу. Загалом, для розглянутих систем доведено, що при осадженні парової фази відповідного елементного складу при температурах, що не перевищують значень 0,4–0,5 від температури плавлення підкладки, відбувається формування гетерофазних структур з

нанорозмірними кристалітами, на відміну від систем з істотно більшим розміром зерен, які формуються при більш високих температурах підкладки.

Четвертий розділ присвячено результатам дослідження напружень у квазікристалічних покриттях Al-Cu-Fe та Al-Cu-Fe-B. Показано, що для систем на основі Al-Cu-Fe при високих температурах кремнієвих і сталевих підкладок та при подальшому їх охолодженні до кімнатної температури в осаджених шарах виникають значні залишкові напруження (200 – 1200 МПа), які спричиняють розтріскування та відшарування покриттів. Запропоновано модель розподілу залишкових напружень при осадженні на підкладки з використанням буферних шарів. На прикладі буферного шару нікелю показано, що такі шари мало впливають на макронапруження, а, головним чином, покращують адгезію покриттів до підкладок. При дослідженні квазікристалічних покриттів Al-Cu-Fe-B на кремнієвих підкладках для аналізу макронапружень залучалися два взаємодоповнюючі методи – рентгенівський та метод визначення напруження за зміною кривизни підкладки (метод Стоні). Встановлено, що при зростанні товщини плівки існують певні граничні значення товщин, починаючи з яких макронапруги починають спадати, а їх релаксація супроводжується тріщиноутворенням у покриттях. Вказано вираз, який дозволяє визначити критичну товщину покриття, нижче якої тріщини не виникають. У цілому, значний об'єм експериментальних даних щодо взаємозв'язку між товщинами покриттів та величинами макронапруг і пов'язаними з цим процесами тріщиноутворення є важливим базисом для прогнозування механічних характеристик покриттів Al-Cu-Fe, Al-Cu-Fe-B при осадженні парової фази.

У **п'ятому розділі** наведено результати дослідження комплексу фізичних характеристик (дюрOMETричних, трибологічних, дисипативних та електрофізичних параметрів) покриттів на основі квазіперіодичних та апроксимантних фаз. Показано, що мікротвердість покриттів на основі систем Al-Cu-Fe суттєво залежить від розміру кристалітів, досягаючи максимуму в області 40 – 50 нм і монотонно зменшуючись при подальшому наноструктуруванні. Виявлено вплив фазового складу покриттів Al-Cu-Fe на їх трибологічні характеристики – в більш пластичних двофазних покриттях (квазікристалічна матриця та пластична β – фаза) в порівнянні з однофазними квазікристалічними покриттями зношування поверхні є меншим. На відміну від цього, стійкість однофазних квазікристалічних покриттів до холодного зварювання у вакуумі поступається такій у двофазних системах. Дослідження дисипативних характеристик покриттів показали, що наноквазіперіодичні покриття характеризуються значним демпфуванням, яке залишається

незмінним після довготривалих навантажень, причому при зменшенні кристалітів до нанорозмірів демпфуюча здатність покриттів зростає. Нарешті, показано, що однофазні квазікристалічні покриття мають суттєво більший питомий електроопір, ніж гетерофазні системи з кристалічними фазами. Отриманий значний масив експериментальних даних щодо впливу структурно-фазових характеристик покриттів на їх ключові фізичні параметри, які визначають можливості практичного застосування систем на основі квазікристалів, дозволяє виконувати прогнозування необхідних властивостей покриттів залежно від умов їх можливої експлуатації.

Шостий розділ дисертаційної роботи присвячений дослідженням процесів фазоутворення через твердофазні реакції у багатошаровій системі фольг Al/Cu. Утворення нових фаз у фольгах Al/Cu у процесах нагрівання досліджувалося комплексно – методами рентгенівської дифрактометрії, скануючої та трансмісійної електронної мікроскопії, диференціальної скануючої калориметрії та шляхом вимірювання електричного опору. Виявлено існування ряду фаз (Al_2Cu , Al_4Cu_9 , $\beta_1\text{-AlCu}_3$, $\gamma_2\text{-Al}_4\text{Cu}_9$), які формувалися в процесах взаємної дифузії Al та Cu, встановлено залежність характеристик фазових перетворень (кінетика фазоутворення, тепловий ефект) від періоду модуляції багатошарових фольг Al/Cu, запропоновано модель формування фаз на міжфазних границях Al та Cu. Результати розділу є корисними для розуміння фазового складу та фізичних характеристик періодичних систем на основі фольг Al/Cu з різним характером модуляції розташування шарів.

Дисертаційна робота Поліщука С.С. оформлена у відповідності до вимог, наведених у Наказі МОН України «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» від 12.01.2017 №40 і являє завершене наукове дослідження.

6. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та їхня достовірність

Необхідно відзначити, що експериментальні результати, отримані в дисертаційній роботі Поліщука С.С., є достовірними, а висновки, зроблені на їх основі, добре обґрунтованими, що визначається декількома чинниками. Перш за все, це комплексний характер дисертаційної роботи, в якій поєднується створення покриттів та плівок на основі квазікристалів та апроксимантів в системах на основі алюмінію методом осадження парової фази з застосуванням сучасних експериментальних методів визначення структурно-фазового стану утворених систем та комплексу їх фізичних

характеристик. До виконання роботи були залучені добре апробовані методи рентгеноструктурного аналізу (фазовий аналіз, текстурний аналіз, визначення залишкових напруг рентгенівським методом, високотемпературна рентгенівська дифрактометрія), метод Стоні, електронна мікроскопія, диференціальна сканувальна калориметрія, метод ідентування для визначення мікротвердості, методики вимірювання трибологічних та дисипативних характеристик покриттів, визначення електрофізичних параметрів у мікрохвильовому діапазоні. Разом з експериментальними дослідженнями виконувалося моделювання розподілу залишкових напружень в наближенні Тсуї та Клайна. Вказані методи адекватно відповідають характеру фізичних процесів при формуванні покриттів на основі квазікристалів та апроксимантів, змінам їх фізичних характеристик та інформативно доповнюють один одного.

Необхідно також відзначити коректне методичне забезпечення експериментів, яке включає калібрування приладів з використанням модельних зразків, контроль за відтворюваністю результатів, ретельне врахування джерел можливих систематичних експериментальних спотворень та мінімізацію випадкових похибок. Крім того, інтерпретація результатів виконувалась автором комплексно, з використанням усіх наявних даних щодо методів і режимів формування покриттів на основі квазікристалів та сукупності значень різних фізичних параметрів таких систем, порівнянням отриманих результатів з даними досліджень інших авторів. Завдяки цьому в роботі відсутні внутрішні протиріччя в основних твердженнях та висновках, результати окремих розділів дисертації логічно узгоджені та є такими, що взаємно доповнюють одне одного.

7. Повнота відображення результатів дослідження в опублікованих наукових працях

За матеріалами дисертаційної роботи Поліщука С.С. опубліковано 37 наукових робіт, з яких 21 стаття, з них 8 статей у реферованих журналах, віднесених до 1-го і 2-го квінтилів (Q1 і Q2), 8 статей в журналах, віднесених до 3-го та 4-го квінтилів (Q3 і Q4), 5 статей у журналах, включених до переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»). Матеріали дисертації пройшли належну апробацію, будучи представлені на 11 міжнародних наукових конференціях і відображені в 16 тезах та матеріалах цих конференцій. Зміст дисертації повністю відповідає матеріалам, викладеним у вказаних статтях.

8. Дискусійні положення та зауваження щодо змісту і оформлення дисертації

При розгляді дисертаційної роботи Поліщука С.С. необхідно висловити наступні зауваження:

1. При визначенні такого ключового поняття, як «квазікристал», у дисертаційній роботі наведено три різні формулювання: стор. 22: квазікристали – це аперіодичні кристали, які мають дальній квазіперіодичний порядок та характеризуються некристалографічною точковою групою симетрії; стор. 35: "квазікристал" є просто скороченням терміну "квазіперіодичний кристал", з двома умовами: а) квазікристал є строго аперіодичним (оскільки математичне визначення квазіперіодичності включає періодичність, як спеціальний випадок), б) його дифрактограма не містить явних підсистем сильних і слабких бреггівських піків; стор. 40: структура є квазікристалом, якщо вона має наступні властивості: 1) впорядкована, але не періодична, 2) має дальній квазіперіодичний трансляційний порядок і дальній орієнтаційний порядок, 3) демонструє інваріантність при масштабуванні і самоподібність структури, 4) має скінченну кількість протоплиток/елементарних комірок, 5) має дискретну дифракційну картину. Яке з цих означень квазікристалу, на думку дисертанта, найбільш точно визначає поняття «квазікристал»?
2. У дисертаційній роботі для отримання покриттів та плівок використовувалося два методи приготування покриттів із квазікристалічною або апроксимантною структурою – електронно-променеве осадження (стор. 107) і магнетронне розпилення (стор. 115). Чи існує різниця у структурі квазікристалічної фази в покриттях, отриманих за допомогою цих методів?
3. У роботі зроблено висновок (стор. 147), що наноструктурована квазікристалічна фаза в покриттях характеризується високим рівнем фазонного безладу, який проявляється в зміщеннях рентгенівських піків відносно їх «ідеальних» положень для квазікристалічної структури. На жаль, в роботі не наведено відповідного аналізу дифрактограм, який би засвідчив прояв фазонного безладу.
4. Стверджується (стор. 149), що кубічна γ -латунна $\text{Al}_3(\text{Cr,Fe})_4$ фаза, на відміну від інших апроксимантних фаз, не є «класичним» апроксимантом до квазікристалів, тобто її структура не може бути описана за допомогою високорозмірної кристалографії. Подібні γ -латунні фази існують в деяких подвійних, потрійних та тетрарних системах, в тому числі, в таких як Al–Cu, Al–Fe–Si, Al–Cr, Al–Cu–Cr, Al–Fe–Cr. Чи відрізняються властивості таких

апроксимантів від властивостей «класичних» апроксимантів та квазікристалів?

5. У дисертаційній роботі використовується поняття «псевдонапруження» (наприклад, стор. 203), яке пов'язується з мікроскопічною неоднорідністю зерен у полікристалі, а також різницею коефіцієнтів термічного розширення, межі плинності, пружних модулів зерен двох фаз. Однак, при цьому не пояснюється зв'язок між псевдомакронапруженнями і мікронапруженнями. Варто також прояснити, що мається на увазі під мікроскопічною неоднорідністю зерен.
6. У розділі 5 показано (напр., на стор. 240), що зменшення розміру зерен в квазікристалічних та апроксимантних матеріалах до наномасштабних величин призводить до значного зростання їх власної демпфуючої здатності при підвищених температурах внаслідок домінуючої ролі в розсіянні механічної енергії зернограничних процесів, таких як генерація і рух зернограничних дислокацій, накопичення дефектів на границях зерен тощо. Але не проаналізовано, в якій мірі ця особливість розсіяння механічної енергії є характерною тільки для наноструктурованих матеріалів зі складною кристалічною будовою, чи вона має спостерігатися для всіх наноструктурованих систем незалежно від їх кристалічної будови.

Однак, зроблені зауваження не знижують цінності одержаних у дисертаційній роботі результатів, не ставлять під сумнів достовірність та обґрунтованість основних положень, що виносяться на захист і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

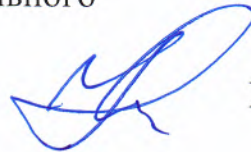
9. Загальний висновок щодо дисертаційної роботи та її відповідність установленим вимогам

Дисертаційна робота Поліщука С.С. «Структура і фізико-механічні властивості покриттів на основі алюмінію з квазікристалічними та апроксимантними фазами» є завершеною науковою працею, в якій представлено розв'язок актуальної задачі фізики металів, а саме, встановлено фізичні закономірності формування квазікристалічних або апроксимантних фаз в системах на основі алюмінію та впливу їх структури на комплекс фізичних параметрів таких систем. Визначено фізико-хімічні принципи розробки методів створення новітніх функціональних покриттів та плівок на основі квазікристалічних та апроксимантних структур шляхом фізичного осадження. Матеріали дисертації повністю відображені в статтях, які відповідають вимогам до публікацій, що презентують результати досліджень

на здобуття наукового ступеня доктора наук, а також пройшли належну апробацію на міжнародних фахових наукових конференціях.

Таким чином, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Поліщука С.С. «Структура і фізико-механічні властивості покриттів на основі алюмінію з квазікристалічними та апроксимантними фазами», подана на здобуття наукового ступеню доктора фізико-математичних наук, за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів відповідає спеціальності 01.04.13 – фізика металів та вимогам «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261 (зі змінами і доповненнями, внесеними постановами Кабінету Міністрів України від 3 квітня 2019 року №283 та від 19 травня 2023 року №502), а її автор – Поліщук Сергій Станіславович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.13 – фізика металів.

Офіційний опонент,
професор кафедри загальної фізики
фізичного факультету Київського національного
університету імені Тараса Шевченка,
доктор фіз.-мат. наук, професор



Микола БОРОВИЙ

Підпис професора Миколи БОРОВОГО засвідчую

ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР НДЧ
КАРАУЛЬНА І.В.
05.07.2023

