

ВІДГУК

офіційного опонента доктора фізико-математичних наук, професора

Прилуцького Юрія Івановича

на дисертаційну роботу **Красікової Ірини Євгеніївни**

“Нові кількісні методи визначення структури матеріалів у електронній мікроскопії”, представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 — фізика твердого тіла

Важливість всебічного дослідження структури матеріалів диктує необхідність розвитку нових підходів щодо одержання та оброблення електронних зображень адресно приготовлених зразків, зокрема їх цифрового оброблення із застосуванням сучасних математичних методів. Ця ключова задача фізики твердого тіла наразі стає все більш актуальною з огляду на стрімкий розвиток обчислювальної техніки, її швидке проникнення в інструментарій фізичних досліджень та зміну орієнтованості традиційного математичного апарату на вирішення конкретних прикладних проблем.

Відповідні структурні параметри досліджуваних матеріалів можуть бути істотно доповнені характеристиками, заснованими на парадигмі фрактальності щодо кількісної характеристики геометричних і статистичних властивостей структури цих матеріалів. Тому дисертаційна робота, присвячена розробці методики визначення фрактальних характеристик зображень структури матеріалу та включає розроблення програмного забезпечення для оброблення цифрових зображень, зокрема отриманих за допомогою електронної мікроскопії, що дозволяє отримувати кількісний опис структури матеріалу, є актуальним дослідженням в галузі фізики твердого тіла. На це вказує і те, що робота виконувалася в рамках багатьох науково-дослідних тем відділу Прикладної математики та обчислювального експерименту в матеріалознавстві Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України: “Моделювання та обчислювальний експеримент в дослідженні фізико-механічних властивостей, властивостей інтер-

фейса та структуроутворення в гетерофазних композитах включаючи евтектичні”, “Побудова моделей та виконання на їх основі обчислювальних експериментів, які спрямовано на визначення, дослідження та прогноз фізико-механічних властивостей і оптимізацію технологій одержання конструкційних та захисних композитних матеріалів на основі сполук з ікосаедричними структурними фрагментами $B_{12}C_3(B_4C)$, $B_{12}O_x(B_6O)$, $B_{12}Si_2(SiB_6)$, AlB_{12} ”, “Комп'ютерне конструювання нових перспективних ударостійких матеріалів на основі тугоплавких сполук” та міжнародного проекту SPS NATO 985070 “New shock-resisting boron-based ceramics: computer modeling, production, testing” (“Новітня ударостійка боридна кераміка: комп'ютерне моделювання, виробництво, тестування”), 2016-2019 рр.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 3 розділів, висновків, списку використаної літератури та 2 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 137 сторінок, 45 рисунків та 4 таблиць, список використаних джерел (105 найменувань).

У **вступі** розкрито суть і стан наукових завдань, обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано головну мету, задачі та методи досліджень, вказано на зв'язок з науковими програмами, чітко визначено новизну отриманих результатів та обґрунтовано їхню практичну цінність. Також висвітлено особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів роботи та опубліковані праці, в яких відображено основний зміст роботи.

У **першому розділі** наведено аналітичний огляд літературних джерел за темою дисертаційної роботи, присвячених вивченню структури матеріалу та застосуванню для цієї мети методів фрактальної геометрії. Наведено приклади застосування фрактального та мультифрактального аналізу до зображень структури матеріалів, отриманих за допомогою електронної мікроскопії, з аналізом їх сильних сторін та недоліків за практичного

застосування, сформульовано суть фрактального підходу, який полягає в обробленні масштабуванням фрактальних структур та опису розподілу структурних характеристик за масштабування. Наведено переконливі дані того, що за допомогою фрактальної геометрії можна описати структуру матеріалів більш інформативно, аніж за допомогою інших методів, а також вказано на зв'язок фрактальних і мультифрактальних характеристик, які обчислюються разом з фізико-механічними параметрами матеріалу.

У **другому розділі** представлено розроблену методику характеризування структури матеріалів за їх електронно-мікроскопічним зображенням як послідовність етапів цифрового оброблення зображень з визначенням фрактальних та мультифрактальних характеристик. Як визначну знахідку обчислювальної фізики твердого тіла слід відзначити здійснене автором вдосконалення алгоритму обчислення характеристик фрактальних об'єктів та розроблену методику проведення кількісного визначення структурних параметрів матеріалу за його електронно-мікроскопічним зображенням. Особливої уваги заслуговує стійкість алгоритму до збурень вхідних даних, що є вирішальним для розв'язання прикладних задач і не зустрічалося досі у публікаціях з цієї тематики. Нарешті, розроблений метод реалізовано у комп'ютерну програму робочого місця користувача з чіткою інструкцією роботи з нею.

У **третьому розділі** за методологією застосування обчислювальної фізики проведено тестування розробленої методики для її верифікації на електронно-мікроскопічних зображеннях структури таких матеріалів: електронно-мікроскопічні зображення зразків плівок, одержаних магнетронним розпиленням титану; плівок, одержаних осадженням хрому в аргоні; гарячепресованих композитів системи $AlB_{12}-AlN$ з різним вмістом AlN . Вивчено взаємозв'язок мультифрактальних характеристик вищезазначених структур з їх фізико-механічними характеристиками.

Дисертаційна робота завершується висновками, які узагальнюють результати проведених досліджень.

Основні результати дисертації достатньо повно викладені в 11 статтях, опублікованих у фахових виданнях, а також в 7 тезах наукових конференцій.

Наукова новизна отриманих результатів, в першу чергу, полягає в тому, що:

- вперше розроблено стійкі методи та алгоритми реалізації математичних моделей застосування фрактального та мультифрактального формалізму для оброблення елементів структури на електронно-мікроскопічних зображеннях поверхні матеріалу та створено відповідне програмне забезпечення. За методологією застосування обчислювальної фізики твердого тіла виконане тестування розроблених програм, яке довело їх стійкість, адекватність отримуваних результатів та їх придатність до використання у матеріалознавчих дослідженнях;
- розроблено та обгрунтовано рекомендації з методики одержання зображень структури матеріалів задля адекватного обчислення фрактальних та мультифрактальних характеристик досліджуваних структур, яке водночас дає можливість автоматизувати оброблення зображень і змогу досліднику контролювати процес обчислень;
- розроблена методика застосована до визначення фрактальних та мультифрактальних характеристик структури конкретних матеріалів та встановлено їх зв'язок з фізико-механічними параметрами досліджуваних матеріалів. При цьому не лише показано, що для різних матеріалів існує кореляція між їх мультифрактальними та фізичними властивостями, але й доведено, що для всебічного вивчення структури матеріалів потрібно використання не тільки фрактальних характеристик зображень структури, а й виділеної системи меж зерен, що наразі важливо для наноструктурованих композитів, для чого у програмному забезпеченні

реалізовано алгоритм, який дозволяє виділити у зображенні множину таких меж.

Водночас, до представленої дисертаційної роботи можна зробити такі зауваження:

1. Оскільки мультифрактальні характеристики розраховуються для того чи іншого масштабу, було б доцільно, аби програмне забезпечення при виведенні результатів вказувало, для якого саме діапазону лінійних розмірів (масштабів) обчислено ці мультифрактальні характеристики. Це б дало змогу порівняти масштаб мультифрактальності з характерними розмірами елементів структури, що призвело б до кращого розуміння того, які саме структурні елементи мають фрактальні властивості.

2. При вивченні фрактальних та мультифрактальних характеристик структури конкретних матеріалів наразі кількість наявних експериментальних зразків, наданих колегами дисертантки, замала для того, щоб можна було з упевненістю говорити про наявність позитивної кореляції. Зокрема, хотілося б бачити не лише величину коефіцієнту кореляції, а й функціональну залежність фізичних параметрів досліджуваних матеріалів від мультифрактальних характеристик.

3. У таблицях кореляції мультифрактальних характеристик зображень з фізичними параметрами матеріалів, на жаль, не вказані похибки вимірювань і обчислень, що ускладнює сприйняття наведених даних.

Разом з тим, зроблені зауваження не стосуються основних результатів дисертаційної роботи, частково носять характер побажання для подальших наукових досліджень і жодним чином не впливають на загальну позитивну оцінку одержаних наукових результатів роботи та висновків.

Автореферат дисертації повністю відповідає її змісту, а сама дисертація відповідає встановленим вимогам до її оформлення.

Одержані у дисертації результати є вагомим внеском у фізику твердого тіла та матеріалознавство. Дисертація написана зрозумілою науковою мовою, при викладенні матеріалу зберігається логічний зв'язок між окремими частинами роботи.

Вважаю, що дисертація Красікової Ірини Євгеніївни є завершеною науково-дослідною роботою, яка робить істотний внесок у галузь чисельного визначення структурних характеристик матеріалів. За актуальністю та обсягом, новизною та науковою значимістю ця робота відповідає усім вимогам п.п. 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24 липня 2013р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ №656 від 19 серпня 2015р., №1159 від 30 грудня 2015р., №567 від 27 липня 2016р., №943 від 20.11.2019р. та №607 від 15.07.2020р.), та усім вимогам МОН України щодо кандидатських дисертацій, а її авторка, **Красікова Ірина Євгеніївна**, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 — фізика твердого тіла.

Офіційний опонент

Професор кафедри біофізики та медичної інформатики
ННЦ «Інститут біології та медицини»

Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
доктор фізико-математичних наук, професор,
Заслужений діяч науки і техніки України

Юрій ПРИЛУЦЬКИЙ

*Лідник офіційного списку
завідую*

Проректор з кафедр



Таня Поксанова