

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента к.ф.-м.н., с.н.с. відділу №60 ІПФ НАН України
Лисенка О.Б.

на дисертаційну роботу

Скорохода Романа Володимировича

на тему «Радіаційно-індукована сегрегація в концентрованих металевих сплавах
Fe-Cr та Fe-Cr-Ni»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 10 «Природничі науки»

за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

Актуальність теми дисертації.

Дослідження змін мікроструктури та локального складу сплаву в матеріалах ядерної енергетики за умов опромінення безумовно є актуальною задачею радіаційного матеріалознавства. Такі зміни призводять до деградації фізико-хімічних і механічних властивостей матеріалів та можуть викликати ряд радіаційно-стимульованих явищ, серед яких розпухання, зміцнення, окрихчення, утворення виділень нової фази, тощо.

Дисертаційна робота Скорохода Р.В. присвячена дослідженню радіаційно-індукованої сегрегації в концентрованих металевих сплавах Fe-Cr та Fe-Cr-Ni, а також теоретичному аналізу пізньої стадії рівноважної сегрегації домішки на міжзеренній межі по механізму визрівання Оствальда. Явище радіаційно-індукованої сегрегації призводить до збагачення чи збіднення головних, домішкових чи легуючих компонентів сплаву на стоках точкових дефектів за умов опромінення та є важливим механізмом зміни локального складу сплаву.

В сучасній ядерній енергетиці серед кандидатів на роль конструкційних матеріалів реакторів IV покоління розглядають феритно-мартенситні сплави та аустенітні нержавіючі сталі, основними компонентами яких є саме Fe-Cr та Fe-Cr-Ni.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розраховано визначальні кількісні характеристики радіаційно-індукованої сегрегації для сплавів Fe-9Cr та Fe-20Cr-8Ni за різних значень швидкостей продукування точкових дефектів, набраних доз опромінення і температур та проведено аналіз залежностей визначальних кількісних характеристик від названих умов опромінення.
2. Продемонстровано, що в при різних швидкостях продукування точкових дефектів, набраних дозах опромінення та температурах дислокаційна підсистема подавляє ефекти радіаційно-індукованої сегрегації.
3. Вперше методами комп'ютерного моделювання показано, що вплив збільшення швидкості продукування точкових дефектів на ефекти радіаційно-індукованої сегрегації можна з достатньо високою точністю компенсувати відносно невеликим підвищенням температури.

4. Вперше теоретично розглянуто кінетику сферичних виділень нової фази на міжзеренній межі, ріст яких лімітується поверхневою кінетикою, з урахуванням дифузійних потоків атомів домішки з глибини зерна до міжзеренної межі на стадії визрівання Оствальда.

Робота виконувалася у відділі № 30 «Ядерно-фізичних досліджень» і в лабораторії №41 «Інтегрованого моделювання механічних властивостей конструкційних матеріалів під дією опромінення» Інституту прикладної фізики НАН України та є складовою досліджень, які проводилися за темами: «Дослідження радіаційно-індукованої сегрегації в конструкційних матеріалах ядерної енергетики при їх опроміненні іонами», державний реєстраційний номер 0118U002291; «Дослідження радіаційних дефектів та радіаційно-індукованої сегрегації домішок у сплавах цирконію під дією опромінення іонами з використанням методів ядерного мікроаналізу», державний реєстраційний номер 0116U002993; «Інтегроване багаторівневе моделювання і експериментальна перевірка радіаційної стійкості конструкційних матеріалів реакторів на період експлуатації понад 60 років», державний реєстраційний номер 0119U102415; «Дослідження радіаційної стійкості матеріалів реакторів ВВЕР в умовах понаднормової експлуатації з використанням інтегрованого багаторівневого моделювання та експериментальної валідації ядерно-фізичними та структурними методами», державний реєстраційний номер 0122U002427.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Скорохода Р.В. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія» та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Фізика».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Скорохода Романа Володимировича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати, тексти і графічний матеріал інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Матеріал роботи викладений структуровано і послідовно, що дає іншим дослідникам можливість зрозуміти методи та результати дослідження. Дисертація проілюстрована графічним матеріалом у вигляді ілюстрацій та графіків за результатами числових розрахунків.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатку. Загальний обсяг дисертації 161 сторінка.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету і завдання дослідження, вказано об'єкт, предмет і методи

дослідження, зв'язок дисертаційного дослідження з науковою тематикою Інституту прикладної фізики НАН України, а також наукова та практична новизна отриманих результатів. Зазначено особистий внесок здобувача та представлена інформація щодо апробації результатів дисертації та публікацій.

У **першому розділі** наведено огляд наукової літератури, присвяченої обраній темі дослідження. Розглянуто основні механізми радіаційно-індукованої сегрегації в розбавлених та концентрованих металевих сплавах. Особлива увага приділена зворотному ефекту Кіркендала, на якому базується явище радіаційно-індукованої сегрегації в концентрованих сплавах Fe-Cr і Fe-Cr-Ni. Проаналізовано експериментальні результати дослідження радіаційно-індукованої сегрегації в сплавах на основі Fe.

У **другому розділі** наведено систему диференціальних рівнянь радіаційно-індукованої сегрегації для N-компонентних концентрованих металевих сплавів та граничні і початкові умови до неї. Для сплаву Fe-9Cr проведено аналіз впливу швидкості продукування точкових дефектів, набраної дози та температури на концентраційні профілі Cr і точкових дефектів, поверхневу концентрацію Cr, FWHM Cr та сегрегаційну площу Cr. Здійснено порівняння результатів моделювання радіаційно-індукованої сегрегації в моделі з термодинамічно рівноважними значеннями концентрацій точкових дефектів та моделі з ідеальними стоками точкових дефектів (концентрації точкових дефектів на поверхні зразку дорівнюють нулю). Досліджено вплив дислокаційної підсистеми сплаву на ефекти радіаційно-індукованої сегрегації за різних умов опромінення. Результати моделювання радіаційно-індукованої сегрегації в сплавах Fe-Cr порівнюються з експериментально отриманими.

У **третьому розділі** для сплаву Fe-20Cr-8Ni проаналізовано залежності визначальних кількісних характеристик радіаційно-індукованої сегрегації від швидкості продукування точкових дефектів та температури. Досліджено взаємний вплив швидкості продукування точкових дефектів та температури в сплаві Fe-20Cr-8Ni на концентраційні профілі Cr та Ni. Проведено порівняння значень поверхневого збіднення Cr і збагачення Ni, сегрегаційних площ та FWHM Cr і Ni, для сплавів Fe-xCr-8Ni та Fe-20Cr-yNi ($x=19; 19,5; 20; 20,5; 21$ і $y=7; 7,5; 8; 8,5; 9$), які розраховані при енергіях міграцій вакансій, взятих для сплаву Fe-20Cr-8Ni, а також розрахованих для кожного сплаву з конкретними значеннями x, y .

У **четвертому розділі** теоретично розглянуто пізню стадію рівноважної сегрегації домішки на міжзеренній межі по механізму визрівання Оствальда у випадку утворення сферичних виділень нової фази, ріст яких лімітується поверхневою кінетикою. Наведено систему рівнянь для цього процесу, яка складається з рівняння швидкості росту окремого виділення, кінетичного рівняння для функції розподілу виділень нової фази за розмірами, нормованої на густину виділень та рівняння балансу речовини в системі. Виконано асимптотичний аналіз Ліфшиця-Сльозова та одержано асимптотичні характеристики ансамблю сферичних виділень нової фази. Наведено оцінки середнього радіуса виділень збагаченої Cr α' -фази на міжзеренній межі для сплаву Fe-10Cr.

Основний текст дисертації завершено висновками дослідження. Дисертація містить додаток, у якому наведено перелік публікацій здобувача за темою дисертаційного дослідження.

На основі цього можна зробити висновок, що у дисертаційній роботі виконано поставлені наукові завдання, а здобувач продемонстрував достатньо високий науковий рівень і здатність займатись науковою роботою.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 17 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 3 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України і проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з них 2 статті опубліковані у наукових виданнях, які віднесені до четвертого квартилю (Q4) та 1 стаття опублікована у науковому виданні, яке віднесене до третього квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank.

Апробація результатів дисертаційної роботи висвітлена в 14 доповідях на наукових фахових конференціях.

Описані в дисертаційній роботі наукові результати повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В літературному огляді згадується, але недостатньо обговорюється модель фазового поля, яка також використовуються для моделювання радіаційно-індукованої сегрегації в концентрованих металевих сплавах.

2. В роботі не досліджено релаксацію елементного складу сплаву, в якому відбувся процес радіаційно-індукованої сегрегації, після вимкнення опромінення.

3. В роботі при моделюванні радіаційно-індукованої сегрегації біля меж зразка сплаву не розглядаються альтернативні стоки точкових дефектів, такі як міжзеренні межі, адже структура міжзеренної межі сильно впливає на перерозподіл компонентів сплаву за умов опромінення.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів і не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи. Матеріал у дисертації викладено послідовно, всі основні результати обґрунтовані і мають чітке наукове пояснення.

Висновок про дисертаційну роботу.

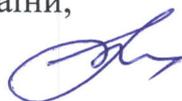
Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Скорохода Романа Володимировича на тему «Радіаційно-індукована сегрегація в концентрованих металевих сплавах Fe-Cr та Fe-Cr-Ni» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є

закінченим науковим дослідженням, сукупність результатів якого розв'язує наукове завдання. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Вважаю, що здобувач Скороход Р.В. заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 10 “Природничі науки” за спеціальністю 104 “Фізика та астрономія”.

Рецензент:

Старший науковий співробітник
відділу моделювання радіаційних ефектів та
мікроструктурних перетворень у конструкційних матеріалах
Інституту прикладної фізики НАН України,
кандидат фізико-математичних наук



Олег ЛИСЕНКО

Підпис к.ф.-м.н., с.н.с. відділу №60

Лисенка О.Б.

засвідчуючий учений секретар
ІПФ НАН України, к.ф.-м.н., с.н.с.



Олексій ВОРОШИЛО