

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу

Білогородського Юрія Сергійовича

«ВПЛИВ РОЗМІРНО-ІНДУКОВАНИХ ЕФЕКТІВ НА ФОРМУВАННЯ ФАЗ
У ПЕРЕСИЧЕНИХ МЕТАЛЕВИХ СИСТЕМАХ»,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за
спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

Актуальність. Актуальність теми дисертації підтверджується сучасними світовими тенденціями розвитку наноматеріалознавства, фізики твердого тіла та ядерного матеріалознавства. У провідних наукових центрах США, країн Європейського Союзу, Японії та Китаю активно проводяться дослідження наноструктурованих металевих систем, оскільки саме такі матеріали розглядаються як основа для створення нових поколінь функціональних елементів електроніки, енергетики, термоелектрики та реакторних технологій. Особлива увага приділяється вивченню фазових перетворень у нанорозмірних системах за умов високих температур, механічних навантажень та опромінення, що безпосередньо пов'язано із забезпеченням довговічності та безпеки сучасних енергетичних установок. Для України ця тематика є особливо актуальною з огляду на необхідність розвитку власних високотехнологічних матеріалів для енергетики, оборонно-промислового комплексу та відновлення промислового потенціалу держави. В умовах модернізації атомної енергетики та інтеграції у європейський науково-технологічний простір важливого значення набувають дослідження структурної стабільності матеріалів в умовах опромінення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота має тісний зв'язок із державними, міжнародними та міжвідомчими науковими програмами, що підтверджує її наукову значущість і відповідність сучасним напрямам розвитку фізики твердого тіла та матеріалознавства. Дослідження виконувались у межах міжнародного науково-технічного співробітництва між Україною та Німеччиною, зокрема за підтримки програм BMBF, DAAD та в рамках співпраці між Інститутом фізики матеріалів університету м. Мюнстер і Навчально-науковим центром «Фізико-хімічне

матеріалознавство» НАН України. Це свідчить про відповідність тематики дисертації сучасним міжнародним науковим тенденціям та її визнання на рівні європейського наукового співтовариства. Результати дослідження отримані в межах виконання низки фундаментальних і прикладних НДР, спрямованих на створення нових радіаційно-стійких композиційних систем для потреб енергетики. Такий зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами МОН України, НАН України та міжнародними проектами підтверджує її практичну спрямованість, комплексний характер і вагомий внесок у розвиток сучасної науки про матеріали.

Загальна характеристика дисертації. Метою роботи є обґрунтування впливу розміру матеріалу на термодинаміку і кінетику утворення фаз у пересичених металевих системах, пошук закономірностей виявлених розмірно-індукованих ефектів.

Дисертаційна робота написана українською мовою, стиль викладення матеріалу є чітким. У тексті дисертації відсутні прояви плагіату. Автореферат достатньо повно відображає зміст дисертації, основні підходи, результати і висновки дисертації.

Вступ дисертації присвячений обґрунтуванню актуальності дослідження у термодинаміці та кінетиці фазоутворення в пересичених металевих наносистемах. Автором підкреслено недостатню вивченість проблеми комплексного врахування розмірних ефектів, хімічного виснаження, бар'єрів зародкоутворення та радіаційно-індукованих дефектів у сучасних моделях фазових перетворень. Визначено об'єкт, предмет та методи дослідження.

Розділ 1 є оглядом літератури. Він містить ґрунтовний і системний аналіз сучасних експериментальних та теоретичних досліджень фазової стабільності нанорозмірних металевих систем. Автором детально розглянуто вплив розмірних ефектів, хімічного виснаження та радіаційно-індукованих дефектів на фазові перетворення. Особливу цінність становить критичний аналіз існуючих підходів, моделей і обґрунтування необхідності поєднання термодинамічних, кінетичних та атомістичних методів моделювання. Розділ логічно

структурований, добре аргументований і створює надійну наукову основу для подальших досліджень автора.

Автором показано, що подібні результати були отримані в експериментальних працях групи Гладких М. Т., Кришталь А.А. (Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна), Jesser W.A. і Gille W.W. (американських дослідників), однак експериментальні умови отримання не мали обмежень щодо збереження речовини (діаграми формувалися в результаті потоку атомів і осадження на підкладинку), тому інші дослідники отримали зсув кривих розчинностей.

У **розділі 2** досліджено зміни фазових діаграм наносистем. Автор демонструє високий рівень володіння як класичним термодинамічним апаратом, так і сучасними підходами до опису наносистем, зокрема з урахуванням ефектів поверхневої енергії, кривизни поверхні та хімічного виснаження. Важливою перевагою розділу є послідовне поєднання фізичної інтерпретації процесів із математичним формалізмом, що дозволяє простежити логіку побудови моделі та її застосування до системи Cu–Ni.

Автор переконливо показує, що через вплив хімічного виснаження та скінченності системи зменшення розміру наночастинок призводить до суттєвої зміни фазових діаграм, що добре узгоджується із сучасними уявленнями про розмірно-індуковані ефекти у наноматеріалах. Це є важливим науковим результатом, який має як фундаментальне, так і прикладне значення для фізики наноматеріалів.

У **розділі 3** досліджено вплив товщини металевих наноплівки на міжатомні взаємодії та фазові діаграми бінарних систем. На основі молекулярно-статичного моделювання з використанням потенціалу Саттона–Чена встановлено наявність розмірного ефекту в енергіях взаємодії атомів і запропоновано аналітичну залежність потенціалу взаємодії від товщини плівки. Подібні результати для міді були отримані в працях співробітника ІМФ ім. Г.В.Курдюмова НАНУ А. І. Карасевського, в якій це було пояснено квантовими ефектами при високих температурах, однак, на відміну від представленої дисертації, при низьких і нульових температурах вплив розмірів зникає.

Отримані результати використано автором для побудови нанорозмірних фазових діаграм систем Bi-Sn та Bi-Pb, що дозволило пояснити зміщення температур фазових переходів і збільшення взаємної розчинності компонентів у тонких плівках.

Розділ 4 містить цілісну фізичну модель впливу радіаційних дефектів на фазову стабільність нанокристалічних металів. Автором вдало побудовано логіку переходу від кінетики накопичення вакансій і міжвузлових атомів до термодинамічного опису поліморфних перетворень у Fe, що створює завершену наукову концепцію. Сильними сторонами є пояснення немонотонної залежності концентрації вакансій від розміру зерна, побудова фазових діаграм та введення областей стабільності фаз під опроміненням.

Отримані у розділі 4 результати можуть бути використані для прогнозування фазового стану металів під дією радіаційного опромінення, а їх подальший розвиток – для підвищення надійності конструкційних матеріалів реакторів, що визначає не лише фундаментальне, а й прикладне значення проведеного дослідження.

Розділ 5 присвячений температурному гістерезису фазових перетворень у високодисперсних порошках Fe. На основі рівняння «master equation» змодельовано поведінку ансамблю нанопорошинок і показано виникнення розмірно-залежного температурного гістерезису об'ємної частки нової фази, ширина якого визначається розміром частинок, швидкістю зміни температури в процесі термоцикування та механізмом росту зародка.

Найцікавішими новими науковими результатами, отриманими в дисертації, є такими:

- 1) уперше виконано кількісні розрахунки кривих співіснування рідкої і твердої фаз при кристалізації та плавленні наночастинки Cu-Ni для різних розмірів і морфологій трансформації і побудовано діаграми розчинності хімічних елементів наночастинки Cu-Ni (розділ 2);
- 2) уперше на основі теоретичного опису і рівнянь хімічної кінетики, встановлено три типи залежності концентрації радіаційно-індукованих вакансій

від розміру зерен у нанокристалічних ГЦК-металах (зростаючої, спадної, немонотонної) і пояснено варіативність через взаємодію точкових дефектів і меж зерен (розділ 4);

3) методами геометричної термодинаміки удосконалено методику розрахунку фазових діаграм у наноплівках Bi–Sn і Bi–Pb, розрахунки форми кривих фазових рівноваг, температур контактного плавлення і розчинностей хімічних елементів, ширини двофазної зони (розділ 3);

4) удосконалено термодинамічний підхід Шена (T.D. Shen) на випадок опису радіаційної стабільності нанокристалічного Fe з урахуванням нестационарної кінетики еволюції дефектів і виявлено ефект стабілізації низькотемпературної фази при високих температурах за різних параметрів опромінення в інтервалі температур 350-530K (розділ 4);

5) дістала подальшого розвитку модель поліморфного перетворення нанопорошку Fe при температурному циклуванні, в якій отримано апроксимаційні залежності для об'ємної частки нової фази та пересичення з урахуванням розміру, форми і механізмів утворення фаз (розділ 5).

Достовірність наведених наукових результатів та висновків дисертаційної роботи підтверджується їх публікацією в рецензованих журналах (серед них: 13 статей у журналах, що мають квартиль Q1 – Q4 і входять до наукометричної бази Scopus), та узгодженням з роботами інших науковців і сучасними уявленнями фізики твердого тіла. Наукові результати отримані із застосуванням відомих методів теоретичного і числового аналізу. Частина отриманих результатів має експериментальне підтвердження інших авторів.

Зауваження до роботи

Дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні, разом з тим вважаю за необхідне висловити наступні зауваження до роботи:

1) У розділі 2 дисертації не приділено увагу питанням стійкості отриманих результатів щодо точності вхідних параметрів моделей і не в повній мірі висвітлено фізичні принципи вибору окремих параметрів моделі. А саме:

викривлення границі розділу або нелінійна апроксимація для енергії поверхні розділу, не пояснено, чому обраний критерій перетворення $\Delta G > 50k_B T$.

2) У розділі 2 в ф. 2.7, 2.8, 2.10, 2.12 в явному вигляді не присутня ентропія і температура, що ускладнює сприйняття врахованих параметрів системи.

3) У третьому розділі, на стор. 98 наведено рис.3.6, який пов'язує розчинність з товщиною плівки. Чи врахована можливість значно більшої розчинності саме в приповерхневих шарах матеріалу?

4) В 4 розділі досліджено вплив іонного опромінення на Ni і Fe. Чому вибрані саме такі матеріали, а не розглянуто чистий Zr чи його сплави, або сталі, які частіше використовуються в реакторобудуванні.

5) В 5 розділі стверджується, що «зародокутворення відбувається миттєво». Чи можлива оцінка фізичного часу такого процесу, наприклад в порівнянні з періодом коливань атомів.

6) В дисертації автор використовує поняття, які не є загальноживаними. Наприклад «нанодіаграма», «сочевиця», «шапка», «наноплавлення», що потребує детального пояснення, а також присутні стилістичні помилки.

Наведені зауваження не зменшують новизну результатів і можуть розглядатись в якості початкових припущень для подальших досліджень.

Загальний висновок

На мою думку, дисертація Білогородського Юрія Сергійовича «Вплив розмірно-індукованих ефектів на формування фаз у пересичених металевих системах» відповідає вимогам нормативних документів МОН України та п. 9, п. 11, п. 12, п. 13, п. 14 вимог «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567 зі змінами та доповненнями, а її автор, Білогородський Юрій Сергійович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

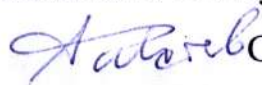
Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор

завідувач лабораторії фізики та радіометрії нерівноважних

транспортних явищ Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова

Національної академії наук України



Олександр ФІЛАТОВ

01.06.2026

Підпис д.ф-м.н., проф. О.В. Філатова підтверджую:

Вчений секретар

Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова

Національної академії наук України



Марина САВЧУК