

ИМИТАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗЛУЧЕНИЮ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИНЖЕКТОРЕ УСКОРИТЕЛЯ ТИПр-1

*Р.П. Куйбида, Б.Б. Чалых, В.Б. Шишмарев, Н.Ю. Грачев, А.Д. Фертман, А.А. Алев,
А.А. Никитин, Н.Н. Орлов, С.В. Рогожкин, Т.В. Кулевой*

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

E-mail: 4alix@gmail.com

Требования безопасной эксплуатации ядерных установок диктуют необходимость тщательного изучения радиационной повреждаемости материалов, используемых в реакторостроении. Исследование статей можно проводить, применяя имитационные эксперименты на пучках ускоренных тяжелых ионов. Подобные работы ведутся в Институте теоретической и экспериментальной физики. Представлены результаты серии экспериментов по изучению радиационной стойкости реакторных материалов на инжекторе ускорителя ТИПр-1 с последующим анализом образцов методом томографической атомно-зондовой микроскопии.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация ядерных промышленных установок определяет необходимость тщательного изучения радиационной повреждаемости материалов, используемых в атомной промышленности. Для этого проводятся теоретические и экспериментальные исследования радиационной стойкости конструкционных сталей и сплавов. Экспериментальные исследования состоят в изучении свойств материалов, подвергшихся облучению в реакторах, и, как следствие, имеющих радиационные повреждения. Изучение сталей, облученных в действующем реакторе, сопряжено с немалыми сложностями, главной из которых является необходимость длительного облучения, что вызвано малой скоростью создания радиационных повреждений нейтронами. Помимо длительной сессии облучения в образцах присутствует наведённая радиоактивность, что затрудняет дальнейшее их изучение с использованием стандартного оборудования. В качестве экспресс-анализа радиационной повреждаемости материалов достаточно успешно применяются методы, основанные на использовании пучков заряженных частиц для создания радиационных повреждений [1-4]. В ИТЭФ в настоящее время существует уникальный комплекс по изучению радиационной стойкости материалов, который позволяет проводить экспресс-анализ сталей и сплавов, – линейный ускоритель, тяжелоионный прототип 1 (ТИПр-1) [5] и томографический атомно-зондовый микроскоп (ТАЗМ) [6]. В статье представлены первые экспериментальные данные, полученные с применением этого уникального комплекса.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ SRIM

Образцы для изучения на ТАЗМ представляют собой иглолочки, характерные поперечные размеры которых составляют 300×300 мкм при длине 1...2 см. Радиус закругления кончика иглы должен быть 50...100 нм и угол раствора конуса менее 11°. Для уточнения режима облучения образцов ионами железа было проведено моделирование программным пакетом SRIM. Результаты показали, что энергия ионов железа, необходимых для внесения максимальных радиационных повреждений в исследуемую область,

составляет ~ 150 кэВ. Пучок, получаемый вакуумно-дуговым источником ионов металлов (ВДИИМ) при использовании железного катода, состоит из ионов трёх зарядностей: Fe^{1+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} . При работе инжектора ионы ускоряются электростатической трубкой с потенциалом ~75 кВ. При данном ускоряющем напряжении энергия ионов второй зарядности составляет как раз необходимые ~150 кэВ. Суммарный флюенс, полученный в одном эксперименте, составляет величину до $\sim 1 \cdot 10^{16}$ частиц/см². На Рис.1 показана схема проведённого моделирования. Зелёным пунктиром обозначена область наибольших радиационных повреждений, вносимых ионами, красным цветом обозначена область, которая может быть изучена при помощи ТАЗМ.

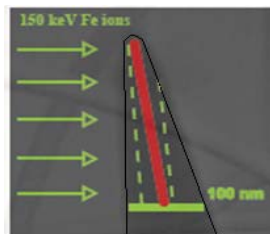


Рис.1. Изображение образца для исследования на ТАЗМ

Необходимая энергия ионов для проведения опыта может быть получена в штатном режиме работы на выходе инжектора ускорителя ТИПр-1.

КОНСТРУКЦИЯ МИШЕННОГО ДЕРЖАТЕЛЯ

Облучение образцов ионами железа проводилось на инжекторе линейного ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой – тяжелоионный прототип (ТИПр1). Схема эксперимента показана на Рис.2. Инжектор состоит из вакуумно-дугового источника ионов металлов и ускорительной трубки на 100 кВ. Ток пучка на выходе ускорительной трубки измеряется индукционным датчиком. За датчиком расположена камера наблюдений А, в которую устанавливается держатель образцов, показанный на Рис.3. Он представляет собой два кольца, между которыми зажимаются иглолочки-образцы. Образцы расположены на равном расстоянии от центра пучка, таким образом достигается симметричное облучение.

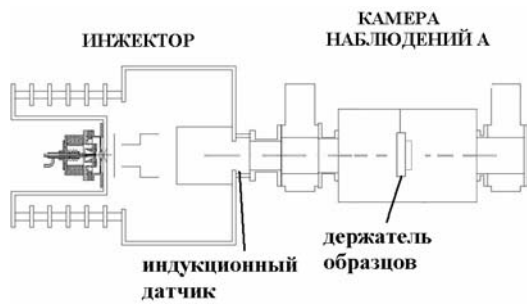


Рис.2. Схема эксперимента

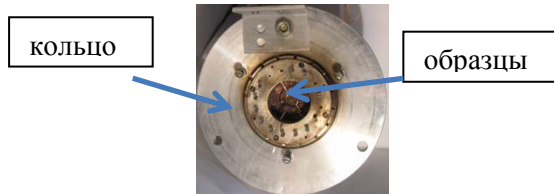


Рис.3. Фотография мишенного держателя

Для контроля дозы облучения за образцами установлен токоприёмник, который состоит из алюминиевого основания диаметром 80 мм, на которое крепятся 9 пластин-ламель (Рис.4,а). На Рис.4,б показан разрез токоприёмника. Одна пластина (поз.5 на Рис.4,б) площадью 0,95 см² и диаметром 11 мм расположена в центре токоприёмника, восемь оставшихся располагаются двумя концентрическими кольцами, разбитыми на четыре сектора каждое (4 и 5 на Рис.4,б). Ламели крепятся к алюминиевой пластине. Площадь ламели внутреннего кольца – 0,92 см², внешнего – 1,54 см². Девять медных пластин расположены так, чтобы перекрывать всю область за образцами. Профилемер позволяет измерить ток, проходящий на каждую из ламелей токоприёмника.

Профиль пучка по вертикали	Ток пучка, мА	Плотность тока, мА/см ²	Профиль пучка по горизонтали	Ток пучка, мА	Плотность тока, мА/см ²
Верхняя	5,6	3,63	Левая	8,7	5,64
Выше центра	6,2	6,73	Левее средней	9,3	10,1
Средняя	10,9	11,59	Средняя	10,9	11,59
Ниже центра	7,5	8,15	Правее средней	7,45	8,09
Нижняя	6,3	4,09	Правая	5,6	3,63

По результатам, указанным в таблице, видно, что геометрическая ось центра мишенного аппарата по вертикали расположена чуть ниже оси пучка, по горизонтали ось мишенного аппарата смещена влево, что вызвано поворотом мишенного держателя. При проведении последующих экспериментов проведена корректировка положения держателя образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены первые исследования образцов перспективной стали ядерных и термоядерных реакторов ODS Eurofer ионами железа до различных повреждающих доз. Эта сталь характеризуется наличием значительного числа ($2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$) наноразмерных (2...3 нм) кластеров, содержащих атомы V, Y, O и N. На Рис.5 представлены характерные атомные карты исходного состояния стали ODS Eurofer и состояния после облучения ионами Fe до флюенса $5,9 \cdot 10^{15}$ частиц/см² (что эквивалентно повреждающей дозе ~ 13 сна).

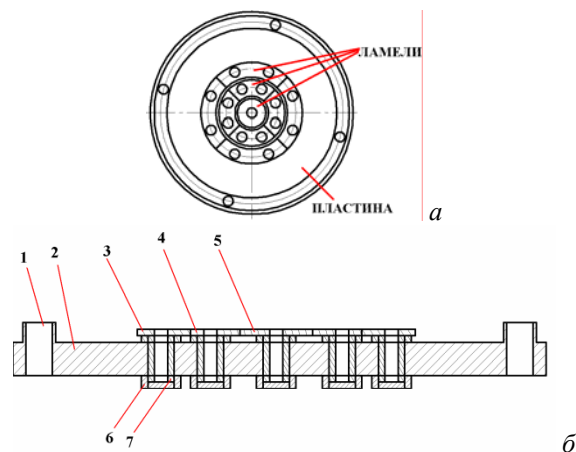


Рис.4. Общий вид (а) и разрез (б) токоприёмника: 1 – отверстие для крепления токоприёмника к держателю мишеней; 2 – алюминиевая пластина; 3,4,5 – ламели; 6,7 – изоляторы

Вывод сигналов с токоприёмника на осциллограф ведётся при помощи коммутатора, позволяющего не только производить последовательный опрос ламелей, но и объединять сигналы, получая таким образом суммарный ток пучка со всех токоприёмников.

Проведены первые эксперименты по облучению образцов с установленным токоприёмником. Общий ток пучка, измеренный при помощи индукционного датчика, составлял 220 мА. В таблице приведены значения тока, полученные во время облучения. Также показаны значения плотности тока для каждой ламели.

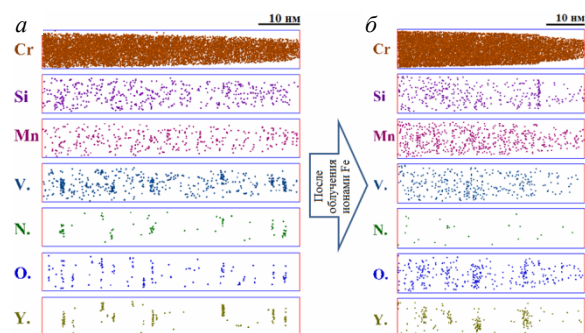


Рис.5. Характерные атомные карты стали ODS Eurofer: в исходном состоянии (а); после облучения ионами Fe до флюенса $5,9 \cdot 10^{15}$ частиц/см² (б)

Результаты исследования образцов на просвечивающем электронном микроскопе показаны на Рис.6. На нём представлена фотография сборки с образцами и изображение каждой иглочки, полученной на электронном просвечивающем микроскопе. На образцах присутствует тонкая плёнка, которая не препятствует их дальнейшему изучению.

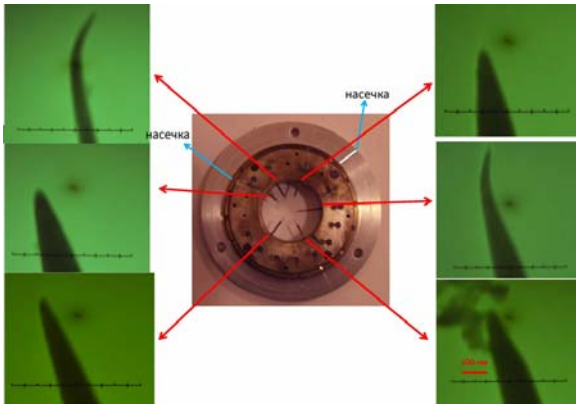


Рис.6. Изображения образцов, полученные при помощи просвечивающего электронного микроскопа

Выявлено изменение состава наноразмерных кластеров под облучением: уменьшилась концентрация V и N, что обусловлено уходом этих элементов в окружающую матрицу (Рис.5,б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На инжекторе ускорителя ТИПр-1 изготовлен и установлен держатель образцов на 12 иглочек, сконструированный для проведения экспериментов по имитации радиационных повреждений конструкционных материалов атомной промышленности. Установлена система метрики пучка, позволяющая производить контроль за дозой радиационных повреждений. Проведены первые эксперименты, позволившие отработать методику проведения данных экспериментов на инжекторе ускорителя ТИПр-1 с последующим изучением облученных образцов на томографическом атомно-зондовом микроскопе.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования РФ в рамках государственного контракта 16.740.11.0093.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. R.S. Nelson, D.J. Mazey, J.A. Hudson. The use of ion accelerators to simulate fast neutron-induced voidage in metals // *Journal of Nuclear Materials*. 1970, v.37, p.1-12.
2. A.D. Marwick. The primary recoil spectrum in the simulation of fast-reactor radiation damage by charged-particle bombardment // *Journal of Nuclear Materials*. 1975, v.55, p.259-266.
3. Shiori Ishino. A review of in situ observation of defect production heavy ions // *Journal of Nuclear Materials*. 1997, v.251, p.225-236.
4. V. Voyevodin, I. Neklyudov, G. Tolstolutsкая, V. Bryk, J. Fomenko, R. Vasilenlo. Modern Status of Accelerators in R&D of Structural Materials for Nuclear Reactors // *IAEA Proceeding series. International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators*, Vienna, Austria, 2009, AP/INT-02, p.1-8. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1433_CD/datasets/papers/ap_int-02.pdf
5. D. Kashinsky, A. Kolomiets, T. Kulevoy, R. Kuybida, V. Kuzmichov, S. Minaev, V. Pershin, B. Sharkov, R. Vengrov, S. Yaramishev. Commissioning of ITEP 27 MHz Heavy Ion RFQ // *Proceedings of the Seventh European Particle Accelerator Conference EPAC-2000*, Vienna. 2000, p.854-856.
6. S.V. Rogozhkin, V.S. Ageev, A.A. Aleev, A.G. Zaluzhnyi, M.V. Leont'eva-Smirnova, and A.A. Nikitin. Tomographic Atom-Probe Analysis of Temperature-Resistant 12%-Chromium Ferritic-Martensitic Steel EK-181 // *The Physics of Metals and Metallography*. 2009, v.1, 108, №6, p.579-585.
7. A. Anders and G. Yushkov. Ion flux from vacuum arc cathode spots in the absence and presence of a magnetic field // *Journal of Applied Physics*. 2002, v.91, №8, p.4824-4832.

Статья поступила в редакцию 22.06.2012 г.

IMITATION EXPERIMENTS FOR STUDY OF RADIOACTIVE RESISTANCE REACTOR MATERIALS ON THE INJECTOR OF LINE ACCELERATOR HIP-1

R.P. Kuybida, B.B. Chalykh, V.B. Shismarev, N.Y. Grachev, A.D. Fertman, A.A. Aleev, A.A. Nikitin, N.N. Orlov, S.V. Rogozhkin, T.V. Kulevoy

Requirements safe operation of nuclear facilities dictate the necessity of careful study of radiation damage of materials used in reactor construction. Investigation can be performed using simulation experiments on beams of accelerated heavy ions. Such operations are conducted at the Institute of Theoretical and Experimental Physics. Presents the results of a series of experiments to study the radiation resistance of reactor materials on the injector accelerator Tiptree-1 with subsequent analysis of samples by tomographic atom-probe microscopy.

ІМІТАЦІЙНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ПО ВИПРОМІНЮВАННЮ РАДІАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ РЕАКТОРНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ІНЖЕКТОРІ ПРИСКОРЮВАЧА ТІПр-1

Р.П. Куйбіда, Б.Б. Чалих, В.Б. Шишмарев, М.Ю. Грачов, О.Д. Фертман, А.А. Алєєв, О.О. Нікітін, М.М. Орлов, С.В. Рогожкін, Т.В. Кулевий

Вимоги безпечної експлуатації ядерних установок диктують необхідність ретельного вивчення радіаційної пошкоджуваності матеріалів, що використовуються в реакторобудуванні. Дослідження сталей можна проводити, застосовуючи імітаційні експерименти на пучках прискорених важких іонів. Подібні роботи ведуться в Інституті теоретичної і експериментальної фізики. Представлені результати серії експериментів з вивчення радіаційної стійкості реакторних матеріалів на інжекторі прискорювача ТІПр-1 з подальшим аналізом зразків методом томографічної атомно-зондової мікроскопії.