

УДК 669.017:539.16

ВПЛИВ РАДІАЦІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ НА НАКОПИЧЕННЯ ТА РОЗПОДІЛ ДЕЙТЕРІЮ В ФЕРИТНО-МАРТЕНСИТНИХ СТАЛЯХ

Г.Д. Толстолицька, І.Є. Копанець, А.А. Макієнко, В.В. Ружицький,
С.О. Карпов, А.В. Нікітін

*Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут"
Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій*

61108, м. Харків, вул. Академічна, 1

E-mail: g.d.t@kipt.kharkov.ua

Надійшла до редакції 12 жовтня 2009 р.

З використанням методик іонної імплантації і ядерної реакції $D(^3\text{He},p)^4\text{He}$ вивчено вплив попередньої імплантації аргону ($E_{\text{іон}} = 1,4 \text{ MeV}$) на захоплення дейтерію в феритно-мартенситних сталях EP-450 та EI-852. При дослідженні захоплення, утримання та еволюції профілів розподілу атомів дейтерію в сталях за глибиною після імплантації або постімплантаційних відпалів в інтервалі температур 300...1500 К використовувалися іони гелію-3 з енергією 0,7 і 1,0 MeV. Імплантація іонів дейтерію з енергією 10 кеВ до дози $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ здійснювалась при кімнатній температурі зразків. Визначена залежність кількості захоплених атомів дейтерію від температури відпалів. Виявлено, що утримання дейтерію в сталях значно посилюється за присутності радіаційних пошкоджень, що виникають при опроміненні матеріалів прискореними іонами аргону – температурний інтервал виходу водню з кристалічної ґратки зміщується на 200 К в сторону вищих температур.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: іони, дейтерій, аргон, дефекти, імплантація, розподіл, накопичення.

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЯХ

Г.Д. Толстолицька, І.Є. Копанець, А.А. Макієнко, В.В. Ружицький,
С.А. Карпов, А.В. Нікітін

*Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут"
Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій*

61108, г. Харьков, ул. Академическая, 1

С использованием методик ионной имплантации и ядерной реакции $D(^3\text{He},p)^4\text{He}$ изучено влияние предварительной имплантации аргона ($E_{\text{ион}} = 1,4 \text{ MeV}$) на захват дейтерия в ферритно-мартенситных сталях EP-450 и EI-852. При исследовании захвата, удержания и эволюции профилей распределения атомов дейтерия по глубине после имплантации или постимплантационных отжига в интервале температур 300...1500 К использовались ионы гелия-3 с энергией 0,7 и 1,0 MeV. Имплантацию ионов дейтерия с энергией 10 кэВ до дозы $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ осуществляли при комнатной температуре образцов. Определена зависимость количества захваченных атомов дейтерия от температуры отжига. Обнаружено, что удержание дейтерия в стали в присутствии радиационных повреждений, которые возникают при облучении материалов ускоренными ионами аргона, значительно усиливается – температурный интервал выхода водорода из кристаллической решетки смещается на 200 К в сторону более высоких температур.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ионы, дейтерий, аргон, дефекты, имплантация, распределение, накопление.

INFLUENCE OF RADIATION DAMAGE ON ACCUMULATION AND DISTRIBUTION OF DEUTERIUM IN FERRITIC/MARTENSITIC STEELS

G.D. Tolstolitskaya, I.E. Kopanets, A.A. Makienko, V.V. Ruzhytskiy,
S.A. Karpov, A.V. Nikitin

*National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"
Institute of Solid State Physics, Material Science and Technologies*

1, Akademicheskaya st., 61108 Kharkov, Ukraine

The influence of preimplanted argon ($E_{\text{ion}}=1,4\text{MeV}$) on deuterium trapping in EP-450 and EI-852 steels was studied using methods of ion implantation and the nuclear reaction $D(^3\text{He},p)^4\text{He}$. Trapping, retention and depth profile evolution of deuterium atoms in steels after implantation or postimplantation annealing in range 300...1500 K were obtained using ^3He ions with energy of 0,7 and 1,0 MeV. The implantation of 10 keV deuterium ions up to dose of $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ was done at room temperature of samples. The dependence of trapped deuterium atoms amount on annealing temperature was determined. It was found that retention of deuterium in steels is strongly enhanced by presence of radiation damages created by argon ions irradiation – the hydrogen release out of crystalline lattice temperature interval shifts on 200 K to higher temperature.

KEY WORDS: ion, deuterium, argon, defects, implantation, depth profile, accumulation.

Феритно-мартенситні сталі є одними з кандидатних матеріалів для першої стінки термоядерних реакторів, а також для корпусів і вікон для введення пучка в камеру мішені для ядерних систем, керованих прискорювачами (ADS). Феритно-мартенситні сталі були включені до програм розробки матеріалів для термоядерних реакторів біля 30 років тому [1] після виявлення при виконанні програми досліджень матеріалів для швидких реакторів їх надзвичайної резистентності розпухання та чудової температурно-механічної

стійкості порівняно з аустенітними неіржавіючими сталями. З моменту включення цих матеріалів до термоядерних програм виникли питання щодо можливості та правомірності їх застосування. Особливе занепокоєння, зокрема, стосувалось виявленого збільшення під дією радіаційного опромінення температури в'язко-крихкого переходу (ТВХП) та зменшення рівня енергії, що запасється.

В зв'язку з цим необхідно було додатково дослідити зміну властивостей матеріалів, обумовлену присутністю в об'ємі газових атомів, зокрема чутливість до водневого окрихчення. Згідно більшості опублікованих на нинішній час праць, в яких розглядається дія імплантованого водню (дейтерію) на окрихчення, зміцнення, втомленість, повзучість конструкційних матеріалів, спостерігається значний небажаний його вплив на ці процеси [2-4]. Ситуація ускладнюється через виявлене значне накопичення водню в об'ємі матеріалів, незважаючи на те, що за високого значення коефіцієнта дифузії при кімнатній температурі $D \sim 1 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ (сталь X18H10T [5]), водень за час опромінення повинен практично покинути зону проникнення.

За оцінками, швидкість утворення водню в сталій першій стінці реактора під дією нейтронів з енергією 14 MeV внаслідок реакції трансмутації (n,p) буде становити 0,1 ат.%/год [6]. Більш того, до уваги потрібно взяти також додаткові зовнішні джерела водню, такі як, наприклад, водна корозія, радіоліз води-охолоджувача, газ-охолоджувач та газ продування. В зв'язку з цим для розробки матеріалів для термоядерних реакторів, як і реакторів, керованих прискорювачами, вивчення закономірностей захоплення водню та його ізоотопів, зокрема дейтерію, тритію, а також їх вплив на механічні властивості сплавів є нагальною потребою.

В термоядерних реакторах синергетичні ефекти зміщувальних пошкоджень, атомів водню та гелію можуть посилювати радіаційно-індуковану деградацію. Такі ефекти спостерігались в ряді досліджень, наприклад, найбільше розпухання спостерігалось в феритних модельних Fe-Cr сплавах при опроміненні їх іонами трьох сортів [7]. В ванадієвих сплавах одночасне опромінення іонами кількох сортів посилювало виникнення порожнин та розпухання [8]. Синергетичний ефект опромінення інертним газом (гелієм) та воднем тих же сплавів і F82H мартенситної сталі [9] був підтверджений при виявленні в них більших за розмірами порожнин (розпухання). Вважається загальноприйнятним, що вихід дейтерію з зони проникнення уповільнюють дефекти, які утворюються при іонній імплантації. Вивчення впливу дефектів на процеси утримання та накопичення водню та визначення механізмів цих процесів є актуальним в зв'язку з виявленням синергетичного характеру поведінки трансмутантних газів при одночасному їх проникненні в матеріали та створенні пошкоджень [10,11].

Метою роботи було дослідження закономірностей накопичення та розподілу водню (дейтерію), імплантованих в феритно-мартенситні сталі, та впливу на ці процеси дефектів, створених при опроміненні високоенергетичними іонами аргону, які використовувались для моделювання зміщувальних пошкоджень, обумовлених дією високоенергетичних нейтронів.

МАТЕРІАЛИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ

Для досліджень використовувались зразки з фольг феритних/мартенситних сталей ЕП-450 та ЕІ-852. Зразки розмірами $27 \times 7 \times 0,1$ (мм) електрополірували в електроліті наступного складу: HCl (10%) + C₃H₈O₃ (10%) + C₂H₅OH (80%). Перед опроміненням зразки короткочасно відпалювались безпосередньо в експериментальній камері для дегазації та очистки поверхні. Склад матеріалів, які досліджувались, подано в таблиці (в масових відсотках).

Таблиця

Склад матеріалів, які досліджувались (мас. %).

Марка сталі	Країна-виробник	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Nb	B	Інші елементи
ЕП-450	Росія	0,1...0,15	0,6	0,6	11...13,5	0,05...0,3	1,2...1,4	0,1...0,3	0,3...0,6	0,004	
ЕІ-852	Росія	0,13	1,19	0,31	13,15	0,27	1,69				P=0,017

Для вивчення імплантації, утримання водню (дейтерію), а також ефектів взаємодії між дейтерієм, атомами благородного газу і дефектами структури в феритно-мартенситних сталях використовувався прискорювально-вимірювальний комплекс «ЕСУ-2». Експериментальний комплекс складається з компактного електростатичного прискорювача «ЕСУ-2», мас-сепаратора, імплантатора, камер для опромінення мішеней та вимірювань за допомогою ядерно-фізичних методів. Параметри вимірювального комплексу наступні: інтервал безперервно регульованих значень енергії прискорених іонів становить 200...1600 keV (за використання подвійно заряджених іонів можливе збільшення енергії до 3,2 MeV); стабільність енергії пучка 0,1%; максимальне значення струму пучка іонів 10 мкА; сорт прискорюваних іонів – інертні гази від He до Xe, хімічно активні – від водню до азоту. Вимірювальна система «ЕСУ-2» дозволяє застосовувати різноманітні техніки аналізу з використанням пучка прискорених часток, в тому числі Резерфордівське зворотне розсіяння (РЗР), каналювання та аналіз за допомогою ядерних реакцій (АЯР). Іонно-пучкова техніка та методологія аналізу експериментальних даних забезпечували можливість вивчення радіаційних дефектів.

Геометрія експерименту визначалась необхідністю суміщення пучків аргону та дейтерію на зразку при

опроміненні, відпалі зразка та вимірюванні просторово-концентраційного розподілу дейтерію. При цьому враховувалось, що аналіз розподілу дейтерію за допомогою ядерної реакції $D(^3\text{He},p)^4\text{He}$ дає кращу роздільність за глибиною при геометрії розсіяння вперед [12].

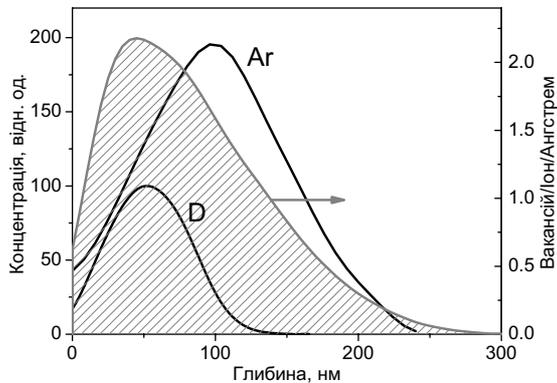


Рис. 1. Профілі пробігів та дефектів іонів аргону з енергією 500 кеВ в сталі при куті падіння 30° до поверхні зразка і профіль пробігів 5 кеВ-ного дейтерію при перпендикулярному куті його падіння.

Виходячи з цих передумов, в поданій роботі вибрана геометрія, при якій зразок розміщено під кутом 30° відносно аналізуючого пучка. Дейтерій імпантувався практично перпендикулярно поверхні зразка, а іони аргону – перпендикулярно поверхні зразка і під кутом 30° .

На рис. 1 показані розраховані за допомогою програми SRIM [13] профілі пробігів та дефектів для іонів аргону в сталі з енергією 500 кеВ з кутом падіння 30° до поверхні та профілі пробігів 5 кеВ-ного дейтерію при перпендикулярному куті його падіння. При таких параметрах опромінення створюються умови розміщення дейтерію в області розподілу атомів інертного газу та високого рівня пошкоджуваності (~ 100 зміщень на атом (зна)).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Просторово-концентраційні розподіли отримані для ізоотопу водню дейтерію, імпантованого з енергією 5 кеВ в сталь ЕП-450 при $T_{\text{кімн}}$. Профіль розподілу дейтерію має форму близьку до гаусіанової, але з шириною на напіввисоті, яка перевищує розрахункові для профілів розподілів пошкоджень та пробігів іонів. Еволюція профілів розподілу дейтерію в сталі ЕП-450 в процесі постімпантацийних відпалів подана на рис. 2.

Профіль розподілу дейтерію, введеного з енергією 5 кеВ при $T_{\text{кімн}}$ до дози $1 \cdot 10^{16}$ см^{-2} в сталь ЭП-450, попередньо опроміненої іонами аргону з енергією 500 кеВ до дози $5 \cdot 10^{16}$ см^{-2} , та його еволюція в процесі постімпантацийних відпалів подані на рис. 3. Проникнення при кімнатній температурі лише дейтерію з енергією 5 кеВ та створення при цьому пошкоджень ~ 1 зна веде до утримання в сталі ЕП-450 концентрації дейтерію приблизно в три рази меншої розрахункової (рис. 2, крива 1). Створення попередньої пошкоджуваності на рівні 100 зна веде до утримання практично 100% імпантованого дейтерію (рис. 3, крива 1).

За допомогою опрацювання наведених на рис. 2 та 3 профілів розподілу дейтерію за глибиною, були отримані дані що до кількості захопленого у зразках при різних температурах відпалу дейтерію. Отримана температурна залежність утримання дейтерію подана на рис. 4.

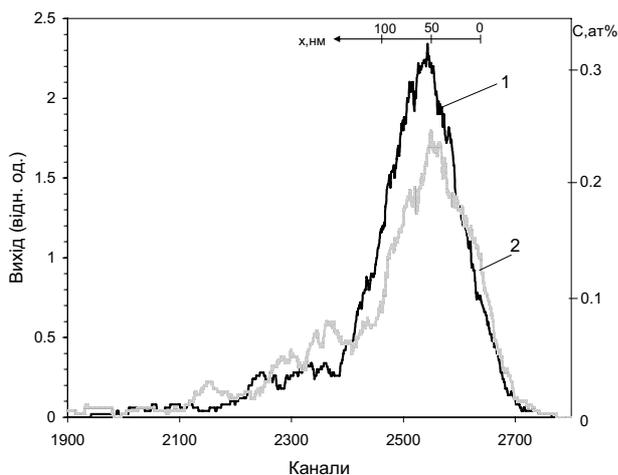


Рис. 2. Профіль розподілу дейтерію, імпантованого з енергією 5 кеВ при $T_{\text{кімн}}$ до дози $1 \cdot 10^{16}$ част./ см^2 в сталь ЕП-450 (1) та після відпалу при 380 К (2).

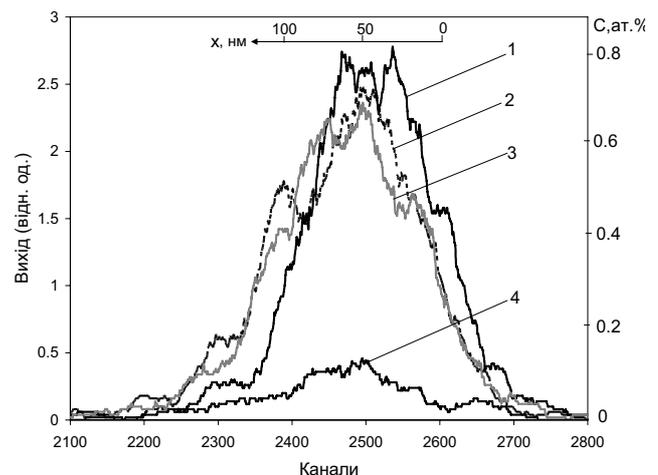


Рис. 3. Профілі розподілу дейтерію, імпантованого з енергією 5 кеВ при $T_{\text{кімн}}$ до дози $1 \cdot 10^{16}$ D/ см^2 в сталь ЕП-450, попередньо опромінену іонами аргону з енергією 500 кеВ до дози $5 \cdot 10^{16}$ Ag^+ / см^2 (1), та після відпалів зразків при 380 (2), 500 (3) і 600 К (4).

Як видно з рис.2 та 4, при рівнях пошкоджень ~ 1 зна, відпал, починаючи з температур ≥ 300 К, спричиняє монотонне зниження висоти профілів розподілу пробігів та зменшення концентрації дейтерію, що утримується в

сталі. За попередньої імплантації аргону (рівень пошкоджень ~ 100 зна) концентрація утримуваного дейтерію залишається незмінною до температури ~ 500 К.

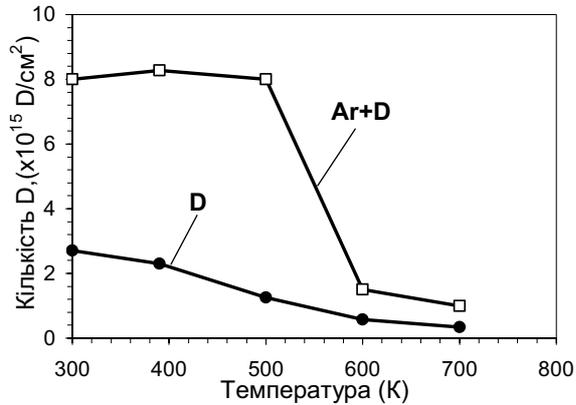


Рис. 4. Утримання дейтерію, імплантованого до дози $1 \cdot 10^{16} \text{D}^+/\text{см}^2$, в сталі ЕП-450, що не опромінювалась попередньо та опромінювалась іонами аргону до дози $5 \cdot 10^{16} \text{Ar}^+/\text{см}^2$.

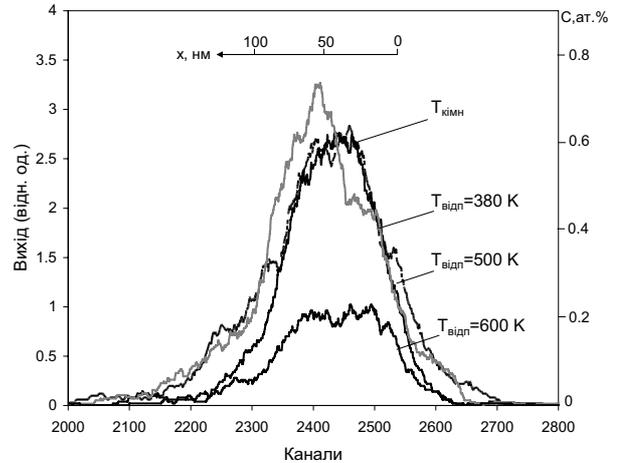


Рис. 5. Профілі розподілу дейтерію, імплантованого з енергією 5 кеВ при $T_{\text{кімн.}}$ до дози $1 \cdot 10^{16} \text{D}^+/\text{см}^2$ в сталь ЕІ-852 безпосередньо після імплантації та після відпалів при 380, 500 і 600 К. Зразки попередньо опромінювались іонами Ar^+ до дози $5 \cdot 10^{16} \text{Ar}^+/\text{см}^2$ при куті падіння 30° до поверхні.

В інтервалі температур 500...600 К спостерігається різке зменшення кількості дейтерію, проте його все ще залишається в зразку в 2...3 рази більше, порівняно з випадком без попереднього опромінення (див. рис. 4, $T=700$ К). У сталі ЕІ-852 спостерігається такий же ефект. При опроміненні сталі ЕІ-852 іонами аргону з енергією 500 кеВ та куті їх падіння 30° до поверхні профілі пробігів, дефектів і енерговиділення достатньо добре перекриваються в шарі 0...150 нм.

При рівні пошкоджень ~ 100 зна профілі розподілу дейтерію в сталі ЕІ-852 залишаються практично незмінними до температури відпалу 500 К (рис. 5).

При збільшенні енергії іонів аргону до 1,4 МеВ та при падінні пучка аргону перпендикулярно поверхні зразка області розподілу тільки дефектів зміщення та дефектів + введених атомів аргону достатньо рознесені (див. рис. 6). При цьому іони дейтерію з енергією 5 кеВ проникають в шар розподілу дефектів. На рис. 7 показані профілі розподілу дейтерію, впровадженого при кімнатній температурі до дози $2 \cdot 10^{16} \text{см}^{-2}$ в сталь ЕІ-852. Попередньо зразки опромінювались іонами аргону з енергією 1,4 МеВ до дози $1 \cdot 10^{17} \text{см}^{-2}$ при падінні пучка перпендикулярно поверхні. Використовуючи аналізуючий пучок іонів $^3\text{He}^+$ з енергіями 700 та 1000 кеВ, зондували шари від 0 до 300 нм в першому випадку та від 0 до 800 нм в другому.

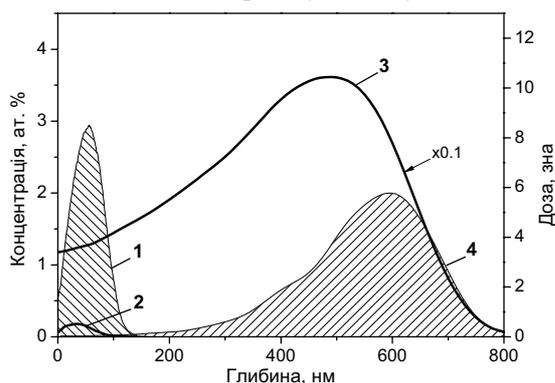


Рис. 6. Розрахункові профілі розподілу пробігів (1) і профілі пошкоджень (2) 5 кеВ дейтерію, та профілі пошкоджень (3) і пробігів (4) іонів аргону у випадку їх нормального падіння на зразок

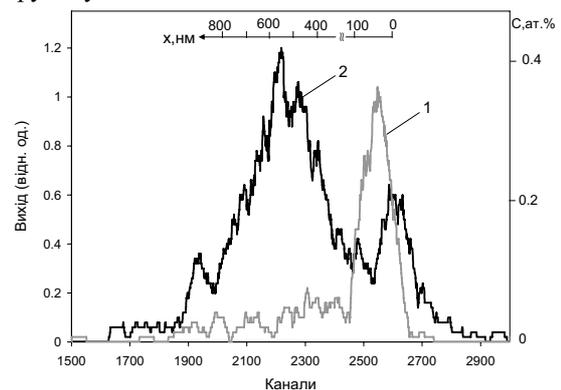


Рис. 7. Профілі розподілу дейтерію, імплантованого з енергією 5 кеВ при $T_{\text{кімн.}}$ до дози $2 \cdot 10^{16} \text{см}^{-2}$ в сталь ЕІ-852 попередньо опромінену іонами аргону з енергією 1400 кеВ до дози $1 \cdot 10^{17} \text{Ar}^+/\text{см}^2$ при куті падіння по нормалі до поверхні. Енергія пучка, що аналізує, становила 700 (1) і 1000 кеВ (2).

Аналіз даних, наведених на рис. 7, показав, що при кімнатній температурі опромінення дейтерієм лише частково ($\sim 17\%$) утримується в шарі з додатково створеними дефектами. Решта $\sim 80\%$ затриманого дейтерію перерозподіляється в шар залягання аргону. При відпалах профілі розподілу дейтерію практично не змінюються до температури 500 К (рис. 8). Після відпалу при $T=600$ К в зразку реєструється всього $\sim 10\%$ від

впровадженого при $T_{\text{кімн}}$ дейтерію, головним чином в приповерхневому шарі.

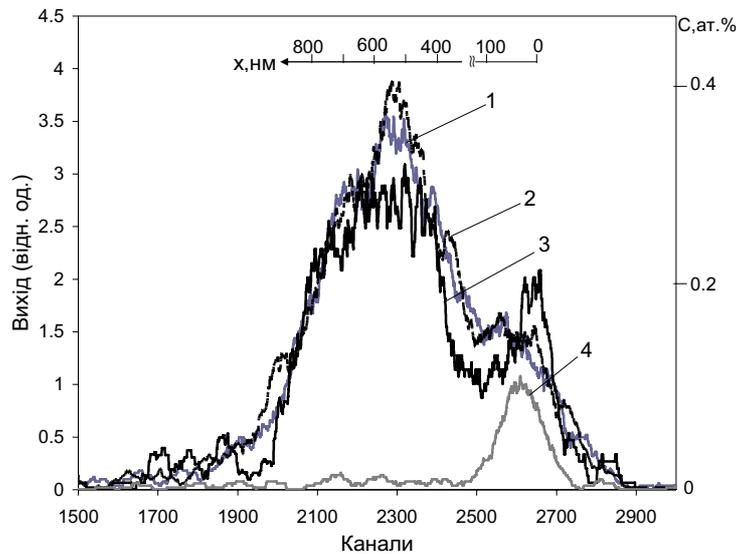


Рис. 8. Профілі розподілу дейтерію, імплантованого в сталь EI-852 з енергією 5 кеВ при $T_{\text{кімн}}$ до дози $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (1), та після відпалів при 380 (2), 500 (3) і 700 К (4).

Попередня імплантація іонів аргону з енергією 1400 кеВ до дози $1 \cdot 10^{17} \text{ Ag}^+/\text{см}^2$ здійснювалась при куті падіння по нормалі до поверхні. Енергія аналізуючого пучка становила 1000 кеВ.

Опромінення металів та сплавів іонами інертних газів в загальному випадку має наслідком утворення мікроскопічних газових бульбашок при кімнатній температурі в тому числі [14]. Наприклад, як показано в [15], невеликі пустоти (бульбашки) високої густини, що утворюються внаслідок виділення з ґратки імплантованого до концентрацій $0.6 \leq C_{\text{He}} \leq 3$ ат. % гелію, є домінуючими в мікроструктурі об'єму зразка. При нагріванні матеріалу до 573 К спостерігався ріст бульбашок та їх коалесценція.

Ми вважаємо, що подібно тому, як це відбувається при високотемпературній імплантації [16], під час відпалу імплантованих зразків зі сталей ЕП-450 та EI-852 мають місце процеси росту та коалесценції газових бульбашок, що містять інертний аргон. Ймовірно, така бульбашкова структура відповідає за ефективне закріплення дейтерію в сталях ЕП-450 та EI-852.

ВИСНОВКИ

З використанням методик іонної імплантації і ядерної реакції $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ вивчено вплив попередньої імплантації аргону на захоплення дейтерію в сталях ЕП-450 і EI-852. Опромінення високоенергетичними важкими частками ($0,5 \dots 1,4 \text{ MeV Ag}^+$) використано для моделювання утворення кластерів дефектів під дією зміщувальних каскадів для імітації умов функціонування матеріалів у термоядерних реакторах.

Показано, що за попередньої імплантації високоенергетичних іонів ефективність утримання водню в об'ємі матеріалу становить близько 100% і слабо залежить від того розділені чи співпадають профілі пробігів атомів інертного газу та створених ними пошкоджень.

Виявлено, що в випадку розділення профілів пошкоджень та розподілу атомів імплантованих високоенергетичних часток, атоми дейтерію (~80%) локалізуються переважно в області профілю розподілу атомів Ag.

Встановлено, що утримання дейтерію в феритно-мартенситних сталях, опромінені іонами аргону, значно посилюється. За цих умов нижня межа температури виходу дейтерію зі сталей зміщується на ~200 К в сторону вищих температур – з 300 до 500 К.

Робота виконана за підтримки гранту УНТЦ, проект №3663.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. S.N. Rosenwasser, P. Miller, J.A. Dalessandro, J.M. Rawls, W.E. Toffolo, W. Chen. The application of martensitic stainless steels in long lifetime fusion first wall/blankets // J. Nucl. Mater. –1979. –Vol.85&86. – P.177-182.
2. В.И. Швачко. Модель водородного охрупчивания конструкционных сталей // Металлофизика. Новейшие технологии. – 2001. – Т. 23, № 11. – С. 1501-1512.
3. T. Nakayama, M. Abe, T. Tadokoro, M. Otsuka. Evaluation of magnetic fields due to the ferromagnetic vacuum vessel and their influence on plasma discharge in tokamak devices // J. Nucl. Mater. –1999. – Vol.271&272. – P.491-495.
4. M.L. Grossbeck, K. Ehrlich, C. Wassilew. An assessment of tensile, irradiation creep, creep rupture, and fatigue behavior in austenitic stainless steels with emphasis on spectral effects // J. Nucl. Mater. –1990. – Vol.174. – P.264-281.

5. Б.Г. Полосухин, Е.П. Баскаков, Е.Н. Сулимов и др. Исследование параметров переноса изотопов водорода в аустенитных сталях в процессе реакторного облучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерная техника и технология». –1992. –Том. 2. –С.10–16.
6. Steven J. Zinkle Advanced materials for fusion technology // Fusion Engineering and Design. – 2005. – Vol. 74. – Issues 1-4. – P. 31–40.
7. T. Tanaka, K. Oka, S. Ohnuki, S. Yamashita, T. Suda, S. Watanabe, E. Wakai. Synergistic effect of helium and hydrogen for defect evolution under multi-ion irradiation of Fe–Cr ferritic alloys // J. Nucl. Mater. – 2004. – Vol.329-333. – P.294-298.
8. N. Sekimura, T. Iwai, Y. Yonamine, A. A. Naito, Y. Miwa, S. Hamada. Synergistic effects of hydrogen and helium on microstructural evolution in vanadium alloys by triple ion beam irradiation // J. Nucl. Mater. – 2000. – Vol.283-287. – P.224-228.
9. E. Wakai, K. Kikuchi, S. Yamamoto, T. Aruga, M. Ando, H. Tanigawa, T. Taguchi, T. Sawai, K. Oka, S. Ohnuki. Swelling behavior of F82H steel irradiated by triple/dual ion beams // J. Nucl. Mater. – 2003. – Vol.318. – P. 267-273.
10. I.S. Kim, J.D. Hunn, N. Hashimoto, D.L. Larson, P.J. Maziasz, K. Miyahara and E.H. Lee. Defect and void evolution in oxide dispersion strengthened ferritic steels under 3.2 MeV Fe⁺ ion irradiation with simultaneous helium injection // J. of Nuclear Materials. – 2000. – Vol. 280. – Issue 3. – P. 264–274.
11. Y. Mukouda, Y. Shimomura, T. Iiyama et.al. Microstructure in pure copper irradiated by simultaneous multi-ion beam of hydrogen, helium and self ions // J. of Nucl. Mater. – 2000. – Vol. 283-287. – P. 302–305.
12. V.V. Gann, G.D. Tolstolutsкая. High Energy Primary Knock-on Process in Metal-Deuterium Systems Initiated by Bombardment with Noble Gas Ions // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2008. – V.266. – Issue 17. – P.3365-3369.
13. www.srim.org. Version – SRIM-2006.02.
14. P. Wang, Y. Li, J. Liu, G. Zhang, R. Ma, P. Zhu, C. Qiu, T. Xu. A study of helium trapping, bubble structures and helium migration in type 316L stainless steel under helium implantation // J. Nucl. Mater. – 1989. – Vol.169. – P.167-176.
15. A.A. Gadalla, W. Jäger, P. Ehrhart. TEM investigation of the microstructural evolution during MeV helium implantation in copper // J. Nucl. Mater. – 1985. – Vol.137. – P.73-76.
16. K. Ono, K. Arakawa, M. Oohashi, H. Kurata, K. Hojou, N. Yoshida. Formation and migration of helium bubbles in Fe–16Cr–17Ni austenitic alloy at high temperature // J. Nucl. Mater. – 2000. – Vol. 283-287. – P.210-214.