

Научная статья

УДК 621.384.6

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-57-62

Проект установки для одновременного облучения двумя пучками ионов на базе ускорителя ТИПр для имитации нейтронного воздействия*

Петр Алексеевич Федин¹, Кирилл Евгеньевич Прянишников²
Альбина Валерьевна Зиятдинова³, Александр Владимирович Козлов⁴
Вячеслав Кириллович Семячкин⁵, Ростислав Петрович Куйбида⁶
Тимур Вячеславович Кулевой⁷

НИЦ «Курчатовский институт»
Москва, Россия

¹fedin-petr1991@yandex.ru

²pryanishnikovk@bk.ru

³albina.ziyatdinova@itep.ru

⁴kozlov@itep.ru

⁵semyachkin@itep.ru

⁶kuibeda@itep.ru

⁷kulevoy@itep.ru

Аннотация

Ионный ускоритель – это многофункциональный инструмент, который, в том числе, может быть использован для моделирования эффектов нейтронного облучения в реакторных материалах. Под действием нейтронов в конструкционных материалах ядерных установок возникают дефекты кристаллической решетки и происходит накопление продуктов трансмутации (гелия и водорода) в структуре материала. В Курчатовском комплексе теоретической и экспериментальной физики (ККТЭФ) ускоритель тяжелых ионов ТИПр (тяжелоионный прототип) используется для моделирования радиационных повреждений в сталях и сплавах с помощью пучка ионов Fe^{2+} 5,6 МэВ. Для одновременной имплантации гелия (или водорода) в область дефектов на установке ТИПр проектируется второй канал, обеспечивающий пучок ионов гелия с энергией до 300 кэВ. В статье представлено описание проектируемой установки.

Ключевые слова

ионное облучение, моделирование радиационных повреждений, тяжелые ионы

Благодарности

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования КАМИКС (<http://kamiks.itep.ru/>) НИЦ «Курчатовский институт».

Для цитирования

Федин П. А., Прянишников К. Е., Зиятдинова А. В., Козлов А. В., Семячкин В. К., Куйбида Р. П., Кулевой Т. В. Проект установки для одновременного облучения двумя пучками ионов на базе ускорителя ТИПр для имитации нейтронного воздействия // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 57–62. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-57-62

* Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Design of a Facility for Simultaneous Irradiation with Two Ion Beams based on the HIPR Accelerator for Simulations Neutron Influence

Petr A. Fedin¹, Kirill E. Prianishnikov², Albina V. Ziatdinova³
Alexander V. Kozlov⁴, Vyacheslav K. Semyachkin⁵, Rostislav P. Kuibeda⁷
Timur V. Kulevoy⁸

NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation

1fedin-petr1991@yandex.ru

¹fedin-petr1991@yandex.ru

²prianishnikovk@bk.ru

³albina.ziyatdinova@itep.ru

⁴kozlov@itep.ru

⁵semyachkin@itep.ru

⁶kuibeda@itep.ru

⁷kulevoy@itep.ru

Abstract

Ion accelerator facility is a powerful tool to simulate neutron irradiation effects in reactor materials. Defects in the crystal lattice arise and the accumulation of transmutation products (helium and hydrogen) occurs in the structure of the material under the action of neutrons in the structural materials of nuclear installations. At Kurchatov Complex for Theoretical and Experimental Physics the heavy ion accelerator HIPr (heavy ion prototype) is used to simulate radiation damage in steels and alloys using a 5.6 MeV Fe²⁺ ion beam. The second beam line is designed at the HIPr facility to simultaneously implant helium (or hydrogen) into the region of defects. The second beam line provides a beam of helium ions with energy up to 300 keV. The report presents a description of second beam line design and a status of construction the second beam line.

Keywords

Ion irradiation, radiation damage simulations, heavy ions

Acknowledgments

Work was performed using equipment of the KAMICS Center for Collective Use (<http://kamiks.itep.ru/>) of the National Research Centre “Kurchatov Institute”.

For citation

Fedin P. A., Prianishnikov K. E., Ziatdinova A. V., Kozlov A. V., Semyachkin V. K., Kuibeda R. P., Kulevoy T. V. Design of a facility for simultaneous irradiation with two ion beams based on the HIPR accelerator for simulations neutron influence. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 57–62 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-57-62

Введение

Разработка конструкционных материалов для нового поколения ядерных и термоядерных энергетических установок (реакторов) требует понимания свойств материалов и изменений микроструктуры в результате нейтронного облучения. Ионное облучение может вызвать микроструктурные изменения, наблюдаемые в нейтронно-облученных материалах (дислокационные петли, полости, сегрегация растворенных веществ и т. д.), что используется для имитации нейтронного воздействия на материалы ядерных реакторов [1]. В сравнении с нейтронным, имитационное ионное облучение позволяет получать экспериментальные результаты влияния на микроструктуру материала в существенно быстрый срок – десятки часов вместо десятков лет. Также имитационное ионное облучение имеет преимущества в отсутствии активации материала и в точном контроле за условиями облучения (температура, флюенс и т. д.). Для сравнения уровня повреждений с различным нейтронным спектром и при облучении различными частицами используется подсчет количества смещений атомов, создаваемых на атом решетки [сна].

С 2009 г. ускоритель ТИПр (тяжелоионный прототип) в НИЦ «Курчатовский институт» ИТЭФ используется для моделирования радиационных эффектов в перспективных реактор-

ных конструкционных сталях и сплавах путем облучения ускоренными тяжелыми ионами (Fe, Ti, V и др.) до уровня повреждения до 200 сна, что соответствует эксплуатационному сроку ядерных установок [2]. ТИПр представляет собой линейный ускоритель с RFQ, работающий с длительностью импульса ионного пучка 475 мкс и частотой повторения один импульс в две секунды. Пучок ионов ускоряется до полной энергии 101 кэВ на нуклон (5,6 МэВ для ионов Fe^{2+}). Во время облучения образцы поддерживаются при определенной фиксированной температуре (в диапазоне от комнатной температуры до 600 °С).

Помимо микроструктурных изменений в кристаллической решетке, в нейтронно-облученных материалах наблюдаются эффекты трансмутации элементов конструкционных материалов, приводящие к появлению водорода и гелия в материале [3]. Имплантация гелия и водорода может быть использована для моделирования эффектов трансмутации в области повреждения тяжелыми ионами. Эффекты от накопления гелия и создаваемых радиационных повреждений зависят друг от друга и происходят в течение времени порядка наносекунд, поэтому для корректного моделирования облучение тяжелыми ионами и гелием должны проходить одновременно. В мире существует порядка двух десятков установок для одновременного облучения двумя или тремя ионными пучками, при этом в России таких установок нет.

Работа посвящена проектированию двухпучковой установки на базе ускорителя ТИПр для проведения имитационных облучений.

Энергия пучка гелия

Расчет глубин имплантации ионов и уровня повреждений был выполнен с помощью кода SRIM [4] в соответствии с методикой, описанной в [5; 6]. Глубина создаваемых повреждений от пучка ионов железа 5,6 МэВ в образцах нержавеющей стали составляет около 2 мкм с пиком на глубине 1,5 мкм. Исследуемая микроструктура с повреждениями находится в диапазоне от 300 до 650 нм. Профиль по глубине имплантированного гелия должен повторять профиль повреждений в этой области. Необходимый профиль гелия на этой глубине можно получить, складывая распределения имплантируемых ионов гелия с энергиями от 100 до 300 кэВ с шагом 50 кэВ. На рис. 1 представлено распределение повреждений в нержавеющей стали и распределение имплантированного гелия при флюенсе от пучка железа 10^{16} см^{-2} и при суммарном флюенсе гелия $1,55 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для моделирования ожидаемых эффектов в термоядерном реакторе DEMO. Подробно о выборе пределов глубины имплантации описано в [7].

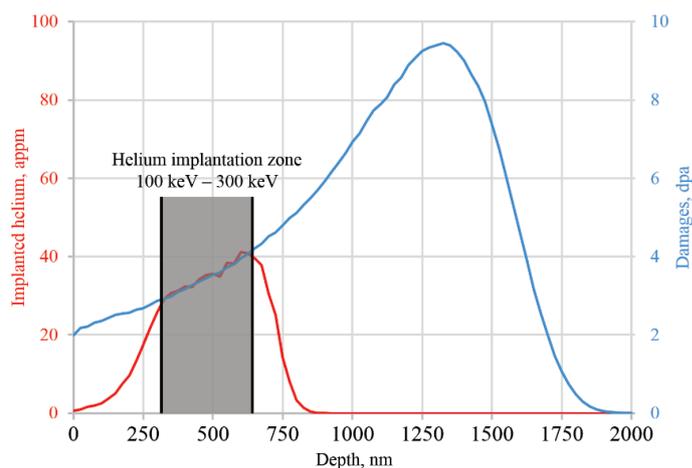


Рис. 1. Распределение повреждений по глубине от пучка Fe^{2+} 5,6 МэВ (синяя кривая), распределение имплантированного гелия по глубине (красная кривая)

Fig. 1. Distribution of damage by depth from a 5.6 MeV Fe^{2+} beam (blue curve), distribution of implanted helium by depth (red curve)

Схема двухпучковой установки

Пучок гелия с энергией от 100 до 300 кэВ легко получить и точно настраивать в постоянном электрическом поле. Для этого ионный источник будет установлен на высоковольтной платформе под потенциалом до 300 кВ. Для облучения была выбрана схема с поворотов образца на 15° от нормали, при которой пучки сходятся под углом 30° между собой. На рис. 2 представлена схема ускорителя ТИПр и проектируемый второй канал.

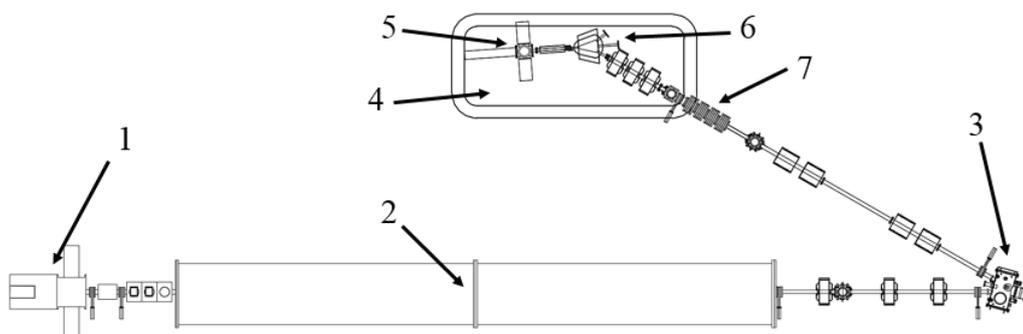


Рис. 2. Схема двухпучковой установки на базе ускорителя ТИПр:

1 – источник ионов металлов ВДИИМ; 2 – ускоритель с ПОКФ ТИПр; 3 – мишенная камера; 4 – высоковольтная платформа; 5 – источник газовых ионов ЭЦР; 6 – сепарирующий магнит; 7 – ускорительная трубка

Fig. 2. Scheme of a two-beam facility based on the HIPR accelerator:

1 – Source of metal ions MEVVA; 2 – RFQ accelerator HIPR; 3 – Target chamber; 4 – High-voltage platform; 5 – Source of gas ions ECR; 6 – Separating magnet; 7 – Accelerating tube

Высоковольтная платформа

На высоковольтной платформе (ВВ) размещается: ионный источник, система транспортировки, вакуумная система, система питания и управления. Для выравнивания потенциалов в зоне установки оборудования платформа имеет внешний каркас из труб-обтекателей. Платформа находится на расстоянии 1,5 м от пола и ограждений с земляным потенциалом. Под платформой устанавливается ВВ источник до 300 кВ. Питание на платформу подается через разделительный трансформатор с мощностью 10 кВт. Охлаждение элементов планируется сделать полностью воздушным.

Пучок ионов гелия вытягивается из ионного источника типа ЭЦР с энергией 25 кэВ, далее фокусируется импульсным соленоидом перед сепарирующим магнитом. После сепарации пучок транспортируется к ускорительной трубке с помощью триплета квадрупольных магнитных линз. В ускорительной трубке пучок ускоряется до определенной энергии от 100 до 300 кэВ. До мишенной камеры ускоренный пучок гелия транспортируется с помощью двух пар квадрупольных магнитных линз.

Мишенная камера

На рис. 3 представлен общий вид мишенной камеры [8]. В мишенной камере два канала сводятся на мишень под углом 30 градусов между собой. Мишень представляет собой кассету, в которую монтируется образец. Кассета монтируется на нагреваемый элемент до 600°C . Контроль за нагревом ведется за счет термпар, встроенных в нагревательный элемент, и тепловизором непрерывно во время облучения. Для удобства монтажа кассеты слева и справа от пучков предусмотрены вакуумные двери. Измерения токов пучков на образце с каждого канала производится отдельно двумя цилиндрами Фарадея. Перед цилиндрами Фарадея установлены проволочные профилометры. Расположение проволочек в профилометре такое, что-

бы не затенять от пучка облучаемую область. Дополнительная юстировка пучков на мишени производится за счет установки сцинтиллятора на посадочное место кассеты с образцами. Наблюдение за сцинтиллятором производится с помощью ПЗС-камеры.

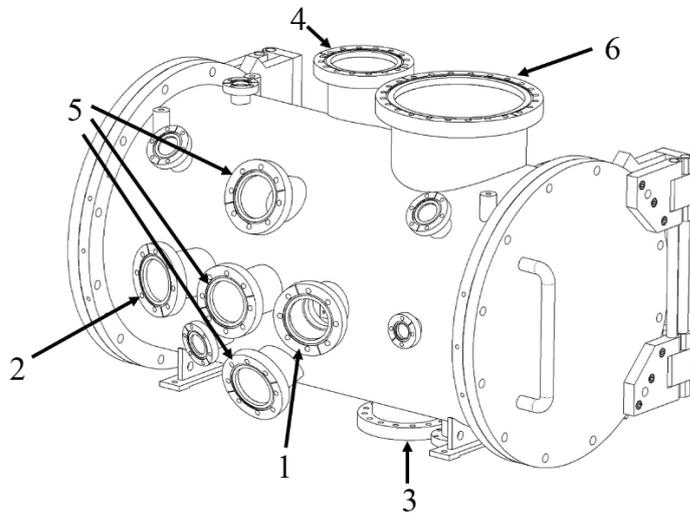


Рис. 3. Вид мишенной камеры для одновременного облучения двумя пучками ионов:
1 – канал Fe^{2+} ; 2 – канал He^+ ; 3 – ЦФ для пучка Fe^{2+} ; 4 – ЦФ для пучка He^+ ; 5 – диагностические окна;
6 – фланец турбомолекулярного насоса

Fig. 3. View of the target chamber for simultaneous irradiation with two ion beams:
1 – Fe^{2+} beamline; 2 – He^+ beamline; 3 – CF for the Fe^{2+} beamline; 4 – CF for the He^+ beamline;
5 – Flanges for diagnostic; 6 – Flange for a turbomolecular pump

Заключение

В работе представлены результаты проектирования двухпучковой установки на базе ускорителя тяжелых ионов ТИПр для проведения имитационных экспериментов. Были определены необходимые энергии для пучка гелия. Выбрана общая установки с высоковольтной платформой до 300 кВ. Была спроектирована и изготовлена мишенная камера для одновременного облучения двумя пучками.

Список литературы

1. Was G. S., Averbach R. S. Radiation Damage Using Ion Beams // Comprehensive Nuclear Materials. 2012. Vol. 1–5. P. 195–221.
2. Fedin P. A. et al. Simulation Experiments at the Heavy Ion Accelerator HIPr // Physics of Atomic Nuclei. 2022. № 85, Suppl. 2. P. S50–S54.
3. Knaster J., Moeslang A., Muroga T. Materials research for fusion // Nature Phys. 2016. № 12. P. 424–434.
4. Ziegler J., Ziegler M., Biersak J. SRIM – The stopping and range of ions in matter // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2010. № 268. P. 1818–1823.
5. Stoller R., Toloczko M., Was G., Certain A., Dwaraknath S., Garner F. On the use of SRIM for computing radiation damage exposure // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2013. № 310. P. 75–80.
6. Zinkle S., Snead L. Opportunities and limitations for ion beams in radiation effects studies: Bridging critical gaps between charged particle and neutron irradiations // Scripta Materialia. 2018. № 143. P. 154–160.

7. **Fedin P. A. et al.** Requirements for the dual Fe + H/He beam at the accelerator HIPr for simulation of neutron influence on nuclear reactor materials // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. № 1686. P. 01207.
8. **Pryanishnikov K. E. et al.** Target chamber for simulation experiments // *Physics of Atomic Nuclei.* 2022. № 85. P. 1894–1898.

References

1. **Was G. S., Averback R. S.** Radiation Damage Using Ion Beams. *Comprehensive Nuclear Materials*, 2012, vol. 1–5, pp. 195–221.
2. **Fedin P. A. et al.** Simulation Experiments at the Heavy Ion Accelerator HIPr. *Physics of Atomic Nuclei*, 2022, vol. 85, suppl. 2, pp. S50–S54.
3. **Knaster J., Moeslang A., Muroga T.** Materials research for fusion. *Nature Phys.*, 2016, vol. 12, pp. 424–434.
4. **Ziegler J., Ziegler M., Biersak J.** SRIM – The stopping and range of ions in matter. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2010, vol. 268, pp. 1818–1823.
5. **Stoller R., Toloczko M., Was G., Certain A., Dwaraknath S., Garner F.** On the use of SRIM for computing radiation damage exposure. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2013, vol. 310, pp. 7580.
6. **Zinkle S., Snead L.** Opportunities and limitations for ion beams in radiation effects studies: Bridging critical gaps between charged particle and neutron irradiations. *Scripta Materialia*, 2018, vol. 143, pp. 154–160.
7. **Fedin P. A. et al.** Requirements for the dual Fe + H/He beam at the accelerator HIPr for simulation of neutron influence on nuclear reactor materials. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1686, 01207.
8. **Pryanishnikov K. E. et al.** Target chamber for simulation experiments. *Physics of Atomic Nuclei*, 2022, vol. 85, pp. 1894–1898.

Сведения об авторах

Федин Петр Алексеевич, младший научный сотрудник
Прянишников Кирилл Евгеньевич, младший научный сотрудник
Зиятдинова Альбина Валерьевна, младший научный сотрудник
Козлов Александр Владимирович, главный инженер линейных ускорителей
Семячкин Вячеслав Кириллович, ведущий конструктор
Куйбида Ростислав Петрович, ведущий инженер-физик
Кулевой Тимур Вячеславович, доктор технических наук

Information about the Authors

Petr A. Fedin, Junior Researcher
Kirill E. Pryanishnikov, Junior Researcher
Albina V. Ziatdinova, Junior Researcher
Alexander V. Kozlov, Chief Linear Accelerator Engineer
Vyacheslav K. Semyachkin, Lead Designer
Rostislav P. Kuibeda, Leading Engineer-Physicist
Timur V. Kulevoy, Doctor Of Technical Sciences

*Статья поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023;
принята к публикации 13.02.2024*

*The article was submitted 13.09.2023; approved after reviewing 13.09.2023;
accepted for publication 13.02.2024*