

Ядерные физические свойства ферритно-мартенситной стали ЭК-181 в условиях длительного нейтронного облучения в быстром БН-600 и термоядерном ДЕМО-РФ реакторах

**Д. А. Блохин, М. В. Леонтьева-Смирнова, В. М. Чернов,
А. И. Блохин, Н. А. Демин, И. В. Сипачев**

На основе базового комплекса ACDAM для ферритно-мартенситной стали ЭК-181 ($\text{Fe} - 12 \text{ Cr} - \text{W} - \text{V} - \text{Ta} - \text{B}$) рассчитаны динамика первичной радиационной повреждаемости, ядерных трансмутаций, накопления (активация) и спада (охлаждение) радиоактивности при длительном облучении (до 50 лет) в нейтронных спектрах быстрого БН-600 и термоядерного ДЕМО-РФ реакторов. Для реактора БН-600 при малых временах облучения (до 560 суток) сталь ЭК-181 удовлетворяет, а при больших временах облучения (более 30 лет) не удовлетворяет критерию малой активируемости. Для реактора ДЕМО-РФ при длительности облучения до 50 лет сталь ЭК-181 удовлетворяет критерию малой активируемости.

Ключевые слова: ферритно-мартенситная сталь ЭК-181, нейтронное облучение, ядерные физические свойства, первичная радиационная повреждаемость, активация, трансмутация, охлаждение.

Using a computational system ACDAM, for the ferritic-martensitic steel EK-181 ($\text{Fe} - 12 \text{ Cr} - \text{W} - \text{V} - \text{Ta} - \text{B}$) the dynamics of the primary radiation damage, activation and transmutation are calculated under long time neutron irradiation (up to 50 years) in fast BN-600 and fusion DEMO-RF reactors. In the BN-600 reactor for small time neutron irradiation (up to 560 days) the steel EK-181 meets a "low activation material" criteria. However, for a long time neutron irradiation (more than 30 years) the steel EK-181 does not meet this "low activation materials" criteria. In a case of the DEMO-RF reactor and a long time neutron irradiation (up to 50 years) the steel EK-181 meets the "low activation materials" criteria.

Key words: ferritic-martensitic steel EK-181, neutron irradiation, nuclear physical properties, primary radiation damage, activation, transmutation, cooling.

Введение

Разработка и создание перспективных жаропрочных и радиационно-стойких конструкционных малоактивируемых материалов для ядерных энергетических реакторов деления и термоядерного синтеза является одним из важных направлений развития мировой ядерной и термоядерной энергетики. Радиационная стойкость материалов и динамика композиционного состава при облучении (ядерная трансмутация элементов) зависят от вида нейт-

ронных полей, их мощности, энергетической формы и времени облучения. Среди разрабатываемых конструкционных малоактивируемых материалов для ядерной техники важное место занимают ферритно-мартенситные стали системы $\text{Fe} - \text{W} - \text{V} - \text{Ta} - \text{B}$: в России — сталь $\text{Fe} - 12 \text{ Cr} - 2 \text{ W} - \text{V} - \text{Ta} - \text{B}$ (ЭК-181/RUSFER-EK-181 [1–3]), за рубежом — сталь $\text{Fe} - 9 \text{ Cr} - \text{W} - \text{V} - \text{Ta}$ (EUROFER-97 [4, 5]). В значительной мере прогресс в создании перспективных конструкционных малоактивируемых материалов для ядерной техники определяется возможностями

опережающего (до металлургического изготовления опытных образцов материалов) определения (расчетов) их ядерно-физических свойств на основе соответствующего комплекса необходимых библиотек и кодов при достаточном знании нейтронных спектров и композиционных элементных составов (легирующих и примесных). Таким российским комплексом является комплекс ACDAM [6]. На основе комплекса ACDAM исследовано среднесрочное (до 560 суток, повреждающая доза около 90 смещений на атом (сна)) облучение стали ЭК-181 нейтронными спектрами быстрого БН-600 и термоядерного ДЕМО-РФ реакторов [7, 8], где было показано хорошее соответствие этой стали, полученной на базе имеющихся металлургических технологий, требованиям малой активируемости (возможности рециклирования и повторного использования материалов за время не более 100 лет после прекращения облучения) при таких дозах облучения.

Однако, уже имеется значительная потребность в определении ядерных физических свойств создаваемых конструкционных материалов при более длительных и более интенсивных облучениях для обеспечения развития ядерной энергетики на основе энергетических быстрых и термоядерных реакторов с проектными сроками службы до 60 лет [9 – 11].

В данной работе на базе комплекса ACDAM [6] выполнены ядерные физические расчёты для стали ЭК-181 при её длительном нейтронном облучении (до 50 лет) в нейтронных спектрах быстрого реактора БН-600 (поток нейтронов $\Phi_n = 6,5 \cdot 10^{15}$ нейтр./ $(\text{см}^2/\text{с})$, $E > 0$) и термоядерного реактора ДЕМО-РФ (поток нейтронов $\Phi_n = 9,0 \cdot 10^{14}$ нейтр./ $(\text{см}^2/\text{с})$, $E > 0$) [7, 8]. Именно для таких типов ядерных реакторов в первую очередь предполагается практическое использование стали ЭК-181 в качестве жаропрочного малоактивируемого (с быстрым спадом активности) конструкционного материала для активных зон и внутрикорпусных устройств. Композиционный состав стали ЭК-181 известен [1 – 3], где приведены составы базисной (беспримесной), рекомендованной (Fe-opt) и полученной композиций с учетом примесных элементов (табл. 1).

Промышленно полученная сталь ЭК-181 по концентрациям легирующих и примесных элементов близка к их рекомендованным значениям Fe-opt [1 – 3]. Для целей данной работы в комплексе ACDAM библиотека ACDAM/ACT была подготовлена в 175-групповом приближении (разбиение VITAMIN-J) и свернута в одногрупповое представление по нейтронным спектрам БН-600 и ДЕМО-РФ. Будут рассчитаны динамика накопления первичной радиационной повреждаемости и её меры (сна), накопления и спада

наведенной активности и ядерных (радиогенных) наработок элементов, особенно водорода и гелия, с учетом различных каналов их образования в ядерных реакциях для стали оптимального Fe-opt и базисного (беспримесного) составов и чистого натурального железа (Fe-nat) с целью определения зависимости рассчитываемых величин от концентрации примесей в стали. Исходные концентрации легирующих и примесных элементов соответствуют их натуральным изотопным составам. При вычислении трансмутации и активации рассматриваемого материала его масса равнялась 1 кг. Конечным результатом таких вычислений является уровень активации и измененный состав первоначальных элементов и их изотопов в стали ЭК-181.

Результаты расчетов для рассмотренных длительных времён облучения будут определять асимптотические (максимальные) значения ядерно-физического влияния нейтронного облучения на конструкционные материалы и определять динамику их структурно-фазовых состояний и направления создания (модификации) новых материалов для перспективных быстрых и термоядерных реакторов [9 – 11].

Методика расчетов изменения нуклидного состава материала в процессе нейтронного облучения

Степень радиационной опасности радиоактивных материалов характеризуется двумя величинами: активностью радиоактивных веществ, определяемой скоростью распада ядер; и мощностью дозы гамма-излучения, которая сопровождает радиоактивный распад элементов и определяемой как гамма-излучение с поверхности радиоактивного материала на расстоянии 1 см от его поверхности. Именно такая величина мощности дозы является ориентиром при определении радиационной опасности от радиоактивных материалов. Согласно принятым нормам радиационной безопасности характерные уровни мощности суммарной дозы определяют условия облучения с радиоактивными веществами:

1) при уровне мощности дозы менее 0,025 мЗв/ч (уровень “hands-on level”) радиоактивный материал рассматривается как обычное (не радиоактивное) вещество;

2) при уровне мощности дозы в интервале от 0,025 до 10,0 мЗв/ч (уровень “remote level”) радиоактивный материал можно повторно использовать (рециклировать);

3) при уровне мощности дозы более 10,0 мЗв/ч радиоактивный материал не может быть рециклирован для повторного использования и подлежит только захоронению.

Таблица 1

Расчетное изменение элементного состава (вес. %) стали ЭК-181 (Fe-opt) при облучении в течение 30, 40 и 50 лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-РФ (БН-600/ДЕМО-РФ)

Z Элемент	Исходный состав Fe-opt. Выделены легирующие элементы (basis)	Состав стали ЭК-181 (Fe-opt) на конец облучения в реакторах БН-600/ДЕМО-РФ		
		30 лет	40 лет	50 лет
1	2	3	4	5
1H		0,00728/0,07746	0,00949/0,10164	0,01161/0,12507
1D		$9,775 \cdot 10^{-6}/3,597 \cdot 10^{-3}$	$1,607 \cdot 10^{-5}/4,74 \cdot 10^{-3}$	$2,378 \cdot 10^{-5}/5,86 \cdot 10^{-3}$
1T		$1,089 \cdot 10^{-5}/1,09 \cdot 10^{-4}$	$1,431 \cdot 10^{-5}/1,33 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-5}/1,55 \cdot 10^{-4}$
2He		0,00342/0,06376	0,00448/0,0845	0,00553/0,10499
3Li		$3,79 \cdot 10^{-4}/2,4 \cdot 10^{-4}$	$3,77 \cdot 10^{-4}/3,21 \cdot 10^{-4}$	$3,75 \cdot 10^{-4}/3,95 \cdot 10^{-4}$
4Be		$9,62 \cdot 10^{-5}/0,00192$	$1,25 \cdot 10^{-4}/0,00243$	$1,53 \cdot 10^{-4}/0,00289$
5B	0,003	0,00609/0,00822	0,00718/0,00977	0,00821/0,01124
6C	0,16	0,16575/0,15517	0,16746/0,15353	0,16907/0,15188
6C(14)		$5,81 \cdot 10^{-3}/1,716 \cdot 10^{-3}$	$7,54 \cdot 10^{-3}/2,205 \cdot 10^{-3}$	$9,176 \cdot 10^{-3}/2,66 \cdot 10^{-3}$
7N	0,07	0,05948/0,05963	0,05635/0,05653	0,05339/0,05360
8O		0,00496/0,00474	0,00494/0,00466	0,00493/0,00457
9F		$8,80 \cdot 10^{-11}/1,78 \cdot 10^{-7}$	$1,20 \cdot 10^{-10}/4,18 \cdot 10^{-7}$	$1,54 \cdot 10^{-10}/8,10 \cdot 10^{-7}$
10Ne		$3,06 \cdot 10^{-6}/2,08 \cdot 10^{-4}$	$5,42 \cdot 10^{-6}/3,69 \cdot 10^{-4}$	$8,43 \cdot 10^{-6}/5,74 \cdot 10^{-4}$
11Na		$-/2,40 \cdot 10^{-5}$	$-/4,53 \cdot 10^{-5}$	$-/7,46 \cdot 10^{-5}$
12Mg		$6,39 \cdot 10^{-4}/0,0151$	$8,51 \cdot 10^{-4}/0,01989$	0,00106/0,02454
13Al		$1,01 \cdot 10^{-6}/0,00592$	$1,37 \cdot 10^{-6}/0,00773$	$1,75 \cdot 10^{-6}/0,00947$
14Si	0,4	0,39948/0,37819	0,39919/0,37107	0,3989/0,36407
15P	0,008	0,00887/0,00806	0,00915/0,00805	0,00942/0,00804
16S	0,008	0,00732/0,00648	0,0071/0,00605	0,00689/0,00564
17Cl		—/—	—/—	$1,24 \cdot 10^{-6}/—$
18Ar		—/—	$-/1,09 \cdot 10^{-6}$	$-/1,77 \cdot 10^{-6}$
20Ca		$4,81 \cdot 10^{-6}/2,64 \cdot 10^{-4}$	$6,34 \cdot 10^{-6}/4,16 \cdot 10^{-4}$	$7,85 \cdot 10^{-6}/5,97 \cdot 10^{-4}$
21Sc		$1,87 \cdot 10^{-6}/3,32 \cdot 10^{-4}$	$2,30 \cdot 10^{-6}/4,47 \cdot 10^{-4}$	$2,69 \cdot 10^{-6}/5,66 \cdot 10^{-4}$
22Ti	0,05	0,05207/0,16263	0,05279/0,20128	0,05353/0,24041
23V	0,4	0,43652/1,0839	0,44495/1,2984	0,45175/1,5072
24Cr	12,00	12,257/12,87	12,335/13,246	12,409/13,657
25Mn	0,6	0,87624/5,2373	0,95865/6,7268	1,0297/8,1085
26Fe	84,689	84,306/78,335	84,153/76,16	84,011/74,063
27Co	0,002	0,03339/0,00238	0,05212/0,00246	0,07634/0,00253
28Ni	0,03	0,03011/0,02467	0,03112/0,02329	0,03214/0,02207
29Cu	0,01	0,00753/0,00856	0,00695/0,00814	0,00646/0,00775
30Zn		$0,00119/1,46 \cdot 10^{-4}$	$0,00147/1,84 \cdot 10^{-4}$	$0,00172/2,18 \cdot 10^{-4}$
31Ga		—/—	—/—	$1,34 \cdot 10^{-6}/—$
37Rb		—/—	—/—	$-/1,24 \cdot 10^{-6}$
38Sr		$1,04 \cdot 10^{-6}/2,04 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-6}/3,37 \cdot 10^{-4}$	$1,93 \cdot 10^{-6}/4,99 \cdot 10^{-4}$
39Y		—/0,00227	—/0,00293	—/0,00354
40Zr	0,05	0,04898/0,04766	0,04864/0,04693	0,0483/0,04623
41Nb	0,005	0,00341/0,00479	0,00273/0,0047	0,00214/0,0046
42Mo	0,01	0,01133/0,00981	0,01191/0,00974	0,01241/0,00967
43Tc		$4,21 \cdot 10^{-4}/2,14 \cdot 10^{-4}$	$4,40 \cdot 10^{-4}/2,74 \cdot 10^{-4}$	$4,54 \cdot 10^{-4}/3,30 \cdot 10^{-4}$
44Ru		$0,00114/7,19 \cdot 10^{-6}$	$0,00155/1,02 \cdot 10^{-5}$	$0,00193/1,34 \cdot 10^{-5}$
45Rh		$4,58 \cdot 10^{-5}/—$	$8,09 \cdot 10^{-5}/—$	$1,21 \cdot 10^{-4}/—$
46Pd		$4,74 \cdot 10^{-5}/—$	$1,16 \cdot 10^{-4}/—$	$2,26 \cdot 10^{-4}/—$
47Ag		—/—	—/—	$1,08 \cdot 10^{-6}/—$
56Ba		$6,08 \cdot 10^{-7}/6,10 \cdot 10^{-5}$	$7,95 \cdot 10^{-7}/9,31 \cdot 10^{-5}$	$9,75 \cdot 10^{-7}/1,38 \cdot 10^{-4}$
57La		$1,28 \cdot 10^{-4}/0,00956$	$1,41 \cdot 10^{-4}/0,0123$	$1,49 \cdot 10^{-4}/0,01482$
58Ce	0,05	0,04516/0,03888	0,04368/0,03578	0,04226/0,03296
59Pr		0,00277/0,0014	0,00335/0,00168	0,00379/0,00189
60Nd		$0,00202/4,13 \cdot 10^{-5}$	$0,00292/5,29 \cdot 10^{-5}$	$0,00389/6,33 \cdot 10^{-5}$
61Pm		$6,56 \cdot 10^{-7}/—$	$1,69 \cdot 10^{-6}/—$	$3,33 \cdot 10^{-6}/—$
62Sm		$1,97 \cdot 10^{-6}/—$	$7,11 \cdot 10^{-6}/—$	$1,82 \cdot 10^{-5}/—$
70Yb		—/—	$-/1,69 \cdot 10^{-6}$	$-/3,40 \cdot 10^{-6}$
71Lu		—/—	$-/3,32 \cdot 10^{-6}$	$-/9,99 \cdot 10^{-6}$
72Hf		$3,56 \cdot 10^{-5}/0,03156$	$3,10 \cdot 10^{-5}/0,04556$	$2,67 \cdot 10^{-5}/0,06101$
73Ta	0,15	0,00318/0,20952	$9,35 \cdot 10^{-4}/0,22485$	$3,13 \cdot 10^{-4}/0,23832$
74W	1,3	0,81949/1,1195	0,65728/1,0721	0,51841/1,0295
75Re		0,11567/0,08503	0,10208/0,10096	0,08704/0,11237
76Os		0,48858/0,00213	0,61607/0,00342	0,69284/0,00481
77Ir		0,01829/—	0,03596/—	0,05512/—
78Pt		0,02053/—	0,0593/—	0,12346/—
79Au		$1,48 \cdot 10^{-5}/—$	$1,31 \cdot 10^{-4}/—$	$6,17 \cdot 10^{-4}/—$
80Hg		$4,86 \cdot 10^{-6}/—$	$6,19 \cdot 10^{-5}/—$	$3,89 \cdot 10^{-4}/—$

Основные результаты

Некоторые полученные результаты расчетов изменения нуклидного состава, активационных свойств и первичной радиационной повреждаемости (сна) стали ЭК-181 (Fe-opt) при ее нахождении в нейтронных полях реакторов БН-600 и ДЕМО-РФ для времен облучения до 50 лет представлены в табл. 1 и на рис. 1 – 8. В ряде случаев на рисунках представлены для сравнения данные, полученные как для чистого железа (Fe-nat), так и для базового состава ЭК-181 (basis), в котором исключены технологические примеси.

Влияние облучения на нуклидный состав стали ЭК-181

Основными легирующими элементами, которые определяют функциональные свойства стали ЭК-181, являются элементы бор, углерод, ванадий, хром, марганец, тантал и вольфрам. Поэтому в процессе длительного нейтронного облучения, в результате которого происходит значимое изменение нуклидного состава стали ЭК-181, и, в частности, изменения концентрации легирующих элементов, могут изменяться её функциональные свойства. В табл. 1 представлены данные: колонка 1 — перечень элементов (*Z*Элемент), входящих в исходный и трансмутированный составы стали ЭК-181; колонка 2 — их начальная концентрация (выделен базовый легирующий состав стали); колонки 3, 4 и 5 — концентрации элементов в облученной стали для времен облучения 30, 40 и 50 лет, соответственно. В табл. 1 концентрации элементов, не обозначенных или обозначенных знаком (—), менее 10^{-6} вес. %.

Анализ полученных данных в таблице 1 позволяет сделать следующие заключения:

— в реакторе БН-600 (колонки 3 – 5, числители) возрастает концентрация таких легирующих элементов как бор, углерод, ванадий, хром и марганец, в то же время концентрации тантала, вольфрама и церия уменьшаются. Практически неизменными остаются концентрации Si, Ti, Fe, Ce, Nb, Mo. Концентрации примесных элементов также изменяются как в сторону их увеличения, так и в сторону их уменьшения. Одновременно в составе стали ЭК-181 образуются новые элементы в значимых количествах (Re, Os, O, He, H), которые полностью отсутствовали в ее исходном составе. Наиболее существенным для функциональных свойств стали является ядерная наработка водорода и гелия и изменения концентрации карбидообразующих элементов (Mn, Cr, W, V).

— в реакторе ДЕМО-РФ (колонки 3 – 5, знаменатели) возрастает концентрация таких легирующих элементов как бор, ванадий, хром, марганец и тантал. Концентрация вольфрама уменьшается. Одновременно в составе стали ЭК-181 образуются новые элементы в значимых количествах (Re, Os, O, He, H), которые полностью отсутствовали в ее исходном составе. Наиболее существенно (по сравнению с БН-600) возрастает концентрация газовых элементов водорода и гелия и уменьшается концентрация базового элемента железа.

Полученные данные дают общую картину об изменении элементного композиционного состава стали ЭК-181, что может служить как основой при прогнозировании изменения структурно-фазового состояния и функциональных свойств стали в процессе ее длительного облучения, так и о возможности изготовления модельных образцов стали ЭК-181, соответствующих высокодозным изменениям её элементного состава.

Расчеты активации и наработок гелия и водорода в стали ЭК-181

При облучении в реакторах БН-600 и ДЕМО-РФ до 50 лет (рис. 1, 2) полная активность стали ЭК-181 (Fe-opt и basis) существенно выше в сравнении с чистым железом, что обусловлено наличием легирующих и примесных элементов, причем уровень активности существенно зависит от нейтронных спектров. В то же время влияние примесных элементов на полную активацию стали ЭК-181 незначительно, как это следует из сравнения данных для ЭК-181 (Fe-opt) и ЭК-181 (basis) при облучении в БН-600. Получены временные зависимости накопления водорода, трития и гелия для стали ЭК-181 (Fe-opt) при облучении до 50 лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-РФ (рис. 3, 4). При начальных временах облучения накопление водорода в стали ЭК-181 происходит, в основном, за счет ядерной реакции $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$, энергетический порог которой положителен. В начальном составе стали азот присутствует в качестве примесного элемента. По мере выгорания изотопа N-14 концентрация азота в целом уменьшается (табл. 1). Поэтому скорость накопления водорода уменьшается и после 30 лет облучения эта скорость очень мала. Для накопления гелия наблюдается аналогичная картина. На начальном этапе облучения основным источником гелия является ядерная реакция на изотопе $^{10}\text{B}(n,\alpha)$, энергетический порог которой положителен. По мере его выгорания скорость накопления гелия уменьшается и после 30 лет облучения её величина очень мала. Радио-

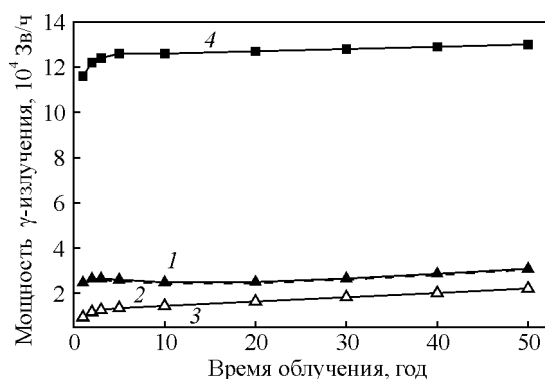


Рис. 1. Временные зависимости накопления наведенной гамма-активности для стали ЭК-181 (Fe-opt (1, 4), basis (2)) и чистого железа (Fe-nat) (3) при облучении в реакторах БН-600 (1 – 3) и ДЕМО-РФ (4).

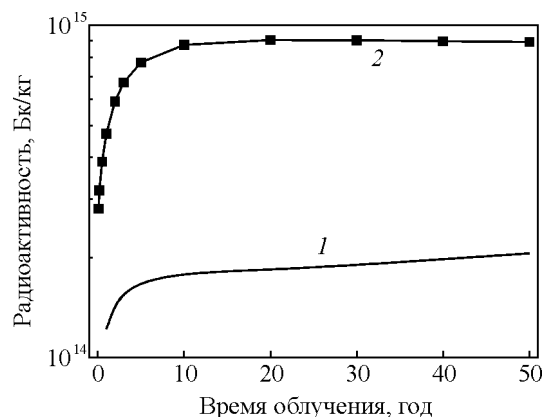


Рис. 2. Временные зависимости накопления наведенной гамма-активности для стали ЭК-181 (Fe-opt) при облучении в реакторах БН-600 (1) и ДЕМО-РФ.

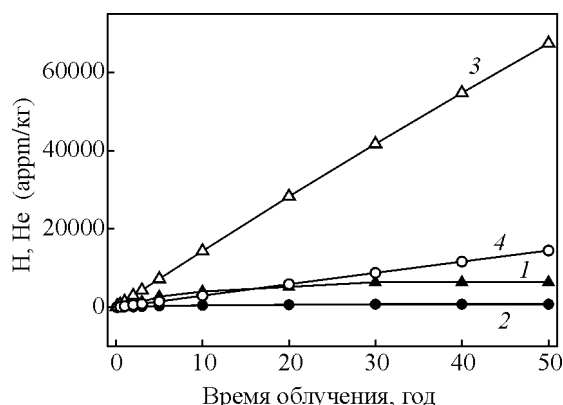


Рис. 3. Временные зависимости накопления концентраций водорода Н (1, 3) и гелия He (2, 4) для стали ЭК-181 (Fe-opt) при облучении в реакторах БН-600 (1, 2) и ДЕМО-РФ (3, 4).

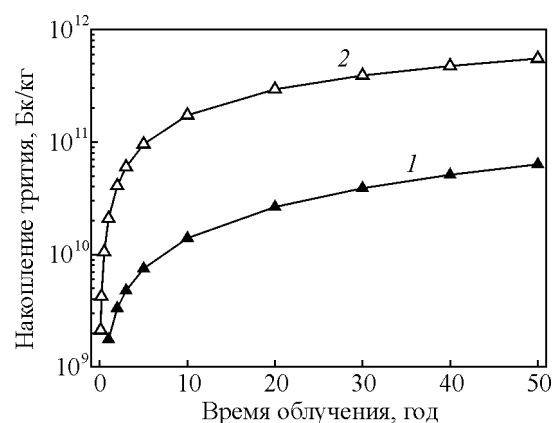


Рис. 4. Временные зависимости накопления трития (Бк/кг) для стали ЭК-181 (Fe-opt) при облучении в реакторах БН-600 (1) и ДЕМО-РФ (2).

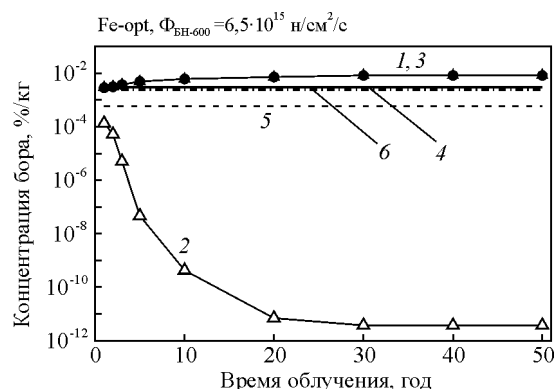


Рис. 5. Временные зависимости изменения нуклидного состава бора (1) и его изотопов В-10 (2) и В-11 (3) для стали ЭК-181 (Fe-opt) при облучении в реакторе БН-600. Горизонтальными линиями показаны исходные концентрации бора (4) и его изотопов В-10 (5), В-11 (6).

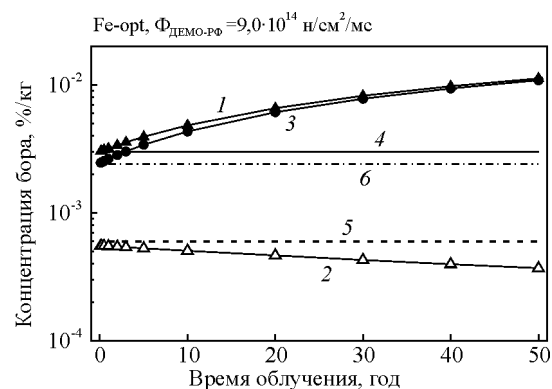


Рис. 6. Временные зависимости изменения нуклидного состава элемента бора (1) и его изотопов В-10 (2) и В-11 (3) для стали ЭК-181 (Fe-opt) при облучении в реакторе ДЕМО-РФ. Горизонтальными линиями показаны исходные концентрации бора (4) и его изотопов В-10 (5), В-11 (6).

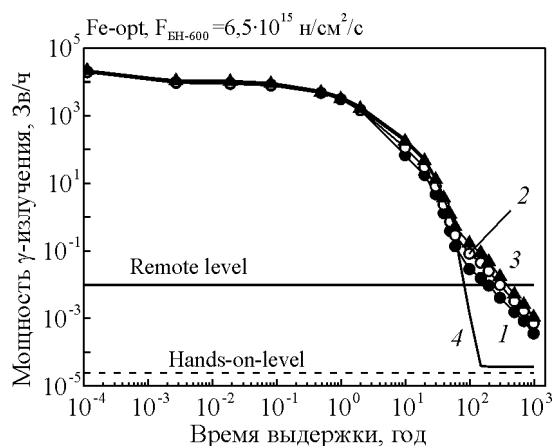


Рис. 7. Временные зависимости остаточной гамма-активности для стали ЭК-181 (basis) при облучении в реакторе БН-600 в течение 30 (1), 40 (2) и 50 лет (3) в сравнении с чистым железом (Fe-nat) (4). Время достижения уровня "Remote level" (10 мЗв/ч) образцами стали равно 199 лет для времени облучения 30 лет, 298 лет — для 40 лет, 374 года — для 50 лет, для чистого железа этот уровень достигается при 80 лет после 50 лет облучения.

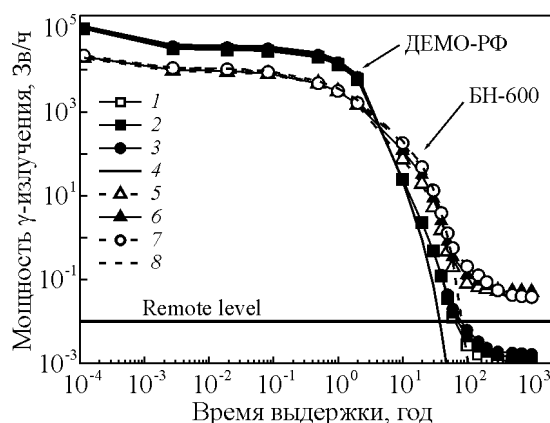


Рис. 8. Временные зависимости остаточной гамма-активности для стали ЭК-181 (Fe-opt) (1 – 3, 5 – 7) и чистом железе (Fe-nat) (4, 8) при облучении в реакторах ДЕМО-РФ (1 – 4) и БН-600 (5 – 8) в течение 30 (1, 5), 40 (2, 6) и 50 лет (3, 4, 7, 8).

генные наработки водорода, трития и гелия в реакторе ДЕМО-РФ существенно превышают соответствующие значения для реактора БН-600 (рис. 3, 4).

Получены временные зависимости изменения нуклидного состава элемента бора и его изотопов В-10 и В-11 (%/кг) для стали ЭК-181 (Fe-opt) (рис. 5, 6). Горизонтальными линиями на рис. 5 и 6 представлены начальные концентрации бора и его стабильных изотопов В-10 и В-11, которые присутствовали в исходном составе стали ЭК-181 (табл. 1). Видно, что в

процессе облучения концентрация бора возрастает за счет накопления стабильного изотопа В-11, в то же время изотоп В-10 выгорает (особенно в реакторе БН-600). Основным источником образования изотопа В-11 является ядерная реакция $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$, энергетический порог которой положителен.

На рис. 7, 8 представлены временные зависимости остаточной гамма-активности для стали ЭК-181 (basis и Fe-opt) при облучении в реакторах БН-600 и ДЕМО-РФ в течение 30, 40 и 50 лет в сравнении с натуральным железом (Fe-nat). Время достижения уровня "Remote level" (10,0 мЗв/ч) для стали ЭК-181 (basis) после её облучения в реакторе БН-600 определено значениями 199 лет для времени облучения 30 лет, 298 лет — для 40 лет, 374 года — для 50 лет. Для таких времён облучения критерий малой активизируемости (быстрого спада активности) стали не выполняется, а для его достижения необходимы дальнейшие технологические работы по оптимизации легирующего комплекса стали. Для стали ЭК-181 (Fe-opt) при облучении более 30 лет в реакторе БН-600 критерий малой активизируемости не выполняется (соответствующие времена охлаждения более 1000 лет).

После облучения до 50 лет в реакторе ДЕМО-РФ критерий малой активизируемости для стали ЭК-181 хорошо удовлетворяется (время достижения уровня 10,00 мЗв/ч существенно менее 100 лет).

Для чистого железа при облучении до 50 лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-РФ критерий малой активизируемости выполняется (80 лет и 35 лет, соответственно).

Расчеты повреждающей дозы в стали ЭК-181

Для расчётов первичной повреждающей дозы (сна) сечения смещения на атом были взяты из библиотеки ACDAM/DDDL [6], которые были подготовлены на основе оцененных нейтронных данных из библиотеки ENDF/B-VI.8 с использованием программы NJOY, в которой в качестве каскадной функции была взята модельная функция из известного NRT-стандарта [12, 6]. В качестве пороговой энергии выбивания атомов из узлов кристаллической решетки для всех элементов было значение 40 эВ, принятое в программе NJOY. Расчётные интегральные зависимости первичной радиационной повреждаемости стали ЭК-181 (Fe-opt) были получены в условиях неизменяющихся энергетических нейтронных спектров реакторов БН-600 и ДЕМО-РФ и определяются выражением $\text{DPA} = K_d t$, где DPA — интегральное значение первичной радиационной повреждаемости, сна, t — время облучения,

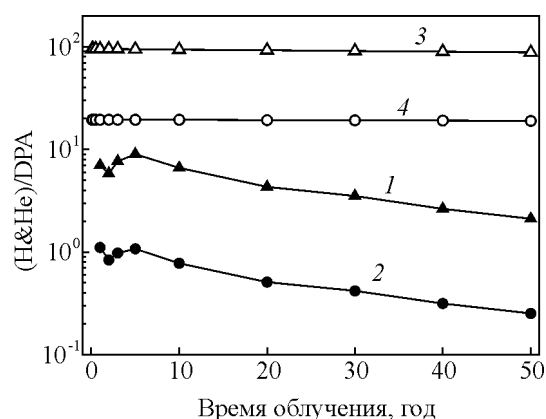


Рис. 9. Временные зависимости отношений радиогенных концентраций водорода Н и гелия Нe к уровню первичной радиационной повреждаемости (сна) Н/сна (1, 3) и Нe/сна (2, 4) для стали ЭК-181 (Fe-opt) при облучении в реакторах БН-600 (1, 2) и ДЕМО-РФ (3, 4).

года, K_d — интегральная скорость накопления первичной радиационной повреждаемости, сна/год. Значения коэффициента K_d приведены в табл. 2.

Таблица 2

Скорости накопления интегральной первичной радиационной повреждаемости K_d в стали ЭК-181 и чистом железе (Fe-nat) в реакторах БН-600 и ДЕМО-РФ

Материал	K_d , сна/год	
	БН-600	ДЕМО-РФ
ЭК-181	60,75	15,27
Железо (Fe-nat)	60,09	15,20

На рис. 9 показаны временные зависимости отношений радиогенных концентраций водорода Н и гелия Нe к уровню сна первичной радиационной повреждаемости: Н/СНА и Нe/СНА для стали ЭК-181 (Fe-opt) при облучении в реакторах БН-600 и ДЕМО-РФ. Эти отношения являются важными параметрами при определении радиационной стойкости материала и его радиационного ресурса.

Заключение

Для ядерных физических расчетов первичной радиационной повреждаемости (сна), наведенной активностью и ядерной наработки элементов, в том числе водорода и гелия, в ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (Fe – 12 Cr – W – V – Ta – B), длительно (до 50 лет) облучаемой в нейтронных полях быстрого реактора БН-600 (поток нейтронов $\Phi_n = 6,5 \cdot 10^{15}$ нейтр./($\text{см}^2/\text{с}$), $E > 0$) и термоядерного реактора ДЕМО-РФ (поток нейтронов $\Phi_n = 9,0 \cdot 10^{14}$ нейтр./($\text{см}^2/\text{с}$), $E > 0$), и спада наведенной

активности (охлаждения) в течение времени до 1000 лет после окончания облучения применен расчетный комплекс ядерно-физических данных ACDAM [6].

Показана важная роль корректного учета всех легирующих и примесных элементов в композиционном элементном составе стали, которые могут приводить к значительным эффектам в ядерных трансмутации, активации, газообразовании и охлаждении.

Элемент бор существенно увеличивает газонакопление гелия при облучении в реакторе деления. Для реактора термоядерного синтеза влияние бора на ядерную наработку гелия не столь существенно в сравнении с реактором деления.

Также важно учитывать содержание азота в исходном составе стали, так как его содержание оказывает существенное влияние на накопление водорода и изотопа С-14 для нейтронных полей реактора деления.

При облучении более 30 лет в реакторе БН-600 сталь ЭК-181 реально не удовлетворяет критерию малой активизируемости. В этом случае время достижения уровня 10,0 мЗв/ч (remote level) существенно превышает 100 лет (F-opt — более тысячи лет, ЭК-181-basis — более 200 лет). При облучении стали ЭК-181 в реакторе БН-600 в течение 560 дней (90 сна) критерий её малой активизируемости хорошо выполняется (время охлаждения до уровня 10,0 мЗв/ч составляет примерно 40 лет).

Необходима дальнейшая работа по оптимизации легирующего комплекса и существенному уменьшению концентрации примесных элементов для модификации стали ЭК-181, удовлетворяющей критерию малой активизируемости при длительном облучении (более 30 лет) в нейтронных спектрах быстрых реакторов.

После облучения до 50 лет в реакторе ДЕМО-РФ сталь ЭК-181 хорошо удовлетворяет критерию малой активизируемости (время достижения уровня 10,00 мЗв/ч существенно менее 100 лет).

Полученные результаты дают целостную картину динамики ядерно-физического поведения ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (Fe – 12 Cr – 2 W – V – Ta – B) при длительных облучениях (до 50 лет) в нейтронных спектрах быстрых и термоядерных реакторов.

Литература

1. Солонин М.И., Иолтуховский А.Г., Леонтьева-Смирнова М.В. и др. Патент на изобретение RU № 2211878, 10.09.2003, Бюл. № 25.

2. Леонтьева-Смирнова М.В., Агафонов А.Н., Ермолаев Г.Н. и др. Микроструктура и механические свойства малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (RUSFER-EK-181). Перспективные материалы, 2006, № 6, с. 40 – 52.
3. Chernov V.M., Leonteva-Smirnova M.V., Potapenko M.M. et al. Structural materials for fusion power reactors — the RF R&D activities. Nuclear Fusion, 2007, v. 47, p. 839 – 848.
4. Lindau R., Moslang A., Schirra M. Thermal and mechanical behaviour of the reduced-activation ferritic-martensitic steel EUROFER. Fusion Engineering and Design, 2002, v. 61 – 62, p. 659 – 664.
5. Baluk N., Abe K., Boutard J.I., Chernov V.M. et al. Status of R&D activities on materials for fusion power reactors. Nuclear Fusion, 2007, v. 47, p. S696 – S717.
6. Блохин А.И., Демин Н.А., Манохин В.Н., Сипачев И.В., Блохин Д.А., Чернов В.М. Расчётный комплекс АСДАМ для исследований ядерных физических свойства материалов в условиях длительного нейтронного облучения. Перспективные материалы, 2010, № 2, с. 46 – 55.
7. Блохин А.И., Демин Н.А., Леонтьева-Смирнова М.В., Потапенко М.М., Чернов В.М. Активация и трансмутация конструкционных материалов в различных нейтронных полях. ВАНТ, сер. “Материаловедение и новые материалы”, 2006, вып. 1, т. 66, с. 88 – 104.
8. Блохин А.И., Демин Н.А., Чернов В.М. Нейтронные источники для исследования конструкционных материалов. ВАНТ, Сер. “Материаловедение и новые материалы”, 2006, вып. 1, т. 66, с. 70 – 87.
9. Mitenkov F., Saraev O. BN-800: a key part of Russian’s nuclear strategy. J. Nuclear Engineering International, 2005, v. 50, no. 608, p. 10 – 12.
10. Зверев Д., Васильев Б., Кодочигов Н. и др. Разработка перспективных реакторных технологий. РОСЭНЕРГОАТОМ, 2008, №5, с. 34 – 39.
11. Bloom E.E., Zinkle S.J., Wiffen F.W. Materials to deliver the promise of fusion power – progress and challenges. J.Nucl. Mater., 2004, v. 329 – 333, p. 12 – 19.
12. NRT ASTM E521 (1996) Standard Practice for Neutron Radiation Damage Simulation by Charged-Particle Irradiation. Annual Book of ASTM Standards, vol. 12.02, ASTM, Philadelphia, PA.

Блохин Даниил Анатольевич — ОАО “Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара” (г. Москва), инженер. Специалист в области ядерных физических свойств материалов.

Леонтьева-Смирнова Мария Владимировна — ОАО “Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А.Бочвара” (г. Москва), кандидат технических наук, начальник отдела. Специалист в области радиационного материаловедения.

Чернов Вячеслав Михайлович — ОАО “Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара” (г. Москва), доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник. Специалист в области радиационного материаловедения и радиационной физики конденсированного состояния. E-mail chernovv@bochvar.ru.

Блохин Анатолий Иванович — ГНЦ РФ Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского (г. Обнинск, Калужская область), кандидат физико-математических наук, начальник отдела теоретической физики. Специалист в области ядерной физики, нейтроники, ядерных библиотек и кодов. E-mail blokhin@ippe.ru.

Дёмин Николай Александрович — ГНЦ РФ Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области ядерных физических свойств материалов и радиационной физики твердого тела.

Сипачев Иван Васильевич — ГНЦ РФ Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, инженер. Специалист в области ядерной физики.