

Исследование влияния облучения ионами Fe на наноструктуру ферритно-мартенситной стали ЭК-181

С. В. Рогожкин, Н. А. Искандаров, А. А. Алеев,
А. Г. Залужный, Р. П. Куйбида, Т. В. Кулевой, Б. Б. Чалых,
М. В. Леонтьева-Смирнова, Е. М. Можанов

Проведено томографическое атомно-зондовое исследование влияния облучения ионами железа до повреждающей дозы 10 смещений на атом (далее сна) на распределение элементов и тонкую структуру образцов стали перспективных ядерных энергетических установок ЭК-181. Показано, что в процессе облучения происходит перераспределение элементов и изменение состава, размеров и количества обнаруженных наноразмерных кластеров, обогащенных Cr, V и N. Увеличение размера кластеров в процессе облучения сопровождается снижением в них концентрации ванадия, хрома и азота.

Ключевые слова: томографическая атомно-зондовая микроскопия; жаропрочность; дисперсионное упрочнение; радиационное повреждение.

The influence of Fe ion irradiation up to dose of 10 dpa on the distribution of chemical elements and on the fine structure of advanced steel Rusfer EK-181 was studied by tomographic atom probe. It was shown that the processes of elements redistribution, changes in element composition, size and number density of detected clusters occurred. The increase of cluster size under irradiation was accompanied by the decrease of vanadium, chrome and nitrogen concentrations in the clusters.

Keywords: tomographic atom probe; high-temperature strength; precipitation hardening; radiation damage.

Введение

В настоящее время наиболее перспективное направление в разработке материалов активной зоны ядерных энергетических установок – малоактивируемые высокохромистые ферритно-мартенситные стали, упрочненные дисперсными включениями [1 – 3]. Повышенные механические свойства этих материалов при высоких температурах в основном связывают с высокодисперсными стабильными включениями (карбидов, оксидов, их предвыделений, кластеров и др.) в матрице. Одним из известных направлений упрочнения сталей является создание дисперсионно-твердеющих сталей путем подбора системы легирования и режима термомеханических обработок [2 – 6]. Известным примером такой стали, разрабатываемой в России, является 12%-я хромистая

ферритно-мартенситная сталь ЭК-181 [3 – 5]. Методом просвечивающей электронной микроскопии было показано [3 – 5], что термическая обработка стали ЭК-181 позволяет сформировать в материале различные упрочняющие карбидные фазы. После традиционной термической обработки (ТТО), включающей закалку от 1070 – 1100 °С и отпуск при 720 °С, размеры карбидных фаз находятся в диапазоне 10 – 300 нм. При этом средний размер карбидных фаз составляет 75 ± 7 нм [4]. Томографические атомно-зондовые исследования ферритно-мартенситной стали ЭК-181 показали [7, 8], что после ТТО в матрице также формируется высокая плотность ($\sim 3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$) кластеров размерами $\sim 2 - 4$ нм, обогащенных хромом, ванадием и азотом. В материале после комбинированной термической обработки (КТО), включающей закалку от 1100 °С, термоциклирование

около точки начала фазового перехода $\alpha \rightarrow \gamma$ и отпуск при 720 °С, атомно-зондовая томография не обнаружила указанные нанокластеры.

Известно, что нейтронное облучение ферритно-мартенситных сталей приводит к сдвигу температуры хрупко-вязкого перехода в рабочую область, упрочнению и снижению пластичности [4, 9, 10]. Для создания радиационно-стойких материалов необходимо знание механизмов процессов, ответственных за деградацию их свойств при облучении, что, в свою очередь, невозможно без исследования дефектной структуры облученных материалов.

В [4] показано, что реакторное облучение стали ЭК-181 после ТТО и КТО при 320 – 330 °С до дозы 5 – 8 сна приводит к формированию дислокационных петель. Средний размер петель (~ 11 нм) и их концентрация ($\sim 2,5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$) одинаковы для обоих состояний. При этом дисперсные карбидные фазы сохраняются после облучения для любой (ТТО или КТО) исходной термообработки [4]. В тоже время информация о поведении наноразмерных кластеров под воздействием облучения отсутствует. Поскольку дисперсные частицы играют важную роль в повышении жаропрочных свойств, разработчикам необходима информация о микроструктурных изменениях под облучением, в том числе на наномасштабах. Для аттестации разрабатываемых материалов активной зоны реакторов необходимы дозы радиационного повреждения, превышающие 100 сна. Набор таких доз при облучении нейтронами достигается за несколько лет даже в реакторах на быстрых нейтронах. В связи с этим в настоящее время востребованы методы экспресс-анализа радиационной повреждаемости конструкционных материалов, использующие быстрый набор высоких повреждающих доз. Для решения этой задачи возможно применение методов, основанных на использовании пучков заряженных частиц [11].

Цель данной работы — изучение изменения наноструктуры стали ЭК-181 с ТТО при облучении ионами железа. Эти исследования позволят провести моделирование влияния каскадного рождения дефектов при реакторном облучении на тонкую структуру исследуемого материала. Изучение изменений локального состава, деталей наноструктуры методами атомно-зондовой томографии.

Материал и методика исследования

В настоящей работе исследована сталь ЭК-181 (химический состав материала исследуемой плавки представлен в табл. 1) с традиционной термической обработкой: закалка от 1100 °С, 40 мин + отпуск при

Таблица 1

Химический состав стали ЭК-181 (ат.%)

Cr	Si	Mn	V	N	W	C	Ni
11,9	0,73	0,95	0,31	0,16	0,33	0,64	0,03

720 °С, 3 ч. В этом состоянии сталь ЭК-181 показывает наивысший уровень жаропрочности [3 – 5].

Микроструктура стали после закалки с 1070 – 1100 °С представляет собой мартенситную фазу, сформированную в результате полиморфного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$. Последующий отпуск при 720 °С формирует ферритную матрицу, которая сохраняет структурную ориентацию мартенсита в закаленном состоянии. В [3 – 5] было показано, что отпуск после закалки приводит к образованию многообразных по составу и размерам карбидных фаз: M_{23}C_6 , M_6C , M_3C , TaC, VC, заметную часть которых составляют карбидные фазы VC (TaC). После ТТО в твердом растворе также содержится высокая концентрация ($\sim 3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$) кластеров размерами 2 – 4 нм, обогащенных в основном элементами Cr, V и N [7, 8].

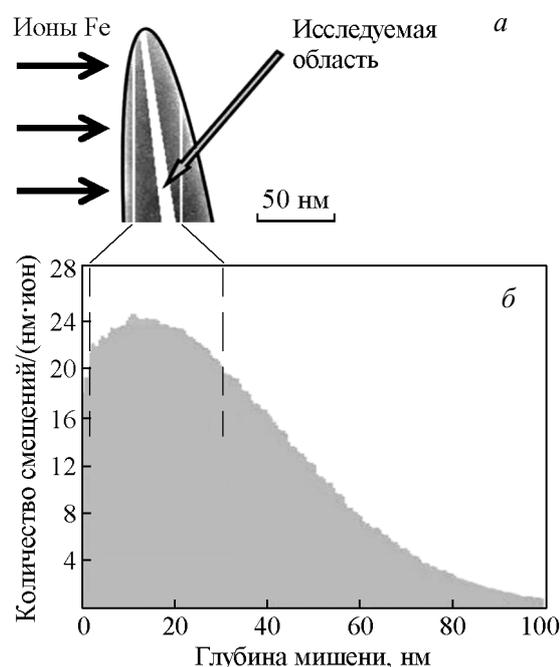


Рис. 1. *a* – схема эксперимента по облучению ионами железа образца для томографических атомно-зондовых исследований; *b* – результаты TRIM моделирования повреждений, возникающих при облучении пучком ионов железа (Fe^+ – 25%, Fe^{+2} – 68%, Fe^{+3} – 7%) с энергиями 70, 140 и 210 кэВ, соответственно.

Исследования наномасштабного состояния стали ЭК-181 проводили методами томографической атомно-зондовой микроскопии [7, 8, 12]. Для этой методики используют образцы в виде иглы, с радиусом закругления кончика несколько десятков нанометров [7, 12]. Для экспериментов по облучению образцов-игл применяли ионный пучок из инжектора линейного ускорителя ТИПр с энергией 70 кэВ на заряд иона [13]. В инжекторе основную долю составляют двухзарядные ионы, также имеется часть одно- и трехзарядных ионов. Облучение проводили пучком ионов Fe, который состоял из ионов Fe^+ (25%), Fe^{+2} (68%), Fe^{+3} (7%) с энергией 70, 140 и 210 кэВ, соответственно [14]. При облучении образцов-игл перпендикулярно к их оси область радиационных повреждений соответствует области, непосредственно исследуемой в атомном зонде (рис. 1). Моделирование при помощи программ SRIM/TRIM показало, что используемый пучок ионов железа, содержащий ионы Fe^+ , Fe^{+2} , Fe^{+3} , генерирует максимальное количество дефектов на глубине приблизительно 5 – 35 нм (рис. 1). В этой области энергий ионов радиационные повреждения практически не зависят от их зарядности.

Образцы облучали до флюенса $(4 \pm 1) \cdot 10^{15}$ ион/см², что соответствует результирующим радиационным повреждениям ~ 10 сна. Плотность пучка составляла 6 мА/см², длительность импульса — 450 мкс, частота импульса — 0,25 Гц, ток источника — 200 мА. Средняя скорость набора дозы ~ $3 \cdot 10^{-3}$ сна/с. Давление в камере при проведении сеансов облучения ниже $2 \cdot 10^{-4}$ Па, температура комнатная.

Детали методики облучения образцов-игл тяжелыми ионами и их последующего исследования методом атомно-зондовой томографии представлены в [15, 16]. Показано соответствие расчетов с помощью программ SRIM/TRIM числа атомов, внедренных пучком в область томографического исследования, экспериментально измеренному числу этих атомов.

При проведении атомно-зондовых исследований температура образцов была порядка 70 К. Испарение атомов с поверхности образцов проводили при напряжениях 1 – 8 кВ постоянной составляющей, при этом амплитуда импульсной составляющей устанавливалась на уровне 19% от постоянной. Количество импульсов для испарения одного атома в среднем составляло ~ 10^2 . Размер исследованных в данной работе областей составлял $6 \times 6 \times 150$ нм, и они представляли собой однофазный твердый раствор, в ряде случаев содержащий неоднородное распределение некоторых элементов, либо кластеры с размерами в несколько нанометров.

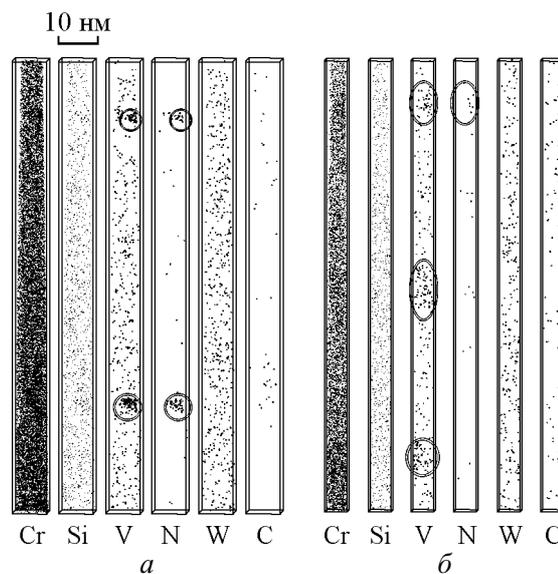


Рис. 2. Атомная карта некоторых элементов в стали ЭК-181 с традиционной термической обработкой (закалка 1100 °С + отпуск 720 °С): а — до облучения, б — после облучения ионами Fe до 10 сна. Кластеры выделены окружностями.

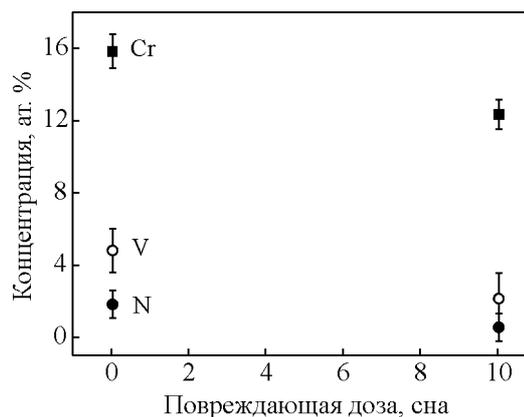


Рис. 3. Сравнение концентраций элементов в кластерах в стали ЭК-181 с ТТО в исходном состоянии и после облучения ионами Fe до дозы 10 сна.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследования исходного состояния стали ЭК-181 после ТТО представлены в [7, 8], показали наличие наноразмерных кластеров, обогащенных Cr, V и N. Распределение различных химических элементов в исследованных объемах после облучения ионами Fe до дозы 10 сна представлено на рис. 2 – 4 и в табл. 2. На рис. 2 можно сравнить 3-D атомные карты исходного (а) и облученного (б) состояний. После облучения также видны кластеры (рис. 2б): области, с повышенным содержанием ванадия и азота. Анализ

Таблица 2

Концентрации химических элементов (ат.%) в стали ЭК-181 до и после облучения пучком ионов Fe до дозы 10 сна							
ЭК-181	Cr	Si	Mn	V	N	W	C
Концентрация элементов в матрице							
Исходное состояние (ТТО)	9,9 ± 0,2	0,64 ± 0,04	0,84 ± 0,07	0,19 ± 0,02	0,010 ± 0,004	0,24 ± 0,03	0,019 ± 0,005
После облучения ионами Fe	9,5 ± 0,7	0,83 ± 0,04	0,87 ± 0,07	0,20 ± 0,01	0,006 ± 0,005	0,25 ± 0,02	0,09 ± 0,04
Концентрация элементов в Cr-V-N кластерах							
Исходное состояние (ТТО)	16 ± 1	1,0 ± 0,2	1,1 ± 0,2	4,9 ± 1,2	1,9 ± 0,7	0,17 ± 0,10	0,11 ± 0,06
После облучения ионами Fe	13 ± 1	1,1 ± 0,3	0,8 ± 0,1	2,4 ± 1,5	0,8 ± 0,8	0,17 ± 0,04	0,06 ± 0,03
Средняя концентрация элементов в исследованных объемах							
Исходное состояние (ТТО)	9,9 ± 0,2	0,65 ± 0,02	0,84 ± 0,04	0,22 ± 0,02	0,024 ± 0,004	0,24 ± 0,02	0,019 ± 0,005
После облучения ионами Fe	9,5 ± 0,7	0,83 ± 0,03	0,87 ± 0,07	0,23 ± 0,06	0,02 ± 0,02	0,24 ± 0,02	0,09 ± 0,04

кластеров, основанный на методе “максимального разделения” [17], показывает, что обнаруженные кластеры обогащены не только атомами V и N, но и Cr (табл. 2). На рис. 3 представлено сравнение концентраций элементов в кластерах образцов стали ЭК-181 с ТТО для исходного и облученного состояний. Кластеры, обнаруженные в образцах в исходном состоянии, больше обогащены элементами Cr, V и N, чем кластеры, обнаруженные в образцах в облученном материале. Характерный размер Cr – V – N кластеров в исходном состоянии составляет 2 – 4 нм, в то время как размер кластеров после облучения

увеличивается до 5 – 8 нм. Облучение приводит к увеличению размера кластеров и одновременному снижению концентрации обогащающих кластер элементов (ванадия, хрома и азота) (рис. 3 и 4). В результате кластеры становятся более “рыхлыми” (происходит “размытие” кластеров). На рис. 4 этот эффект продемонстрирован на радиальных распределениях хрома и ванадия в кластерах. В кластерах падает только концентрация обогащающих элементов, в то время как количество атомов основного сорта (железа) возрастает.

Концентрация кластеров, составляющая в исходном состоянии $\sim 3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, уменьшается в 1,5 раза при облучении до повреждающей дозы 10 сна.

В исследованных объемах образцов в исходном состоянии значение концентрации углерода в твердом растворе составляет 0,02 ат.%, что характерно для ферритных зерен. После облучения значение концентрации углерода в матрице возросло до 0,09 ат.%. Возможно, при облучении материала происходит частичный распад карбидов за счет каскадов атом-атомных соударений и уход углерода в матрицу. Этот эффект также может являться причиной увеличений концентрации кремния в матрице (табл. 2), поскольку кремний сегрегирует на карбиды, формирующиеся при термообработке.

Дисперсные карбидные фазы, упрочняющие сталь ЭК-181 ТТО, сохраняются после реакторного облучения при 320 – 330 °С до дозы 5 – 8 сна [4]. После облучения ионами Fe при комнатной температуре до 10 сна в матрице сохраняются дисперсные кластеры, увеличиваясь в размере в 2 раза, но их концентрация снижается в 1,5 раза. Изменение элементного состава в матрице и в нанокластерах стали ЭК-181 явно проявились при дозе ~ 10 сна. Эта повреждающая доза соответствует (многократному) перекрытию каскадных областей, в которых, главным образом, возникают дефекты в рассматриваемом случае. Близкая ситуация наблюдается при облучении дисперсно-упрочненной оксидами стали ODS Eurofer.

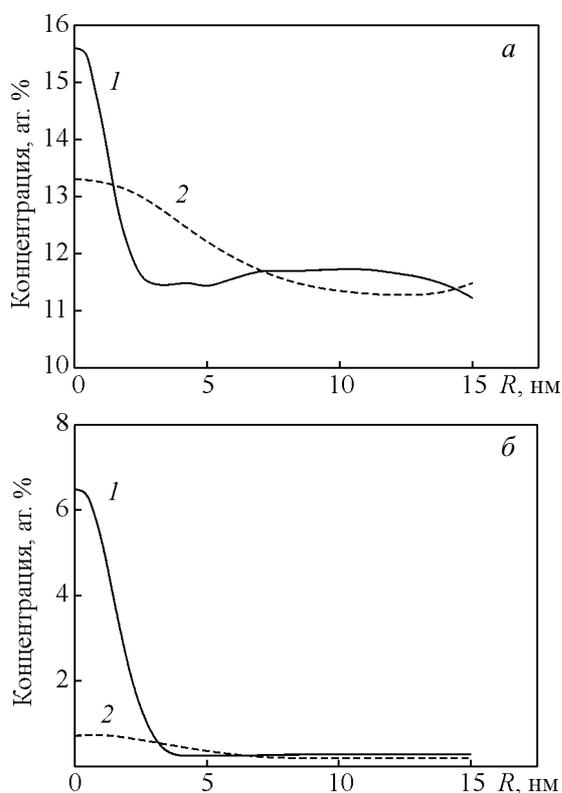


Рис.4. Радиальное распределение значений концентраций элементов Cr (а) и V (б) в кластере: 1 – до, 2 – после облучения.

В исходном состоянии этого материала содержится высокая концентрация ($\sim 10^{24} \text{ м}^{-3}$) наноразмерных (2–4 нм) кластеров, обогащенных V, O, Y, Cr [18]. При каскадообразующем облучении (как при реакторном облучении при 330°C [18], так и при облучении ионами Fe при комнатной температуре [15, 16]) происходит выход ванадия из состава кластеров. Таким образом, хотя ванадий и является элементом, формирующим кластеры в дисперсно-упрочненных материалах на стадиях их приготовления и завершающей термообработки [18], при облучении ванадий выходит из состава кластеров в окружающий твердый раствор. В тоже время это не исключает процесс прихода в эти кластеры других элементов, и формирования в последующем радиационно-индуцированных предвыделений (фаз). В случае ЭК-181 при облучении до дозы 10 сна обнаруживается только разрушение кластеров, хотя и частичное. В случае стали ODS Eurofer облучение приводит не только к разрушению (выходу ванадия), но также проникновению иттрия и кислорода в кластеры [19]. По-видимому, в последнем случае кластеры выступают в качестве центров зарождения фаз.

В условиях проведенных экспериментов бомбардирующие ионы тратят свою энергию в каскадах атомно-атомных соударений. Поэтому естественно предположить, что именно каскадное рождение дефектов приводит наблюдаемому изменению наноструктуры стали ЭК-181.

Заключение

Проведены эксперименты по облучению образцов ферритно-мартенситной стали ЭК-181 с ТТО ионами железа до повреждающей дозы 10 сна. В исходном состоянии данный материал характеризуется наличием наноразмерных кластеров (2–4 нм) с концентрацией $\sim 3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Кластеры обогащены хромом (~ 16 ат.%), ванадием (~ 5 ат.%) и азотом (~ 2 ат.%). Томографические атомно-зондовые исследования облученных образцов, показали, что в результате облучения кластеры увеличиваются в размере до 5–8 нм, при этом отмечается снижение концентрации обогащающих кластеры элементов — Cr, V и N.

Обнаружено уменьшение концентрации кластеров, что указывает на растворение некоторых из них.

Литература

1. Ukai S., Nishida T., Okada H., Okuda T., Fujiwara M., Asabe K. Development of Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Steels for FBR Core Application. (I) Improvement of Mechanical Properties by Recrystallization Processing. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1997, v. 34, p. 256–263.
2. Tamura M., Sakasegawa H., Kohyama A., Esaka H., Shinozuka K. Effect of MX type particles on creep strength of ferritic steel. *Journal of Nuclear Materials*, 2003, v. 321, p. 288–293.
3. Leonteva-Smirnova M.V., Ioltukhovskiy A.G., Arutiunova G.A., Tselischev A.V., Chernov V.M. Investigation of heat treatment conditions on the structure of 12% chromium reduced activation steels *Journal of Nuclear Materials*, 2002, v. 307–311, p. 466–470.
4. Леонтьева-Смирнова М.В., Агафонов А.Н., Ермолаев Г.Н., Иолтуховский А.Г., Можанов Е.М., Ревизников Л.И., Цвелев В.В., Чернов В.М., Буланова Т.М., Голованов В.Н., Островский З.О., Шамардин В.К., Блохин А.И., Иванов М.Б., Козлов Э.В., Колобов Ю.Р., Кардашев Б.К. Микроструктура и механические свойства малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (RUSFER-EK-181). *Перспективные материалы*, 2006, № 6, с. 40–52.
5. Тюменцев А.Н., Чернов В.М., Леонтьева-Смирнова М.В., Астафурова Е.Г., Шевяко Н.А., Литовченко И.Ю. Особенности микроструктуры ферритно-мартенситной (12% Cr) стали ЭК-181 после термообработок по разным режимам. *Журнал технической физики*, 2012, т. 82, вып. 1, с. 52–58.
6. Klueh R.L., Hashimoto N., Maziasz P.J. New nanoparticle-strengthened ferritic/martensitic steels by conventional thermo-mechanical treatment. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, v. 367–370, p. 48–53.
7. Рогожкин С.В., Агеев В.С., Алеев А.А., Залужный А.Г., Леонтьева-Смирнова М.В., Никитин А.А. Томографическое атомно-зондовое исследование жаропрочной 12%-ой ферритно-мартенситной хромистой стали ЭК-181. *ФММ*, 2009, т. 108(6), с. 612–618.
8. Рогожкин С.В., Искандаров Н.А., Алеев А.А., Залужный А.Г., Никитин А.А., Леонтьева-Смирнова М.В., Можанов Е.М. Исследование наномасштабного состояния ферритно-мартенситной стали ЭК-181 после различных термических обработок. *Перспективные материалы*, 2011, № 5, с. 29–36.
9. Ioltukhovskiy A.G., Leonteva-Smirnova M.V., Solonin M.I., Chernov V.M., Golovanov V.N., Shamardin V.K., Bulanov T.M., Povstyanko A.V., Fedoseev A.E. Heat resistant reduced activation 12% Cr steel of 16Cr12W2VTaB type-advanced structural material for fusion and fast breeder power reactors. *Journal of Nuclear Materials*, 2002, v. 307–311, p. 532–535.
10. Gaganidze E., Petersen C., Materna-Morris E., Dethloff C., Weib O.J., Aktaa J., Povstyanko A., Fedoseev A., Makarov O., Prokhorov V. Mechanical properties and TEM examination of RAFM steels irradiated up to 70 dpa in BOR-60. *Journal of Nuclear Materials*, 2002, v. 417, p. 93–98.
11. Воеводин В.Н., Неклюдов И.М. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов. Киев: Наукова думка, 2006, 376 с.

12. Miller M.K., Cerezo A., Hetherington M.G., and Smith G.D.W. Atom Probe Field Ion Microscopy. Clarendon Press, Oxford, 1996, 520 p.
13. Kulevoy T., Kuibeda R., Kropachev G., Kozlov A., Chalyh B., Aleev A., Fertman A., Nikitin A., and Rogozhkin S. ITER MEVVA ion beam for reactor material investigation. Review of Scientific Instruments 81, 2010, 02B906 (1-3).
14. Кропачев Г.Н., Шишмарев В.Б., Куйбида Р.П., Чалых Б.Б., Плотников С.В., Рогожкин С.В., Алеев А.А., Никитин А.А., Орлов Н.Н., Селезнев Д.Н., Кулевой Т.В. Подготовка имитационного эксперимента на пучке ионов железа по изучению радиационной устойчивости реакторных сталей, Ядерная физика и инжиниринг, 2011, т. 2, № 6, с. 538 – 542.
15. Рогожкин С.В., Алеев А.А., Залужный А.Г., Куйбида Р.П., Кулевой Т.В., Никитин А.А., Орлов Н.Н., Чалых Б.Б., Шишмарев В.Б. Исследование влияния тяжелоионного облучения на наноструктуру перспективных материалов ядерных энергетических установок. Физика металлов и металловедение, 2012, т. 113, № 2, с. 212 – 224.
16. Рогожкин С.В., Алеев А.А., Залужный А.Г., Куйбида Р.П., Кулевой Т.В., Никитин А.А., Орлов Н.Н., Чалых Б.Б., Шишмарев В.Б. Томографическое атомно-зондовое исследование эволюции наноструктуры дисперсно-упрочненной оксидами стали ODS Eurofer под воздействием тяжелоионного облучения. Ядерная физика и инжиниринг, 2012, т. 3, № 3, с. 1 – 8.
17. Russel K.F., Miller M.K. Embrittlement of RPV steels: An atom probe tomography perspective. Journal of Nuclear Materials, 2007, v. 371, p. 145 – 160.
18. Aleev A.A., Iskandarov N.A., Klimenkov M., Lindau R., Mıslang A., Nikitin A.A., Rogozhkin S.V., Vladimirov P., Zaluzhnyi A.G. Investigation of oxide particles in unirradiated ODS Eurofer by tomographic atom probe. Journal of Nuclear Materials, 2011, v. 409, p. 65 – 71.
19. Rogozhkin S.V., Aleev A.A., Zaluzhnyi A.G., Nikitin A.A., Iskandarov N.A., Vladimirov P., Lindau R., Mıslang A. Atom probe characterization of nano-scaled features in irradiated ODS Eurofer steel. Journal of Nuclear Materials, 2011, v. 409, p. 94 – 99.

Статья поступила в редакцию 26.11.2012 г.

Рогожкин Сергей Васильевич — ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва), кандидат физико-математических наук, заместитель начальника центра. Специалист в области физики твердого тела. E-mail: sergey.rogozhkin@itep.ru.

Искандаров Насиб Амирхан-оглы — ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва), инженер. Специалист в области ультрамикроскопии. E-mail: Iskandarov@itep.ru.

Алеев Андрей Аскольдович — ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва), инженер. Специалист в области ультрамикроскопии. E-mail: andrey.aleev@itep.ru.

Залужный Александр Георгиевич — ГНЦ РФ – Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва), доктор физико-математических наук, профессор, начальник центра. Специалист в области материаловедения, физики радиационных повреждений металлов и сплавов. E-mail: Zaluzhnyi@itep.ru.

Куйбида Ростислав Петрович — ГНЦ РФ – Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва), ведущий инженер. Специалист в области физики ускорителей заряженных частиц. E-mail: kuibeda@itep.ru.

Кулевой Тимур Вячеславович — ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва), кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории. Специалист в области физики ускорителей заряженных частиц. E-mail: kulevoy@itep.ru.

Чалых Борис Борисович — ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва), аспирант. Специалист в области физики конденсированного состояния и применения ускорителей заряженных частиц. E-mail: 4alyhx@mail.ru.

Леонтьева-Смирнова Мария Владимировна — ОАО “Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара” (г. Москва), кандидат технических наук, доцент, начальник отдела. Специалист в области радиационного материаловедения. E-mail: Smirnova@bochvar.ru.

Можанов Евгений Михайлович — ОАО “Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара” (г. Москва), научный сотрудник. Специалист в области материаловедения и радиационного материаловедения. E-mail: z291@yandex.ru.