

УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОННЫХ ПОТОКОВ С МАТЕРИАЛАМИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

А.В. Пермяков, В.В. Мельниченко, В.В. Брык, В.Н. Воеводин, Ю.Э. Куприянова
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

Описаны конструкция и результаты испытаний устройства для непрерывного и одновременного облучения мишеней тремя пучками ионов с целью изучения синергетических эффектов влияния ионов гелия и водорода при совместном повреждающем облучении собственными ионами на микроструктуру конструкционных материалов. Представлены схемы управления и контроля параметров облучения. Приведены результаты, иллюстрирующие работу устройства.

ВВЕДЕНИЕ

Планируется, что конструкционные компоненты реакторов 4-го поколения будут эксплуатироваться при 500...1000 °С и уровнях повреждения 100...200 сна. Радиационные дозы в термоядерных реакторах будущего должны быть значительно выше. Поэтому высокие дозы облучения и высокие температуры, намечаемые для усовершенствованных ядерных и термоядерных реакторов будущего, без сомнения потребуют разработки новых усовершенствованных материалов [1]. Решения таких амбициозных программ, которые стоят перед мировой общественностью (ИНПРО, 4 Поколение и т. д.), требуют, прежде всего, решения проблем с материалами. Именно деградация свойств конструкционных материалов ограничивает достижение более высоких повреждающих доз и затрудняет достижение более глубоких выгораний топлива [2]. Определяющим научно-техническим вызовом является длительное время (~ 20 лет), необходимое для разработки материалов, их тестирования, лицензирования, постановки в реактор и получения результатов. Стоимость испытаний материалов под облучением нейтронами для усовершенствованных ядерных систем постоянно увеличивается, так как наличие реакторов для испытаний постоянно снижается. В последнее время возможности облучения сильно сократились из-за остановки целого ряда ядерных устройств.

Хорошо известно, что ускорители заряженных частиц широко применяются для получения экспресс-информации о радиационной стойкости и для исследования физической природы излучения. В процессе облучения пучком заряженных частиц можно воспроизвести и исследовать в хорошо контролируемых условиях практически все известные радиационные эффекты, а также детально исследовать физическую природу этих эффектов. Имитационные эксперименты наряду с реакторными испытаниями вносят весомый вклад в явления радиационной физики, радиационные и ионные технологии, а также в решение проблем создания слабоактивируемых материалов с высокой радиационной стойкостью. Важно учитывать

современный статус имитационных экспериментов в исследовании структурно-фазовых превращений в реакторных материалах под облучением. Возникающие при облучении вакансионное распухание, гелиевое охрупчивание, микроструктурная нестабильность и наведенная радиоактивность вынудили изучать механизмы этих процессов в надежде отыскать способы их подавления легированием различными элементами или термомеханической обработкой.

Нейтронное облучение ускоряет процессы ползучести, повышает прочность, резко понижает способность к деформации, а также понижает коррозионную стойкость. Набор определенной дозы нейтронов способствует порообразованию и радиационному распуханию. В результате ядерных реакций трансмутаций в материалах образуются газообразные примеси (гелий и водород), которые способствуют проявлению гелиевого охрупчивания, водородной ломкости, газовому и вакансионному распуханию. Например, в материалах внутрикорпусных устройств (ВКУ) реакторов ВВЭР накопление гелия составляет ~ 1500 аррм за 40 лет эксплуатации (расчетные данные).

В быстрых и легководяных реакторах генерация газа достаточно низкая в типичных ферритных сталях, но когда идет речь о термоядерных программах, то уровень генерации гелия может быть очень высоким (порядка ~ 15 аррм/сна) [3]. Для реакторов, управляемых ускорителями, генерация гелия составляет ~ 160 аррм/сна в компонентах, которые находятся под действием высокоэнергетического потока протонов. Следует отметить, что для всех концепций реакторов скорость генерации водорода будет приблизительно на порядок выше, чем скорость генерации гелия. Для исследования их совместного влияния возникает необходимость облучения материалов тремя пучками, а именно, пучками ионов металла, гелия и водорода. При этом желательно иметь возможность проводить исследования радиационной стойкости с разной скоростью набора дозы радиационного повреждения (сна/с), чтобы обеспечить требуемый уровень радиационного повреждения (сна) в сроки, более короткие, чем время пребывания материалов конструкций в

реакторах. Таким образом, нужно обеспечить плотность потока быстрых нейтронов ($E_n \geq 0,1$ МэВ), равной величине $1,5 \cdot 10^{15}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ и выше [4].

Для исследования процессов влияния газов возникает необходимость одновременного облучения материалов ионами металлов, содержащихся в матрице исследуемого материала, гелия и водорода. Практически во всех научных центрах, где ведутся имитационные эксперименты, требование одновременного облучения тремя пучками ионов удовлетворяется путем тривиального конструкторского решения: создается количество ускорителей, равное количеству сортов ионов, затем получаемые пучки ионов сводятся на объекте облучения (рис. 1) [5].

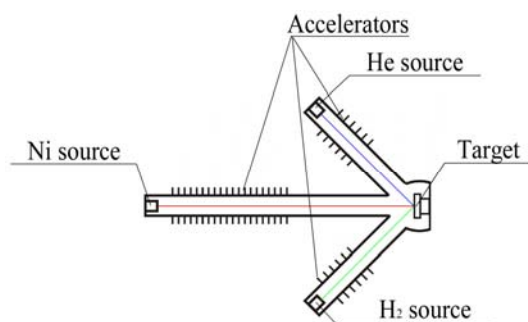


Рис. 1. Схема традиционного облучения мишеней тремя пучками ионов

В сравнении с традиционным использованием трех ускорителей (см. рис. 1) для облучения тремя пучками ионов нами разработано устройство, которое обеспечивает облучение с использованием одной ускорительной трубки (рис. 2).

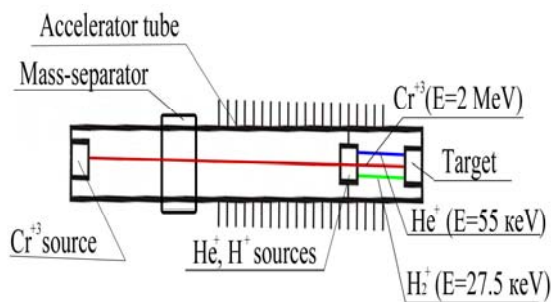


Рис. 2. Схема устройства, предлагаемого в данной работе

1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИМ УСКОРИТЕЛЯМ

Использование ускорителей в радиационном материаловедении и широкомасштабные исследования в области физики радиационных явлений в Харьковском физико-техническом институте (ХФТИ) развернуты с 1974 года. За прошедшие четыре десятилетия накоплен большой опыт использования ускорителей заряженных частиц в имитационных технологиях. Разработано и введено в эксплуатацию множество различных ускорителей. Одним из них является

электростатический ускоритель с внешним инжектором ЭСУВИ [6]. На этом ускорителе за время его эксплуатации проведено большое число экспериментов, результаты которых изложены в работах [7-15]. ЭСУВИ и был взят за основу, поскольку его конструкция удовлетворяла основным требованиям для корректной имитации нейтронного облучения, а именно:

1) исследуемый материал следует облучать пучками ионов металла, составляющего основу этого материала, для избегания его легирования [16];

2) энергия тяжелых ионов должна составлять 1,5 МэВ и выше, чтобы исключить влияние поверхностных эффектов на процессы зарождения и формирования дефектов [16];

3) интенсивность ионных пучков должна обеспечивать такую скорость генерации дефектов, чтобы количество дефектов в смещениях на атом создавалось за короткое время, эквивалентное флюенсу нейтронов: 10^{23} нейтр./ см^2 и выше [16];

4) облучение должно производиться в непрерывном режиме;

5) ускоритель должен обладать рядом дополнительных устройств и приспособлений (устройств для диагностики нахождения пучков, измерения и контроля температуры облучения и тока пучков ионов, определения дозы облучения и др.);

6) конструкция ускорителя должна предусматривать возможность последовательного или одновременного облучения исследуемых материалов ионами газов для имитации накопления газа, образующегося при нейтронном облучении в результате ядерных реакций [17].

Для удовлетворения этих требований было разработано, изготовлено и введено в эксплуатацию устройство для моделирования эффектов взаимодействия нейтронных потоков с материалами ядерных реакторов «Prime Idea» (PI).

2. УСТРОЙСТВО УСТАНОВКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОННЫХ ПОТОКОВ С МАТЕРИАЛАМИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ «PRIME IDEA»

Описываемая в данной работе установка PI состоит из следующих основных функциональных узлов (рис. 3):

- источника многозарядных ионов металлов (МЗИ);
- электромагнитного сепаратора масс с углом поворота 60° ;
- системы фокусирования и транспортировки ионного пучка;
- пролетного источника ионов газов «ГиВ-3М»;
- электростатического ускорителя (ЭСУ) Ван де Граафа;
- мишенного комплекса;
- вакуумной системы;
- системы телеметрического контроля и управления (СТКУ).

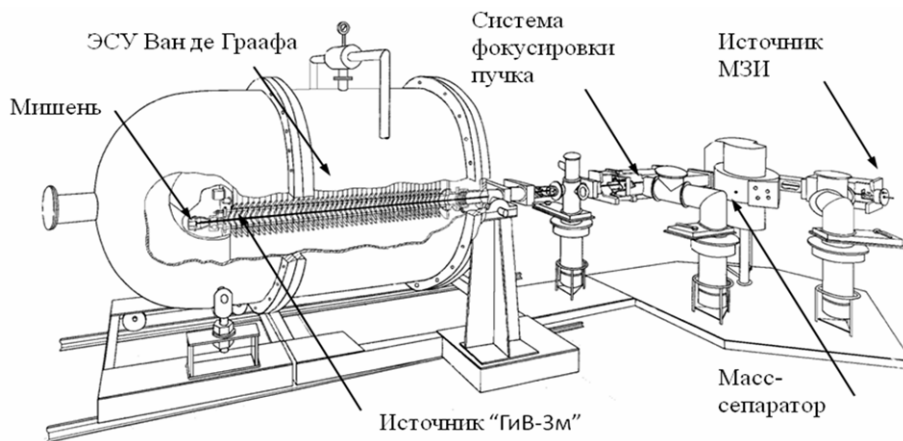


Рис. 3. Установка для моделирования эффектов взаимодействия нейтронных потоков с материалами ядерных реакторов Р1

2.1. ИСТОЧНИК ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ МЗИ

Источник многозарядных ионов (МЗИ) металлов плазменно-дугового типа с распылением рабочего вещества показан на рис. 4. Он дает возможность получать пяти-, шестизарядные ионы никеля, хрома и других элементов с током 20...40 мкА непосредственным испарением рабочего вещества в область разрядной камеры электронным пучком, а также работать в режиме одновременного облучения газовых и металлических ионов.

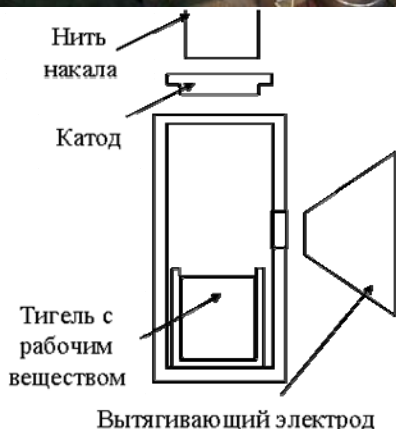


Рис. 4. Общий вид и схема источника тяжелых ионов МЗИ

Пучки ионов металла после извлечения из источника МЗИ попадают в электромагнитный сепаратор (рис. 5).

2.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СЕПАРАТОР МАСС

Электромагнитный сепаратор позволяет выделить пучок ионов. Средний радиус траектории ионов в анализаторе ЭСУВИ равен 60 см.



Рис. 5. Общий вид электромагнитного сепаратора масс, системы формирования и фокусирования пучка ионов

Выделенный пучок ионов металла фокусируется с помощью системы формирования и фокусирования пучка ионов. Система состоит из дуплета электростатических квадрупольных линз, четырех пар взаимоперпендикулярных плоскопараллельных электростатических конденсаторов, апертурной диафрагмы и ускоряющей трубки.

2.3. ИСТОЧНИК ИОНОВ ГАЗОВ «ГиВ-3М»

В ускорительной трубке размещен разработанный нами пролетный источник ионов газов «ГиВ-3М» (рис. 6).

Источник выполнен в виде полого цилиндра, что позволяет пропускать сквозь него пучок от источника тяжелых ионов МЗИ. Источник «ГиВ-3М» способен работать при давлении $P \sim 10^{-6} \dots 10^{-5}$ мм рт. ст. Пучки газовых ионов, сгенерированные источником ионов газов, совместно с пучком ионов металла попадают на мишень (рис. 7).

2.4. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ ВАН ДЕ ГРААФА

Электростатический ускоритель, который используется в установке, представляет собой ускоритель Ван де Граафа горизонтального типа

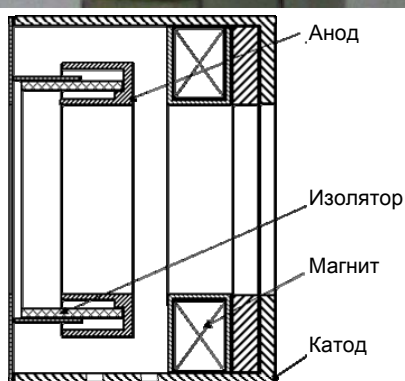


Рис. 6. Общий вид и схема проточного источника ионов газов «TiV-3M»

2.5. СИСТЕМА ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ОБЛУЧЕНИЯ

Система телеметрического контроля и управления (СТКУ) параметрами облучения была разработана и создана для контроля и управления параметрами облучения мишеней, находящихся под высоким потенциалом. Она состоит из двух блоков электронных схем и светового канала связи. Один блок размещен под кондуктором, а второй – в пультовой. СТКУ обеспечивает выполнение следующих функций: измерение тока пучков ионов в микро- и пикоамперных диапазонах; измерение и поддержание температуры мишени; определение положения пучка на мишени; измерение набранной дозы.

2.6. МИШЕННЫЙ КОМПЛЕКС

Разработанный мишенный комплекс (рис. 9) состоит из камеры мишеней, системы диагностики положения пучка, системы нагрева образца, мишенедержателя и измерительного блока цилиндра Фарадея (ЦФ). Расположение мишенного комплекса на конце ускорительной трубки под кондуктором генератора с потенциалом до 2 МэВ создало определенные трудности по контролю и управлению параметрами облучения и наложило ограничения по весу и габаритам.

(рис. 8). Максимальное напряжение на кондукторе генератора 2,3 МВ, ток короткого замыкания равен 220 мкА.

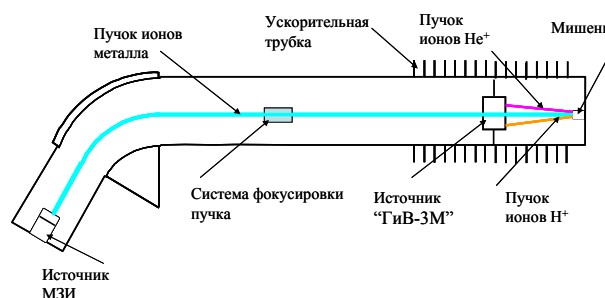


Рис. 7. Схема проводки пучков ионов металла и газов



Рис. 8. Электростатический ускоритель Ван де Граафа



Рис. 9. Мишенный комплекс, установленный на ускорителе

В процессе облучения нагрев мишени осуществляется печкой, установленной непосредственно под мишенью. Контроль температуры нагрева мишени осуществляется СТКУ, которая учитывает нагрев мишени самим пучком. Особое внимание уделено поддержке надежного термодатчика между мишенью и термопарой (рис. 10).

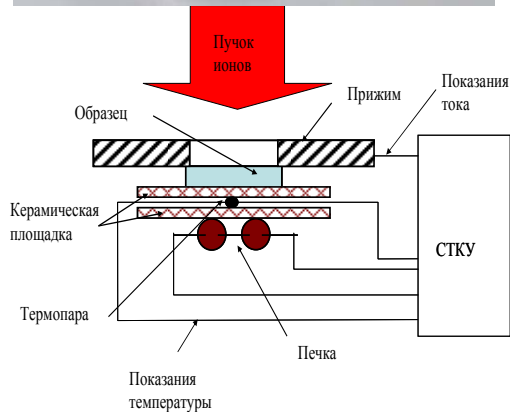


Рис. 10. Общий вид и схема мишенедержателя с системой нагрева образца

Непрерывный контроль положения ионных пучков достигается с помощью проволочного датчика-монитора, представляющего собой систему проволочек, натянутых горизонтально и вертикально на изолирующих рамках. Диаметр проволочек 0,1 мм. В основу работы монитора положен принцип измерения зарядов, накопленных на проволочках вследствие поглощения небольшой доли ионов пучка.

2.7. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

При создании вакуумной системы ускорителя учитывалось требование получения максимально высокого вакуума по всему ионно-оптическому тракту. В связи с тем, что работающий источник многозарядных ионов создает большую газовую нагрузку, была применена дифференциальная откачка участка ионпровода от источника до масс-сепаратора. Для исключения возможного загрязнения мишеней во время облучения камера мишеней дополнительно откачивалась специально разработанным малогабаритным абсорбционным насосом.

Для откачки вакуумной системы применяются абсорбционный насос и три турбомолекулярных высоковакуумных ТМН-500; для откачки на форвакуум – два вакуумных золотниковых насоса типа АВЗ-20Д и один пластинчато-роторный НВР-5Д. Для улучшения вакуума в ускорительной трубке используются две азотные ловушки, установленные в начале и конце ускорительной трубки.

3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВКИ РІ

1. Разработанная установка РІ дает возможность получать пучки ионов различных металлов с зарядностью в диапазоне 1...6 и газов от H_2^+ до He^{3+} .

2. В имитационных экспериментах энергия ионов металлов варьируется в пределах 0,3...1,8 МэВ, а ионов гелия и водорода – 0,1...60 кэВ. При необходимости энергия ионов может варьироваться в гораздо более широких пределах.

3. Плотность тока пучка ионов металлов $j = 1...40 \text{ мкА/см}^2$.

4. Плотность тока пучков ионов газов He и H_2 $j = 1...500 \text{ нА/см}^2$.

5. Диапазон скорости создания дефектов $k = 10^{-5}...10^{-2} \text{ сна/с}$.

6. Предельное давление в области источника $P_{и} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$, в области ускоряющей трубки $P_{т} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ мм рт. ст.}$

7. Температура образцов при облучении может устанавливаться в интервале $T_{обл} = 80...800 \text{ }^\circ\text{C}$. Причем изменение температуры нагрева образцов можно осуществлять с пульта управления во время облучения.

8. Плотность тока пучка ионов, попадающих на мишень, и температура измеряются непосредственно с образца. Точность измерения плотности тока ионного пучка и температуры – 1,0 %.

9. Доза облучения более 500 сна.

4. ПРЕИМУЩЕСТВА УСТАНОВКИ РІ

Установка РІ состоит из одного ускорителя и, как следствие, имеет такие преимущества:

- более низкую стоимость как облучения, так и самого устройства;
- простоту и дешевизну в эксплуатации и обслуживании;
- вероятность незапланированных остановок намного реже, так как нет надобности обслуживания трех отдельных ускорителей, что существенно увеличивает количество облучений в год;
- упрощенную систему фокусировки пучков, поскольку оптические оси источников совпадают.

Устройство позволяет непрерывно и одновременно облучать одну мишень диаметром 3 мм. Измерение тока пучков проводится с помощью пролетного ЦФ в области мишени. Данные с ЦФ поступают на интегратор, который суммирует дозу, и после набора заданной дозы отключает пучок.

Таким образом, на базе оригинальной конструкторской разработки ЭСУВИ была создана уникальная установка РІ, позволяющая имитировать эффекты взаимодействия нейтронных потоков с материалами ядерных реакторов. Устройство РІ учитывает требуемый уровень радиационных повреждений, полученный путем облучения тяжелыми ионами от источника металлов МЗИ, а также влияние газов (He и H) с использованием пучков, сгенерированных пролетным источником

«ГиВ-3М». Установка позволяет облучать мишени одним повреждающим пучком ионов металлов, а также проводить уникальные эксперименты одновременного облучения двумя (металл + He/N) или тремя пучками ионов (металл + He + H).

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ ЭИ-852, ОБЛУЧЕННЫХ НА УСТАНОВКЕ РІ

В рамках работы по созданию новой установки на базе ускорителя ЭСУВИ проводилось облучение промышленной 12% хромистой стали марки ЭИ-852 российского производства (С – 0,13; Si – 1,19; Cr – 13,15; Ni – 0,27; Mo – 1,69; Mn – 0,31, вес.%).

Эта сталь разработана для применения в качестве материала оболочки твэлов для реакторов со свинцово-висмутovým теплоносителем. Образцы после термообработки были облучены моно- (Cr^{+5}) и тройным пучками (Cr^{+5} , He^+ и H^+) ионов с энергиями: 1,7 МэВ, 10 и 5 кэВ соответственно. Температура облучения $T_{\text{обл}} = 480^\circ\text{C}$, доза

$D = 100$ сна, скорость повреждения $k = 10^{-3}$ сна/с и концентрации газов – 4800 аppm He и 6000 аppm H.

Исходная микроструктура стали ЭИ-852 представляет собой феррит, в котором однородно распределены выделения типа M_{23}C_6 (рис. 11,а).

Электронно-микроскопическое исследование образцов показало, что после облучения тяжелыми ионами хрома при температуре 480°C и дозе 100 сна сталь ЭИ-852 сохраняет ферритную структуру. Наблюдалось образование мелких (20 нм) и крупных (~ 60 нм) пор, равномерно распределенных по объему зерна с концентрацией $4,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Распухание при этом составило ~ 0,01% (см. рис. 11,б). При облучении тройным пучком (Cr^{+5} , He^+ и H^+) ионов стали ЭИ-852 наблюдалось образование как крупных (~ 50 нм), так и множества мелких (10...15 нм) газовых пор с концентрацией $3,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, что приводило к значительному увеличению распухания до ~ 0,1% (см. рис. 11,в). Параметры распухания в стали ЭИ-852 приведены в таблице.

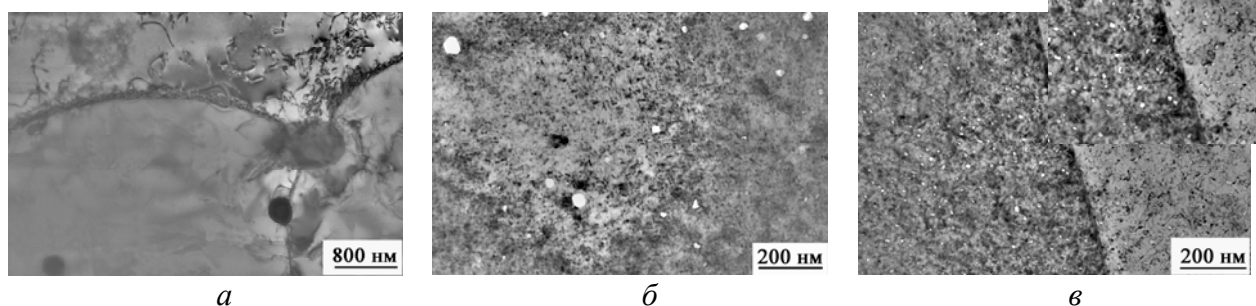


Рис. 11. Микроструктура стали ЭИ-852 до и после облучения: а – исходная микроструктура; б – после облучения Cr^{+5} ; в – после облучения $\text{Cr}^{+5} + \text{He}$ (4800 аppm) + H (6000 аppm)

Параметры распухания в стали ЭИ-852

Вид облучения	Размер пор, нм	Концентр. пор, см^{-3}	Распухание S , %
Cr^{+5}	20...60	$4,2 \cdot 10^{13}$	0,01
$\text{Cr}^{+5} + \text{He}^+ + \text{H}^+$	10...50	$3,6 \cdot 10^{15}$	0,085

На данной установке были проведены эксперименты по тройному облучению аустенитной стали X18N10T [18, 19], а также по облучению до сверхвысоких доз [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена принципиально новая система одновременного облучения материалов тремя пучками ионов, предполагающая использование одного ускорителя вместо трех. Разработан и изготовлен пролетный источник ионов газов с замкнутым дрейфом, удовлетворяющий основному условию – источник должен обеспечивать максимальный выход тока при давлениях He и H_2 $10^{-6} \dots 10^{-5}$ мм рт. ст., а также иметь малый вес и габариты. Следует отметить, что зарубежных и отечественных аналогов как самой системы, так и источника ионов газов такого типа в мире не существует.

Использование данной схемы устройства значительно снижает стоимость как самого ускорительного комплекса, так и его эксплуатации, обслуживания и облучения.

Установка РІ позволяет получать интенсивные высокоэнергетические пучки ионов металлов и газов при сравнительно малых габаритах ускорителя и невысоком потенциале на ускоряющей трубке. Доза 100 сна, эквивалентная нейтронному облучению $1,2 \cdot 10^{23}$ нейтр./ см^2 ($E_n \geq 0,1$ МэВ), достигается за 3 ч. Полное отсутствие наведенной радиоактивности в исследуемых материалах позволяет значительно ускорять исследования по разработке и созданию новых радиационно-стойких материалов.

Моделирование нейтронного воздействия с помощью установки РІ удовлетворяет требованиям стандарта ASTM E521-83 «Standard Practice for Neutron Radiation Damage Simulation by Charged-Particle Irradiation» [21].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. *Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов*. Киев: «Наукова думка», 2006, 376 с.
2. F.A. Garner and L.R. Greenwood // *Radiation Effects and Defects in Solids*. 1998, v. 144, p. 251-283.
3. Б.А. Шляев, В.Н. Воеводин. *Расчеты параметров радиационного повреждения материалов нейтронами источника ННЦ ХФТИ/ANL USA с подкритической сборкой, управляемой ускорителем электронов*: Препринт ХФТИ, Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006, с 19.

4. L.R. Greenwood. Neutron source characterization and radiation damage calculation for materials studies // *JNM*. 1982, v. 108-109, p. 21-27.
5. S. Hamada, Y. Miwa, D. Yamaki, Y. Katano, et al. Development of a triple beam irradiation facility // *Japan Atomic Energy Research Institute*. Tokai, Ibaraki, p. 319-11.
6. В.Ф. Зеленский и др. Материаловедческий ускоритель тяжелых ионов для моделирования реакторных повреждений // *ВАНТ. Серия ОЯИ*. 1980, в. 2(12), с. 20-23.
7. В.Ф. Зеленский, В.Н. Воеводин, В.В. Брык и др. Вакансионное распухание высоконикелевого сплава в различном структурном состоянии при облучении тяжелыми ионами // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ*. 1979, в. 2(13).
8. В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, В.В. Брык, Т.П. Черняева, В.Н. Воеводин, А.И. Трефилов. Исследование радиационного распухания деформированного малолегированного сплава хрома при облучении на ускорителе // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ*. 1981, в. 1(15).
9. В.В. Брык, М.Ю. Бредихин, В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов, П.В. Платонов. Влияние холодной деформации на радиационное распухание стали X16H15M3B при облучении тяжелыми ионами // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ*. 1981, в. 3(17).
10. В.Ф. Зеленский, А.М. Паршин, И.М. Неклюдов, В.В. Брык, В.Н. Воеводин. Исследование радиационной повреждаемости сплавов на основе α -титана после облучения тяжелыми ионами // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ*. 1981, в. 2(16).
11. A.S. Bakai, O.V. Borodin, V.V. Bryk, V.N. Voyevodin, V.F. Zelenskij, I.M. Neklyudov, P.V. Platonov, A.A. Turkin. On the effect of radiation-induced segregation on void shape and growth rate // *J. of Nuclear Materials*. 1991, v. 185, issue 3, p. 260-267.
12. O.V. Borodin, V.V. Bryk, I.M. Neklyudov, P.V. Platonov, V.N. Voyevodin, A.S. Bakai, A.A. Turkin. Evolution of Second-Phase Precipitates during Irradiation with Neutrons and Charged Particles // *Mater. Science Forum*. 1992, v. 97-99.
13. O.V. Borodin, V.V. Bryk, V.N. Voyevodin, I.M. Neklyudov, V.K. Shamardin. Investigation of microstructure of ferritic-martensitic steels containing 9 and 13% Cr irradiated with fast neutrons // *J. of Nuclear Materials*. 1993, v. 207, p. 295-302.
14. O.V. Borodin, V.V. Bryk, V.N. Voyevodin, I.M. Neklyudov. Microstructural evolution and radiation stability of steels and alloys // *J. of Nuclear Materials*. 1999, v. 271&272, p. 290-295.
15. O.V. Borodin, V.V. Bryk, A.C. Kalchenko, I.M. Neklyudov, A.A. Parkhomenko, V.N. Voyevodin. Swelling and post-irradiated deformation structures in 18Cr-10Ni-Ti irradiated with heavy ions // *J. of Nuclear Materials*. 2004, v. 329-333, part 1, p. 630-633.
16. В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, Т.П. Черняева. *Радиационные дефекты и распухание металлов*. Киев: «Наукова думка», 1988.
17. О.В. Бородин, В.В. Брик, Р.Л. Василенко, В.М. Воеводин, О.С. Кальченко, В.В. Мельниченко, И.М. Неклюдов, О.В. Пермяков, М.М. Пилипенко, Ю.Е. Куприянова, Б.А. Шиляев. Модернізація прискорювача ЕСУВІ для опромінення сталі X18H10T іонами хрому та іонами гелію та водню різних енергій // *Ресурс-2009*. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Київ, 2009, с. 194-202.
18. O.V. Borodin, V.V. Bryk, A.S. Kalchenko, V.V. Melnichenko, V.N. Voyevodin, F.A. Garner. Synergistic effects of helium and hydrogen on self-ion-induced swelling of austenitic 18Cr10NiTi stainless steel // *J. of Nuclear Materials*. 2013, v. 442, issues 1-3, p. S817-S820.
19. О.В. Бородин, В.В. Брик, В.М. Воеводин, О.С. Кальченко, В.В. Мельниченко. Вивчення дефектної структури сталі X18H10T при одночасному опроміненню подвійним та потрійним пучком власних іонів Cr та іонами He і H // *Труди XIX Міжнародної конференції по фізиці радіаційних явлень і радіаційному матеріалознавству*, Алушта, 6–11 сентября 2010. Харьков, 2010, с. 100.
20. О.В. Бородин, В.В. Брык, В.Н. Воеводин, А.С. Кальченко, Ю.Э. Куприянова, В.В. Мельниченко, И.М. Неклюдов, А.В. Пермяков. Радиационное распухание ферритно-мартенситных сталей ЭП-450 и НТ-9 при облучении металлическими ионами до сверхвысоких доз // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ*. 2011, в. 97(2), с. 10-15.
21. Standard Practice for Neutron Radiation Damage Simulation by Charged-Particle Irradiation (Designation E 521-96). Annual Book of ASTM Standards vol. 12.02. Philadelphia, PA, USA, 2004, p. 141-160, American Society for Testing and Materials.

Статья поступила в редакцию 18.03.2014 г.

ПРИСТРІЙ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВ ВЗАЕМОДІЇ НЕЙТРОННИХ ПОТОКІВ З МАТЕРІАЛАМИ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ

О.В. Пермяков, В.В. Мельниченко, В.В. Брик, В.М. Воеводин, Ю.Е. Куприянова

Описані конструкція і результати випробувань пристрою для безперервного і одночасного опромінення мішеней трьома пучками іонів з метою вивчення синергетичних ефектів впливу іонів гелію і водню при спільному ушкодуючому опроміненні власними іонами на мікроструктуру конструкційних матеріалів. Представлено схеми управління і контролю параметрів опромінення. Представлено результати, що ілюструють роботу пристрою.

FACILITY FOR MODELING THE INTERACTIONS EFFECTS OF NEUTRONS FLUXES WITH MATERIALS OF NUCLEAR REACTORS

A.V. Permyakov, V.V. Mel'nichenko, V.V. Bryk, V.N. Voyevodin, Yu.E. Kupriyanova

The design and results of the plant tests for simultaneous triple beam ion irradiations are described. The triple beam ion irradiation facility has been developed to study the synergistic effects of displacement damage, helium and hydrogen ions on microstructure of constructive materials. The schemes of control and monitoring of target irradiation three ion beams are described. The results showing the successful operation of the device are presented.