

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Сунгурова Богдана Сергійовича «Вплив радіаційно-індукованих мікроструктурних дефектів на процеси накопичення водню та зміцнення аустенітної сталі SS316», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Актуальність теми.

Актуальність пропонованого дослідження пов'язана з рішенням однієї з основних проблем фізики твердого тіла - розробкою фундаментальних основ створення конструкційних матеріалів з тривалим терміном функціонування в умовах інтенсивних термічних, радіаційних, хімічних, механічних та інших зовнішніх впливів. Конструкційні матеріали ядерних енергетичних установок в порівнянні з матеріалами традиційних енергетичних установок працюють в більш складних умовах. Нейтронне опромінення прискорює процеси повзучості, підсилює тимчасову залежність міцності, різко знижує деформаційну здатність при помірних (20 ... 450 °C), високих (500 ... 800 °C) і особливо надвисоких (вище 800 °C) температурах, знижує опір корозії. Накопичення певної дози нейтронів викликає пороутворення і радіаційне розпухання. В результаті ядерних реакцій в матеріалах утворюються газоподібні трансмутанти (гелій, водень), які сприяють прояву гелієвого окрихчення, водневої крихкості і газового розпухання.

Об'єктом дослідження у поданій роботі є аустенітна нержавіюча сталь SS316, яка широко використовується як конструкційний матеріал в реакторах II і III поколінь через поєднання її хорошої стійкості до повзучості при високій температурі і опору кисневій корозії. Крім того, зі сталі типу SS316 виготовлений корпус діючих в даний час джерел нейтронів «spallation», вона обрана в якості конструкційного матеріалу для ІТЕР і вважається найбільш придатним конструкційним матеріалом для корпусу реактора з розплавленою сіллю (MSR) в якості теплоносія.

Вплив гелію і водню на властивості конструкційних сталей ядерних і термоядерних реакторів розглядається в даний час як особлива проблема фізики радіаційних ушкоджень і радіаційного матеріалознавства, яка потребує вирішення багатьох матеріалознавчих задач, зокрема, вивчення комплексного впливу на матеріали водню, гелію і радіаційних дефектів.

Внесок в процеси накопичення і утримання водню в металах і сплавах дає цілий спектр різних дефектів радіаційного походження (точкові дефекти і їх кластери, дислокаційні петлі вакансійного і міжвузельного типів, виділення нової фази, вакансійні і газонаповнені пори). Однак внесок в ці процеси кожного з типів дефектів до теперішнього часу остаточно не встановлено.

У зв'язку з вищесказаним, встановлення закономірностей захоплення і накопичення водню, механізмів зміцнення сталі SS316 і впливу на ці процеси радіаційних дефектів і імплантованого гелію становлять **важливу і актуальну** задачу сучасної фізики твердого тіла.

Актуальність дисертаційної роботи підтверджується і тим, що результати дослідження є складовою частиною трьох наукових програм в рамках тем:

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

2. «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.

3. «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

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Сунгурова Б.С. базується на добротному огляді літератури за даною проблемою, чіткої постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів досліджень, критичному аналізу отриманих результатів у порівнянні з результатами інших дослідників, якісному формулюванні отриманих висновків і є дуже високою. Дисертаційна робота являє собою закінчений труд, який представляє сукупність оригінальних експериментальних методик і нових, отриманих автором, науково обґрунтованих результатів в області фізики твердого тіла.

Згідно з викладеним вище обґрунтованість наукових положень, висновки результатів дослідження і рекомендації, що сформульовані в дисертаційній роботі, не підлягають сумніву.

Достовірність результатів досліджень.

При виконанні поставленої мети й завдання досліджень було коректно використано комплекс експериментальних методів. Для виявлення закономірностей захоплення і накопичення водню, механізмів зміцнення сталі SS316 і впливу на ці процеси радіаційних дефектів і імплантованого гелію використані добре відомі та широко апробовані методи досліджень твердого тіла та ядерно-фізичні методи. Зокрема, термодесорбційна мас-спектрометрія (ТДС), просвічувальна та скануюча електронна мікроскопія, дослідження механічних характеристик шляхом вимірювання нанотвердості за допомогою наноіндентора Nanoindenter G200, металографічні дослідження, а також методика розрахунку спектрів термоактивованого виділення водню з металів, яка ґрунтується на моделі, що дозволяє враховувати його дифузію, взаємодію з дефектами і рекомбінаційну десорбцію.

Застосування комплексу незалежних експериментальних методів, які взаємно доповнюють одне одного, забезпечило достовірність отриманих результатів.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступні:

1. Вперше проведено детальне дослідження температурних інтервалів десорбції і вивчені просторово-концентраційні розподіли дейтерію в об'ємі сталі SS316 після імплантації і в процесі відпалу, виконано чисельне моделювання процесів імплантації, дифузії, взаємодії з пастками і рекомбінації для визначення термодинамічних параметрів захоплення ізотопів водню в сталі SS316 і порівняння їх з параметрами для інших сталей аустенітного класу.

2. Встановлено внесок в процеси накопичення і утримання водню в сталі SS 316 різних дефектів радіаційного походження (точкові дефекти і їх кластери, дислокаційні петлі міжвузольні типу, вакансійні і газонаповнені пори). Встановлена кореляція між структурою, що розвивається при опроміненні, та рівнем накопичення водню. Вперше показано, що максимальний ефект на захоплення дейтерію з його утриманням до $0,35 T_{пл}$ здійснюють бульбашки інертного газу.

3. Вперше досліджено залежність зміцнення сталі SS316 від умов опромінення. Показано зв'язок еволюції радіаційно-індукованої структури і імплантації гелію і водню зі зміною її механічних властивостей. Встановлено, що радіаційне зміцнення сталі SS316 є функцією дози опромінення і досягає квазінасичення при флюенсах близько 1 зна . Ефект зміцнення обумовлений консервативною природою петель Франка, що стримують рух дислокацій.

4. Вперше показано, що закріплення дислокацій, що призводить до зміцнення сталі, більш ефективно на дислокаційних петлях діаметром до 15 нм, в порівнянні з газовими бульбашками. Гелій і водень при імплантації їх до концентрацій більше 1 ат.% підсилюють зміцнення, обумовлене дислокаційною компонентою, на 20-30%. Два ці фактори - петлі Франка та гелій/водень підвищують межі міцності і плинності в 1,8 рази.

Представлені експериментальні результати дисертаційної роботи є важливими. Їхня наукова значимість полягає в тому, що вони становлять безпосередній інтерес не тільки для оцінки накопичення ізоотопів водню і розвитку низькотемпературного окрихчення, але також є сходинкою для встановлення взаємозв'язку механічних властивостей і радіаційно-індукованої мікроструктури матеріалів, що розвивається при різних радіаційних впливах.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, можуть використовуватися для аналізу закономірностей поведінки ізоотопів водню в імітаційних експериментах з одночасним створенням пошкоджень і введенням домішок газових трансмутантів в нержавіючих сталях аустенітного класу.

Результати дослідження дають можливість надати ряд обґрунтованих рекомендацій експериментаторам і фахівцям-розробникам конструкційних матеріалів ядерних і термоядерних реакторів щодо врахування низькотемпературного радіаційного окрихчення та характеру поведінки водню і гелію при одночасному їх проникненні в матеріали і створенні пошкоджень.

Встановлений в дисертації механізм перерозподілу ізоотопу водню - дейтерію між пастками радіаційного походження дає можливість узагальнити сучасні знання про взаємодію водню з матеріалами і вирішити проблему зниження опору

корозійному розтріскуванню внутрішньокорпусних пристроїв водо-водяних реакторів і визначити технології його попередження.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 15 наукових роботах, з них 7 наукових статей у фахових виданнях України та інших країн та 8 матеріалів і тез доповідей на міжнародних наукових конференціях. У цілому, рівень і кількість публікацій та апробація матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам ДАК МОН України.

Автореферат є ідентичним за змістом з основними положеннями дисертації і достатньо повно відображає основні її наукові результати, що отримані здобувачем.

По тексту дисертаційної роботи можна зробити наступні зауваження:

- на мою думку принаймні два висновки, які наведені у висновках до розділу 3, а саме, незмінність параметрів радіаційно-індукованих дислокацій у всьому температурному діапазоні, де спостерігається процес десорбції газу та відсутність чіткої кореляції між еволюцією дислокаційної структури і термічно активованим вивільненням дейтерію, а також зміщення інтервалу десорбції дейтерію зі сталі на 200 ... 300 градусів у область більш високих температур при наявності пасивуючої окисної плівки, можуть бути представлені в загальних висновках до всієї дисертації;
- У дисертації використана спрощена модель для вилучення характеристик зміцнення металу, яка не враховує просторовий градієнт концентрації імплантованої газової домішки і градієнт профілю радіаційних ушкоджень. Такий підхід дає можливість визначити тільки усереднені значення твердості, зміцнення і межі плинності уздовж градієнтів концентрації дефектів і імплантованою домішки.
- на більшості, але не на всіх рисунках вказаний довірчий інтервал, хоча більшість результатів, представлених в дисертації, експериментального характеру;
- деяку незадоволеність залишає відсутність в підписах для деяких малюнків вказівок на тип газу, використовуюваного для опромінення, дозу і температуру опромінення, рис. 3.1-3.3, 3.15, 5.5, 5.20;
- в тексті зустрічаються описки, слова російською мовою, наприклад, с. 17, 27, 48.

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

ВИСНОВОК

Зазначені зауваження носять поодинокий характер і не знижують наукової та практичної цінності роботи Сунгурова Б.С.

Вважаю, що дисертація є закінченою науковою працею, у якій вирішено поставлене завдання зі встановлення фізичних закономірностей захоплення та накопичення водню в аустенітній неіржавіючій сталі SS316 і впливу на ці процеси радіаційних дефектів та імплантованого гелію, а також визначення механізмів зміцнення сталі при радіаційному впливі.

Проведені в роботі дослідження відповідають паспорту спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла (фізико-математичні науки).

На мою думку, дисертація Сунгурова Б.С. повністю відповідає всім вимогам ДАК МОН України, що пред'являються до дисертацій на здобуття наукового ступеню кандидата фізико-математичних наук, зокрема пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Сунгуров Богдан Сергійович, заслуговує присудження вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри фізики
Харківського національного
університету міського господарства
імені О.М.Бекетова МОН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор



О.М.Петченко

Підпис проф. Петченка О.М. засвідчую.
Вчений секретар ХНУМГ ім.О.М. Бекетова
МОН України, д.т.н., доцент

Д.В.Тугай



Діючий проф. Петченко О.М.
Завідувач кафедри фізики
Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Тугай Д.В.