

## Раздел пятый

# ДИАГНОСТИКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 620.187: 539.12.04

## МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ОБЛУЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИОНАМИ ГЕЛИЯ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ

*Р.А. Анохин, В.Н. Воеводин, С.Н. Дубнюк, А.М. Егоров, Б.В. Зайцев, А.Ф. Кобец,  
О.П. Леденёв, К.В. Павлий, В.В. Ружицкий, Г.Д. Толстолицкая*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*  
*E-mail: kvint@kipt.kharkov.ua*

Представлено описание установки и методика облучения конструкционных материалов ионами гелия с энергией до 4 МэВ. Для облучения материалов разработана, изготовлена и запущена новая ускоряющая структура ПОС-4 встречно-штыревого ИН-типа, в которой используется метод переменного-фазового фокусировки с шаговым изменением синхронной фазы вдоль фокусирующих периодов. Создан и исследован инжектор однократно заряженных ионов гелия, энергия которых на выходе ускорительной трубки равна 120 кэВ, с последующей инъекцией пучка в ускорительную секцию ПОС-4. Для облучения образцов изготовлена камера, в процессе облучения измеряются температура образца, ток пучка и доза. Установка и методика облучения апробированы при исследовании термодесорбции гелия и электрофизических свойств облученных образцов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время порядка 50 % электроэнергии, вырабатываемой в Украине, приходится на долю атомной энергетики. В ближайшее время значительная часть ядерных реакторов должна быть выведена из эксплуатации в связи с выработкой их ресурса. Данная тенденция справедлива и для многих других стран. В связи с этим предусматривается к середине века строительство реакторов нового поколения: на быстрых нейтронах и термоядерных. В конструкционных материалах активной зоны реакторов на быстрых нейтронах и особенно первой стенки термоядерных реакторов, наряду с высокой степенью радиационных повреждений структуры, будет происходить накопление значительного количества гелия, который образуется в результате различных ядерных реакций, а также может быть внедрен непосредственно из плазмы в термоядерных реакторах (ТЯР).

Гелий оказывает существенное влияние на радиационную повреждаемость материалов и часто может быть причиной значительного ухудшения свойств и сокращения срока службы конструктивных элементов реакторов. В связи с этим изучению поведения гелия в различных материалах уделяли большое внимание. Выявлен ряд особенностей и закономерностей [1-5] по влиянию гелия на радиационное распухание, высокотемпературное и низкотемпературное радиационное упрочнение и охрупчивание, радиационно-ускоренную ползучесть, эрозию поверхности материалов первой стенки ТЯР и др. Для прогнозирования работоспособности конструктивных материалов в условиях накопления значительных концентраций газов кроме знаний о влиянии газов на развитие радиационной повреждаемости требуются сведения о поведении самих

газов в зависимости от различных внутренних и внешних факторов. Такими факторами могут быть глубина залегания гелия, его концентрационно-пространственное распределение, содержание примесей и легирующих элементов в металлах и сплавах различных кристаллических систем, послерадиационная обработка. К настоящему времени экспериментальных данных по поведению гелия в материалах в зависимости от этих факторов получено недостаточно.

При исследовании поведения гелия в материалах особое внимание уделяют его влиянию на механические свойства. Общеизвестно, что наличие нескольких десятков ppm гелия в аустенитных сталях вызывает значительное охрупчивание, сопровождаемое изменением в характере разрушения: от транскристаллитного к межкристаллитному расщеплению. Для механических испытаний образцов с заданной концентрацией гелия необходимы облучательные устройства, обеспечивающие внедрение гелия на глубину от нескольких десятков до сотен микрометров, а также имеющие размер пучка без сканирования до нескольких сантиметров.

Целью данной работы являлась разработка методики облучения конструкционных материалов ионами гелия с энергиями от 0,12 до 4 МэВ и апробация этой методики при исследовании термодесорбции гелия и электрофизических свойств облученных образцов.

### 2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изучения процессов, связанных с имплантацией гелия, в ННЦ ХФТИ осуществлен запуск линейного ускорителя ионов гелия с энергией 4 МэВ, в дальнейшем планируется увеличение энергии до 34 МэВ [6].

## 2.1. УСКОРИТЕЛЬНАЯ СЕКЦИЯ ПОС-4 И ИНЖЕКТОР ИОНОВ ГЕЛИЯ

Ускорительная секция ПОС-4 предназначена для ускорения ионов  $He^+$  до энергии 4 МэВ (входная энергия – 30 кэВ/нукл.), кроме того, ее можно использовать для ускорения протонов. В ускоряющей структуре ПОС-4 встречно-штыревого типа для фокусировки пучка используется метод переменнo-фазовой фокусировки с шаговым изменением синхронной фазы вдоль фокусирующих периодов [7]. Эффективность этого метода зависит от конфигурации фокусирующего периода. Выбор синхронных фаз обеспечил захват пучка ионов высокой интенсивности в фазовом угле  $120^\circ$ , а также радиальную и фазовую устойчивости сгустков ионов вдоль ускоряющей структуры. Для того чтобы обеспечить максимальный захват частиц ( $120^\circ$ ) в режим устойчивого радиального и продольного движения, ускоряющее поле в начальной части структуры было сделано нарастающим. Схема ПОС-4 и амплитудное значение ВЧ-поля в зависимости от номера ускоряющей ячейки показаны на рис. 1.

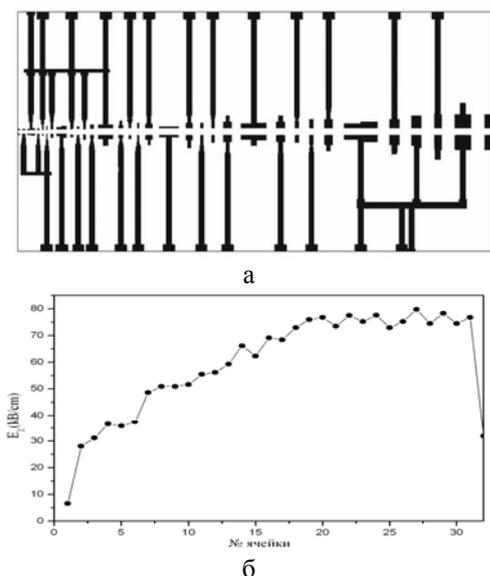


Рис. 1. Схема ПОС-4 (а) и амплитудное значение ВЧ-поля в зависимости от номера ускоряющей ячейки (б)

В результате проведенных вычислений и экспериментальных работ, выполненных при настройке и запуске ускорительной секции ПОС-4, получено заданное распределение электрического поля в структуре на рабочей частоте 47,2 МГц. Основные параметры ПОС-4 представлены в табл. 1.

Для облучения конструкционных материалов ионами гелия с энергией 120 кэВ и для инъекции пучка в ускорительную секцию ПОС-4 был разработан, изготовлен и протестирован инжектор однократно заряженных ионов гелия. Инжектор состоит из источника ионов, системы вытягивания и фокусировки пучка, а также ускорительной трубки. Для формирования пучка с заданными параметрами был выбран источник типа дуоплазмотрон, с осциллирующими в анодной области электронами [8].

Таблица 1

Основные параметры ПОС-4

Рабочая частота, МГц	47,2
Входной импульсный ток, мА	30
Выходной импульсный ток, мА	1... 0,3
Выходной нормализованный gms эмиттанс в плоскости X, см·мрад	0,0584
Выходной нормализованный gms эмиттанс в плоскости Y, см·мрад	0,0568
Выходной нормализованный 99 % эмиттанс в плоскости X, см·мрад	0,7809
Выходной нормализованный 99% эмиттанс в плоскости Y, см·мрад	0,7723

Такой выбор был сделан в связи с тем, что рабочим газом является гелий, имеющий аномальную кривую Пашена. В источнике поджигается несамостоятельный дуговой разряд для получения плазмы, проникающей из анодной области в зазор между плазменной частью источника и вытягивающим электродом, где формируется при подаче вытягивающего потенциала двойной слой, служащий источником ионов.

Инжектор позволяет получить пучок однократно заряженных ионов гелия с токами в несколько десятков миллиампер. Основные параметры инжектора приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры инжектора

Рабочий газ	гелий
Ток дуги, А	2...4
Ток пучка на выходе, мА	до 20
Энергия частиц на выходе, кэВ	120
Диаметр пучка на выходе, мм	~ 8
Давление рабочего газа в анодной области источника, мм рт.ст.	$5 \cdot 10^{-3}$
Частота посылок, Гц	2...10
Длительность импульса модулятора дуги, мкс	500
Магнитное поле в источнике, Э	300...700

На рис. 2 представлена осциллограмма тока пучка ускоренных ионов из ПОС-4. Ток дуги равен 4 А, ток инъекции – 1,2 мА, ток ускоренного пучка ~ 300 мкА. Из рисунка видно, что ускоренный ток пучка имеет квазипрямоугольную форму, отклонение пикового значения тока составляет не более 5 %.



Рис. 2. Осциллограмма тока пучка ионов гелия из ПОС-4 с энергией 4 МэВ

## 2.2. МИШЕННЫЙ УЗЕЛ И УСЛОВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ

Для облучения образцов из конструкционных материалов была изготовлена камера с мишенным узлом. Схема мишенного узла приведена на рис. 3. Температура образца при облучении измерялась хромель-алюмелевой термопарой, прикрепленной к образцу с противоположной стороны по отношению к падающему пучку (см. рис. 3). Сигнал с термопары усиливался дифференциальным усилителем. Градуировка проводилась с учетом длины (~ 30 м) измерительных проводов.

Контроль тока пучка на входе и выходе ускорителя производится пролетными индукционными датчиками. В ходе работы измеряются токи инжектируемого пучка ионов гелия с энергией 120 кэВ и ускоренного пучка с энергией 4 МэВ. Ток пучка ионов гелия измерялся пролетным датчиком, установленным перед образцом на расстоянии ~ 30 см. Перед каждым облучением проводили градуировку датчика с помощью цилиндра Фарадея. Средний

диаметр падающего на образец пучка ионов составлял ~ 36...37 мм, а площадь облучаемого образца – около 10 см<sup>2</sup>. На ускорителе были проведены облучения 10 образцов. Материалы и параметры облучения представлены в табл. 3.

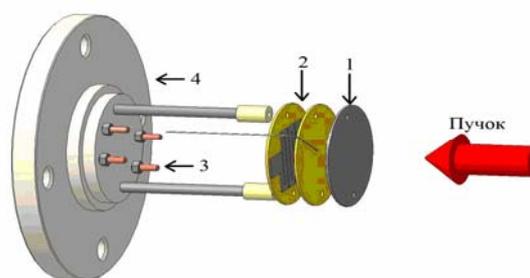


Рис. 3. Схема мишенного узла:  
1 – образец; 2 – нагреватель; 3 – тоководы;  
4 – фланец

Таблица 3

Материалы и параметры облучения

Номер образца	Образец	Толщина образца, мкм	Энергия ионов He <sup>+</sup> , МэВ	Средняя температура облучения, °С	Полная доза облучения
1	X18H10T	200	4	72	7,5·10 <sup>15</sup>
2	Сталь-3	100		78	1,5·10 <sup>16</sup>
3	Zr+2,5%Nb	250		70	2,3·10 <sup>16</sup>
4	Zr	300		58	5·10 <sup>16</sup>
5	Zr+1%Nb	250	2,42	40-80	5·10 <sup>16</sup>
6			(4+0,12)		5·10 <sup>16</sup> +5·10 <sup>16</sup>
7			0,12		5·10 <sup>16</sup>
8			0,12		5·10 <sup>17</sup>
9	Nb	16	4	40	5·10 <sup>16</sup>
10	Nb+1%Zr	22			

## 2.3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

В ходе облучения проводились измерения температуры образца, тока пучка и дозы облучения. Для этого использовался аналого-цифровой преобразователь ZET 210 «Sigma USB», подключенный к персональному компьютеру. Создан программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить необходимые измерения с последующим сохранением данных в цифровом виде. Схемы устройств для измерений температуры облучения, тока пучка и дозы приведены на рис. 4.

Температура образца измеряется при помощи хромель-алюмелевой термопары с частотой 1 Гц, что позволяет наиболее точно определять ее изменение в процессе облучения. Термопара подключена на вход АЦП, который передает оцифрованное значение термоЭДС на вольтметр постоянного напряжения. После вольтметра измеренное значение выводится на экран в виде графика (при помощи компонента XYZ-плоттер), а также на цифровой индикатор (текущее на данный момент) и через преобразователь сохраняется в виде файла на жестком диске компьютера для последующей работы с ним.

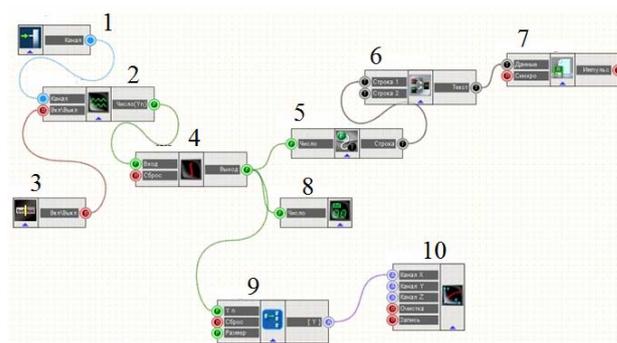


Рис. 4. Схема измерения температуры образца, тока пучка и дозы облучения: 1 – входной канал; 2 – вольтметр; 3 – кнопка включения; 4 – интегратор (используется только при измерении дозы облучения); 5 – конвертер; 6 – сложение строк; 7 – запись в файл; 8 – ЖКИ; 9 – массив; 10 – XYZ-плоттер

Измерение интенсивности пучка (тока) происходит по следующей схеме. После оцифровки в АЦП цифровое значение подается на вольтметр переменного напряжения, который настроен на измерение

пикового значения напряжения. Это значение выводится на экран в виде графика (при помощи компонента XYZ-плоттер) и на цифровой индикатор (текущее на данный момент). Измеренные данные сохраняются в виде файла на жестком диске компьютера. Измерения проводятся с частотой 10 Гц, что позволяет наиболее точно определить пиковое значение тока пучка.

Измерение дозы облучения образца проводится по схеме, аналогичной схеме измерения пикового значения тока, только после вольтметра установлен интегратор. Это позволяет регистрировать дозу облучения непосредственно при проведении экспериментальных работ на ускорителе.

На рис. 5 приведен внешний вид измерителя тока пучка на экране компьютера, такой же вид имеют температурный и дозовый приборы.



Рис. 5. Внешний вид прибора для измерения тока пучка

#### 2.4. МЕТОДИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В процессе облучения отрабатывались режимы работы ускорителя и системы регистрации параметров. Исследовано влияние выключения и включения ВЧ-питания ускоряющей структуры на изменение температуры образца. Из графика (рис. 6) следует, что чувствительность находится в пределах  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура на образце стабилизируется после 60...90 мин работы ускорителя.

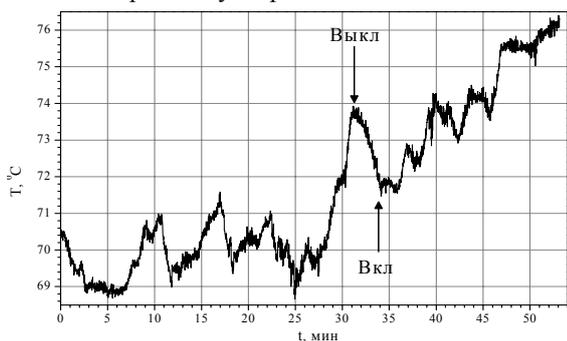


Рис. 6. Зависимость температуры образца X18N10T от времени облучения

Измерения тока пучка (рис. 7) показали, что ток ускоренных ионов до 4 МэВ в 4-6 раз меньше инжектируемого. Стабильность тока пучка после выхода ускорителя на оптимальный режим составляет  $\pm 5\%$  и определяется стабильностью питающих систем.

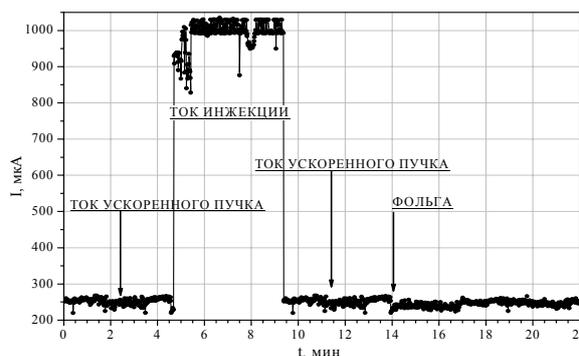


Рис. 7. Зависимость пикового тока пучка от времени облучения

Доза облучения регистрируется с помощью пролетного датчика тока и программного интегратора, зависимость дозы облучения образца от времени показана на рис. 8. Проведенные расчеты подтвердили правильность регистрации дозы.

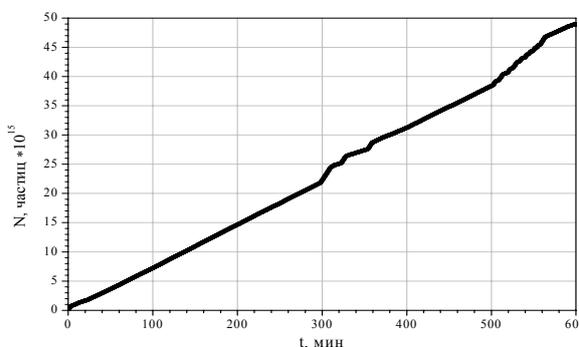


Рис. 8. Зависимость дозы облучения образца циркония от времени

Большое внимание в ходе проведения методических экспериментов было уделено вопросу определения энергии ионов гелия, падающих на образец. Для проверки энергии ионов перед пролетным датчиком была установлена алюминиевая фольга толщиной 10 мкм. Измерения тока пучка без фольги и с фольгой показали практически одинаковые значения (см. рис. 7). Поскольку только ионы гелия с энергией 4 МэВ, имеющие пробег  $>16\text{ }\mu\text{m}$ , могут беспрепятственно преодолеть алюминиевый заслон, можно утверждать, что ионы гелия, именно, с энергией 4 МэВ попадают на образец.

На рис. 9 показаны зависимости температуры образца (верхняя кривая) и тока пучка (нижняя кривая) от времени при выключении и включении ВЧ-питания ускорителя. Энергия инжекции в этом случае составляет 120 кэВ, а энергия ускоренных ионов гелия – 4 МэВ. Инжектируемый ток в 4 раза больше, чем ток ускоренных ионов, а температура образца при инжектируемом токе меньше, чем при ускоренном. Таким образом, рост температуры образца обусловлен только высокоэнергетической (4 МэВ) компонентой пучка. Данный вывод полностью совпадает с проведенными расчетами и зависимостями, показанными на рис. 7, 9.

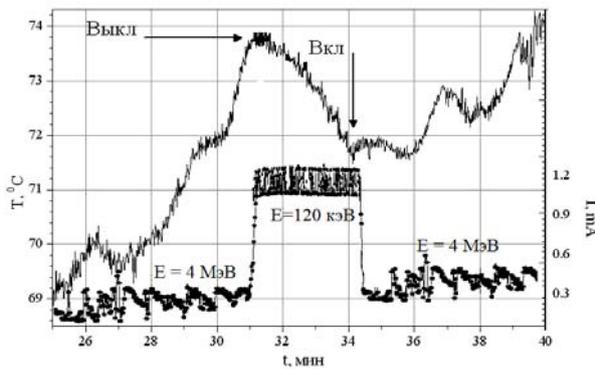


Рис. 9. Зависимость температуры образца и тока пучка от времени при инжектируемом и ускоренном токе пучка

Из проведенных методических экспериментов следует: для стабилизации и увеличения тока пучка ионов необходимо осуществлять регистрацию ВЧ-поля ускоряющей структуры для его корректировки при облучении образцов, а также измерять распределение выходного тока пучка с целью обеспечения его равномерности по площади образца; для создания более высокого вакуума необходимо осуществлять дополнительно вакуумную откачку в месте расположения образца.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для облучаемых образцов с помощью программы SRIM были проведены расчеты распределений залегания гелия по толщине. На рис. 10 приведены эти зависимости для Zr+1%Nb. Полные дозы при энергиях ионов гелия 120 кэВ и 4 МэВ одинаковы ( $5 \cdot 10^{16}$  ионов). На образцах №1-8 (см. табл. 3) были проведены измерения термодесорбции гелия.

Электрофизические свойства были измерены на образцах Nb и Nb+1%Zr (см. табл. 3). Ионы гелия с энергией 4 МэВ проникают в эти металлы на глубину соответственно 7,2 и 7,4 мкм, на которую и приходится основной пик распределения внедренных атомов гелия.

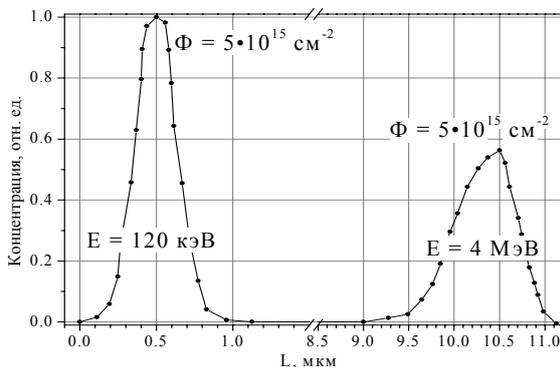


Рис. 10. Расчетный профиль распределения ионов гелия, имплантированных в Zr+1%Nb, с энергией 120 кэВ (левый график) и 4 МэВ (правый график), доза –  $5 \cdot 10^{15}$   $1/\text{см}^2$

#### 3.1. ТЕРМОДЕСОРБЦИЯ ГЕЛИЯ

Поведение гелия в исследуемых материалах после облучения их ионами гелия с энергиями 0,12...4 МэВ изучали при помощи методики термо-

стимулированной десорбции (ТД). Суть методики состоит в измерении парциального давления гелия, выделяющегося из исследуемого образца, в процессе постимплантационного линейного повышения его температуры. В экспериментах использовалась методика термодесорбции в динамическом режиме, при котором давление газа в камере пропорционально скорости его десорбции из металла. Образцы исследовались в температурном интервале 0...1500 °С, скорость их нагрева составляла 5...8 °С/с.

Исследования ТД выполнены на установке «Ант» [10] с безмасляной системой откачки, обеспечивающей давление остаточных газов в камере мишени на уровне  $(2...3) \cdot 10^{-5}$  Па. Анализ состава газовой среды в экспериментальной камере установки осуществлялся монопольным масс-спектрометром.

На рис. 11-13 приведены спектры термодесорбции гелия из стали X18H10T и сплава Zr+1%Nb при различных параметрах облучения образцов.

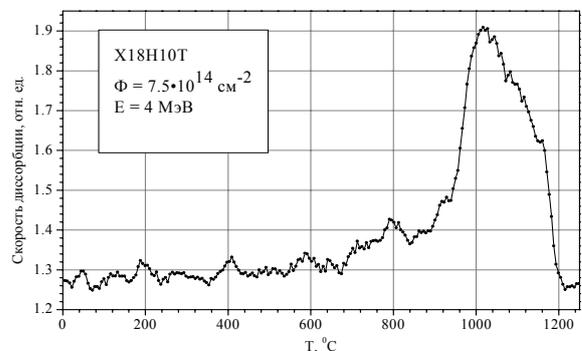


Рис. 11. Спектр термодесорбции гелия из образца стали X18H10T, облученного ионами He<sup>+</sup> с энергией 4 МэВ. Скорость нагрева образцов – 5,5 °С/с

Для сплава Zr+1%Nb при указанных дозах имплантации и независимо от энергии облучения температурный интервал отсутствия десорбции имеет несколько меньшую величину. Заметное газовыделение начинается при  $T \approx 500$  °С и продолжается до  $T \approx 1500$  °С. В этой области температур спектр ТД характеризуется суперпозицией нескольких пиков десорбции. Сложность структуры спектра возрастает при увеличении дозы облучения (см. рис. 12, 13). Максимальное газовыделение наблюдается в пике с температурой максимума вблизи  $T \approx 1280$  °С. Причем, необходимо отметить, что эта стадия десорбции наблюдается как в спектрах образцов, облученных до дозы  $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$   $\text{см}^{-2}$ , так и образцов, облученных до дозы в 10 раз большей.

На рис. 13 показан спектр ТД из образцов из сплава Zr+1%Nb, облученных ионами гелия с энергией 2,42 МэВ до дозы  $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$   $\text{см}^{-2}$ , а также спектр образцов, последовательно облученных ионами гелия с энергией 0,12 и 4 МэВ до одной и той же дозы  $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$   $\text{см}^{-2}$ . От спектров, показанных на рис. 12, первый спектр отличается возросшей долей атомов газа, выделяющегося в наиболее высокотемпературном пике.

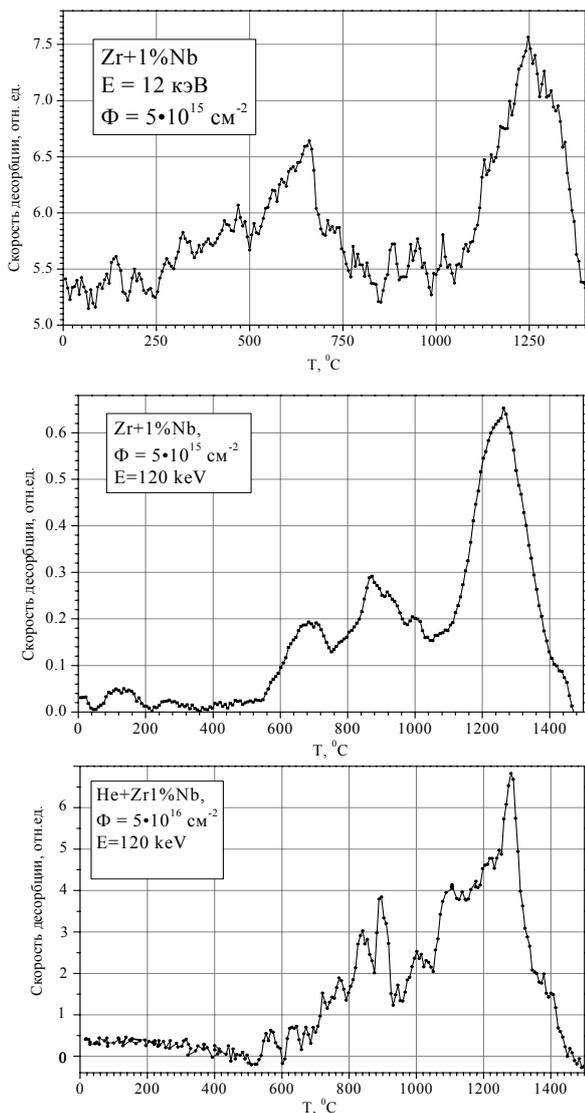
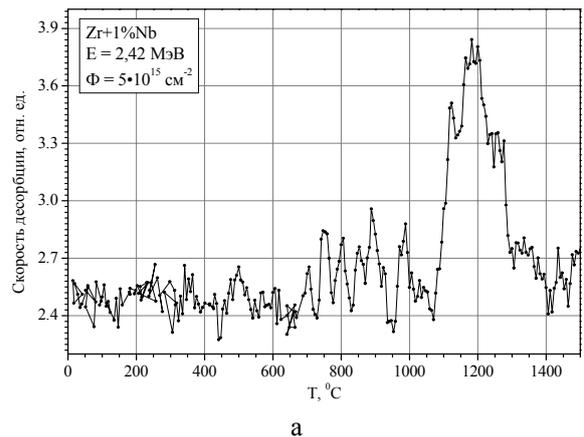


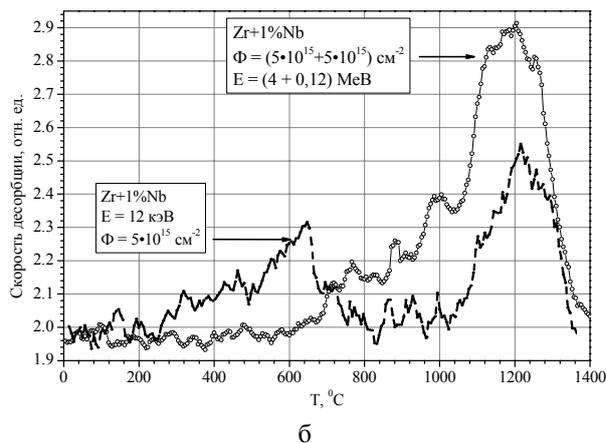
Рис. 12. Спектры термодесорбции гелия из сплава  $Zr+1\%Nb$ , облученного ионами  $He^+$  с энергией 12 и 120 кэВ. Скорость нагрева образцов:  $5^\circ C/c$  – 12 кэВ,  $7,8^\circ C/c$  – 120 кэВ, дозы приведены на графиках

Изучение газовой выделения гелия из образцов после их последовательного облучения показало, что структура спектров в этом случае менее сложная по сравнению со спектрами, полученными при облучении этого сплава ионами  $He^+$  с энергией 120 кэВ и 2,42 МэВ. Заметная десорбция начинается с  $T \approx 600^\circ C$ , в спектре преобладает пик газовой выделения с максимумом при  $T \approx 1200^\circ C$ .

При облучении образцов из сплава  $Zr+1\%Nb$  последовательно ионами гелия с энергией 0,12 и 4 МэВ до одной и той же дозы  $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  спектр термодесорбции изменяется незначительно. Как видно из рис. 13, структура спектра в этом случае менее сложная по сравнению со спектрами, полученными при облучении этого сплава ионами  $He^+$  с энергией 120 кэВ и 2,42 МэВ. Для выяснения влияния глубины залегания имплантированных частиц и созданных ими радиационных повреждений материала на механизмы выхода гелия, а соответственно, структуры спектра ТД из объема образцов необходимы дополнительные эксперименты.



а



б

Рис. 13. Спектр термодесорбции гелия из образца сплава  $Zr+1\%Nb$ , облученного ионами  $He^+$  с энергией: а – 2,42 МэВ; б – 4 МэВ+120 кэВ (верхняя кривая) и 120 кэВ (нижняя кривая).

Скорость нагрева образцов:  $5,6^\circ C/c$  – 2,42 МэВ;  $8^\circ C/c$  – 4+0,12 МэВ;  $5^\circ C/c$  – 12 кэВ

Наблюдаемое отсутствие (или крайне малая интенсивность) выхода гелия из стали и сплава циркония и ниобия при температурах ниже  $T \approx 500 \dots 650^\circ C$  свидетельствует о том, что содержание атомов гелия в материалах при нагреве в этой области температур не изменяется. В этом интервале, очевидно, идут сложные диффузионные процессы трансформации как гелиевой подсистемы, так и дефектной структуры кристаллической решетки, которые приводят к многостадийным процессам выхода гелия из имплантированного объема при более высоких температурах.

Наличие в спектрах ТД нескольких пиков указывает на существование нескольких дискретных стадий выделения гелия, отличающихся термодинамическими характеристиками и механизмами выхода гелия из металла. При облучении атомы гелия взаимодействуют с дефектами кристаллической решетки, являющимися ловушками для гелия. При этом происходит захват гелия одиночными вакансиями, дивакансиями, а также скоплениями вакансий (являющимися сильными ловушками для атомов He); захват гелия дислокациями и границами зерен, межфазными границами; образование гелиевых и гелий-вакансионных кластеров [3].

На рис. 13,6 пунктирной линией показан спектр ТД гелия из сплава Zr+1%Nb, имплантированного в виде непрерывного пучка ионов с энергией 12 кэВ до дозы  $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Из сравнения спектров видно, что, несмотря на значительные расхождения в глубине залегания внедренных атомов газа, выход гелия в высокотемпературной области происходит в пиках с близкими температурами. Это позволяет сделать заключение о том, что в их основе лежит один и тот же механизм. В спектре образцов, имплантированных ионами с низкой энергией, наблюдается низкотемпературная стадия десорбции гелия. Вероятно, она связана с выходом гелия из гелий-вакансионных комплексов, образовавшихся в приповерхностной области образца, концентрация которых значительно выше по сравнению с высокоэнергетичным облучением.

Экспериментальный факт близости спектров ТД гелия из сплава циркония и ниобия в высокотемпературной области при различных способах насыщения образцов ионами, по-видимому, имеет важное значение при рассмотрении вопроса об адекватности (соответствии) методики импульсной имплантации материалов и методики их непрерывного облучения (см., например, [11]).

Определение природы ТД гелия из исследованных конструкционных материалов при условиях облучения, изложенных в настоящем сообщении, связи стадий выхода атомов инертного газа с миграцией отдельных атомов, их комплексов с радиационными дефектами структуры или газовых микропузырьков к поверхности требует дальнейших исследований.

### 3.2. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Было проведено облучение ионами  $\text{He}^+$  с энергией 4 МэВ, флюенсом  $5 \cdot 10^{15}$  ионов/ $\text{см}^2$ , при температуре 40 °С образцов, изготовленных из тонких фольг чистого Nb и сплава Nb+1% ат. Zr (см. табл. 3, №9, 10). Толщина образцов равнялись 16 и 22 мкм соответственно. Образцы подвергались облучению одновременно в ходе одного сеанса и их флюенсы были одинаковы.

Было измерено усредненное удельное электросопротивление  $\rho$  образцов до и после облучения при комнатной и азотной (-196 °С) температурах с применением четырехзондовой измерительной схемы на базе потенциометров Р363-1.

После облучения в Nb-образце электросопротивление при комнатной температуре стало на 4,18 % большим, чем до облучения, тогда как в образце из Nb+1%Zr влияние облучения сказалось на порядок меньше.

При азотной температуре, в связи с уменьшением рассеяния электронов на фонах, вклад внедренных ионов гелия в сопротивление оказался несколько большим и составил 5,47 %. Слабое влияние внедренных атомов гелия на сопротивление образца сплава Nb+1%Zr следует из того, что в нем растворено достаточно большое количество (~ 1 ат.%) примеси Zr, атомы которого в этом случае выступают в качестве основных рассеивающих центров, так как имеют существенно большие размеры

по сравнению с малыми атомами гелия. Учитывая неоднородность распределения внедренного гелия по толщине образца, указанные значения сопротивления в образцах характеризуют лишь усредненный результат, тогда как в области основного накопления гелия в глубине образцов изменения электросопротивления, видимо, могут иметь существенно большее значение. Для продолжения исследований электрофизических свойств предполагается разработка методики внедрения гелия равномерно по толщине образца.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования конструкционных материалов разработана методика облучения на линейном ускорителе ионов гелия с энергией до 4 МэВ. На облученных металлах получены предварительные результаты по термодесорбции гелия и изменению электрофизических свойств в широком интервале температур.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. Современный статус материалов ядерной энергетики – микроструктурная эволюция и радиационная стойкость // *Труды XVIII ICPRT. Алушта, Крым, 8-13.09.2008.* с. 4-5.
2. В.В. Ружицкий, Г.Д. Толстолуцкая, И.Е. Копанец, Б.С. Сунгуров. Влияние радиационных повреждений на термодесорбцию гелия из ферритномартенситной стали ЭП-450 // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ.* 2012, №2, с. 16-21.
3. И.М. Неклюдов, Г.Д. Толстолуцкая. Гелий и водород в конструкционных материалах // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ.* 2003, №3, с. 3-14.
4. А.И. Ранюк, В.Ф. Рыбалко. *Гелий в решетке металлов:* Обзор. М.: «ЦНИИАтоминформ», 1986, с. 64.
5. И.М. Неклюдов, В.Ф. Рыбалко, Г.Д. Толстолуцкая. *Эволюция профилей распределения гелия и водорода в материалах в процессе облучения и отжига:* Обзор. М.: «ЦНИИАтоминформ», 1985, с. 41.
6. В.А. Бомко, А.М. Егоров, Б.В. Зайцев, А.Ф. Кобец, К.В. Павлий. Развитие комплекса ЛУМЗИ для ядерно-физических исследований // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования».* 2008, №3(49), с. 100-104
7. В.А. Бомко, А.Ф. Кобец, С.С. Тишкин и др. Вариант переменного-фазовой фокусировки с шагом изменением синхронной фазы // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования».* 2004, №2, с. 153-155.
8. А.Т. Форрестер. *Интенсивные ионные пучки.* М.: «Мир», 1992, с. 353.
9. H. Iwakiri, K. Yasunaga, K. Morishita, N. Yoshida. Microstructure evolution in tungsten during low-energy helium ion irradiation // *J. of Nucl. Mater.* 2000, v. 283-287, p. 1134-1138.
10. И.М. Неклюдов, В.Н. Воеводин, В.В. Ружицкий и др. Сочетание метода ядерных реакций, термодесорбционной спектроскопии и двухпучкового облучения при исследовании поведения гелия и водорода в конструкционных материалах // *Труды XIV*

## **МЕТОДИКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ ОПРОМІНЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ІОНАМИ ГЕЛІУ НА ЛІНІЙНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ**

*Р.О. Анохін, В.М. Воеводін, С.М. Дубнюк, О.М. Єгоров, Б.В. Зайцев, А.П. Кобец, О.П. Ледєньов, К.В. Павлій, В.В. Ружицький, Г.Д. Толстолуцька*

Представлено опис установки і методика опромінення конструкційних матеріалів іонами гелію з енергією до 4 МеВ. Для опромінення матеріалів розроблена, виготовлена і запущена нова прискорювальна структура ПОС-4 зустрічно-штирьового ІН типу, в якій використовується метод перемінно-фазового фокусування з кроковою зміною синхронної фази уздовж фокусуєчих періодів. Створен та досліджен інжектор одноразово заряджених іонів гелію, енергія іонів на виході прискорювальної трубки дорівнює 120 кеВ, з подальшою інжекцією пучка в прискорювальну секцію ПОС-4. Для опромінення зразків виготовлена камера, в процесі опромінення вимірюються температура зразка, струм пучка і доза. Установка і методика опромінення апробовані при дослідженні термодесорбції гелію і електрофізичних властивостей опромінених зразків.

## **METHODS AND EXPERIMENTAL RESULTS CONSTRUCTION MATERIALS IRRADIATION OF HELIUM IONS AT THE LINEAR ACCELERATOR**

*R.A. Anokhin, V.N. Voyevodin, S.N. Dubnyuk, A.M. Yegorov, B.V. Zajtsev, A.F. Kobets, O.P. Ledenev, K.V. Pavlii, V.V. Ruzhytskiy, G.D. Tolstolutskaia*

Presented description of the plant and methods of construction materials irradiation by helium ions with energies up to 4 MeV. For irradiation of materials developed, manufactured and launched a new accelerating interdigital H type structure POS-4, in which to focus the beam uses the alternating phase focus with stepper synchronous phase change along the focusing period. Created and studied injector singly charged helium ions, ion energy at the output of the accelerating tube is 120 keV, with subsequent injection of the beam in the accelerating section of POS-4. To irradiate the sample the camera was made, in the process of irradiation measured sample temperature, beam current and dose. Setting and methodology of irradiation tested in the investigation of thermodesorption of helium and electrical properties of the irradiated samples.