

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Никітіна Аркадія Валерійовича «Блістерінг феритно-мартенситної сталі та заліза під дією потоку частинок низькоенергетичної водневої плазми», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

### 1. Актуальність теми дисертації.

Ядерна енергетика майбутнього, яка буде включати реактори нового покоління на швидких нейтронах, термоядерні реактори, системи, керовані прискорювачами, є гарантом стійкого економічного і соціального розвитку в світі та Україні.

Під час роботи експериментальних установок термоядерного синтезу і майбутніх термоядерних реакторів перша стінка, обмежувачі пучка і дивертор будуть піддаватися комплексному впливу плазмових потоків іонів гелію, ізотопів водню та електромагнітного випромінювання. Сталі феритно-мартенситного класу, в зв'язку з більш високою в порівнянні з аустенітними сталями, радіаційною стійкістю, передбачаються до використання в якості перспективних матеріалів для елементів конструкції ядерних і термоядерних реакторів.

Дисертаційна робота А.В. Никітіна спрямована на рішення важливого завдання з встановлення фізичних закономірностей розвитку таких явищ деградації матеріалів як блістерінг та тріщиноутворення, що виникають під дією потоків частинок з низькоенергетичної водневої плазми в феритно-мартенситній сталі ЕП-450 і модельному матеріалі – залізі, і виявлення структурних факторів, що сприяють пригніченню тріщиноутворення.

Таким чином, наукові дослідження, проведені в дисертаційній роботі, є актуальними не тільки з наукової точки зору, але і мають велике прикладне значення. Актуальність дисертаційної роботи підтверджується і тим, що



результати дослідження є складовою частиною чотирьох наукових програм в рамках тем:

1. «Теоретичні та експериментальні дослідження ефектів взаємодії речовин з потоками нейтронів і заряджених частинок та розробка принципів створення нових матеріалів для реакторобудування» 2006-2010 р., № держреєстрації 80906UP0010 від 16.06.2006 р.;

2. «Дослідження фундаментальних матеріалознавчих проблем створення радіаційно-стійких функціональних матеріалів для атомно-енергетичного комплексу» 2011-2015 р., № держреєстрації 0111U009715;

3. «Вивчення фізичних механізмів радіаційно-індукованої деградації функціональних властивостей матеріалів діючих та перспективних атомно-генеруючих комплексів нового покоління для забезпечення енергетичної безпеки України» 2016-2020 р., № держреєстрації 0116U005094;

4. «Визначення критичних рівнів накопичення водню та впливу індукованих воднем мікроструктурних змін на деградацію фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів діючих і майбутніх ядерних енергетичних установок» 2016-2018 р., № держреєстрації 0116U006893.

**2. Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій.**

Для вирішення поставленого завдання автор застосовував сучасні, добре апробовані, методи дослідження поведінки дейтерію в сталі та залізі, структури, фазового складу досліджених матеріалів, параметрів блістерів, мікроструктурних механізмів розвитку блістерінга і тріщиноутворення в сталі і залізі під дією потоків водню, а саме, прецизійні методики термоактивованої десорбції і визначення профілю залягання дейтерію в матеріалах. Використані добре відомі надійні методи оптичної та скануючої електронної мікроскопії; рентгенівського енергодисперсійного мікроаналізу; вимірювання мікротвердості; рентгеноструктурних досліджень. Експериментальні дані, отримані за допомогою різних методів, добре узгоджені, як один з одним, так й із сучасними уявленнями про процеси розвитку блістерінга і

тріщиноутворення в конструкційних матеріалах під дією потоків водню. Усе вище сказане свідчить про **обґрунтованість і достовірність** отриманих результатів, висновків і рекомендацій.

### 3. Основні наукові результати дисертації, їх новизна.

Дисертаційна робота містить ряд **нових** експериментальних результатів, які характеризують особливості ерозії поверхні  $\alpha$ -заліза і сталі ЕП-450 під впливом потоків частинок з низькоенергетичної водневої плазми, температурні і дозові залежності виникнення блістерів і тріщин в сталі ЕП-450, вплив деформації на виникнення та перебіг цих процесів, а також вплив вихідної структури на розвиток і пригнічення блістерінга в феритно-мартенситній сталі.

На мою думку, найбільш важливими є наступні результати:

– вперше проведено детальне дослідження розмірів блістерів і тріщин, їх густини, глибини розташування, кінетики розвитку. Встановлена залежність цих параметрів від мікроструктури сталі, дози і температури опромінення;

– вперше встановлено вплив попередньої деформації зразків на закономірність розвитку блістерів. Показано, що збільшенні ступеня холодної деформації зразків сталі з 10 до 95% приводить к зниженню майже на порядок величини критичних доз та збільшення розмірів блістерів і тріщин майже вдвоє та поширення тріщин на глибини до сотень мікрон;

– вперше встановлено температурний інтервал виникнення блістерів і тріщин в сталі ЕП-450 і залізі. Показано, що блістерінг і утворення тріщин вноситимуть значний внесок в деградацію структури зразків сталі ЕП-450 коли температура їх поверхні буде знижуватись до значень  $\sim 373$  К, що може мати місце під час аварійної зупинки термоядерного реактора;

– показано, що зменшення розмірів карбідів і карбонітридів по межах зерен та їх сфероїдизація призводить до зниження числа блістерів та тріщин.

Представлені експериментальні результати дисертаційної роботи є важливими. Їхня **наукова значимість** полягає в тому, що вони доповнюють

існуючі фізичні фундаментальні уявлення про фізику радіаційної пошкоджуваності твердих тіл і дозволяють прогнозувати певні аспекти поведінки матеріалів в термоядерних реакторах і енергетичних установках 4-го покоління.

4. **Практичне значення** отриманих результатів полягає в першу чергу в тому, що показана можливість розвитку блістерінга і утворення тріщин в сталях феритно-мартенситного класу під дією пристінкової низькоенергетичної водневої плазми термоядерного реактора. Дані про залежність параметрів блістероутворення від структури і фазового складу феритно-мартенситної сталі можуть бути використані для визначення факторів, що призводять до пригнічення утворення тріщин і блістерів. Дані щодо посилення блістероутворення при деформації сталі можуть представляти інтерес для розробників технологій термічної обробки сталей феритно-мартенситного класу. Крім того необхідно відзначити, що встановлені в дисертаційній роботі температурні інтервали виникнення блістерів і тріщин в сталі ЕП-450 і залізі можуть бути використані при розробці регламенту робіт під час аварійної зупинки термоядерного реактора.

Отримані результати відповідають сучасними уявленням щодо комплексного впливу плазмових потоків, іонів гелію та ізотопів водню, і електромагнітного випромінювань на властивості конструкційних матеріалів ядерних і термоядерних реакторів.

Основні результати роботи **в повному обсязі** й вчасно опубліковані у 18 наукових працях, з них 7 наукових статей у фахових журналах та 11 тез докладів на міжнародних наукових конференціях. Автореферат **повно** та **точно** відображає зміст дисертації.

Зауваженні до тексту, та змісту дисертації:

1. В авторефераті і дисертації роботи наведені різні назви досліджених зразків сталі. Доцільніше було вказати, що в якості зразків для досліджень були використані зразки сталі типу ЕП-450.

2. У дисертаційній роботі були досліджені зразки сталі типу ЕП-450 і для порівняння модельні зразки чистого заліза. На жаль, в роботі відсутні висновки щодо порівняльних характеристик поведінки цих зразків в умовах впливу плазми.
3. Наведені в роботі гістограми непереконливо ілюструють зміну розмірів блістерів в залежності від умов опромінення за рахунок порушення правила їх побудови і відмінності в масштабі.
4. На стор. 38 в таблиці 1,3 наведені не коефіцієнти дифузії, а значення передекспоненційного множника та енергії активації. Тому й таблиця повинна мати таку назву.
5. На мікрофотографіях (наприклад рис. 3.9, рис. 4.6, а) форма наведених блістерів не є круглою, тому слід писати не діаметр блістера, а “середній діаметр”.
6. Текст дисертації містить недоречні вирази, наприклад, стор. 85 “тріщина розвивається по межі зерна (рис. 3.11) і має міжкристалітний характер”.
7. У дисертаційній роботі зустрічаються помилки в словах, наприклад, с. 86, 7-й рядок від початку абзацу, написано «фугативність» замість «фугітивність»; с. 65, рядок над рис. 2.8 - «воднень» замість «водень»; с. 138, в підписі під рис. 5.5 написано «карбидами» замість «карбідами».

Зазначені зауваження не знижують наукової та практичної цінності роботи А.В. Нікітіна.

Вважаю, що дисертація є **закінченою науковою працею**, у якій вирішено поставлене наукове завдання зі встановлення фізичних закономірностей розвитку таких явищ деградації матеріалів як блістеринг та тріщиноутворення, що виникають під дією потоків частинок з низькоенергетичної водневої плазми в феритно-мартенситній сталі ЕП-450 і модельному матеріалі – залізі, і виявлення структурних факторів, що сприяють пригніченню тріщиноутворення.

Проведені в роботі дослідження відповідають паспорту **спеціальності** 01.04.07 – фізика твердого тіла.

На мою думку, дисертація Нікітіна А.В. повністю відповідає всім вимогам МОН України, що пред'являються до дисертацій на здобуття наукового ступеню кандидата фізико-математичних наук, а також пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Нікітін Аркадій Валерійович, заслуговує присудження вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,  
професор кафедри фізики твердого тіла,  
Харківського національного університету  
імені В.Н. Каразіна,  
кандидат фізико-математичних наук,  
професор

Є.Ю. Бадіян

Підпис к. фіз.-мат. наук, проф. Бадіян Є.Ю.  
ЗАСВІДЧУЮ  
вчений секретар  
Харківського національного університету  
імені В.Н. Каразіна МОН України



Н.А. Віннікова