

Голові разової спеціалізованої вченої ради  
Національного наукового центру  
«Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,  
доктору технічних наук Миколі ПИЛИПЕНКУ  
вул. Академічна 1, м. Харків, 61108

## ВІДГУК

офіційного опонента

провідного наукового співробітника Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, доктора технічних наук (спеціальність 05.02.01 - матеріалознавство), професора Студент Олександри Зиновійвни на дисертаційну роботу Ростової Ганни Юріївни «**Механізми впливу термомеханічної обробки на радіаційну стійкість, ерозійні та механічні властивості конструкційних матеріалів**», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 104 – «Фізика та астрономія» у галузі знань 10 – «Природничі науки».

**Актуальність роботи.** Основною проблемою сучасних ядерних реакторів є занижений рівень вигорання ядерного палива. У зв'язку із постійним зростанням споживання електроенергії у світі та обмеженістю запасів урану на Землі ця проблема з кожним роком гострішає. Саме тому виникла концепція створення інноваційних ядерних установок 4-го покоління (Gen-IV). Їх конструкція та експлуатаційні параметри забезпечують вищий рівень вигорання ядерного палива. Введення в експлуатацію реакторів нового покоління неможливе без розробки нових або модифікації наявних стійких до радіації конструкційних матеріалів. Одним із пріоритетних напрямків модифікації сталей та сплавів, придатних для виготовлення ядерних реакторів майбутнього покоління, є застосування механіко-термічного оброблення.

Сучасні методи механіко-термічного оброблення конструкційних матеріалів передбачають їх інтенсивне пластичне деформування з наступним термічним обробленням. Їх реалізація неможлива без встановлення фізично обумовлених закономірностей формування структури модифікованих матеріалів, а також без оцінювання впливу інтенсивного пластичного деформування з подальшим термічним обробленням на їх фізико-механічні властивості.

Крім цього радіаційна стійкість та стійкість до кавітаційного зношування (як визначальних властивостей матеріалів атомної енергетики) потребують особливої уваги для обґрунтування режимів їх модифікування. Адже умови експлуатації конструкційних матеріалів для реакторів четвертого покоління (високі температури, тиск, значні дози опромінення та інтенсивні потоки рідин) сприяють виникненню кавітаційних пошкоджень, які можуть суттєво знизити робоздатність компонентів реакторів (зокрема теплообмінників і трубопроводів) і безпеку експлуатації реакторів в цілому. Наявні в науковій літературі дані щодо кавітаційної стійкості вживаних в реакторах матеріалів достатньо обмежені.

Проведений аналіз літератури показав, що вивчення впливу механіко-термічного оброблення конструкційних матеріалів на трансформацію їх мікроструктури, механічні характеристики, радіаційну та кавітаційну стійкість (як ключових властивостей, що забезпечують надійність експлуатації реакторів) є беззаперечно **важливим і актуальним науковим завданням для сьогодення**. Адже в умовах війни вихід з ладу хоча б одного блоків атомних електростанцій загрожує енергетичній безпеці України в цілому.

**Достовірність отриманих в роботі результатів. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Достовірність результатів, представлених у дисертаційній роботі Г. Ю. Ростової, підтверджується багатоплановим підходом до проведення досліджень. По-перше, у роботі використано широкий спектр сучасних та апробованих експериментальних методів досліджень (оптична та електронна сканівна і трансмісійна мікроскопія, рентгенівська дифрактометрія, рентгенофлуоресцентний та енергодисперсійний мікроаналізи, випробування за активного розтягу, мікроіндентування, випробування на кавітаційну стійкість сталей та сплавів, а також на їх стійкість до опромінення високоенергетичними іонами), що дало змогу всебічно оцінити механічні, ерозійні та радіаційні характеристики матеріалів. По-друге, результати були отримані на основі усереднення значного обсягу експериментів, що забезпечило статистичну

значущість і надійність даних. Таким чином, комплексність підходу та використання науково обґрунтованих методів забезпечили високу достовірність отриманих результатів дослідження механізмів впливу термомеханічного оброблення на властивості конструкційних матеріалів.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації, обґрунтовані ретельним аналізом і узгодженням отриманих результатів, їх кореляцією з відомими і теоретично обґрунтованими постулатами сучасного матеріалознавства.

Отже, дисертація є **науково обґрунтованою працею** з чітко сформульованою метою та завданнями для її досягнення, порівняльним аналізом отриманих експериментальних результатів та узагальненими висновками щодо правомірності застосування запропонованого термомеханічного оброблення для покращення ключових властивостей матеріалів атомної енергетики.

**До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:**

Вперше застосовано метод багаторазового «осаджування-видавлювання» для інтенсивного пластичного деформування ферит-мартенситної сталі Т91 в різних температурних умовах. Завдяки технологічній простоті реалізації метод придатний для промислового застосування.

Вперше визначено та обґрунтовано оптимальні температурні інтервали механічного та термічного оброблення сталі Т91, які забезпечують стабільність отриманої наноструктури і, як наслідок, покращують її механічні властивості.

Досліджено вплив структурного стану сталі Т91 на її радіаційну стійкість. Встановлено, що сталі з ферит-мартенситною та мартенситною структурами властива найвища радіаційна стійкість, що зумовлено наявністю значної кількості стоків для точкових дефектів. Показано, що радіаційна стійкість сталі Т91 з феритною структурою у 24 рази перевищує характерну для аустенітної сталі AISI 316.

Вперше досліджено схильність до кавітаційно-ерозійного зношування ферит-мартенситних сталей (Т91 і Eurofer 97) та нікелевого сплаву 42ХНМ і

визначено ключові чинники (хімічний склад матеріалів, мікроструктурні показники та механічні властивості), відповідальні за їх кавітаційну стійкість.

### **Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.**

1. Отримані результати досліджень додають нові і важливі знання щодо ефективності впливу механіко-термічного оброблення на фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів, які необхідні для оптимізації технологічного процесу виробництва сталей, що використовуються у атомній енергетиці, забезпечення необхідної якості та підвищення їх роботоздатності в складних температурно-силових експлуатаційних умовах.

2. Отримані результати інтегровані в навчальний процес з підготовки фахівців у галузі матеріалознавства шляхом застосування розроблених лекційних курсів та методичних посібників, присвячених сучасним методам термомеханічного оброблення, модифікації структури та підвищення радіаційної і кавітаційної стійкості конструкційних матеріалів. Це сприятиме підвищенню рівня компетенцій студентів і молодих дослідників, забезпечуючи їх актуальними знаннями для вирішення практичних завдань енергетики із залученням методів і знань сучасного матеріалознавства.

### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи Г. Ю. Ростової пройшли достатньо широку апробацію і обговорення з експертами фахових наукових видань на етапі їх підготовки до друку. Основні результати дисертації опубліковано в 7 наукових працях в журналах, індексованих в наукометричній базі «Scopus» і віднесених до кварталів Q1-Q3, та 8 тезах доповідей на міжнародних і вітчизняних наукових конференціях.

Участь Г. Ю. Ростової у роботах, що опубліковані у співавторстві, розкрита у дисертаційній роботі. Опубліковані матеріали повністю відповідають змісту дисертації та вимогам пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії,

затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

**Оцінка змісту дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатку.

Анотація відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває наукові результати та практичну цінність роботи.

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження, його мету і основні завдання, сформульовано об'єкт і предмет дисертаційного дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, описано використані фізичні методи досліджень, а також виокремлено особистий внесок дисертантки.

Перший розділ дисертації присвячено аналізу доступних даних досліджень матеріалів атомної енергетики. Проаналізовано сучасні та перспективні конструкційні матеріали для реакторів майбутніх поколінь, а також охарактеризовано їхні структурні особливості. Висвітлено вплив елементів легування на структурно-фазовий стан і властивості кожного типу матеріалів. Особливу увагу приділено актуальним проблемам радіаційного матеріалознавства. На основі проведеного аналізу обґрунтовано вибір теми дослідження та сформульовано наукові задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі описано аналізовані матеріали, використані методи досліджень та експериментальне обладнання. Залучення широкого спектру сучасних методів і фізичних, і механічних досліджень дало можливість у повному обсязі вирішити поставлені в дисертації завдання і, як наслідок, досягти поставленої мети.

У третьому розділі представлено результати досліджень структури та механічних властивостей сталі Т91 у стані постачання та після застосування до її модифікації багаторазового механіко-термічного оброблення в різних температурних діапазонах. Інтенсивним пластичним деформуванням сталі Т91 методом багаторазового «осаджування-видавлювання» за різних температур сформовано структуру з нанорозмірними зернами фериту і «дефектного» мартенситу та високою щільністю нанорозмірних карбідів типу МХ, що

виділялися під час подальшого відпуску деформованих зразків. Показана різниця за структурними показниками сталі, інтенсивно деформованої в феритній і аустенітній областях деформування та їх зміну після наступного відпуску. Обґрунтовано оптимальні температурні режими інтенсивного пластичного оброблення та відпуску сталі для стабілізації мінімальних розмірів субзерен в її структурі виділеннями карбідів типу МХ як необхідної передумови для підвищення характеристик міцності і пластичності в широкому інтервалі температур випробувань.

У четвертому розділі наведено результати досліджень, пов'язані із встановленням закономірностей впливу мікроструктури сталі Т91 на її радіаційну стійкість до опромінення. Показано, що після однакових температурних умов опромінення сталі (460 °С) до дози 120 зна іонами Ar розпухання феритної структури досягло 0,65%, мартенситної – 0,26%, а ферит-мартенситної – 0,12%. Різницю між ними пояснили різною кількістю стоків точкових дефектів, щільністю дислокацій та когерентних нанорозмірних виділень, поєднання яких виявилось найсприятливішим у сталі з ферит-мартенситною мікроструктурою.

У п'ятому розділі досліджено кавітаційну стійкість матеріалів для атомної енергетики з різною кристалічною структурою. Це ферит-мартенситні сталі Т91 та Eurofer 97 з ОЦК граткою та аустенітні сплави 42ХНМ та 08Х18Н10Т з ГЦК граткою, використані для порівняння. Встановлено, що за швидкістю кавітаційного зношування в дистильованій воді аналізовані сплави розташовувались у наступній послідовності: 42 ХНМ → Т91 → 08Х18Н10Т → Eurofer 97. При цьому швидкість їх зношування відрізнялась практично на порядок (від  $1,6 \times 10^{-7}$  до  $2,6 \times 10^{-6}$  см<sup>3</sup>/хв). Найвищу стійкість до кавітації сталі Т91 та сплаву 42ХНМ пояснили їх оптимальним композиційним складом, дисперснішою мікроструктурою, високою твердістю та, як наслідок, дрібнодисперсною морфологією кавітаційних виразок на їх поверхнях зношування.

Висновки, сформульовані за результатами експериментальних досліджень в рамках дисертаційної роботи, є логічними і обґрунтованими, відображають

наукову новизну, практичну цінність та значимість результатів проведених досліджень.

Основний текст дисертаційної роботи викладено на 134 сторінках, містить 47 рисунків і 9 таблиць. До списку використаних джерел увійшло 286 найменувань, перелік яких сформовано на основі ґрунтовного вивчення і аналізу науково-технічної літератури за тематикою дисертаційного дослідження. Загалом робота написана зрозуміло, матеріали викладені логічно і послідовно пов'язані між собою.

**Академічна доброчесність.** На основі аналізу тексту дисертаційної роботи та наукових публікацій Г. Ю. Ростової, в яких висвітлено її основні наукові здобутки, очевидних порушень академічної доброчесності не виявлено.

**Разом з тим до дисертаційної роботи виникли наступні зауваження:**

1. У роботі неодноразово повторюється теза про низьку жароміцність ферит-мартенситних сталей та про їх переваги щодо радіаційної стійкості. Дублювання розпочинається зі вступу і періодично продовжується у розділах 1, 3 та 4. Так на стор. 18: «Ф-М сталі спочатку не розглядалися для ядерних реакторів через недостатній рівень жароміцності...», а на стор. 19 практично повтор: «Невирішеним питанням, що не дозволяє повноцінно використовувати феритно-мартенситні сталі в якості конструкційних реакторних матеріалів є низька жароміцність...».

2. У 1 розділі аналізується література, присвячена рідкометалевому окрихченню і корозійному розтріскуванню ферит-мартенситних сталей та корозійній стійкості нікелевих сплавів. Проте у самій дисертаційній роботі ці питання не розглядалися.

3. Важливо було б розширити перелік методів атестації матеріалів атомної енергетики, доповнивши його визначенням їх корозійної стійкості, оскільки значна частина з них експлуатується в умовах контакту з рідкими середовищами. Особливо важливо оцінити вплив пропонованого в роботі методу інтенсивного пластичного деформування на схильність обробленої сталі до корозійного розтріскування. Адже за корозійного розтріскування виникає ще супутня

проблема водневого окрихчення матеріалів, яка особливо гостро може проявитися в зміцненому варіанті сталі.

4. У тексті роботи не достатньо чітко означено термін "радіаційна стійкість". Адже вона характеризується низкою параметрів. Тому важливо завжди конкретизувати, який саме з них використано для атестації сталі. Те ж стосується терміну «поламаний мартенсит». Може пошкоджений чи подрібнений було б краще?

5. В роботі не обґрунтовано вибір тривалості відпалу зразків сталі Т91 впродовж 100 годин перед дослідженнями температурної стабільності її структури та механічних властивостей.

6. В роботі подекуди трапляються чисто технічні помилки. Зокрема на стор. 97: «щільність карбідів  $M_{23}C_6$  зросла до  $3,8 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ » – замість  $2,7 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , як це подано у таблиці 3.3; стор. 92: «щільність виділень  $4,0 \times 10 \text{ 1/м}^2$ », а не в  $\text{м}^{-3}$ .

7. В роботі доволі часто використовуються трафаретні переклади термінів з російської. Зокрема: невизначеність з терміном кристалічна решітка чи ґратка (в тексті дисертації навіть в межах однієї сторінки зустрічаються обидва терміни одночасно); карбідоутворюючих елементів – замість карбідтвірних; поставка – замість постачання; кавітаційні каверни – замість виразки; схлопування бульбашок – замість їх сплескування; розтріскування під напругою – замість під напруженням: прокалюваність сталі – замість її прогартовуваність; відпускання – замість відпуск; наслідкове аустенітне зерно – замість спадкове; границі зерен – замість межі; дефекти упаковки – замість дефекти упакування; прокатка – замість вальцювання; преципітати – замість виділення; більш високий, більш низький, найбільш стійкий – замість вищий, нижчий, найстійкіший тощо. Звісно, що це зауваження лише доводить нагальну необхідність формування україномовної технічної термінології.



Більшість перелічених вище зауважень загалом мають рекомендаційних характер і тому не применшують загальної вагомості наукових результатів, отриманих під час виконання дисертаційної роботи, а, отже, якісно не змінюють її позитивну оцінку в цілому.

### **Загальний висновок по роботі**

Дисертаційна робота Ростової Г.Ю. на тему «Механізми впливу термомеханічної обробки на радіаційну стійкість, ерозійні та механічні властивості конструкційних матеріалів», є актуальним і завершеним науковим дослідженням з необхідними для дисертаційних робіт елементами наукової новизни та практичним значенням результатів. Оригінальні результати та висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими, а використані для цього методи – різнопланові і сучасні. Тема і отримані в дисертаційній роботі результати, присвячені матеріалознавчим аспектам модифікації структури і механічних властивостей матеріалів для атомної енергетики, збагачують наші знання в області прикладної фізики і відповідають паспорту спеціальності 104 – Фізика та астрономія, віднесеної до галузі знань 10 – Природничі науки, а також вимогам наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та постанові Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44 «Порядок присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії». З урахуванням вищесказаного, вважаю, що Ростова Ганна Юріївна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія» з галузі знань 10 «Природничі науки».

### **Офіційний опонент:**

провідний науковий співробітник  
відділу діагностики корозійно-  
водневої деградації матеріалів  
Фізико-механічного інституту  
ім. Г. В. Карпенка НАН України,  
доктор технічних наук, професор

Олександра СТУДЕНТ



Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ

створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 16:25:26 11.11.2024

Назва файлу з підписом: Відгук Студент О.З.\_Ст (1).pdf.asice

Розмір файлу з підписом: 571.5 КБ

Назва файлу без підпису: Відгук Студент О.З.\_Ст (1).pdf.zip

Розмір файлу без підпису: 610.2 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: СТУДЕНТ ОЛЕКСАНДРА ЗИНОВІЇВНА

П.І.Б.: СТУДЕНТ ОЛЕКСАНДРА ЗИНОВІЇВНА

Країна: Україна

РНОКПП: 1890609522

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 11:17:02 01.11.2024

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000D92291018C829405

Тип носія особистого ключа: Незахищений

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)

Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)

Сертифікат: Кваліфікований

Підписані файли: Відгук Студент О.З.\_Ст (1).pdf

Версія від: 2024.10.11 13:00