

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента – доктора фіз.-мат. наук, професора**  
**Марченка Івана Григоровича**  
**на дисертацію Скорохода Романа Володимировича**  
**“Радіаційно-індукована сегрегація в концентрованих металевих**  
**сплавах Fe-Cr та Fe-Cr-Ni”,**  
**поданої на захист до разової спеціалізованої вченої ради на здобуття**  
**ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 “Фізика та**  
**астрономія” фізико-математичні науки**

**Актуальність обраної теми дослідження**

Конструювання та побудова нових ядерних реакторів та продовження строку експлуатації існуючих реакторів вимагають створення нових конструкційних матеріалів, які можуть функціонувати в широкому діапазоні умов опромінення. Радіаційно-індукована сегрегація (РІС) призводить до зміни мікроструктури і локального складу сплавів та негативно впливає на їхні механічні та фізико-хімічні властивості. Це явище тісно пов'язано з розвитком розпухання, радіаційної повзучості та крихкості, які призводять до руйнування конструкційних матеріалів під час експлуатації. Сплави на основі Fe-Cr-Ni на теперішній час є найбільш поширеними матеріалами ядерної енергетики. Тому тема дослідження є безумовно актуальною. Таке дослідження має важливе наукове та практичне значення і сприяє подальшому розвитку технологій для розробки конструкційних матеріалів ядерної та термоядерної енергетики.

Незважаючи на те, що на час постановки задач у рамках представленої дисертаційної роботи вже була значна кількість теоретичних результатів щодо вивчення явища радіаційно-індукованої сегрегації, на сьогодні триває активне дослідження впливу РІС на властивості конструктивних матеріалів ядерної енергетики.

Актуальність теми дисертації Скорохода Р.В. підтверджується також тим фактом, що вона виконувалась у рамках держбюджетних тем, які фінансувалися НАН України.

### **Наукова новизна результатів дослідження**

Отримані в дисертації результати дають можливість прогнозувати зміни локального складу концентрованих сплавів при опроміненні.

У результаті дослідження сформульовано низку положень і висновків, що містять елементи наукової новизни, зокрема:

Розраховано визначальні кількісні характеристики радіаційно-індукованої сегрегації для сплавів Fe-9Cr та Fe-20Cr-8Ni в широкому діапазоні швидкостей продукування точкових дефектів, доз опромінення і температур та проведено аналіз залежностей визначальних кількісних характеристик від названих умов опромінення.

Продемонстровано, що в широкому діапазоні швидкостей продукування точкових дефектів, набраних доз опромінення, густин дислокацій в сплаві та температур дислокаційна підсистема подавляє ефекти радіаційно-індукованої сегрегації.

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.

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.

## **Зміст дисертації та відповідність встановленим вимогам**

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатку. Дисертацію викладено на 161 сторінці, обсяг основної частини становить 115 сторінок та містить 75 рисунка. Список використаних джерел складається із 197 найменувань.

Дисертація написана послідовно з дотриманням наукового стилю викладення в ній матеріалів досліджень, наукових положень та висновків, що забезпечує доступність їх сприйняття.

Вступ дисертаційної роботи містить загальну характеристику роботи та обґрунтування актуальності обраної теми досліджень. Автором сформульована мета та задачі досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими планами, відображена наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, відзначено особистий внесок здобувача.

У першому розділі, що є літературним оглядом, здійснено глибокий та критичний аналіз наявних результатів за темою дисертаційної роботи. Зокрема розглянуті питання радіаційного пошкодження матеріалів та механізми радіаційно-індукованої сегрегації.

На основі критичного аналізу були сформульовані напрями подальших досліджень.

У другому розділі “Моделювання радіаційно-індукованої сегрегації в двокомпонентних концентрованих металевих сплавах Fe-Cr” проведено моделювання радіаційно-індукованої сегрегації сплаву Fe-9Cr та виконані розрахунки її визначальних кількісних характеристик в широкому інтервалі швидкостей продукування точкових дефектів, набраних доз, температур та товщин зразка.

У третьому розділі “Моделювання радіаційно-індукованої сегрегації в трикомпонентних концентрованих сплавах Fe-Cr-Ni” досліджено вплив

температури та швидкості продукування точкових дефектів на визначальні кількісні характеристики РІС для сплаву Fe-20Cr-8Ni.

У четвертому розділі “Пізня стадія сегрегації домішки на міжзеренній межі у випадку утворення сферичних виділень нової фази, ріст яких лімітується поверхневою кінетикою” розглянуто пізню стадію рівноважної сегрегації домішки на міжзеренній межі по механізму визрівання Оствальда у випадку утворення сферичних виділень нової фази. Сформульовано систему рівнянь, яка описує визрівання сферичних виділень на міжзеренній межі, ріст яких лімітується поверхневою кінетикою вбудови атомів домішки в виділення. Знайдено асимптотичні часові залежності середнього і критичного радіусів виділення, пересичення твердого розчину атомів домішки в міжзеренній межі, функції розподілу виділень за розмірами, густини виділень.

### **Практичне значення результатів дисертаційної роботи та зв'язок з науковими програмами та темами**

Дисертаційне дослідження відповідає пріоритетним напрямкам наукових досліджень Інституту прикладної фізики НАН України, зокрема держбюджетним науково-дослідним роботам за темами «Дослідження радіаційно-індукованої сегрегації в конструкційних матеріалах ядерної енергетики при їх опроміненні іонами» (державний реєстраційний номер 0118U002291, термін виконання 2018-2019 рр.), «Дослідження радіаційних дефектів та радіаційно-індукованої сегрегації домішок у сплавах цирконію під дією опромінення іонами з використанням методів ядерного мікроаналізу» (державний реєстраційний номер 0116U002993, термін виконання 2016-2018 рр.), «Інтегроване багаторівневе моделювання і експериментальна перевірка радіаційної стійкості конструкційних матеріалів реакторів на період експлуатації понад 60 років» (державний

реєстраційний номер 0119U102415, термін виконання 2019-2021 рр.), «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, термін виконання 2022-2024 рр.)

Отримані в роботі результати мають цінність як з точки зору фундаментального, так і прикладного значення. Результати досліджень можуть стати методологічною основою для створення радіаційно-стійких матеріалів.

### **Оцінка рівня виконання поставленого наукового завдання та оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності**

Дисертація робота виконана на належному науковому рівні, про що свідчать 3 публікації у виданнях, що індексуються у міжнародних базах SCOPUS та/або Web of Science. Основні наукові результати презентувалися дисертантом на Всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях та отримали позитивну оцінку.

Виходячи з тексту дисертаційної роботи, можна стверджувати, що здобувач оволодів методологією наукової діяльності.

### **Академічна доброчесність**

Ознак порушення автором академічної доброчесності, зокрема випадків оприлюднення, частково або повністю, наукових результатів, отриманих іншими особами, як результатів власного дослідження або відтворення опублікованих текстів інших авторів без зазначення їх авторства не виявлено.

## Зауваження до дисертаційної роботи

Загалом, позитивно оцінюючи наукове і практичне значення отриманих дисертантом результатів, варто зазначити наступні зауваження до змісту дисертаційної роботи Скорохода Р.В. “Радіаційно-індукована сегрегація в концентрованих металевих сплавах Fe-Cr та Fe-Cr-Ni”:

1. Методика моделювання не обговорена. Якими математичними методами проводилося моделювання? Дисертант використовував існуючі чи створені їм безпосередньо програмами? Досліджувалась система жорстких диференціальних рівнянь, однак у дисертаційній роботі не обговорено метод розв'язання цих рівнянь.

2. Не достатньо обговорено вплив радіаційно-індукованої сегрегації на механічні та фізичні властивості матеріалів. Яким чином та якими фізичними механізмами сегрегація впливає на ці властивості?

3. У роботі зроблено висновок що “радіаційно-індукованої сегрегації можна з достатньо високою точністю компенсувати відносно невеликим підвищенням температури”. Не зовсім зрозуміло фізичне значення терміну “відносно невелике”. Про який інтервал температур ідеться мова?

4. В системі рівнянь, що описують радіаційно-індуковану сегрегацію, присутні тільки нейтральні стоки, але не беруться до уваги преференційні стоки. Так як преференс відіграє ключову роль у ряді радіаційно-індукованих ефектів, наприклад, у радіаційному розпуханні, то було б бажано обговорити вплив преференсу на радіаційно-індуковану сегрегацію.

У тексті дисертації зустрічаються граматичні та стилістичні помилки, зокрема, в деяких місцях відсутні розділові знаки та некоректна побудова речень.

Однак, наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Загальний висновок**

Дисертаційна робота “Радіаційно-індукована сегрегація в концентрованих металевих сплавах Fe-Cr та Fe-Cr-Ni ” за своєю актуальністю, ступенем новизни, постановкою та способом вирішення поставлених питань, теоретичним та практичним значенням та обґрунтованістю одержаних результатів відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44) та наказу МОН № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (зі змінами від 12.07.2019 р.), а дисертант Скороход Роман Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» фізико-математичні науки.

Завідувач відділу фізики радіаційних технологій

ІНЦ “Харківський фізико-технічний інститут”

НАН України

д.ф.-м.н., професор

Іван МАРЧЕНКО