

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ И ЧЕХЛОВ ТВС РЕАКТОРА БН-600

Н.М. Митрофанова, А.В. Целищев, В.С. Агеев, Ю.П. Буданов,
А.Г. Иолтуховский, М.В. Леонтьева-Смирнова, Ф.Г. Решетников,
Ю.К. Бибилашвили, И.А. Шкабура, Ю.А. Иванов
ОАО «ВНИИИИМ», г. Москва



Рассмотрено состояние разработки радиационно стойких конструкционных материалов оболочек твэлов и чехлов ТВС для повышения выгорания топлива в реакторах БН. Приведены данные по радиационной стойкости сталей аустенитного и ферритно-мартенситного классов в обоснование достижения повреждающих доз до 110–180 сна. Показано, что разработка радиационно стойких материалов проводится на основе реализации структурных факторов, влияющих на функциональные характеристики материалов.

Ключевые слова: аустенитная сталь, выгорание, конструкционный материал, мартенситно-ферритная сталь, оболочка твэла, формоизменение.

Key words: austenitic steel, burnup, structural material, martensitic-ferritic steel, fuel cladding, distortion.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с энергетической стратегией России и федеральной целевой программой «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 гг. и на перспективу до 2020 г.» предусматривается дальнейшее развитие быстрых натриевых реакторов в рамках разработки и создания новой технологической платформы ядерной энергетики с замкнутым топливным циклом на основе реакторов четвертого поколения на быстрых нейтронах [1, 2].

Россия является мировым лидером в освоении технологий БР (быстрых реакторов). В течение 30-ти лет на БАЭС успешно работает единственный на сегодня в мире опытно-промышленный быстрый реактор БН-600 с натриевым теплоносителем мощностью 600 МВт(э) [3].

На основании этого уникального опыта строится прототипный быстрый реактор БН-800 мощностью 880 МВт(э) с плановым пуском в 2014 г. и проектируется коммерческий быстрый реактор БН-1200 мощностью 1200 МВт(э) [4].

Успешная работа и развитие быстрых реакторов определяются в значительной степени функциональными характеристиками конструкционных материалов при высоких повреждающих дозах. Наиболее важными характеристиками являются

© *Н.М. Митрофанова, А.В. Целищев, В.С. Агеев, Ю.П. Буданов, А.Г. Иолтуховский, М.В. Леонтьева-Смирнова, Ф.Г. Решетников, Ю.К. Бибилашвили, И.А. Шкабура, Ю.А. Иванов, 2011*

распухание, ползучесть, определяющие формоизменение изделия, и деградация механических свойств после облучения.

СТАЛИ ДЛЯ ЧЕХЛОВ ТВС

Анализ эксплуатации ТВС в реакторе БН-350 с чехлом из аустенитной стали 08X16H11M3 в МТО-состоянии и последующие первичные исследования показали, что уже при умеренных выгораниях и небольших повреждающих дозах (до 50 сна) происходит увеличение размера шестигранника «под ключ», превышающее зазоры между сборками, что ограничивает выгорание топлива в пределах 5–7%.

В результате предварительных исследований применительно к материалам для чехлов ТВС наметились два основных направления [5]:

- разработка и исследование аустенитных сталей с рациональным легированием их элементами Ti, Si, B, P, Mo, Nb в сочетании с холоднодеформированной на 20% обработкой (08X16H11M3T, ЭП172, ЭИ448) – испытаны до 70 сна;
- разработка и исследование высокопрочных хромистых сталей (9–13% хрома) с высоким сопротивлением распуханию и радиационной ползучести (ЭП450, 05X12H2M, ЭП823) – испытаны до 60–108 сна.

Кардинальное решение проблемы малого формоизменения чехлов ТВС было найдено при разработке сталей ферритно-мартенситного класса. Представительные послереакторные исследования показали, что сталь ЭП450 (табл. 1) обеспечивает малое формоизменение чехлов ТВС: уровень деформации по всей длине шестигранной трубы находится в пределах 1% и слабо зависит от повреждающей дозы, по крайней мере, до 100 сна [6]. Модуль радиационной ползучести для стали ЭП450 не более $0,4 \times 10^{-6}$ (МПа·смещ./ат)⁻¹, распухание при повреждающей дозе 160 сна не превышает 0,4% [7]. Механические свойства после облучения не лимитируют использование стали ЭП450 в качестве материала чехлов ТВС реактора БН-600 [6–7].

Результаты исследований и опыт эксплуатации в реакторах БОР-60, БН-350 и БН-600, а также консервативные прогнозные оценки с учетом разброса данных, проведенные на БАЭС, показали, что характеристики распухания и радиационной ползучести стали ЭП450 позволяют достичь повреждающих доз порядка 140 сна и выгораний топлива порядка 19% т.а. в реакторе БН-600 и 15% т.а. в реакторе БН-800.

Сталь ЭП450 принята в качестве материала чехлов ТВС коммерческого реактора БН-1200 [8].

СТАЛИ ДЛЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ

Аустенитные хромоникелевые стали

К началу работ над техническими проектами активных зон первых отечественных реакторов в промышленности была широко освоена только аустенитная хромоникелевая сталь 12X18H9T. Для твэлов первого промышленного реактора БН-350 была разработана более жаропрочная коррозионно-стойкая аустенитная хромоникелевая сталь ЭИ847, в которой было изменено соотношение Cr/Ni (16:15 вместо 18:9) и введен карбидообразующий элемент ниобий. В дальнейшем была разработана модификация стали ЭИ847 – сталь ЭП172 (введен бор в количестве 0,003 – 0,008 масс.%) [5,9]. На основе стали ЭИ847 разработана еще одна сталь – ЧС68, легированная, помимо бора, кремнием и титаном [9, 14]. Новая сталь ЭК164 имеет более высокое содержание никеля и комплексно легирована титаном, ниобием, ванадием, бором, фосфором и церием (табл. 2) [10].

В Японии с целью достижения повреждающих доз 100–115 сна. разработана сталь PNC 1520, в которой также повышено ~ до 20% масс. содержание никеля,

Таблица 1

Химический состав ферритно-мартенситных нержавеющей сталей [7]

Сталь	Содержание элементов, % масс.												
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	V	B	W	Ti	Ta	
ЭП450	0.10– 0.15	<0.6	<0.6	12.0– 14.0	<0.3	1.2–2.8	0.25– 0.55	0.1–0.3	0.010 Расчет	–	–	–	
ЭК181	0.10– 0.20	0.3–0.5	0.5–0.8	10.0– 12.0	<0.1	<0.01	<0.01	0.2–1.0	0.003– 0.006	1.0–2.0	0.03–0.3	0.05– 0.2	
ЧС139	0.18– 0.20	0.2–0.3	0.5–0.8	11.0– 12.5	0.5–0.8	0.4–0.6	0.2– 0.3	0.2–0.3	0.003– 0.006	1.0–1.5	0.03–0.3	–	

Таблица 2

Химический состав аустенитных нержавеющей сталей [7]

Сталь	Содержание элементов, % масс.												
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	V	B	P	Ce	
ЭИ847	0.04– 0.06	0.4	0.4–0.8	15.0– 16.0	15.0– 16.0	2.7–3.2	0.9	–	–	–	0.02	–	
ЭП172	0.04– 0.07	0.6	0.5–0.9	15.0– 16.5	14.5– 16.0	2.5–3.0	0.35– 0.90	–	–	0.003– 0.008	0.02	–	
ЭП172У	0.04– 0.07	0.3–0.6	0.5–0.9	15.0– 16.5	14.5– 16.0	2.5–3.0	0.35– 0.90	–	–	0.003– 0.008	0.02	0.15 Расчет	
ЧС68	0.05– 0.08	0.3–0.6	1.3–2.0	15.5– 17.0	14.0– 15.5	1.9–2.5	–	0.2–0.5	0.1–0.3	0.002– 0.005	0.02	–	
ЭК164	0.05– 0.09	0.3–0.6	1.5–2.0	15.0– 16.5	18.0– 19.5	2.0–2.5	0.1–0.4	0.25– 0.45	0.15 Расчет	0.001– 0.005	0.010– 0.025	0.15 Расчет	

использовано легирование двумя карбидообразующими элементами (Ti + Nb), а также бором и фосфором [11]. В рамках Европейской программы для аналогичных целей разработана сталь 16-25Ti.Nb.V, в которой содержание никеля повышено до 25% масс., мультстабилизированных титаном, ниобием и ванадием [11]. Мировой опыт показывает, что аустенитные стали обеспечивают работоспособность твэлов до повреждающих доз 110–120 сна [11].

Исследования, проведенные на оболочечных трубах из аустенитных хромоникелевых сталей ЭИ847, ЭП172 и ЧС68 (табл. 1) в холоднотемпературном состоянии как до облучения, так и на облученных оболочках твэлов в реакторе БН-600 до повреждающих доз 84–87 сна, показали [10, 12, 13], что основными факторами, сдерживающими распухание, являются

- повышение стабильности твердого раствора, фазовой стабильности выделяющихся частиц МС и стабильности дислокационной структуры;
- увеличение содержания бора в твердом растворе;
- холодная деформация на 20 – 25%, формирующая исходную ячеистую структуру с плотностью дислокаций $\rho = 10^{15} \text{ м}^{-2}$ и наличием микродвойников деформации.

Это позволило определить приоритетные направления разработок аустенитных сталей с низким распуханием и приемлемыми механическими свойствами при дозах 90–110 сна с точки зрения структурно-фазовой стабильности, а именно:

- повышение стабильности карбидов МС под облучением до более высоких доз, что приводит к задержке выделения радиационно-индуцированной G-фазы и, как следствие, сдвигает инкубационный период распухания к более высоким дозам;
- формирование в структуре в процессе облучения новых дисперсных фаз, обладающих более высокой фазовой стабильностью по сравнению с карбидами МС, например, фосфидов M_2P ;
- формирование в материале оболочек в процессе облучения такой дислокационной структуры, которая способна трансформироваться с образованием дислокационных петель с дефектом упаковки в широком диапазоне температур и нейтронных доз.

Разработка радиационно стойких сталей ведется с учетом следующих структурных факторов, контролирующих распухание [12]:

- твердорастворный фактор, определяемый концентрацией в твердом растворе матрицы легирующих (прежде всего, Ni) и примесных элементов (C, Nb, Ti, B, Si, PЗМ и др.), которые формируют комплексы «точечный дефект-примесь» с измененными характеристиками диффузии;
- фактор фазовой нестабильности, проявляющийся в образовании частиц выделений, природа, состав, объемная доля, морфология и локализация которых во многом определяют процесс зарождения и роста пор;
- дислокационный фактор, когда холодная деформация (15–25%) увеличивает плотность дислокационных стоков точечных дефектов и позволяет существенно задержать начало интенсивного образования пор.

Данные послереакторных исследований показали, что реализация подхода, основанного на использовании указанных факторов, позволила существенно снизить распухание отечественных аустенитных хромоникелевых сталей [12, 13].

Сталь ЧС68. На сегодня достижение выгорания топлива 11,2% т.а. и повреждающей дозы 82 сна в активной зоне О1М2 реактора БН-600 надежно обеспечено применением материалов оболочек твэлов из стали ЧС68 х.д. и чехла из стали ЭП450 [7]. Эти же материалы приняты для оболочек твэлов первой загрузки (сталь ЧС68 х.д.) и чехлов ТВС (сталь ЭП450) строящегося реактора БН-800.

Анализ данных по распуханию стали ЧС68 х.д. за период эксплуатации с 1987 г. по настоящее время показал, что можно выделить две группы результатов профилометрии оболочек твэлов на разных стадиях промышленного освоения, полученные на экспериментальных и штатных ТВС, отличающиеся между собой примерно в 1,5 раза [9]. На основании исследований для улучшения качества труб в существующую технологию изготовления ОАО «МСЗ» решено ввести высокотемпературный диффузионный отжиг, а также оптимизировать режим аустенизирующего отжига на промежуточных и предготовом размерах, применить короткооправочное волочение [12]. Это приведет к повышению длительной прочности в дореакторных условиях и уменьшению примерно в 1,5 раза величины формоизменения оболочек твэлов из стали ЧС68 х.д. [12, 13].

В настоящее время проводятся дальнейшие работы по усовершенствованию металлургической технологии, химического состава стали ЧС68 в части оптимизации содержания Si и V, а также структуры и свойств оболочек за счет применения режимов скоростного нагрева при изготовлении особотонкостенных труб.

На реакторе БН-600 с использованием реперных и штатных ТВС продолжается обоснование работоспособности стали ЧС68 х.д. до повреждающей дозы 92 сна.

Сталь ЭК164. Для достижения повреждающих доз не менее 110 сна разработана сталь ЭК164, которая является реализацией ресурса хромоникелевых сталей аустенитного класса на базовой основе 16Cr-15Ni с точки зрения повышения их структурно-фазовой и радиационной стабильности для поэтапного повышения выгорания топлива до ~ 15% т.а. в реакторе БН-600.

При разработке стали ЭК164 реализованы структурные подходы повышения радиационной стойкости известных отечественных и зарубежных оболочечных материалов аустенитного класса (стали ЭИ847, ЭП172, ЧС68, AISI 316М, 15-15Ti, DIN 1.4970, 16-25Ti.Nb.V, ПНС 1520), при этом использованы одновременно несколько способов [7, 11]:

- повышение содержания никеля до 19,5%;
- комплексное легирование тремя карбидообразующими элементами (Ti, Nb, V) в количестве, превышающем необходимое для образования карбидов MC;
- легирование горофильными элементами (бором, фосфором, редко-земельными металлами), причем содержание фосфора должно обеспечивать выделение в стали в процессе эксплуатации фосфидов M_2P ;
- повышение и регламентация содержания кремния (0,3 – 0,6 % масс.);
- двойной вакуумный переплав (ВИ+ВДП), обеспечивающий низкое содержание примесей, и охлаждение гелием слитков при кристаллизации после ВДП;
- гомогенизация слитка (высокотемпературная термообработка при 1200°C в течение 8 ч – ВТТО) с последующей ковкой на размер трубной заготовки;
- создание холоднодеформированного состояния на готовом размере холодной прокаткой труб (ХПТР) или короткооправочным волочением (КОВ).

Прототипом стали ЭК164-ИД является сталь ЭП172, имеющая большой объем испытаний (~ 80 ЭТВС) в реакторе БН-600, причем на пять ЭТВС без разгерметизации достигнуты повреждающие дозы 84–87 сна, что соответствует выгораниям топлива 11,0–11,6 % т.а. [13].

За основу была принята усовершенствованная технология выплавки стали ЭП172, включающая в себя охлаждение гелием слитков вакуумно-дугового переплава при кристаллизации и дальнейшую высокотемпературную термическую обработку (ВТТО) на слитке. Это приводит к повышению однородности структуры, более равномерному распределению бора (рис. 1), увеличению его содержания в твердом растворе с 18 до 46 ppm [14, 15]. Увеличение содержания бора в твер-

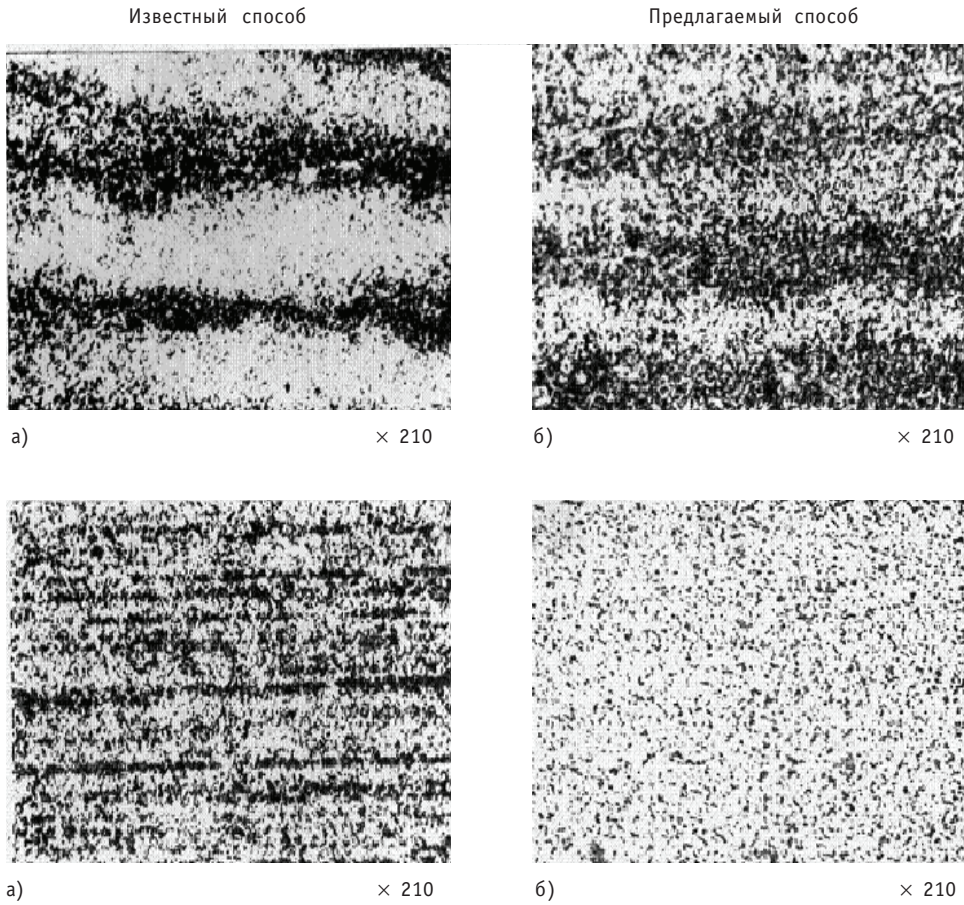


Рис. 1. Распределение бора в структуре стали ЭП172: в передельной трубе 89×8 мм (а) и готовой трубе 6,9×0,4 мм (б) по стандартной технологии (известный способ); в передельной трубе 89×8 мм (а) и готовой трубе 6,9×0,4 мм (б) по усовершенствованной технологии (предлагаемый способ)

дом растворе приводит к повышению структурно-фазовой стабильности, длительной прочности, а также снижению распухания и повышению деформационной способности после облучения в реакторе БН-350 повреждающей дозой 60 сна (рис. 2) [15].

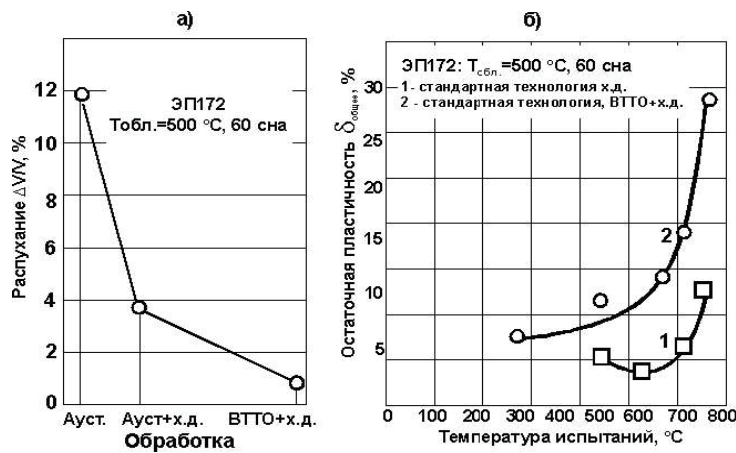


Рис. 2. Влияние высокотемпературной обработки (ВТТО) на распухание (а) и величину остаточной пластичности (б) стали ЭП172, полученной по стандартной технологии [9]

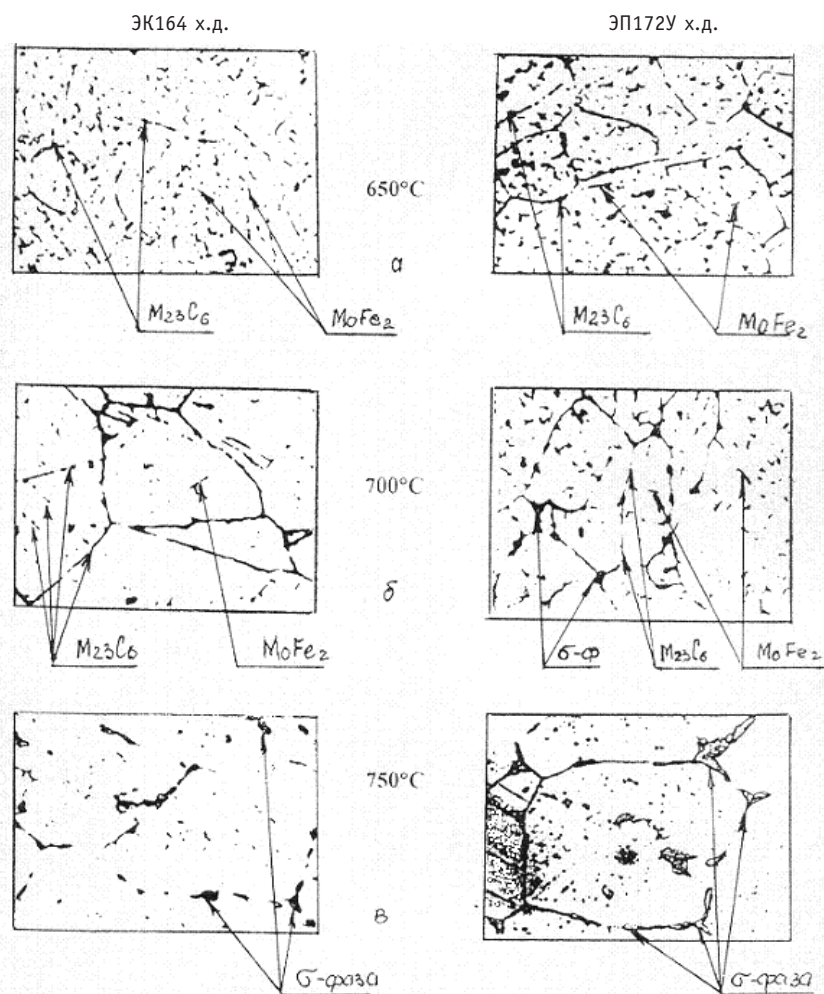


Рис. 3. Микроструктура оболочечных труб из сталей ЭК164 и ЭП172У в холоднотемпературном состоянии после старения в интервале температур 650–750°C в течение 20000ч (×2000)

Исследования структурно-фазовой стабильности при изотермическом старении осесимметричных труб из стали ЭК164 х.д. в сравнении с прототипом (ЭП172У х.д.) показали, что сталь ЭК164 отличается большей фазовой стабильностью (рис. 3, табл. 3) [16] и стабильностью дислокационной структуры на временной базе от 25 до 20 000 ч в интервале температур 650–750°C (табл. 4) [16].

Таблица 3

Объемная доля выделившихся фаз при старении сталей ЭК164 х.д. и ЭП172У х.д. в течение 20000 часов при температурах 650–750°C [16]

Материал	Объемная доля выделившихся фаз, %					
	650°C		700°C		750°C	
	$M_{23}C_6$	σ-фаза	$M_{23}C_6$	σ-фаза	$M_{23}C_6$	σ-фаза
ЭК164 х.д.	3,4	–	3,5	0,4	3,4	0,8
ЭП172У х.д.	6,1	–	9,1	1,8	4,8	1,4

Таблица 4

Размер дислокационных ячеек в сталях ЭК164 х.д. и ЭП172У х.д. при старении в течение 20000 ч при температурах 650–750°C [16]

Режим старения	Размер ячеек, нм	
	ЭК164 х.д.	ЭП172У х.д.
Исходное	200	300
650°C, 25 ч	230	250
750°C, 13000 ч	700	1500
650°C, 20000 ч	800	Ячейки не наблюдаются
700°C, 20000 ч	880	Ячейки не наблюдаются

В стали ЭК164 х.д. так же, как в стали ЭП172У х.д., выделяются избыточные фазы M_3C , $M_{23}C_6$, Fe_2Mo , σ -фаза, но количество выделившихся фаз (как внутризеренных частиц фазы Лавеса Fe_2Mo , так и карбидов $M_{23}C_6$, выделившихся на границах зерен и микродвойниках, а также σ -фазы) в стали ЭК164 существенно меньше (рис. 3) [16].

Качественным отличием фазового состава стали ЭК164 х.д. от стали ЭП172У х.д. является выделение при старении мелкодисперсных фосфидов M_2P .

Кратковременные механические свойства в интервале температур 20–700°C и характеристики ползучести, длительной прочности оболочечных труб из сталей ЭК164 и ЭП172У в х.д. состоянии в интервале температур 600–700°C достаточно близки между собой [10].

Оценка свариваемости особотонкостенных труб из стали ЭК164 х.д. по результатам первичных исследований и на реальных герметизирующих соединениях показала, что сопротивляемость трещинообразованию этой стали находится на уровне применяемых сталей ЧС68 х.д. и ЭП172 х.д.

Имитационные эксперименты по облучению ионами хрома до повреждающих доз 140 сна холоднодеформированных на 20% особотонкостенных труб из стали ЭК164 показали, что она имеет большее сопротивление распуханию, чем сталь ЭП172У х.д. [10,16], при этом

- величина распухания при повреждающей дозе 140 сна и температуре максимального распухания составляет 5% для стали ЭК164 х.д. и 18 % – ЭП172У х.д., что ~ в четыре раза меньше, чем у стали ЭП172У х.д. (рис. 4) соответственно;
- инкубационный период распухания (величина повреждающей дозы, при ко-



Рис. 4. Температурная зависимость распухания оболочечных труб в х.д. состоянии из сталей ЭК164, ЭП172-У [10], ЧС68 при облучении ионами хрома

торой значения объемного распухания не превышают значения 0,1%) на стали ЭК164 х.д. [10,16] на 40 сна больше, чем для стали ЭП172 У х.д. (рис. 5);

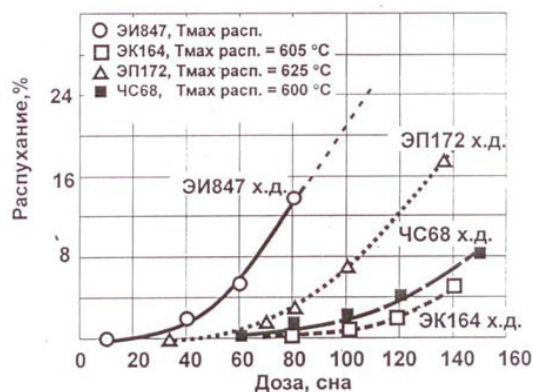


Рис. 5. Зависимости распухания от повреждающей дозы оболочечных труб в х.д. состоянии из сталей ЭИ847, ЭП172, ЧС68, ЭК164 при облучении ионами хрома при температуре максимального распухания

- стабильность дислокационной структуры, образующейся в процессе облучения (дефектные петли → совершенные петли → дислокационная сетка), в стали ЭК164 х.д. выше, чем в стали ЭП172У х.д.; эволюция дислокационной структуры в стали ЭК164 х.д. наблюдается при больших повреждающих дозах, при этом дефектные петли Франка наблюдаются практически при всех повреждающих дозах [10];
- выделения G-фазы и связанное с ней порообразование, в стали ЭК164 х.д. наблюдаются начиная с повреждающей дозы 75 сна, в то время как в стали ЭП172У х.д. с 40 сна [10].

Для дальнейшего улучшения служебных характеристик стали ЭК164 на ОАО «МСЗ» проводится работа по усовершенствованию технологии изготовления оболочечных труб:

- введены дополнительные отжиги (на гильзе и высокотемпературный диффузионный отжиг на трубе промежуточного размера);
- повышена температура аустенизации на промежуточных и предготовом размерах;
- использован метод короткооправочного волочения для создания холоднодеформированного состояния на готовом размере.

В настоящее время проводятся комплексные сравнительные исследования влияния усовершенствования трубной технологии ОАО «МСЗ» на структурно-фазовую стабильность при длительном изотермическом старении в интервале температур 600–750°C, длительную прочность и ползучесть при одноосном и двухосном нагружениях и другие характеристики оболочечных труб из стали ЭК164 х.д.

С целью экспериментального обоснования работоспособности стали ЭК164 х.д. в соответствии с «Решением об организации работ по изготовлению ТВС с оболочкой твэлов из стали ЭК164 х.д. и опытной эксплуатации в активной зоне реактора БН-600» изготовлены и испытываются восемь опытных ТВС. Объем и состояние облучения опытных ТВС с оболочками твэлов из стали ЭК164 х.д. в реакторе БН-600 приведены в табл. 5.

Из восьми ОТВС две комбинированные с оболочками твэлов из стали ЭК164 х.д., изготовленными по штатной трубной технологии (ПНТЗ – ХПТР), и оболочками из стали ЧС68 х.д. штатного исполнения (усовершенствованная технология МСЗ) облучены без замечаний на штатные параметры зоны О1М2 реактора БН-600 максимальной повреждающей дозой 77 сна, максимальное выгорание 10,7 % т.а.

По данным, полученным в «горячей» камере Белоярской АЭС, первичных послереакторных исследований комбинированной опытной ТВС № 3417550606 с оболочками твэлов из сталей ЧС68 х.д. и ЭК164 х.д., облученной в зоне малого обогащения повреждающей дозой 77 сна, формаизменение твэлов с оболочками ЭК164 х.д. в 1,5–2 раза меньше, чем у стали ЧС68 х.д. (рис. 6), при этом (по данным разрушающих материаловедческих исследований в ИРМ) величина остаточной пластичности как на кольцевых, так и на трубчатых образцах выше.

Шесть ОТВС из восьми с полным пучком твэлов с оболочками из стали ЭК164 х.д., изготовленными по усовершенствованной трубной технологии (МСЗ – гелий, ВТТО, отжиг сверленной гильзы, ДО, повышение температуры аустенизации на промежуточных и предготовом размерах, КОВ), облучены без замечаний на штатные параметры (четыре микрокампании), две из них в течение пяти микрокампаний до максимальной повреждающей дозы 94 сна, одна продолжает облучаться в пятой микрокампании (табл. 5).

Таблица 5

Объем и состояние облучения опытных ТВС с оболочками твэлов из стали ЭК164-ИД х.д. в реакторе БН-600 (январь 2011 г., окончена 59 МКК)

Обозначение ТВС	Начало облучения	Номер ОТВС	Зона облучения	Достигнутые параметры облучения			Примечание
				Время облучения (МКК), эфф. сут.	Повреждающая доза, сна	Выгорание, % т.а.	
Комби ЧС68 х.д. +ЭК164 х.д. (ПНТЗ)	2006	3417 5506 06	ЗМО	4 МКК, 569	77	9,1	Облучение закончено, исследование
		3526 5507 06	ЗБО	4 МКК, 569	74	10,7	
3-и полностью ЭК164 х.д. (МСЗ)	Весна 2008 г.	3717 5711 06	ЗМО	4 МКК, 563	84,0	9,6	Облучение закончено, подготовка к исследованию
		3821 5713 06	ЗСО	5 МКК, 688	94,0	12,0	Облучение закончено, ВРХ
		3926 5715 06	ЗБО	5 МКК, 688	84,4	11,9	Облучение закончено, ВРХ
3-и полностью ЭК164 х.д. (МСЗ)	Осень 2008 г.	3717 5712 06	ЗМО	4 МКК, 565	82,1	9,7	Облучение закончено, ВРХ
		3821 5714 06	ЗСО	4 МКК, 565	79,1	10,4	Облучение закончено, ВРХ
		3926 5716 06	ЗБО	4 МКК, 565	74,9	10,7	Продолжается облучение в пятой МКК (60-ая МКК)

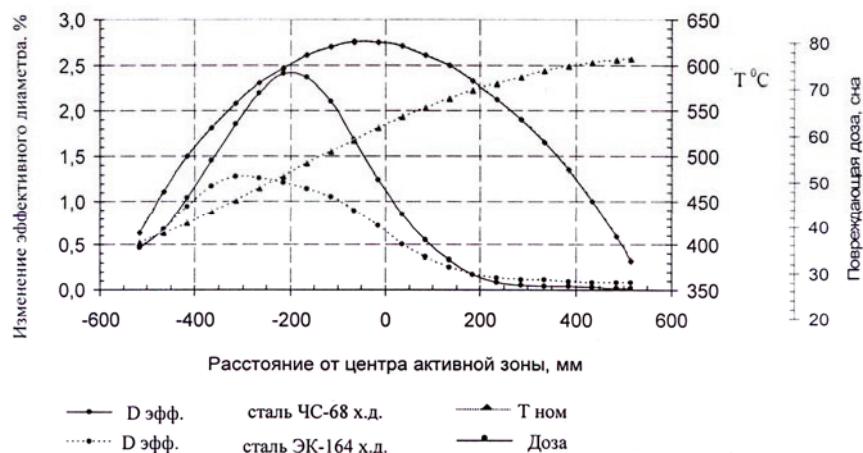


Рис. 6. Изменение эффективного диаметра, повреждающей дозы и номинальной температуры оболочек твэлов ОТВС № 3417550606

В 2012 г. планируется получить данные по распуханию оболочек твэлов из стали ЭК164 х.д. производства ОАО «МСЗ» (усовершенствованная технология) при повреждающих дозах 95 сна.

Работы по экспериментальному обоснованию работоспособности стали ЭК164 х.д. до повреждающих доз не менее 110 сна (выгорание 15% т.а.) в реакторе БН-600 продолжаются.

Для достижения более высоких выгораний аустенитные стали могут оказаться непригодными из-за их распухания при более высоких повреждающих дозах. Поэтому активно проводятся исследования в обоснование применения в качестве материала оболочки твэла практически «нераспухающих» 12 %-ных хромистых сталей.

Ферритно-мартенситные 12%-ные хромистые стали

Преимуществом 12%-ных хромистых сталей является более высокое по сравнению со сталями аустенитного класса сопротивление распуханию, высокотемпературному охрупчиванию и радиационной ползучести. Недостатком этих сталей, по сравнению с аустенитными, является более низкая жаропрочность, склонность к НТРО и недостаточная коррозионная стойкость при длительном хранении в воде бассейнов выдержки. Результаты систематических послереакторных исследований оболочек твэлов из стали ЭП450, облученных в реакторах БОР-60, БН-350 и БН-600, демонстрируют относительную стабильность структуры стали и высокую стойкость к вакансионному распуханию вплоть до повреждающей дозы 160 сна.

Основным фактором, ограничивающим применение стали ЭП450 в качестве оболочек твэлов реакторов БН, является ее недостаточно высокая жаропрочность. Для исключения повреждений твэлов, связанных с низкой жаропрочностью и внутритвэльными коррозионными процессами, максимальная начальная температура облучения должна быть ограничена значением 650°C.

В качестве материала оболочки, обеспечивающего работу твэла до доз ~140 сна, рассматриваются жаропрочные комплексно-легированные 12%-ные хромистые стали ЭК181 (16X12В2ФТаР) и ЧС139 (20X12НМВБФАР) [7, 9], прошедшие освоение в металлургической промышленности; начато производство из них особотонкостенных труб. Эти стали отличаются от ЭП450, прежде всего, дополнительным легированием углеродом, азотом, вольфрамом, танталом и некоторым снижением содержания хрома (табл. 1). Такое легирование обеспечивает стабильность уп-

рочнящих фаз, устойчивость к рекристаллизационным процессам и повышает характеристики жаропрочности по сравнению со сталью ЭП450 [7, 9].

Полученные к настоящему времени результаты показывают перспективность применения жаропрочных сталей типа ЭК181 и ЧС139 в качестве материала оболочки твэлов реакторов БН. Для экспериментального обоснования в реакторе БН-600 с весны 2010 г. испытываются две материаловедческие ТВС с образцами из сталей ЭК181 и ЧС139 до максимальной повреждающей дозы ~ 140 сна, а в реакторе БОР-60 планируется, начиная с 2010 г., облучение одной ТВС с оболочками твэлов.

Для обеспечения достижения повреждающей дозы ~180 сна во ВНИИНМ разрабатываются с использованием методов порошковой металлургии дисперсно-упрочненные оксидами 12%-ные хромистые стали (ДУО-стали) [9]. Необходимое повышение характеристик ползучести и длительной прочности достигается упрочнением матрицы дисперсными частицами оксидов иттрия и титана. Значительный объем работ в настоящее время направлен на отработку технологии изготовления (порошковая металлургия и трубное производство) и комплексные дореакторные исследования твэльных труб из ДУО-сталей ферритного (на основе ЭП450) и мартенситного (на основе стали ЭК181) классов и их сварных соединений. Материалы этого класса в настоящее время испытываются в реакторе БН-600 в составе двух материаловедческих ТВС до максимальной повреждающей дозы ~ 140 сна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Увеличение глубины выгорания топлива в реакторах БН сдерживается распуханием оболочек твэлов из аустенитных хромоникелевых сталей при высоких повреждающих дозах. Показано, что при использовании структурных факторов, контролирующих величину распухания, возможно повышение служебных характеристик штатной стали ЧС68 х.д. и создание новых радиационно стойких сталей – ЭК164 х.д. Формоизменение твэлов с оболочками ЭК164 х.д. примерно в два раза меньше, а величина остаточной пластичности как на кольцевых, так и на трубчатых образцах выше, чем у твэлов из стали ЧС68 х.д., облученных в составе одной ОТВС повреждающей дозой 77 сна.

В настоящее время с использованием опытных, реперных и штатных ТВС проводятся работы по обоснованию работоспособности оболочечных сталей аустенитного класса: сталь ЧС68 до повреждающей дозы 92 сна, сталь ЭК164 до 110 сна.

2. Повышение работоспособности оболочек твэлов быстрых реакторов до доз ~140 сна решается путем применения новых 12%-ных хромистых мартенситных сталей типа ЭК181 и ЧС139. Для экспериментальной проверки их использования планируется проведение на реакторе БОР-60 облучения одной ТВС с оболочками твэлов, с весны 2010 г. в реакторе БН-600 начато облучение двух материаловедческих сборок с образцами из сталей ЭК181 и ЧС139 до максимальной повреждающей дозы ~ 140 сна.

3. С целью обеспечения работоспособности оболочек твэлов реакторов БН до повреждающих доз ~ 180 сна разрабатываются жаропрочные хромистые ДУО-стали. Проводятся отработка технологии изготовления и комплексные дореакторные исследования твэльных труб из ДУО-сталей ферритного (на основе ЭП450) и мартенситного (на основе ЭК181) классов и их сварных соединений. Испытание материалов этого класса в реакторе БН-600 начато весной 2010 г. в составе двух материаловедческих сборок до максимальной повреждающей дозы ~ 140 сна.

4. Представительные реакторные испытания и послереакторные исследования показали, что ферритно-мартенситная сталь ЭП450 обеспечивает малое формоизменение чехлов ТВС и тем самым открывает возможность достижения существенно более высоких выгораний топлива. Сталь ЭП450 рассматривается в качестве

материала чехлов ТВС коммерческого реактора БН-1200, и есть все основания полагать, что чехлы ТВС из этой стали не будут лимитировать достижение глубины выгорания топлива 18% т.а. и повреждающей дозы 180 сна.

Литература

1. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI в. – ФГУП «ЦНИИ атоминформ», 2001.
2. Федеральная целевая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 гг. и на перспективу до 2020 г.».
3. Сараев О.М., Ошканов Н.Н., Зродников А.В. и др. Опыт эксплуатации и перспективы дальнейшего развития быстрых натриевых реакторов // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 191-197.
4. Рачков В.И., Поплавский В.М., Цибуля А.М. и др. Концепция перспективного энергоблока с натриевым реактором БН-1200 // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 201-206.
5. Решетников Ф.Г., Митенков Ф.М., Троянов М.Ф. Состояние и перспективы разработки радиационно стойких конструкционных материалов для активных зон быстрых реакторов в СССР / Тр. Международной конференции по радиационному материаловедению (Алушта, 1990). Т.1. – С. 15-23.
6. Карпенко А.И., Козманов Е.А., Огородов А.Н., Ошканов Н.Н. Эксплуатационные свойства элементов реактора БН-600, изготовленных из стали ЭП450 // ВАНТ. – 2005. – Вып. 1(64). – С. 281-285.
7. Целищев А.В., Агеев В.С., Буданов Ю.П. и др. Развитие конструкционных сталей для активной зоны реакторов БН на основе результатов послереакторных исследований / Доклад на III Международной конференции «Развитие атомной энергетики на основе замкнутого топливного цикла с реакторами на быстрых нейтронах. Инновационные технологии и материалы» (11-12 ноября 2009 г., г. Москва).
8. Поплавский В.М., Цибуля А.М., Васильев Б.А. и др. Активная зона и топливный цикл для перспективного быстрого реактора // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 206 – 211.
9. Целищев А.В., Агеев В.С., Буданов Ю.П. и др. Разработка конструкционной стали для твэлов и ТВС быстрых натриевых реакторов // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 217-222.
10. Митрофанова Н.М., Боголепов М.Г., Бибилашвили Ю.К. и др. Разработка новой радиационно стойкой стали аустенитного класса ЭК164, комплексно-легированной титаном, ниобием и ванадием, для оболочек твэлов реакторов типа БН // ВАНТ. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1997. – Вып. 1(65), 2(66). – С. 128-143.
11. Maziasz P.J. Radiation-induced phase formation and stability in neutron-irradiated steels / Materials for nuclear reactor core applications. – London: BNES, 1987. – p. 61-71.
12. Целищев А.В., Митрофанова Н.М., Агеев В.С. и др. Развитие и применение микроструктурного подхода для создания радиационно-стойких сталей аустенитного класса // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2006. – Вып. 1(66). – С. 304-312.
13. Ошканов Н.Н., Чуев В.В., Повстанко А.В. и др. Основные результаты эксплуатации материалов в первых натриевых контурах установок БН-600 и БОР-60 / Доклад на III Международной конференции «Развитие атомной энергетики на основе замкнутого топливного цикла с реакторами на быстрых нейтронах. Инновационные технологии и материалы» (11-12 ноября 2009 г., г. Москва).
14. Агеев В.С., Митрофанова Н.М., Боголепов М.Г. и др. Микролегирование аустенитной стали ОХ16Н15МЗБ бором с целью повышения ее радиационной стойкости / Доклад на Международной конференции по радиационному материаловедению (Алушта, 1990).
15. Ageev V.S., Mitrofanova N.M. et al. Boron microalloying of austenitic stainless steel for improved radiation resistance // Nuclear Energy. – 1992. – 31. – № 4. – P. 287-294.
16. Митрофанова Н.М., Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К. и др. Состояние разработки и перспектива использования комплексно-легированной стали 07X16Н19М2Г2БТФР (ЭК164) для оболочек твэлов активной зоны реакторов БН // ВАНТ. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1998. – Вып. 1(67), 2(68). – С. 95.

Поступила в редакцию 14.10.2010

УДК 621.039.53

Structural Materials for Fuel Cladding and Sub-Assembly Wrappers of the BN-600 Reactor | N.M. Mitrofanova, A.V. Tselishchev, V.S. Ageev, Yu.P. Budanov, A.G. Ioltukhovskiy, M.V. Leonteva-Smirnova, F.G. Reshetnikov, Yu. K. Bibilashvili, I.A. Shkabura, Yu.A. Ivanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 13 pages, 5 tables, 6 illustrations. – References, 16 titles.

The results of research into materials such as wrapper and cladding steels of various grades for the BN-600 fuel sub-assemblies are presented. Different steel types are compared in terms of the operating reliability. The prospective steel patterns for the commercial BN-1200 reactor are determined.

УДК 621.039.54

Change in the Physical-Mechanical Properties of the Fuel Cladding Made of the EK-164 and ChS-68 Steels after Their Operation in the BN-600 Reactor after Four Cycles | A.M. Mosin, M.V. Evseev, I.A. Portnykh, E.N. Shcherbakov, V.S. Shikhalev, A.V. Kozlov, N.M. Mitrofanova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 1 table, 8 illustrations.

The results of research into the fuel cladding made of the ChS68 and EK64 austenitic steels after operation in the BN-600 reactor are presented. The change in diameters, the swelling, the mechanical properties, the electric resistance and the Young modulus of the cladding materials along the fuel pins have been determined.

УДК 621.039.54

Comparative Studies of the Porosity Formed in the Material of the Fuel Cladding Made of ChS68 steel and Manufactured following the Pervouralsk Novotrubny Works Technology and Advanced Machine-building Works Technology after Operation in the BN-600 Reactor | I.A. Portnykh, A.V. Kozlov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 8 illustrations. – References, 4 titles.

It is shown that the improvement of the technology of the manufacture of the fuel cladding made of the ChS68 cold-worked steel has led to the reduction in the spread of the porosity characteristics and therefore in the cladding swelling values. At the same time the spread of the characteristics of porosity and swelling of the cladding manufactured by the Machine-building Works remains significant which requires further improvement of the fuel cladding manufacture technology.

УДК 621.039.54

Absorbing Materials and Control Rods of the Innovation Nuclear Reactors | V.D. Risovany, A.V. Zakharov, E.P. Klochkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 13 illustrations.

Boron carbide differently enriched in boron-10 isotope remains to be a main absorbing material for the safety rods of the fast reactors. The promising line is a utilization of the rods with annular shapes of boron carbide of a large diameter. For extension of the fast reactor control rod lifetime the absorbing materials based on europium and hafnium hydride are proposed.

УДК 621.039.54

Development of the BN-600 Reactor Safety Rods based on Refabricated Boron Carbide with a Lifetime of 745 efpd | V.D. Risovany, A.V. Zakharov, E.P. Klochkov, V.V. Maltsev, A.I. Karpenko, E.A. Kozmanov, A.M. Tuchkov, B.A. Vasilev, O.V. Mishin, Yu.K. Alexandrov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 2 tables, 7 illustrations.

On the basis of the developed technique of the refabrication of enriched boron carbide from the spent safety rods the closed cycle ensuring its recycling as a kernel of the absorbers has been created. The specialized section for the control rod manufacture as complying with all the necessary requirements imposed on the standard safety rod manufacture has been created.