

УДК 621.039.623:621.039.619

ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АУСТЕНИТНЫХ НИКЕЛЕВЫХ И МАРГАНЦЕВЫХ СТАЛЕЙ ПРИ НЕЙТРОННЫХ ОБЛУЧЕНИЯХ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ ДЕЛЕНИЯ (БЫСТРЫХ) И СИНТЕЗА

А.И. Блохин¹, В.М. Чернов^{2, 3}

¹Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН), Москва, Россия

²Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара (АО «ВНИИНМ»), Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Определены ядерно-физическкие свойства аустенитной хромоникелевой стали ЭК-164 (Fe—16Cr—19Ni—2Mo—2Mn—Nb—Ti—B) и её модификаций на основе марганца ЭК-164Mn (Fe—16Cr—20Mn—2Mo—Nb—Ti—B) и ЭК-164MnW (Fe—16Cr—20Mn—2W—Nb—Ti—B) при облучении (до 5 эффективных лет) в нейтронных спектрах быстрого энергетического (БН-600) и термоядерного (ДЕМО-С) реакторов и после облучения (ядерное охлаждение до 1000 лет). Исследования проведены на базе расчётного комплекса ACDAM-2.0 с учётом элементных (легирующих и примесных) составов сталей и типичных нейтронных спектров реакторов деления (БН-600) и синтеза (ДЕМО-С). Получен набор ядерно-физических характеристик сталей (первичная радиационная повреждаемость, трансмутация элементов, радиогенное накопление элементов, включая водород, гелий и бор, мощность γ -дозы, радиоактивность, ядерное энерговыделение, изотопные вклады) и дан их сравнительный анализ. Определены временные интервалы выполнения критерии малой активируемости сталей после облучения (мощность γ -дозы менее 10 мЗв/ч, радиоактивность менее 10^{10} Бк/кг, энерговыделение менее 10 Вт/м³).

Ключевые слова: сталь ЭК-164 (Fe—16Cr—19Ni—2Mo—2Mn—Nb—Ti—B), сталь ЭК-164Mn (Fe—16Cr—20Mn—2Mo—Nb—Ti—B), сталь ЭК-164MnW (Fe—16Cr—20Mn—2W—Nb—Ti—B), быстрый реактор БН-600, термоядерный реактор ДЕМО-С, нейтронные спектры, облучение, ядерно-физические свойства.

NUCLEAR PHYSICAL PROPERTIES OF AUSTENITIC NICKEL AND MANGANESE STEELS UNDER NEUTRON IRRADIATION IN NUCLEAR FISSION (FAST) AND FUSION REACTORS

A.I. Blokhin¹, V.M. Chernov^{2, 3}

¹ Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Science (IBRAE RAS), Moscow, Russia

² A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials (JSC «VNIINM»), Moscow, Russia

³ National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

The nuclear physical properties of austenitic chromium-nickel steel EK-164 (Fe—16Cr—19Ni—2Mo—2Mn—Nb—Ti—B) and its manganese-based modifications EK-164Mn (Fe—16Cr—20Mn—2Mo—Nb—Ti—B) and EK-164MnW (Fe—16Cr—20Mn—2W—Nb—Ti—B) under irradiation (up to 5 effective years) in the neutron spectra of fast power (BN-600) and thermonuclear (DEMO-C) reactors and after irradiation (nuclear cooling up to 1000 years) were determined. The researches were performed on the basis of the ACDAM-2.0 calculation complex, taking into account the elemental (alloying and impurity) compositions of steels and typical neutron spectra of fission (BN-600) and fusion (DEMO-C) reactors. The entire set of nuclear physical characteristics of steels (primary radiation damage, transmutation of elements, radiogenic accumulation of elements, including hydrogen, helium and boron, γ -dose power, radioactivity, nuclear energy release, isotope contributions) is obtained and their comparative analysis is given. The time intervals for fulfilling the criteria of low activation of steels after irradiation (γ -dose rate less than 10 mSv/h, radioactivity less than 10^{10} Bq/kg, energy release less than 10 W/m³) were determined.

Key words: steel EK-164 (Fe—16Cr—19Ni—2Mo—2Mn—Nb—Ti—B), steel EK-164Mn (Fe—16Cr—20Mn—2Mo—Nb—Ti—B), steel EK-164MnW (Fe—16Cr—20Mn—2W—Nb—Ti—B), fast reactor BN-600, fusion reactor DEMO-C, neutron spectra, irradiation, nuclear physical properties.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-3-11-23

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время аустенитные хромоникелевые стали типа ЧС-68 (Fe—16Cr—15Ni—2Mo—Mn—Ti—V—B) и ЭК-164 (Fe—16Cr—19Ni—2Mo—2Mn—Nb—Ti—B) используются или планируются к применению как конструкционные материалы (КМ) для активных зон российских быстрых [1—6] (БН-600, БН-800, БН-1200, МБИР, др.) и термоядерных [7—9] (ДЕМО-С, ДЕМО-ТИН, др. проекты НИЦ «Курчатовский институт») реакторов. Сдерживающими факторами применения аустенитных хромоникелевых сталей в ядерных и термоядерных реакторах являются их высокая радиоактивность, высокое радиационное распухание и

высокотемпературное радиационное охрупчивание (ВТРО). С целью уменьшения распухания при нейтронном облучении в стали ЭК-164 увеличена концентрация никеля (относительно стали ЧС-68). Однако увеличение концентрации никеля в аустенитных сталях усиливает другие проблемы их применения в реакторах с разными типами теплоносителей (ВТРО, коррозия, радиоактивность, стоимость).

Применение высоконикелевых сталей делает практически невозможной реализацию полного замкнутого ядерного топливного цикла (ПЗЯТЦ), включающего переработку и повторное использование (рециклирование) облучённых топлива и КМ за исторически короткое время после нейтронного облучения (для КМ менее 100 лет).

С целью уменьшения ядерных и радиационных проблем применения аустенитных хромоникелевых сталей предложены и разрабатываются для ядерного применения аустенитные хромомарганцевые стали типа Fe—(10—18)Cr—(10—30)Mn—2Mo—W [10—24]. Аустенитные хромомарганцевые стали являются по сравнению с аустенитными хромоникелевыми сталями потенциально менее радиоактивными, менее гелий-образующими, более прочными и коррозионно-стойкими сталями, что представляет потенциальный интерес их ядерного применения и обосновывает потенциальную перспективность их дальнейших разработок для применения в ядерных (быстрых) и термоядерных реакторах. Особый интерес потенциально малоактивируемые аустенитные хромомарганцевые стали (не магнитные) представляют для термоядерных реакторов с магнитным удержанием плазмы (типа токамак), в которых применение таких сталей в качестве КМ является важным преимуществом.

С целью оптимизации элементных составов сталей хромомарганцевого типа для ядерного применения представляется важным исследование всего комплекса их ядерно-физических свойств при длительных облучениях в нейтронных спектрах быстрых и термоядерных реакторов и длительных выдержках (ядерное охлаждение) после облучения. Такие исследования облучённых сталей позволяют определить условия обращения с ними (переработка, захоронение), их соответствие критериям малой активируемости и сроки выполнения таких критериев после нейтронных облучений.

Степень радиационной опасности радиоактивных материалов (РМ) характеризуется [25—30]:

— мощностью дозы γ -излучения (Зв/ч), которое сопровождает радиоактивный распад элементов в стали. Эта мощность является ориентиром при определении радиационной опасности РМ и определяет условия обращения с ними:

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

при уровне мощности γ -дозы в интервале от 0,025 до 10,0 мЗв/ч (уровень remote level) РМ можно повторно использовать (рециклировать);

при уровне мощности γ -дозы более 10,0 мЗв/ч РМ не может быть рециклирован для повторного использования и подлежит только захоронению разной сложности в зависимости от класса радиоактивности (целью является остаточная радиоактивность класса 3 и ниже);

— радиоактивностью облучённых материалов (Бк/кг), определяемой скоростью распада радиоактивных ядер и характеризуемой разными классами радиоактивности облучённых материалов и радиоактивных отходов (РАО). Твёрдые РАО относятся к классу 3, если это:

среднеактивные РАО, содержащие β -излучающие нуклиды (за исключением трития) удельной активностью от 10^7 до 10^{10} Бк/кг;

низкоактивные долгоживущие РАО, содержащие радионуклиды с периодом полураспада более 31 года (^{14}C , ^{26}Al , ^{39}Ar , ^{53}Mn , ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{91}Nb , ^{92}Nb , ^{94}Nb , ^{93}Zr , ^{93}Mo , ^{99}Tc) и удельной активностью от 10^6 до 10^7 Бк/кг для РАО, содержащих β -излучающие радионуклиды (за исключением трития);

— энерговыделением (Вт/м³, Вт/кг), производимым в КМ ядерными реакциями во время и после нейтронного облучения и определяющим температуру облучённого КМ: при уровне энерговыделения менее 10 Вт/м³ возможна радиохимическая переработка облучённых КМ.

В данной работе на основе расчётного комплекса ACDAM-2.0 [31—33] выполнены исследования ядерно-физическисх характеристик аустенитной хромоникелевой стали ЭК164 (Fe—16Cr—19Ni—2Mo—2Mn—Nb—Ti—B) и её марганцевых модификаций ЭК-164Mn (Fe—16Cr—20Mn—2Mo—Nb—Ti—B) и ЭК-164MnW (Fe—16Cr—20Mn—2W—Nb—Ti—B), облучаемых до 5 эффективных лет в типичных нейтронных спектрах быстрых (БН-600) и термоядерных (ДЕМО-С) реакторов. Проведён сравнитель-

ный анализ изменений ядерно-физических свойств сталей ЭК-164, ЭК-164Mn и ЭК-164MnW, включая первичную радиационную повреждаемость (ПРП), активацию, трансмутацию, радиоактивность, энерговыделение, наработку водорода и гелия, ядерное охлаждение после облучения и соответствующие изотопные вклады. Определены временные интервалы после облучения, обеспечивающие выполнение критерии малой активируемости и радиационной безопасности для облучённых сталей.

КОМПОЗИЦИОННЫЙ СОСТАВ АУСТЕНИТНОЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ ЭК-164 И ЕЁ МАРГАНЦЕВЫХ МОДИФИКАЦИЙ

В табл. 1 приведены композиционные составы хромоникелевой стали ЭК-164 [1—5] и её марганцевых модификаций, обозначенных как ЭК-164Mn (никель заменён на марганец) и ЭК-164MnW (никель заменён на марганец, молибден заменён на вольфрам), использованные при расчётах в данной работе.

Таблица 1. Композиционные составы (масс. %) стали ЭК-164 и её модификаций ЭК-164Mn и ЭК-164MnW, использованные при расчётах в данной работе

Z	Элемент	ЭК-164	ЭК-164Mn	ЭК-164MnW
5	B	0,004	0,004	0,004
6	C	0,07	0,07	0,07
7	N	0,01	0,01	0,01
13	Al	0,10	0,10	0,10
14	Si	0,41	0,41	0,41
15	P	0,02	0,02	0,02
16	S	0,01	0,01	0,01
22	Ti	0,30	0,30	0,30
23	V	0,13	0,13	0,13
24	Cr	15,91	15,91	15,91
25	Mn	1,60	20,99	20,99
26	Fe	59,606	59,606	59,606
27	Co	0,01	0,01	0,01
28	Ni	19,39	—	—
41	Nb	0,17	0,17	0,17
42	Mo	2,26	2,26	—
74	W	—	—	2,26

Элементный состав стали ЭК-164 (см. табл. 1) определяется соответствующими техническими условиями на её композиционный состав и соответствует элементному составу типичной плавки этой стали. Концентрация хрома и ниобия в модифицированных марганцевых сталях оставлена без изменений (концентрация хрома не уменьшена до максимального уровня 15% масс. для аустенитных хромомарганцевых сталей) для более точного сравнения ядерно-физических свойств стали ЭК-164 и её модификаций ЭК-164Mn и ЭК-164MnW.

НЕЙТРОННЫЕ СПЕКТРЫ РЕАКТОРОВ БН-600 И ДЕМО-С И УСЛОВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ

На рис. 1 представлены нейтронные спектры реакторов БН-600 и ДЕМО-С [4, 8, 32], для которых в данной работе проведены расчёты радиационных параметров сталей ЭК-164, ЭК-164Mn и ЭК-164MnW, облучённых в таких нейтронных спектрах длительностью до 5 эффективных лет. Предполагается неизменность нейтронных спектров за время облучения.

Для реактора БН-600 нейтронные спектры взяты для центральной области активной зоны. Для реактора ДЕМО-С взяты данные по нейтронному

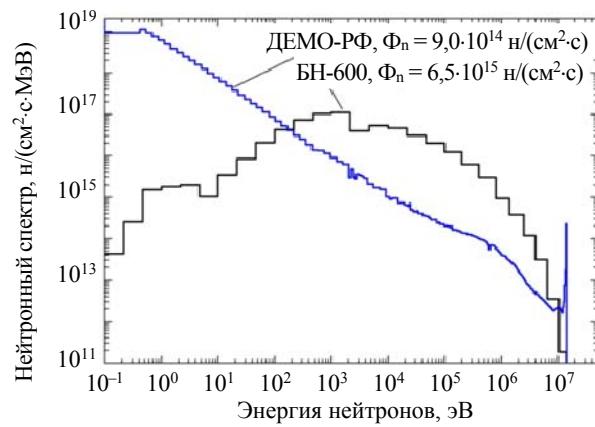


Рис. 1. Нейтронные спектры для реакторов БН-600 и ДЕМО-С

спектру первой стенки. Полные потоки нейтронов ($E > 0$) составляют значения $6,5 \cdot 10^{15}$ н/(см²·с) (БН-600) и $9,0 \cdot 10^{14}$ н/(см²·с) (ДЕМО-С).

При вычислениях трансмутации и активации рассматриваемой стали масса её образца принималась равной 1 кг. Результатом таких вычислений являются уровни ядерной активации сталей при нейтронном облучении и их спад (ядерное охлаждение) после прекращения облучения, изменённые исходные составы первоначальных элементов в сталях из-за их ядерной трансмутации, включая радиогенные концентрации водорода, трития, гелия и бора, в зависимости от типа сталей, длительности облучения (до 5 эффективных лет) в нейтронных спектрах быстрого (БН-600) и термоядерного (ДЕМО-С) реакторов и длительности после реакторных выдержек (до 1000 лет).

ПЕРВИЧНАЯ РАДИАЦИОННАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ

Расчёты ПРП (сна — смещений на атом) для стали ЭК-164 и её модификаций были выполнены при облучении в нейтронных спектрах реакторов, следуя известной модели TRN-стандартса с использованием сечений радиационных повреждений, подготовленных с помощью программы NJOY-99 на основе библиотек оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.1 и БРОНД-3.1, входящих в состав комплекса ACDAM-2.0 [31—33]. Величина ПРП для этих сталей представляется выражением ПРП = $K_d t$, где K_d — скорость образования ПРП (сна/год), t — время облучения (годы). Расчёты скорости образования ПРП K_d приведены в табл. 2.

Таблица 2. Скорости образования ПРП K_d при облучении в нейтронных спектрах реакторов БН-600 и ДЕМО-С

Сталь	Первичная повреждаемость, сна/год	
	БН-600 ($\Phi_n = 6,5 \cdot 10^{15}$ см ⁻² ·с ⁻¹)	ДЕМО-С ($\Phi_n = 9,0 \cdot 10^{14}$ см ⁻² ·с ⁻¹)
ЭК-164	48,24	48,60
ЭК-164Mn	49,88	46,90
ЭК-164MnW	47,89	48,23
Fe	62,24	47,77

Следует отметить (см. табл. 2) небольшую разницу для уровней ПРП во всех сталях и нейтронных спектрах деления (БН-600) и синтеза (ДЕМО-С). Для стали ЭК-164 и её марганцевых модификаций значения K_d близки и находятся в малом интервале 47—50 сна/год для всех нейтронных спектров.

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА НУКЛИДНЫЙ СОСТАВ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Полученные результаты расчётов изменения нуклидных составов аустенитной стали ЭК-164 и её модификаций ЭК-164Mn и ЭК-164MnW при их нахождении в нейтронных полях быстрого (БН-600) и термоядерного (ДЕМО-С) реакторов представлены в табл. 3—5. Изменения элементных составов сталей зависят от типа нейтронного спектра (деления, синтеза) и длительности облучения, а концентрация отдельных элементов может как увеличиться, так и уменьшиться при облучении. Элементы, отсутствующие в исходном элементном составе сталей, образуются в результате ядерных реакций.

Таблица 3. Расчётное изменение элементного состава (вес. %) стали ЭК-164, облучённой в реакторах БН-600 и ДЕМО-С в течение 5 эффективных лет

Z	Элемент	Исходный состав ЭК-164	Состав ЭК-164, конец облучения (5 лет)	
			БН-600	ДЕМО-С
1	H	—	0,0053	0,01815
2	He	—	0,00149	0,00914
3	Li	—	$4,5768 \cdot 10^{-4}$	$2,63023 \cdot 10^{-5}$
4	Be	—	$1,41287 \cdot 10^{-5}$	$1,58122 \cdot 10^{-4}$
5	B	0,004	0,00345	0,00409
6	C	0,07	0,07012	0,0697
7	N	0,01	0,0097	0,00967
11	Na	—	$7,8488 \cdot 10^{-9}$	$3,08663 \cdot 10^{-5}$
12	Mg	—	$1,67209 \cdot 10^{-4}$	0,00303
13	Al	0,1	0,09975	0,10031
14	Si	0,41	0,40986	0,40687

15	P	0,02	0,02014	0,01964
16	S	0,01	0,00991	0,00965
20	Ca	—	7,30976·10 ⁻⁶	1,34201·10 ⁻⁴
21	Sc	—	5,57749·10 ⁻⁶	3,16604·10 ⁻⁴
22	Ti	0,3	0,3003	0,32162
23	V	0,13	0,14849	0,27858
24	Cr	15,91	15,92113	15,85418
25	Mn	1,6	1,58482	1,96782
26	Fe	59,606	59,8037	59,55167
27	Co	0,01	0,03142	0,09885
28	Ni	19,39	19,14514	18,84721
29	Cu	—	0,00251	1,19831·10 ⁻⁴
30	Zn	—	3,11225·10 ⁻⁵	2,02882·10 ⁻⁷
39	Y	—	3,44964·10 ⁻⁶	1,65412·10 ⁻⁴
40	Zr	—	5,04256·10 ⁻⁴	0,00451
41	Nb	0,17	0,16775	0,17677
42	Mo	2,26	2,20183	2,23792
43	Tc	—	0,03773	0,00942
44	Ru	—	0,02412	2,18382·10 ⁻⁴
45	Rh	—	1,27121·10 ⁻⁴	1,43162·10 ⁻¹⁰
46	Pd	—	1,72537·10 ⁻⁵	1,73822·10 ⁻¹³

Примечание. Не указаны радиогенные элементы с концентрацией $<10^{-5}$ масс. % одновременно для обоих спектров: O, F, Ne, Cl, Ar, K, Ga, Ge, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Ag, Cd.

Т а б л и ц а 4. Расчётоное изменение элементного состава (вес. %) стали ЭК-164Mn, облучённой в реакторах БН-600 и ДЕМО-С в течение 5 эффективных лет

Z	Элемент	Исходный состав ЭК-164Mn	Состав ЭК-164Mn, конец облучения (5 лет)	
			БН-600	ДЕМО-С
1	H	—	0,0012	0,01084
2	He	—	6,73724·10 ⁻⁴	0,00454
3	Li	—	4,58893·10 ⁻⁴	2,63055·10 ⁻⁵
4	Be	—	1,40995·10 ⁻⁵	1,58141·10 ⁻⁴
5	B	0,004	0,00345	0,00409
6	C	0,07	0,07012	0,0697
7	N	0,01	0,0097	0,00967
11	Na	—	7,86008·10 ⁻⁹	3,08701·10 ⁻⁵
12	Mg	—	1,75114·10 ⁻⁴	0,00303
13	Al	0,1	0,0997	0,10032
14	Si	0,41	0,4099	0,40692
15	P	0,02	0,02014	0,01964
16	S	0,01	0,00992	0,00965
20	Ca	—	6,96157·10 ⁻⁶	1,34218·10 ⁻⁴
21	Sc	—	6,21861·10 ⁻⁶	3,16642·10 ⁻⁴
22	Ti	0,3	0,30054	0,32167
23	V	0,13	0,14852	0,27926
24	Cr	15,91	15,9219	16,14715
25	Mn	20,99	20,2855	21,0318
26	Fe	59,606	60,27368	59,14186
27	Co	0,01	0,01221	0,00985
28	Ni	—	7,72932·10 ⁻⁵	2,36381·10 ⁻⁶
39	Y	—	8,03862·10 ⁻⁶	1,65432·10 ⁻⁴
40	Zr	—	5,99818·10 ⁻⁴	0,00451
41	Nb	0,17	0,16776	0,17679
42	Mo	2,26	2,20199	2,2382
43	Tc	—	0,03757	0,00942
44	Ru	—	0,02403	2,18409·10 ⁻⁴
45	Rh	—	1,27609·10 ⁻⁴	1,43179·10 ⁻¹⁰
46	Pd	—	1,73015·10 ⁻⁵	1,73843·10 ⁻¹³

Примечание. Не указаны радиогенные элементы с концентрацией $<10^{-5}$ масс. % одновременно для обоих спектров: O, F, Ne, Cl, Ar, K, Cu, Zn, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Ag, Cd.

Таблица 5. Расчётное изменение элементного состава (вес. %) стали ЭК-164MnW, облучённой в реакторах БН-600 и ДЕМО-С в течение 5 эффективных лет

Z (№)	Элемент	Исх. состав ЭК-164MnW	Состав ЭК-164MnW, конец облучения (5 лет)	
			БН-600	ДЕМО-С
1	H	—	0,0012	0,01074
2	He	—	$6,66884 \cdot 10^{-4}$	0,00451
3	Li	—	$4,58891 \cdot 10^{-4}$	$2,63054 \cdot 10^{-5}$
4	Be	—	$1,40994 \cdot 10^{-5}$	$1,58141 \cdot 10^{-4}$
5	B	0,004	0,00345	0,00409
6	C	0,07	0,07012	0,0697
7	N	0,01	0,0097	0,00967
11	Na	—	$7,86005 \cdot 10^{-9}$	$3,087 \cdot 10^{-5}$
12	Mg	—	$1,75113 \cdot 10^{-4}$	0,00303
13	Al	0,1	0,0997	0,10032
14	Si	0,41	0,4099	0,40692
15	P	0,02	0,02014	0,01964
16	S	0,01	0,00992	0,00965
20	Ca	—	$6,96154 \cdot 10^{-6}$	$1,34218 \cdot 10^{-4}$
21	Sc	—	$6,21858 \cdot 10^{-6}$	$3,16642 \cdot 10^{-4}$
22	Ti	0,3	0,30054	0,32167
23	V	0,13	0,14852	0,27926
24	Cr	15,91	15,92184	16,14712
25	Mn	20,99	20,28542	21,03176
26	Fe	59,606	60,27345	59,14175
27	Co	0,01	0,01221	0,00985
28	Ni	—	$7,72929 \cdot 10^{-5}$	$2,36381 \cdot 10^{-6}$
39	Y	—	$1,72454 \cdot 10^{-7}$	$1,86154 \cdot 10^{-5}$
40	Zr	—	$2,31395 \cdot 10^{-5}$	0,00234
41	Nb	0,17	0,16764	0,1676
42	Mo	—	0,00263	$5,63104 \cdot 10^{-7}$
72	Hf	—	$1,26149 \cdot 10^{-6}$	$4,50549 \cdot 10^{-4}$
73	Ta	—	$9,70735 \cdot 10^{-4}$	0,02675
74	W	2,26	2,05923	2,19369
75	Re	—	0,13938	0,03848
76	Os	—	0,06258	$3,0204 \cdot 10^{-4}$
77	Ir	—	$3,77658 \cdot 10^{-5}$	$2,2741 \cdot 10^{-14}$

Примечание. Не указаны радиогенные элементы с концентрацией $<10^{-5}$ масс. % одновременно для обоих спектров: O, F, Ne, Cl, Ar, K, Cu, Zn, Kr, Rb, Sr, Er, Tm, Yb, Lu, Pt, Au, Hg.

ЯДЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И НАКОПЛЕНИЕ ВОДОРОДА В СТАЛЯХ

Ядерное образование и накопление водорода и его изотопа трития в сталях при их облучении до 5 лет в нейтронных спектрах реакторов БН-600 и ДЕМО-С приведены в табл. 3—6 и показаны на рис. 2—4 (концентрация дана в вес. %, appm — атомных частиц на миллион, Бк/кг). Накопление водорода в сталях ЭК-164Mn и ЭК-164MnW практически одинаково для всех нейтронных спектров, но меньше, чем в стали ЭК-164, примерно в 4 раза для БН-600 и примерно в 2 раза для ДЕМО-С. Накопление водорода в сталях

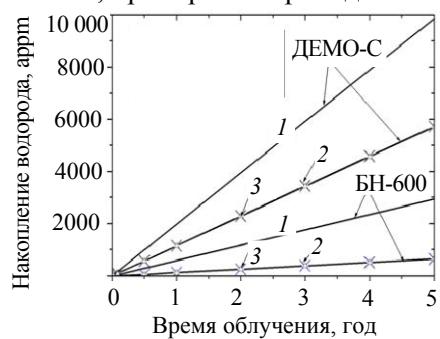


Рис. 2. Радиогенное накопление водорода в стали ЭК-164 (1, —) и её модификациях ЭК-164Mn (2, Δ) и ЭК-164MnW (3, ×) при облучении в реакторах БН-600 и ДЕМО-С

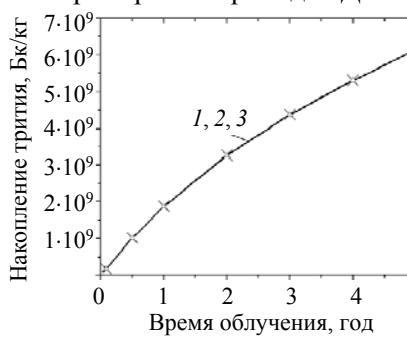


Рис. 3. Радиогенное накопление трития в сталях ЭК-164 (1, —), ЭК-164Mn (2, Δ) и ЭК-164MnW (3, ×) при облучении в реакторе БН-600 в зависимости от времени облучения

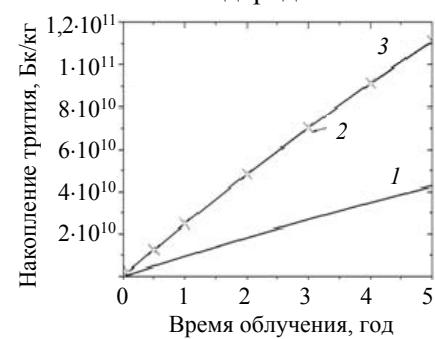


Рис. 4. Радиогенное накопление трития в сталях ЭК-164 (1, —), ЭК-164Mn (2, Δ) и ЭК-164MnW (3, ×) при облучении в реакторе ДЕМО-С в зависимости от времени облучения

термоядерном спектре (ДЕМО-С) существенно выше, чем в спектре деления (БН-600): для стали ЭК-164 выше примерно в 3,4 раза, для сталей ЭК-164Mn и ЭК-164MnW примерно в 9 раз.

Таблица 6. Накопление водорода (аррт) в сталях ЭК-164, ЭК-164Mn и ЭК-164MnW при облучении в реакторах до 5 эффективных лет БН-600 и ДЕМО-С

Время облучения, год	Накопление водорода, аррт					
	БН-600			ДЕМО-С		
	ЭК-164	ЭК-164Mn	ЭК-164MnW	ЭК-164	ЭК-164Mn	ЭК-164MnW
1	583,96	130,79	130,88	1978,14	1146,49	1141,70
3	1759,44	391,66	391,96	5925,46	3441,78	3427,49
5	2931,66	650,76	651,27	9848,14	5732,31	5708,59

ЯДЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И НАКОПЛЕНИЕ ГЕЛИЯ В СТАЛЯХ

Ядерное образование и концентрация (вес. %, аррт) гелия в сталях при их облучении до 5 эффективных лет в нейтронных спектрах реакторов БН-600 и ДЕМО-С показаны на рис. 5 и приведены в табл. 3—5, 7. Накопление гелия в сталях ЭК-164Mn и ЭК-164MnW практически одинаково для нейтронных спектров деления и синтеза, но ниже примерно в 2 раза, чем в стали ЭК-164. Накопление гелия при облучении в сталях ЭК-164, ЭК-164Mn и ЭК-164MnW в термоядерном спектре (ДЕМО-С) существенно выше (примерно в 6—7 раз), чем в спектре деления (БН-600).

Таблица 7. Накопление радиогенного гелия (аррт) в сталях ЭК-164, ЭК-164Mn и ЭК-164MnW при облучении до 5 эффективных лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-С

Время облучения, год	Накопление гелия, аррт					
	БН-600			ДЕМО-С		
	ЭК-164	ЭК-164Mn	ЭК-164MnW	ЭК-164	ЭК-164Mn	ЭК-164MnW
1	47,43	23,72	23,83	255,22	124,10	124,06
3	130,62	57,03	57,28	765,04	373,68	373,54
5	207,95	81,32	81,63	1272,87	624,17	623,92

ЯДЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И НАКОПЛЕНИЕ БОРА И ЕГО ИЗОТОПОВ В СТАЛЯХ

Ядерное образование и накопление бора ($^{10}\text{B} + ^{11}\text{B}$) и его изотопов (^{10}B , ^{11}B) в сталях при их облучении до 5 лет в нейтронных спектрах реакторов БН-600 и ДЕМО-С показаны на рис. 6—7 и приведены в табл. 3—

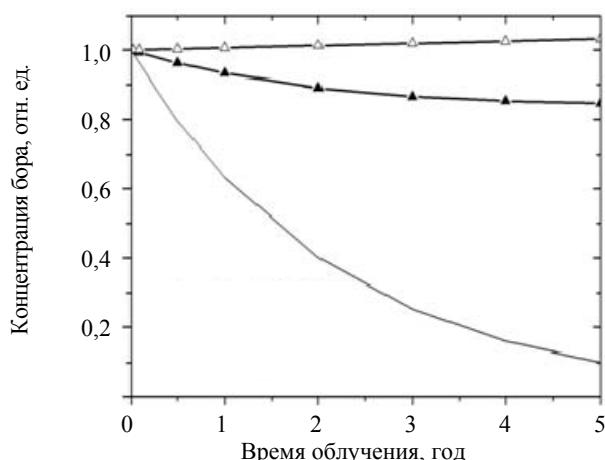


Рис. 6. Временная зависимость изменения концентрации $\text{B}^{(10\text{B} + 11\text{B})}$ (\blacktriangle) и его изотопов ^{10}B (—) и ^{11}B (\triangle) в стали ЭК-164 при облучении в БН-600 от времени облучения

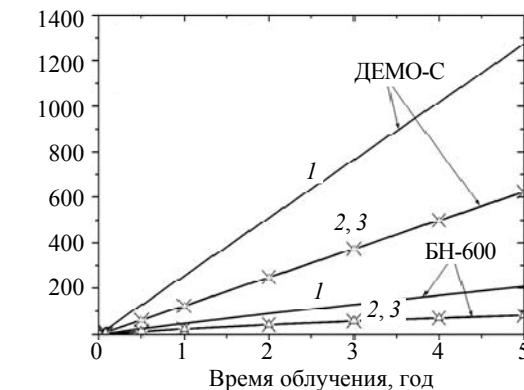


Рис. 5. Радиогенное накопление гелия в сталях ЭК-164 (1, —), ЭК-164Mn (2, Δ) и ЭК-164MnW (3, \times) при облучении в реакторах БН-600 и ДЕМО-С

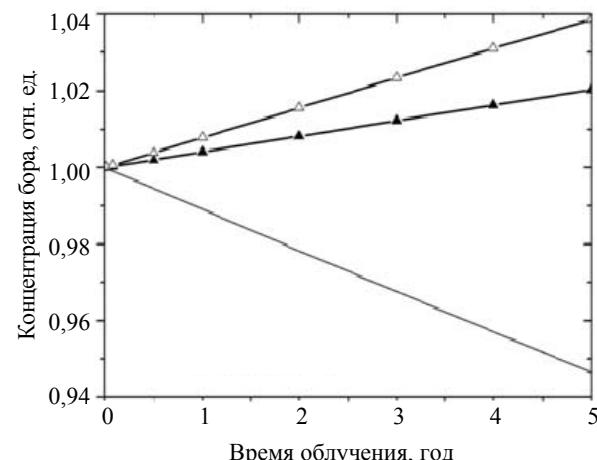


Рис. 7. Временная зависимость изменения концентрации $\text{B}^{(10\text{B} + 11\text{B})}$ (\blacktriangle) и его изотопов ^{10}B (—) и ^{11}B (\triangle) в стали ЭК-164 при облучении в ДЕМО-С от времени облучения

5, 8. Радиогенная концентрация бора ($^{10}\text{B} + ^{11}\text{B}$) во всех сталях одинакова при облучении в нейтронном спектре деления или синтеза, но для спектра синтеза такая концентрация существенно выше (см. табл. 3—5).

Таблица 8. Относительные изменения концентрации бора ($^{10}\text{B} + ^{11}\text{B}$) и его изотопов ^{10}B и ^{11}B в стали ЭК-164 при облучении в реакторах БН-600 и ДЕМО-С

Время облучения, год	БН-600			ДЕМО-С		
	$^{10}\text{B} + ^{11}\text{B}$	^{10}B	^{11}B	$^{10}\text{B} + ^{11}\text{B}$	^{10}B	^{11}B
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,5	0,962	0,796	1,003	1,002	0,995	1,004
1	0,933	0,633	1,007	1,004	0,989	1,008
3	0,868	0,253	1,020	1,012	0,968	1,023
5	0,848	0,101	1,033	1,020	0,947	1,039

При облучении в реакторе БН-600 концентрация бора ($^{10}\text{B} + ^{11}\text{B}$) во всех сталях понижается на 15%, при этом концентрация ^{10}B понижается на 90%, а концентрация ^{11}B увеличивается на 3%. При облучении в реакторе ДЕМО-С концентрация бора ($^{10}\text{B} + ^{11}\text{B}$) во всех сталях увеличивается на 2%, при этом концентрация ^{10}B уменьшается на 5%, а концентрация ^{11}B увеличивается на 4%. Исходная концентрация изотопов в исходном (натуральном) В определяется значением 19,8% для ^{10}B и 80,2% для ^{11}B . Радиогенная наработка гелия в сталях при облучении в термоядерных нейтронных спектрах (ДЕМО-С) практически не зависит от концентрации в них бора.

РАДИОАКТИВНОСТЬ

Ядерное образование и накопление (распад) радионуклидов в сталях при их облучении до 5 эффективных лет в нейтронных спектрах реакторов деления (БН-600) и синтеза (ДЕМО-С) показаны на рис. 8, 9 и приведены в табл. 9. Только для стали ЭК-164MnW спад радиоактивности до уровня 10^{10} Бк/кг (класс 3 радиоактивности) при нейтронном облучении длительностью до 5 эффективных лет в быстрых (БН-600) и термоядерных (ДЕМО-С) реакторах достигается за время менее 100 лет после облучения. Для других сталей (ЭК-164, ЭК-164Mn) времени такого уменьшения радиоактивности более 1000 лет после облучения. Существенный вклад в радиоактивность облучённых сталей вносят долгоживущие изотопы ^{93}Mo , ^{91}Nb и ^{94}Nb (см. табл. 9).

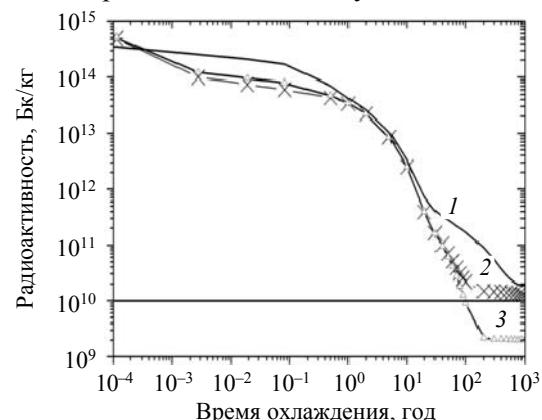


Рис. 8. Временная зависимость спада наведённой радиоактивности (Бк/кг) в сталях ЭК-164 (1, —), ЭК-164Mn (2, ×) и ЭК-164MnW (3, Δ) после их облучения в течение 5 эффективных лет в реакторе БН-600. Горизонтальной линией отмечен уровень радиоактивности 10^{10} Бк/кг

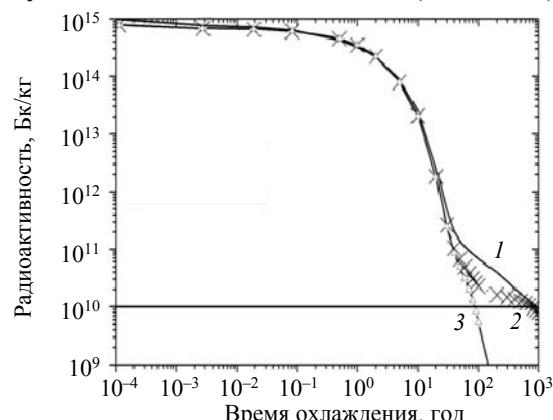


Рис. 9. Временная зависимость спада наведённой радиоактивности в сталях ЭК-164 (1, —), ЭК-164Mn (2, ×) и ЭК-164MnW (3, Δ) после их облучения в течение 5 эффективных лет в реакторе ДЕМО-С. Горизонтальной линией отмечен уровень радиоактивности 10^{10} Бк/кг

Таблица 9. Вклад в остаточную радиоактивность (%) основных изотопов в облучённых сталях ЭК-164, ЭК-164Mn и ЭК-164MnW через 31 год после облучения длительностью 5 эффективных лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-С

БН-600				ДЕМО-С							
ЭК-164		ЭК-164Mn		ЭК-164MnW		ЭК-164		ЭК-164Mn		ЭК-164MnW	
Изотоп	%										
^{63}Ni	56,03	^{93m}Nb	87,02	^{93m}Nb	89,87	^{60}Co	29,40	^{55}Fe	42,87	^{55}Fe	46,72
^{93m}Nb	34,09	^{55}Fe	6,59	^{55}Fe	6,99	^{55}Fe	25,60	^{93m}Nb	41,10	^{93m}Nb	44,07
^{55}Fe	3,07	^{93}Mo	3,25	^{94}Nb	1,24	^{93m}Nb	22,22	^{3}H	8,36	^{3}H	9,09
^{60}Co	2,72	^{94}Nb	1,17	^{60}Co	1,01	^{63}Ni	16,55	^{91}Nb	7,07	^{91}Nb	0,05
^{59}Ni	1,96	^{60}Co	0,95	^{3}H	0,72	^{91}Nb	3,82	^{93}Mo	0,50	^{14}C	0,03
^{93}Mo	1,28	^{3}H	0,68	^{14}C	0,17	^{3}H	1,73	^{14}C	0,03	^{60}Co	0,02

Примечание. Полужирным шрифтом выделены изотопы с временем полураспада более 31 года.

НАВЕДЁННАЯ γ -АКТИВНОСТЬ (МОЩНОСТЬ γ -ДОЗЫ)

Уровни наведённой нейтронным облучением в сталях γ -активности показаны на рис. 10, 11 и приведены в табл. 10. При облучении в нейтронных спектрах быстрых реакторов (БН-600) все стали (ЭК-164, ЭК-164Mn, ЭК-164MnW) не являются малоактивируемыми (время спада мощности γ -дозы до уровня 10 мЗв/ч более 1000 лет даже после очень коротких длительностей нейтронного облучения). В этом случае (быстрые реакторы) повторное использование (рециклирование) облучённых сталей возможно при времени выдержки более 1000 лет после облучения. Существенный вклад в мощность γ -излучения облучённых сталей вносят долгоживущие изотопы ^{94}Nb , ^{91}Nb и ^{93}Mo . При облучении в нейтронных спектрах термоядерных реакторов (ДЕМО-С) только сталь ЭК-164MnW относится к классу малоактивированных КМ. Повторное использование (рециклирование) облучённой стали ЭК-164MnW возможно при времени выдержки менее 50 лет после длительного (до 5 эффективных лет) нейтронного облучения в термоядерных реакторах (ДЕМО-С).

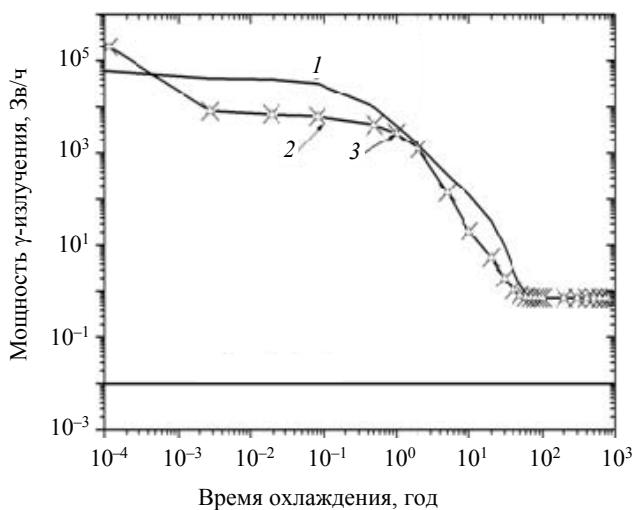


Рис. 10. Временная зависимость спада наведённой γ -активности (Зв/ч) в сталях ЭК-164 (1, —), ЭК-164Mn (2, \times) и ЭК-164MnW (3, Δ) после облучения в течение 5 эффективных лет в реакторе БН-600. Горизонтальной линией отмечен уровень радиоактивности 10 мЗв/ч

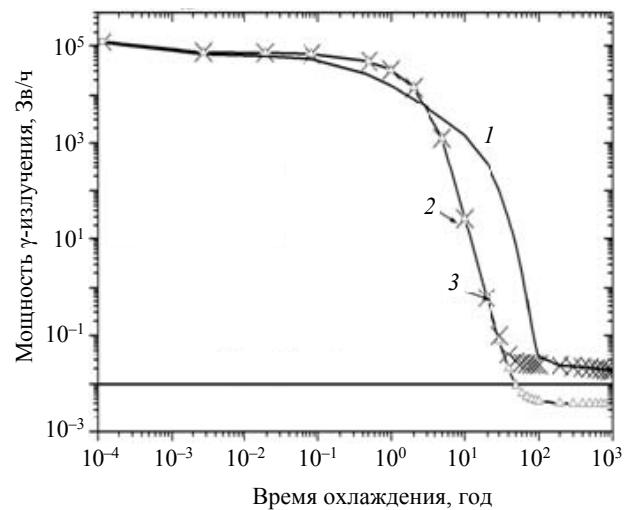


Рис. 11. Временная зависимость спада наведённой γ -активности (Зв/ч) в сталях ЭК-164 (1, —), ЭК-164Mn (2, \times) и ЭК-164MnW (3, Δ) после облучения в течение 5 эффективных лет в реакторе ДЕМО-С. Горизонтальной линией отмечен уровень радиоактивности 10 мЗв/ч

Стали ЭК-164 и ЭК-164Mn удовлетворяют требованиям малой активируемости только при очень малой длительности нейтронного облучения (менее 1 эффективного года) в термоядерных реакторах (ДЕМО-С).

Таблица 10. Вклад в мощность γ -излучения (%) основных изотопов в облучённых сталях ЭК-164, ЭК-164Mn и ЭК-164MnW через 31 год после облучения длительностью 5 эффективных лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-С

БН-600						ДЕМО-С					
ЭК-164		ЭК-164Mn		ЭК-164MnW		ЭК-164		ЭК-164Mn		ЭК-164MnW	
Изотоп	%	Изотоп	%	Изотоп	%	Изотоп	%	Изотоп	%	Изотоп	%
^{60}Co	61,80	^{93m}Nb	54,39	^{93m}Nb	60,57	^{60}Co	99,94	^{60}Co	37,28	^{60}Co	48,00
^{93m}Nb	25,07	^{60}Co	18,35	^{60}Co	20,98	^{55}Fe	0,03	^{55}Fe	29,95	^{55}Fe	38,58
^{94}Nb	7,00	^{94}Nb	15,18	^{94}Nb	17,35	^{94}Nb	0,02	^{94}Nb	16,26	^{93m}Nb	6,13
^{93}Mo	5,08	^{93}Mo	11,02	^{55}Fe	1,10	^{91}Nb	0,01	^{91}Nb	10,92	^{94}Nb	5,46
^{55}Fe	0,53	^{55}Fe	0,96	—	—	—	—	^{93m}Nb	4,97	^{178m}Hf	0,75
^{59}Ni	0,48	^{91}Nb	0,10	—	—	—	—	^{26}Al	0,29	^{178m}Hf	0,52

Примечание. Полужирным шрифтом выделены изотопы с временем полураспада более 31 года.

ЯДЕРНОЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ В СТАЛЯХ

Уровни ядерного энерговыделения в сталях к концу облучения длительностью 5 эффективных лет в нейтронных спектрах реакторов БН-600 и ДЕМО-С и после облучения (до 1000 лет) показаны на рис. 12, 13 и приведены в табл. 11.

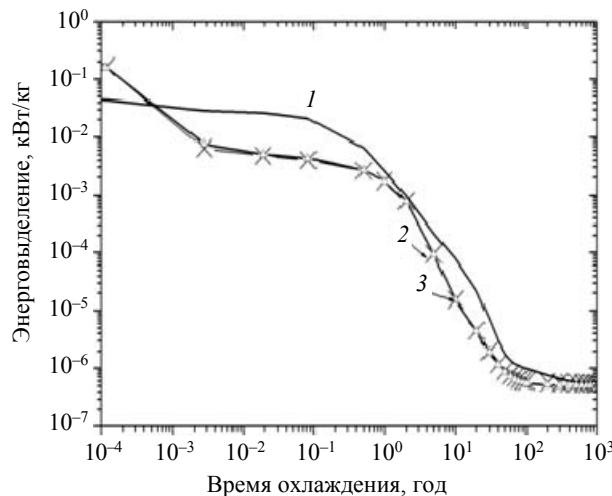


Рис. 12. Временная зависимость спада остаточного энерговыделения (кВт/кг) в сталях ЭК-164 (1, —), ЭК-164Mn (2, ×) и ЭК-164MnW (3, Δ) после облучения в течение 5 эффективных лет в реакторе БН-600

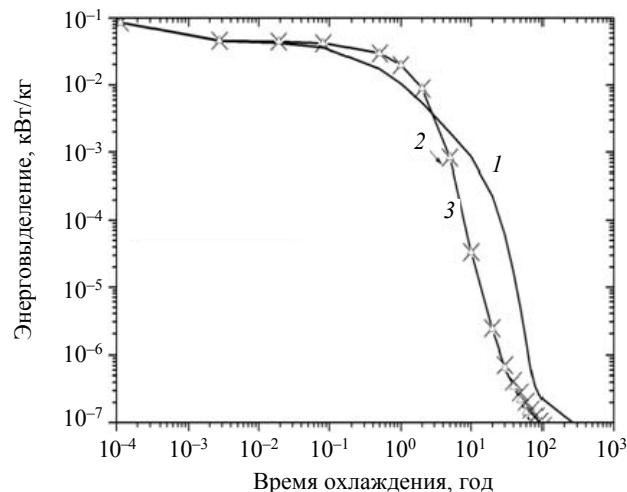


Рис. 13. Временная зависимость спада остаточного энерговыделения для сталей ЭК-164 (1, —), ЭК-164Mn (2, ×) и ЭК-164MnW (3, Δ) после облучения в течение 5 эффективных лет в реакторе ДЕМО-С

Уровни энерговыделения в хромомарганцевых сталях (ЭК-164Mn, ЭК-164MnW) практически одинаковы, но меньше, чем в хромоникелевой стали (ЭК-164). Уровень энерговыделения $10 \text{ Вт}/\text{м}^3$ в облученных сталях достигается после облучения в реакторе БН-600 через 50 лет для сталей ЭК-164Mn и ЭК-164MnW и через 90 лет для стали ЭК-164, а после облучения в реакторе ДЕМО-С через 25 лет для хромомарганцевых сталей (ЭК-164Mn, ЭК-164MnW) и через 60 лет для хромоникелевой стали (ЭК-164). Заметный вклад в энерговыделение дают долгоживущие изотопы ^{63}Ni , ^{94}Nb , ^{91}Nb , ^{93}Mo .

Таблица 11. Вклад в энерговыделение (%) основных изотопов в облученных сталях ЭК-164, ЭК-164Mn и ЭК-164MnW через 31 год после облучения длительностью 5 эффективных лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-С

БН-600						ДЕМО-С					
ЭК-164		ЭК-164Mn		ЭК-164MnW		ЭК-164		ЭК-164Mn		ЭК-164MnW	
Изотоп	%										
^{60}Co	70,98	^{93m}Nb	36,82	^{93m}Nb	36,54	^{60}Co	98,42	^{93m}Nb	71,29	^{93m}Nb	77,93
^{93m}Nb	10,59	^{60}Co	33,78	^{60}Co	34,42	^{93m}Nb	0,88	^{55}Fe	13,63	^{55}Fe	15,14
^{63}Ni	9,81	^{94}Nb	27,84	^{94}Nb	28,35	^{63}Ni	0,37	^{91}Nb	7,32	^{60}Co	3,16
^{94}Nb	8,01	^{93}Mo	0,70	^{55}Fe	0,52	^{55}Fe	0,19	^{60}Co	2,84	^3H	2,97
^{93}Mo	0,20	^{55}Fe	0,51	^{14}C	0,11	^{91}Nb	0,09	^3H	2,68	^{94}Nb	0,44
^{55}Fe	0,17	^{99}Tc	0,17	^3H	0,05	^{94}Nb	0,02	^{94}Nb	1,52	^{14}C	0,10

Примечание. Полужирным шрифтом выделены изотопы с временем полураспада более 31 года.

ВЫВОДЫ

На базе расчётного комплекса ACDAM-2.0 проведены исследования ядерно-физических свойств austenитной хромоникелевой стали ЭК-164 ($\text{Fe}-16\text{Cr}-19\text{Ni}-2\text{Mo}-2\text{Mn}-\text{Nb}-\text{Ti}-\text{B}$) и её хромомарганцевых модификаций ЭК-164Mn ($\text{Fe}-16\text{Cr}-20\text{Mn}-2\text{Mo}-\text{Nb}-\text{Ti}-\text{B}$) и ЭК-164MnW ($\text{Fe}-16\text{Cr}-20\text{Mn}-2\text{W}-\text{Nb}-\text{Ti}-\text{B}$) при их облучении (до 5 эффективных лет) в типичных нейтронных полях быстрых (БН-600) и термоядерных (ДЕМО-С) реакторов и после реакторных облучений (до 1000 лет).

Дан сравнительный анализ для каждой стали и каждого нейтронного спектра. Результаты представлены в виде рисунков и таблиц. Полученные результаты дают целостную картину динамики ядерно-

физических характеристик сталей при длительном нейтронном облучении в ядерных реакторах деления (быстрых) и синтеза и длительной выдержки (ядерное охлаждение). Полученные результаты необходимы при разработке аустенитных хромоникелевых и хромомарганцевых сталей для их применения как КМ для быстрых и термоядерных реакторов.

Определены радиогенные изменения элементных составов сталей, включая концентрацию Н, Не и В. Радиогенная концентрация исходных и новых элементов существенно зависит от исходных элементных составов сталей и нейтронных спектров облучения. Радиогенная концентрация Н и Не существенно выше при облучении в нейтронном спектре реактора синтеза, чем в реакторе деления (быстрым).

Накопление водорода в сталях ЭК-164Mn и ЭК-164MnW практически одинаково для нейтронных спектров деления и синтеза и меньше, чем в стали ЭК-164, примерно в 4 раза для БН-600 и примерно в 2 раза для ДЕМО-С. Накопление водорода в сталях в термоядерном спектре (ДЕМО-С) существенно выше, чем в спектре деления (БН-600): для стали ЭК-164 выше примерно в 3—4 раза, для сталей ЭК-164Mn и ЭК-164MnW примерно в 9 раз.

Наработка гелия при облучении в нейтронных спектрах деления и синтеза практически одинакова для сталей ЭК-164Mn и ЭК-164MnW и меньше примерно в 2 раза, чем для стали ЭК-164. Наработка гелия во всех сталях при облучении в термоядерных нейтронных спектрах (ДЕМО-С) существенно (в 6—7 раз) превышает соответствующие значения при облучении в нейтронных спектрах быстрых реакторов (БН-600).

Определены уровни наведённой радиоактивности (Бк/кг), мощность γ -излучения (Зв/ч) и энерговыделения (Вт/кг) к концу облучения длительностью 5 эффективных лет в реакторах деления (БН-600) и синтеза (ДЕМО-С) и их уменьшение (спад) после облучения длительностью 1000 лет.

Все аустенитные стали (ЭК-164, ЭК-164Mn, ЭК-164MnW) не являются малоактивируемыми при облучении в быстрых реакторах (БН-600) длительностью более 1 года. В этом случае повторное использование (рециклирование) облучённых сталей возможно только при времени выдержки более 1000 лет после облучения.

Только сталь ЭК-164MnW относится к классу малоактивируемых при облучении в термоядерных нейтронных спектрах (ДЕМО-С). В этом случае переработка (рециклирование) стали ЭК-164MnW после облучения длительностью 5 эффективных лет возможна при времени выдержки менее 50 лет после облучения.

Только для стали ЭК-164MnW спад радиоактивности до уровня 10^{10} Бк/кг (3-й класс радиоактивности) после облучения длительностью 5 эффективных лет в нейтронных спектрах БН-600 и ДЕМО-С достигается при времени выдержки менее 100 лет после облучения.

Указаны основные изотопы, определяющие радиоактивность, мощность γ -дозы и энерговыделения во всех сталях через 31 год после их облучения в нейтронных спектрах быстрых (БН-600) и термоядерных (ДЕМО-С) реакторов.

Радиоактивность стали ЭК-164MnW, малоактивируемой при облучении в термоядерном нейтронном спектре, в значительной мере определяется долгоживущими изотопами ^{94}Nb , ^{91}Nb и ^{14}C . Перспективным является дальнейшая модификация элементного состава этой стали с заменой в её элементном составе Nb на Ta или V (сталь ЭК-164MnWTa(V)). Такая модификация стали, дополненная также уменьшением концентрации азота, существенно уменьшит её радиоактивность с выполнением критериев малой активируемости при облучении в нейтронных спектрах реакторов деления и синтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митрофанова Н.М., Чурюмова Т.А. Сталь ЭК164 — конструкционный материал оболочек твэлов реакторов БН. — ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2019, вып. 2(98), с. 100—109.
2. Барсанова С.В., Козлов А.В., Шило О.Б. Влияние облучения быстрыми нейтронами на изменения механических свойств аустенитных сталей ЭК-164 и ЧС-68. — ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2018, вып. 5(96), с. 4—12.
3. Бобков В.П., Блохин А.И., Румянцев В.Н., Соловьев В.А., Тарасиков В.П. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий. Т. 5. Свойства реакторных сталей и сплавов. Под общей редакцией доктора технических наук, профессора В.М. Поплавского. — М.: ИздАТ, 2014. 584 с.
4. Блохин Д.А., Чернов В.М., Митрофанова Н.М., Целищев А.В., Блохин А.И. Ядерно-физические свойства аустенитных сталей ЧС-68 и ЭК-164 в условиях длительного нейтронного облучения в реакторе БН-600. — ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2015, вып. 3(82), с. 22—37.

5. Никитина А.А., Агеев В.С., Леонтьева-Смирнова М.В., Митрофанова Н.М., Науменко И.А., Целищев А.В., Чернов В.М. Развитие работ по конструкционным материалам активных зон быстрых реакторов. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 5, с. 292—300.
6. Соловьёв В.А., Белозеров В.И., Орлова Е.А., Алексеев В.В. Исследования процессов коррозии в жидким металлах. — М.: НИЯУ МИФИ, 2014. 336 с.
7. Sokolov Yu.A. Overview of the Russian Demo plant study. — Fusion Engineering and Design, 1995, vol. 29, p. 18—27.
8. Проект ДЕМО-С. Основы концепции демонстративного термоядерного реактора ДЕМО-С. Ч. V. Составители А.А. Борисов, Г.Е. Шаталов. — М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2001. 302 с.
9. Азизов Э.А., Гладуш Г.Г., Минеев А.Б. УТС с магнитным удержанием и разработка гибридного реактора синтез-деление на основе токамака. — М.: Тровант, 2016. 320 с.
10. Гольдштейн М.И., Грачёв С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. — М.: Металлургия, 1985. 468 с.
11. Cole J.I., Gelles D.S., Hoyt J.J. Phase stability of reduced — activation Mn-stabilized austenitic steels. — J. Nucl. Mater., 1992, vol. 191—194, p. 657—661.
12. Piatti G., Boerman D., Dos Santos Marques F. Microstructural and mechanical characterization of new low-activation austenitic steels. — Ibid., p. 662—667.
13. Abe F., Noda T., Araki H., Nakazawa S. High temperature strength of simple and solute-modified 10Cr-30Mn austenitic steels. — Ibid., p. 668—671.
14. Hosoi Y., Shimode Y., Abraham M., Kutsuna M., Miyahara K. Influence of tungsten, carbon and nitrogen to toughness and weldability of low activation austenitic high manganese stainless. — Ibid., p. 686—690.
15. Shamardin V.K., Bulanova T.M., Neustroyev V.S., Ostrovsky Z.E., Kosenkov V.M. Study of Fe—12Cr—20Mn—W—C austenitic steels irradiated in the SM-2 reactor. — Ibid., p. 706—711.
16. Ivanov L.I., Bystrov L.N., Platov Yu.M., Lazorenko V.M., Bondarenko G.G., Kasjanov O.M., Ustinovshchikov V.M. Electron irradiation induced structure-phase transformation in low radioactivation chromium-manganese steel. — Ibid., p. 733—736.
17. Ohnuki S., Takahashi H., Kinoshita H., Moshizuki S. Mechanical properties of low-activated Fe-Cr-Mn alloys neutron-irradiated at lower temperature. — Ibid., 1994, vol. 212—215, p. 755—759.
18. Abe F., Garner F.A., Kayano H. Effect of carbon on irradiation hardening of reduced-activation 10Cr—30Mn austenitic steels. — Ibid., p. 760—765.
19. Miyahara K., Dong-Su Bae, Shimoide Y. Improvement of high temperature strength and low toughness of high manganese-chromium austenitic steels. — Ibid., p. 766—771.
20. Shamardin V.K., Bulanova T.M., Golovanov V.N., Neustroyev V.S., Povstyanko A.V., Ostrovsky Z.E. Change in the properties of Fe—Cr—Ni and Fe—Cr—Mn austenitic steels under mixed and fast neutron irradiation. — Ibid., 1996, vol. 233—237, p. 162—168.
21. Klueh R.L. Tensile behavior of irradiated manganese-stabilized stainless steels. — Ibid., p. 197—201.
22. Lyakishev N.P., Dyomina E.V., Ivanov L.I., Kolotov V.P., Kashin V.I., Platov Yu.M., Savvateev N.N., Vinogradova N.A. Prospect of development and manufacturing of low activation metallic materials for fusion reactor. — Ibid., p. 1516—1522.
23. Takahashi H., Shindo Y., Kinoshita H., Shibayama T., Ishiyama S., Fukaya K., Eto M., Kusuhashi M., Hatakeyama T., Sato I. Mechanical properties and damage behavior of non-magnetic high manganese austenitic steels. — Ibid., 1998, vol. 258—263, p. 1644—1650.
24. Suzuki Y., Saida T., Kudough F. Low activation austenitic Mn-steel for in-vessel fusion materials. — Ibid., p. 1687—1693.
25. Постановление Правительства РФ «О критериях отнесения твёрдых, жидким и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» № 1069. — Москва. Правительство РФ, 2012. 15 с.
26. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. С изменениями от 16 сентября 2013 г.
27. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.2523-09). Критерии приемлемости РАО для захоронения. НП-093-14.
28. Кащеев В.А. Обращение с конструкционными материалами оболочек твэлов и ТВС при переработке ОЯТ реакторной установки БРЕСТ-ОД-300. — ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2015, вып. 3(82), с. 71—79.
29. Хала И., Навратил Дж.Д. Радиоактивность, ионизирующее излучение и ядерная энергетика. Пер. с англ. — М.: Изд-во ЛКИ, 2013. 432 с.
30. Hancock D., Homfray D., Porton M., Todd I., Wynne B. Refractory metals as structural materials for fusion high heat flux components. — J. Nucl. Mater., 2018, vol. 512, p. 169—183.
31. Блохин А.И., Дёмин Н.А., Манохин В.Н., Сипачев И.В., Блохин Д.А., Чернов В.М. Расчётный комплекс ACDAM-2.0 для исследований ядерных физических свойств материалов в условиях нейтронного облучения. — ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2015, вып. 3(82), с. 81—109.
32. Блохин А.И., Дёмин Н.А., Манохин В.Н., Сипачев И.В., Блохин Д.А., Чернов В.М. Расчётный комплекс ACDAM для исследований ядерных физических свойств материалов в условиях длительного нейтронного облучения. — Перспективные материалы, 2010, № 2, с. 46—55.
33. Блохин А.И., Дёмин Н.А., Чернов В.М. Нейтронные источники для исследования конструкционных материалов. — ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2006, вып. 1(66), с. 70.



Анатолий Иванович Блохин, в.н.с., к.ф.-м.н., доцент; ИБРАЭ РАН, 115191 Москва, ул. Большая Тульская 52, Россия
bai@ibrae.ac.ru



Вячеслав Михайлович Чернов, г.н.с., д.ф.-м.н., профессор; АО «ВНИИНМ», 123098 Москва, ул. Рогова 5а, Россия; профессор; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия
VMChernov@bochvar.ru

Статья поступила в редакцию 28 декабря 2019 г.
После доработки 15 июня 2020 г.
Принята к публикации 5 августа 2020 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 3, с. 11—23.