

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛОВ ПОД ПУЧКОМ ИОНОВ АЗОТА

*В.А. Бомко, С.Н. Дубнюк, Б.В. Зайцев, Б.Н. Зинченко, А.Ф. Кобец, А.И. Кравченко, М.С. Лесных, Л.С. Ожигов, К.В. Павлий\*, А.С. Пархоменко*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина; \*E-mail: kvint@kipt.kharkov.ua*

Рассмотрен вопрос о методическом обеспечении экспериментальных работ по радиационному материаловедению под пучком ионов на ускорителе ЛУМЗИ. Созданы экспериментальная камера и экспериментальное устройство для облучения широкого круга конструкционных материалов и изучения пластических характеристик при температуре в диапазоне 100...800 °С. Это позволит изучать ползучесть, релаксацию напряжения, активное деформирование и размерную стабильность как под пучком ионов, так и после набора определенного потока ионов. На ускорителе получен пучок однозарядных ионов азота с энергией 1 МэВ/нук. и током до 25 мкА.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Пластические характеристики конструкционных материалов во многом определяют работоспособность конструкций активной зоны АЭС. Используя ускоренные заряженные частицы, можно полностью моделировать процессы, происходящие при радиационном воздействии в активных зонах реакторов при стационарных и переходных режимах эксплуатации. Поэтому исследование воздействия заряженных частиц на материалы [1-3] в связи с проблемой определения радиационных характеристик конструкционных материалов и использования их в реакторостроении является актуальным. К таким исследованиям относится изучение особенностей изменения механических свойств материалов при облучении их ионами высоких энергий. Исследованиями взаимодействия заряженных ионов с различными материалами посвящено большое количество экспериментальных работ [4-12]. Интерес к изучению процессов при прохождении ионов в материалах обусловлен особенностями радиационных изменений, что имеет большое значение для понимания основных закономерностей этих процессов, но также важно для использования радиационных эффектов в развитии новых технологий.

Основные физические процессы, происходящие при взаимодействии ионов с твердым телом, в значительной степени понятны [13-15]. Однако для технологических целей и обоснования работоспособности конструкционных материалов в активных зонах атомных реакторов требуется более углубленное знание процессов не только после облучения материалов, но и в процессе их облучения ионами. В частности, внедрение атомов газа в решетку металла оказывает существенное влияние на физико-химические и механические свойства. Влиянию атомов азота на механические свойства посвящены статьи [16-19]. Поглощательная способность поверхности облученного металла формируется слоем с пространственно зависящей диэлектрической проницаемостью, обусловленной наличием градиентов

концентрации, растворенной в скин-слое примеси. При этом градиент концентрации имеет разный знак для прямой и обратной диффузии. При высоких температурах происходит диффузионное насыщение атомами азота скин-слоя металла и при быстром остывании до комнатной температуры резко уменьшается коэффициент диффузии, что существенно увеличивает время обратной диффузии азота – выхода азота из металла. Эти процессы приводят к упрочнению металлов. Однако комплексного изучения пластических характеристик материалов под пучком азота и выявления влияния дозы облучения, плотности ионного потока, температуры и внешнего напряжения не было. Поэтому целью настоящей работы является разработка методик и экспериментальных средств для изучения пластических характеристик (ползучести, релаксации напряжения, активного деформирования и т.д.) металлов в процессе ионного облучения и после него.

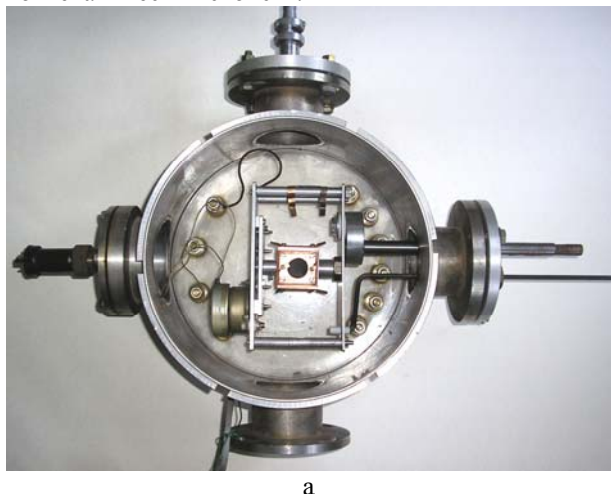
### 2. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения пластических характеристик конструкционных материалов разрабатывается комплекс экспериментальных средств, который позволит проводить облучения под пучком ионов азота и впоследствии изучать ползучесть, релаксацию напряжений, активное деформирование и т.д. облученных образцов. Это позволит изучить вышеперечисленные характеристики от различных доз облучения, температуры, плотности ионного потока, времени релаксации (выдержка образцов после облучения) и других параметров.

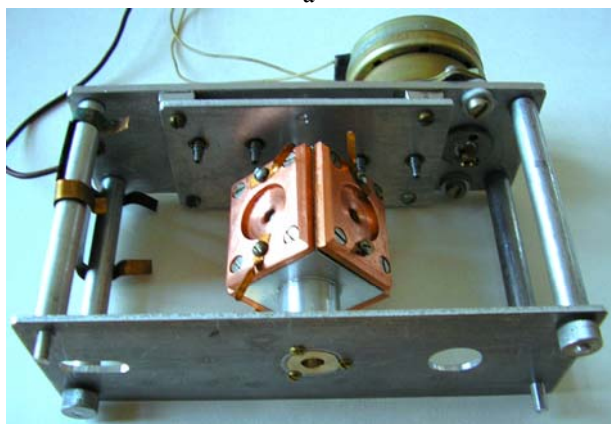
На рис. 1 приведена камера (а) и держатель образцов (б) для облучения образцов на ускорителе ЛУМЗИ. В держателе образцов располагаются четыре образца на барабане, которые можно последовательно облучать без извлечения их из камеры.

Каждый образец снабжен термопарой для измерения температуры в процессе облучения, в камере предусмотрена смена и контроль среды. После облучения всех образцов и необходимой выдержки,

образцы извлекаются из камеры для изучения физико-механических свойств.



а



б

Рис. 1. Камера (а) и держатель образцов (б) для облучения конструкционных материалов

Разработано устройство, позволяющее под пучком ионов изучать ползучесть, релаксацию напряжений, активное деформирование и размерную стабильность. На рис. 2 приведена схема экспериментального устройства для изучения пластических свойств конструкционных материалов под пучком ионов.

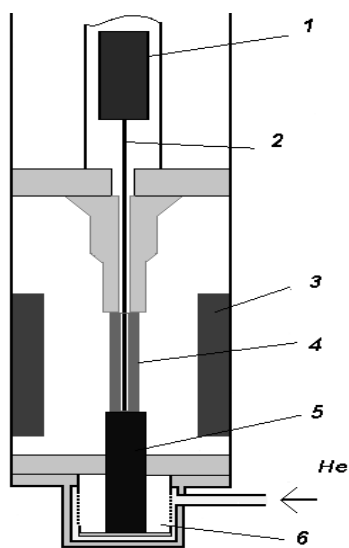


Рис. 2. Схема экспериментального устройства для изучения пластических свойств материалов под пучком ионов

Устройство состоит из индукционного датчика деформации (рис. 3), который обеспечивает измерение деформации с точностью 1 мкм. Датчик состоит из двух последовательно соединенных катушек с ферритовым сердечником (1); штока датчика деформации, который передает перемещение нагружающего устройства на датчик деформации и тем самым регистрируется деформация образца (2); нагревательного элемента, позволяющего в процессе облучения поддерживать температуру образца в пределах 100...800 °С (3); испытуемого образца, общий вид которого с захватами для растяжения приведен на рис. 4 (4); нагружающего штока, который передает нагрузку на образец от сменного пневматического нагружающего устройства (5); съемного пневматического нагружающего устройства. В зависимости от сечения образца можно менять нагружающее устройство, тем самым менять предельные нагрузки на исследуемый образец (6).

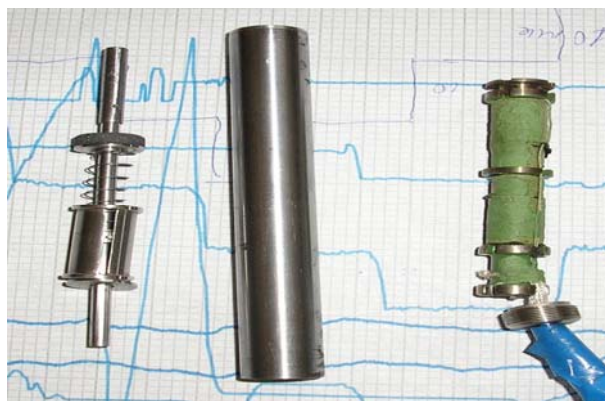


Рис. 3. Индукционный датчик деформации

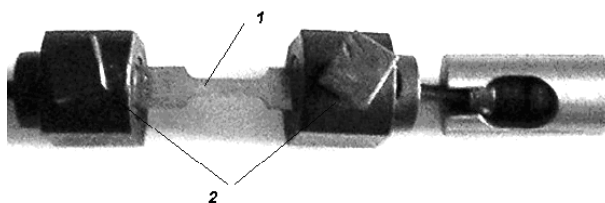


Рис. 4. Исследуемый образец с захватами:  
1 – образец; 2 – захваты

### 3. ИНЖЕКТОР ИОНОВ

Для реализации изучения вышеперечисленных характеристик материалов был разработан, изготовлен и испытан инжектор однозарядных ионов азота с последующим ускорением ионов в ускорительной трубке до энергии 462 кэВ. Длина ускорительной трубки составляет 1415 мм.

Источник ионов представляет модифицированный импульсный дуоплазмотрон с осцилляцией электронов [20, 21] и накаливаемым катодом. Источник состоит из катода (вольфрам – диаметром 0,8 мм), промежуточного электрода (магнитный материал), анода (медь), антикатада (магнитный материал) и содержит вытягивающий и фокусирующий электроды. В области катод-промежуточный электрод-анод-антикатод создавался импульсный разряд, параметры которого (плотность частиц, темпе-

ратура электронов) изменялись в результате изменения подаваемого от модулятора импульсного потенциала и давления рабочего газа в разрядном промежутке. На выходе антикатода (диаметр отверстия 6 мм) при подаче вытягивающего потенциала формируется двойной слой, который и является источником ионов азота. Параметры разряда контролировались: токи в цепях катода, промежуточного электрода и анода – поясами Роговского; потенциалы на этих электродах – с помощью высокоомных безындуктивных делителей.

Проведенные расчеты распределения потенциала от поверхности эмиссии ионов до выхода из ускорительной трубки и траекторий крайних ионов позволили определить значения вытягивающего и фокусирующего потенциалов для формирования пучка в самом источнике и в ускорительной трубке.

Значительное влияние на формирование пучка оказывает магнитное поле в плазменной части источника, так как влияет на форму поверхности двойного слоя. В ряде случаев в источнике ионов наблюдалась перефокусировка пучка, и изменением величины магнитного поля [22] осуществлялась расфокусировка для улучшения суммарной фокусировки пучка на входе в ускорительную секцию.

Контроль общего тока пучка ионов в экспериментах осуществлялся с помощью цилиндров Фарадея (ЦФ) и экранов, которые расположены на выходе из ускорительной трубки (ЦФ-1), на входе в ускорительную секцию (ЦФ-2) и на выходе ускорителя (ЦФ-3). С помощью цилиндра Фарадея, расположенного на выходе ускорителя (ЦФ-3), измерялась величина тока ускоренных однозарядных ионов азота. В этом случае перед ЦФ-3 располагалась алюминиевая фольга толщиной 8 мкм, которая отсекала неускоренные ионы азота более высокой зарядности.

Измерения показали, что величина общего ионного тока на выходе из ускорительной трубки составляет 10...15 мА и сильно зависит от разности потенциалов между вытягивающим и фокусирующим электродами, т.е. на этом участке при торможении пучка происходит фокусировка пучка.

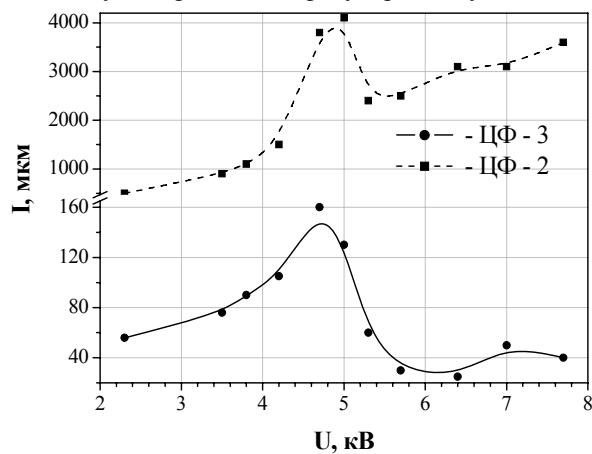


Рис. 5. Зависимость токов ионов от величины фокусирующего потенциала

Величина тока на входе в ускорительную секцию составляет 4 мА, а на выходе из нее (измерения

производились без включения высокочастотного питания) достигает 160 мкА. Следует отметить, что максимальные величины токов на входе и выходе ускорительной секции наблюдались при одном и том же значении потенциала на фокусирующем электроде. Это означает, что инжектируемый пучок был сфокусирован на первом ускоряющем зазоре (рис. 5).

Выше отмечалось значительное влияние величины магнитного поля на форму поверхности двойного слоя, а значи, на компенсацию перефокусировки пучка. Для изучения этого влияния измерялись величины тока ускоренных ионов однозарядного азота на выходе из ускорителя. На рис. 6 приведены зависимости ускоренного тока ( $I_{ЦФ-3}$ (ускор.)) от величины фокусирующего потенциала для трех значений тока соленоида ( $I_{сол.}$ ). Как видно из этого рисунка, влияние величины магнитного поля на фокусировку пучка (суммарную) на выходе ускорителя значительно. Таким образом, при выборе режимов облучения существует возможность в широких пределах изменять дозу обработки в результате изменения потенциалов вытягивающего и фокусирующего электродов и тока соленоида.

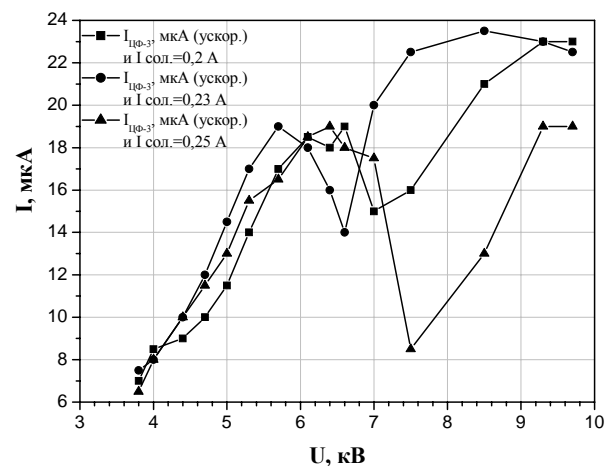


Рис. 6. Зависимости тока ускоренных ионов азота от потенциала фокусирующего электрода

Эксперименты по изучению пластических характеристик конструкционных материалов будут проводиться на ускорителе ЛУМЗИ [23] с пучком однозарядных ионов азота с параметрами, приведенными в таблице.

#### Параметры пучка ионов азота

| Параметры                               | Значения  |
|-----------------------------------------|-----------|
| Ток разряда в источнике, А              | 16...20   |
| Потенциал разряда, В                    | 500...600 |
| Ток ионного пучка, мкА(N <sup>+</sup> ) | до 25     |
| Энергия ионов, МэВ/ион.                 | 1,0       |
| Длительность токового имп., мкс         | 400       |
| Частота повторений, Гц                  | 2...10    |

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании и обосновании работоспособности элементов конструкций атомных электро-

станцій, в першу чергу, необхідно знати пластичні характеристики використовуваних конструкційних матеріалів. Для вивчення цих характеристик як під пучком іонів, так і після облучення, розроблено експериментальний комплекс на базі ЛУМЗИ, який включає в себе: камеру для облучення і експериментальне устаткування, що дозволяє вивчати вищеперелічені характеристики. Отриманий на ЛУМЗИ пучок однозарядних іонів азоту забезпечує необхідний ток і вимагає енергетичного розподілу іонів.

Робота виконана в рамках проектів ЯМРТ гранта № X-5-533 і III-4-06 (ШЕНМП).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. D. Lesueu. Amorphisation par irradiation aux flag-mats de fission d'un alliage Pd-Si // *Radiat. Effects*. 1975, v. 24, N 2, p. 101–110.
2. И.А. Баранов, С.О. Цепелевич, Ю.Н. Явлинский. Неупругое распыление твердых тел // *УФН*. 1988, т. 156, № 3, с. 477–510.
3. И.А. Баранов, А.С. Кривохатский, В.В. Обнорский. Механизм распыления материалов тяжелыми многозарядными ионами – осколками деления // *ЖТФ*. 1981, т. 51, № 12, с. 2457 – 2475.
4. Z.G. Wang et al. The sensitivity of metals under irradiation swift-heavy-ion irradiation: a transient thermal process // *J. Phys.: Condens. Matter*. 1994, v. 6, N 34, p. 6733–6750.
5. M. Toulemonde. Nanometric phase transformation of oxide materials under GeV energy heavy ion irradiation // *Nucl. Instr. Meth. B*. 1999, v. 156, N 1-4, p. 1–11.
6. R. Neumann. Scanning probe microscopy of ion-irradiated materials // *Nucl. Instr. Meth. B*. 1999, v. 151, N 1-4, p. 42–55.
7. S. Furuno et al. Tracks of high energy heavy ions in solids // *Nucl. Instr. Meth. B*. 1996, v. 107, N 1-4, p. 223–226.
8. C. Dufour et al. A high-resistivity phase induced by swift heavy-ion irradiation of Bi: a probe for thermal spike damage // *J. Phys.: Condens. Matter*. 1993, v. 5, N 26, p. 4573–4584.
9. A. Audouard et al. Atomic displacements and atomic motion induced by electron excitation in heavy-ion-irradiated amorphous metallic alloys // *J. Phys.: Condens. Matter*. 1993, v. 5, N 5, p. 995–1018.
10. S.A. Karamian, Yu.Ts. Oganessian, V.N. Bugrov. The effect of high-energy ions heavier than argon on a germanium single crystal and a new mechanism for autorecrystallisation // *Nucl. Instr. Meth. B*. 1989, v. 43, N 2, p. 153–158.
11. А.Ю. Дидык. Радиационное воздействие тяжелых ионов на хромоникеливую сталь при высоких температурах // *Известия РАН. Металлы*. 1995, № 3, с. 128–135.
12. А.Ю. Дидык, В.С. Вариченко. Track structure in dielectric and semiconductor single crystals irradiated by heavy ions with high level of inelastic energy loss // *Radiat. Meas.* 1995, v. 25, N 1-4, p. 119–124.
13. F. Ziegler, J. Biersack, U. Littmark. The Stopping Powers and Ranges of Ions in Matter // *Pergamon, N.Y.*, 1985, v. 1.
14. L.C. Northclie, R.F. Shilling // *Nucl. Data Tables*, A7. 1970, N 3-4.
15. I. Lindhard, M. Shar, H.E. Schiott // *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.* 1963, v. 33, N 14, p. 1–42.
16. E.A. Gulbransen, K.F. Andrew // *Trans. AIME*. 1950, v. 188, p. 586.
17. K. Osthagen, P. Kofstad // *J. Less Common Metals*. 1963, v. 5, N 1, p. 7.
18. А.В. Бялобжеский, М.С. Цирлин, Б.И. Красилов. *Высокотемпературная коррозия и защита сверхтугоплавких металлов*. М.: «Атомиздат», 1977.
19. Л.Е. Ihod. *Transition metal carbides and nitrides*. New York, Academic, 1971.
20. Ю.Н. Антонов, Л.П. Зиновьев, В.П. Рашевский // *Атомная энергия*. 1960, № 8, с. 454.
21. Р.А. Демирханов, Ю.В. Курсанов, В.М. Благовещенский // *ПТЭ*. 1964, № 1, с. 30.
22. М.Д. Габович, Л.И. Романюк // *ЖТФ*. 1961, № 3, с. 31.
23. V.A. Bomko, S.A. Borsuk, A.F. Dyachenko et al. Tuning the Cells of the Accelerating Structure with RF Quadrupole Doublets // *Proc. of RuPAC XIX, Dubna 2004*, p. 321–323.

#### TECHNIQUE OF STUDYING OF PLASTIC PROPERTIES OF MATERIALS UNDER A BEAM OF NITROGEN

**V.A. Bomko, S.M. Dubnjuk, B.V. Zaytsev, B.M. Zinchenko, A.P. Kobets, A.I. Kravchenko, M.S. Lesnych, L.S. Ozhigov, K.V. Pavlii, A.A. Parkhomenko**

The question on methodical maintenance of experimental works on radiating materials science under a beam of ions on the accelerator LAMI is considered. The experimental chamber and the experimental device for an irradiation of the broad audience of constructional materials and studying of plastic characteristics are created at temperature in a range 100...800 °C. It will allow to study creep, a relaxation of a pressure, active deformation and dimensional stability, both under a beam of ions, and after a set of the certain stream of ions. On the accelerator the beam onecharge ions of nitrogen with energy 1 MeV/nucleon and a current up to 25 microampere is received.

#### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ ПІД ПУЧКОМ ІОНІВ АЗОТУ

**В.О. Бомко, С.М. Дубнюк, Б.В. Зайцев, Б.М. Зінченко, А.П. Кобець, А.І. Кравченко, М.С. Лесних, Л.С. Ожгігов, К.В. Павлій, А.О. Пархоменко**

Розглянуто питання стосовно методичного забезпечення експериментальних робіт з радіаційного матеріалознавства під пучком іонів на прискорювачі ЛПБЗІ. Створено експериментальну камеру і експериментальний пристрій для опромінювання широкого кола конструкційних матеріалів та вивчення пластичних характеристик при температурі в межах 100...800°C. Це дозволить вивчати повзучість, релаксацію напруження, активне деформування та розмірну стабільність, як під пучком іонів, так і після набору певного потоку іонів. На прискорювачі було отримано пучок однозарядних іонів азоту з енергією 1 МеВ/нуклон та струмом до 25 мікроамперів.