

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ, КОНСТРУКЦИОННЫХ И ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ РЕАКТОРА БН-350 В ГОРЯЧЕЙ ЛАБОРАТОРИИ ГНЦ РФ – ФЭИ

**С.И. Поролло, А.М. Дворяшин, В.П. Тарасиков, А.А. Иванов,
С.В. Шулепин**

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

Для цитирования: Поролло С.И., Дворяшин А.М., Тарасиков В.П., Иванов А.А., Шулепин С.В. Материаловедческие исследования топливных, конструкционных и поглощающих материалов реактора БН-350 в горячей лаборатории ГНЦ РФ – ФЭИ. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 153-158. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.14>.

ВВЕДЕНИЕ

Работы по проектированию реактора БН-350 были начаты в начале 1960-х гг., когда опыт проектирования твэлов и других компонентов активной зоны быстрого энергетического реактора отсутствовал. Знания по поведению материалов при высокодозном облучении были крайне ограничены. Такие явления, как вакансионное распухание и радиационная ползучесть, были открыты лишь в 1967 г. Поэтому выбор конструкционных материалов для компонентов активной зоны проводился без учета этих явлений, в основном, из общих соображений. Это привело к тому, что на начальном этапе работы реактора наблюдались массовая разгерметизация и разрушение твэлов. Позднее появились проблемы при эксплуатации направляющих гильз СУЗ, изготовленных из высоконикелевого сплава ЭП-150. Для выяснения причин преждевременной разгерметизации и разрушения часть твэлов была транспортирована в горячую лабораторию (ГЛ) ГНЦ РФ – ФЭИ. Так были начаты материаловедческие исследования топливных, конструкционных и поглощающих материалов реактора БН-350. Приведем краткий обзор выполненных исследований и отметим наиболее важные результаты.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В таблице 1 приводится перечень штатных ТВС реактора БН-350, в различное время исследованных в ГЛ. Исследование твэлов первой загрузки реактора БН-350 с выгоранием от 4,4 до 5,6% т.а. показало, что их разгерметизация и разрушение происходят в результате образования множественных трещин, начинающихся на внутренней поверхности оболочек твэлов. Образованию трещин способствовала значительная

© С.И. Поролло, А.М. Дворяшин, В.П. Тарасиков, А.А. Иванов, С.В. Шулепин, 2023

Таблица 1

Характеристика исследованных ТВС реактора БН-350

Наименование ТВС	Материал оболочек твэлов	Материал чехла ТВС	Макс. выгорание, % т.а.	Макс. флюенс нейтронов, $n/cm^2 E > 0$	Макс. доза, сна
Штатные сборки первой загрузки					
П-98	ЭИ-847,А	0Х18Н10Т	4,4	$1,14 \cdot 10^{23}$	36
Ц-17	ЭИ-847,А	0Х18Н10Т	4,4	$1,54 \cdot 10^{23}$	46
П-52АТ	ЭИ-847,А	0Х18Н10Т	5,4	$1,37 \cdot 10^{23}$	42
Ц-105	ЭИ-847,А	0Х18Н10Т	5,6	$1,98 \cdot 10^{23}$	55
Штатная сборка усовершенствованной конструкции					
ЦЦ-15Т	ЭИ-847,А	08Х16Н11М3	6,0	$1,7 \cdot 10^{23}$	47
Экспериментальные ТВС					
ОП-3	ЭИ-847,А ЭИ-847 х.д.	ЭП-450	9,84	$1,55 \cdot 10^{23}$	47,5
ОП-4	ЭИ-847,А	ЭП-450	11,8	$1,1 \cdot 10^{23}$	49
ОП-5	ЭП-450	ЭП-450	9,5	$1,6 \cdot 10^{23}$	48
ОП-6	ЭП-450	ЭП-450	11,2	$1,88 \cdot 10^{23}$	60
Гильзы СУЗ					
КП-1		ЭП-150	–	$3,7 \cdot 10^{23}$	110
ТК		ЭП-150	–	$1,52 \cdot 10^{23}$	65

коррозия и науглероживание внутренней поверхности оболочек при действии высоких окружных напряжений в оболочках твэлов. Проведенные исследования и последующие расчеты напряженно-деформированного состояния твэлов позволили перейти к усовершенствованной конструкции топливной сборки и увеличить выгорание топлива до 6% т.а. Дальнейшая эксплуатация твэлов реактора БН-350 происходила без замечаний.

Изначально считалось, что ресурс направляющих гильз СУЗ реактора БН-350 будет очень большой, сравнимый со сроком эксплуатации реактора. Практика показала, что в результате низкотемпературного облучения гильз на начальном этапе работы реактора происходит значительное охрупчивание материала, приводящее к разрушению гильз. Проведенное в ГЛ исследование гильзы КП-1, облученной до рекордной на тот момент повреждающей дозы 110 сна, установило полное охрупчивание ее наружных поверхностей и наличие большого количества трещин, идущих от слоя диффузионного хромирования в тело металла. Исследование гильзы ТК, облученной при более высокой температуре, выявило значительное и неравномерное распухание сплава ЭП-150, что привело к значительному искажению первоначальных размеров гильзы (удлинению, изгибу, искажению поперечного сечения) [1].

Выявленные недостатки использованных конструкционных материалов обусловили необходимость разработки новых материалов с более высокой радиационной стойкостью. Для этого в реакторе БН-350 была облучена серия экспериментальных ТВС с новыми чехловыми и оболочечными материалами. Твэлы четырех таких ТВС были исследованы в ГЛ. Главным образом исследования были направлены на обоснование работоспособности ТВС с шестигранными чехлами из ферритно-мартенситной стали ЭП-450. Измерение механических свойств материала шестигранных чехлов

после облучения до максимальной повреждающей дозы 60 сна показало, что несмотря на снижение пластичности стали ЭП-450 в нижних частях чехлов в результате низкотемпературного радиационного охрупчивания они сохраняют свою работоспособность при высоком выгорании. Результатом этих исследований является то, что в настоящее время сталь ЭП-450 является штатным материалом для шестигранных чехлов ТВС и направляющих гильз СУЗ действующих быстрых реакторов БН-600 и БН-800.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Концепция быстрых реакторов предусматривает использование МОКС-топлива. Но по причинам, главным образом, технологического характера реактор БН-350 эксплуатировался с топливом из обогащенного диоксида урана. Для разработки МОКС-топлива в активную зону реактора БН-350 была установлена серия экспериментальных ТВС со смешанным оксидным топливом. Твэлы четырех ТВС, облученных до различного уровня выгорания, были исследованы в ГЛ (табл. 2). В результате исследования были определены закономерности набухания и выхода газообразных продуктов деления из МОКС-топлива, радиальное и осевое перераспределение плутония, характер внутритвэльной коррозии [2]. Эти работы стали началом весьма длительного этапа перевода отечественных быстрых реакторов на МОКС-топливо. В настоящее время реактор БН-800 полностью переведен на смешанное оксидное топливо.

Таблица 2

Характеристика ТВС с различными видами топлива

Наименование ТВС	Макс. выгорание, % т.а.	Макс. флюенс нейтронов, $n/cm^2 E > 0$	Макс. повреждающая доза, сна
МОКС-топливо			
ТВС № 2	4,9	$1,3 \cdot 10^{23}$	28
ТВС № 4	4,9	$1,3 \cdot 10^{23}$	28
ТВС № 9	4,96		65
Ц-11	9,7		62
СВУТ-топливо			
Ц-585	4,7	$1,02 \cdot 10^{23}$	30,2
Микросферическое СВУТ-топливо			
ОП-9	9,0	$1,6 \cdot 10^{23}$	51

Кроме этого в ГЛ исследовались и различные варианты виброуплотненного топлива.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

В таблице 3 приведены характеристики исследованных в ГЛ поглощающих стержней СУЗ. Были выполнены исследования как герметичных, так и негерметичных поглощающих стержней. Исследования проводились с целью определения основных повреждающих факторов и обоснования надежного ресурса их эксплуатации. Полученные результаты позволили дать обоснованные рекомендации по работоспособности ПЭЛ реактора БН-350 до 300–365 эффективных суток [3].

Таблица 3

Характеристика исследованных стрержней СУЗ

№ стержня	Тип	Наработка, эфф. сут.	Обогащение по В-10, %	Макс. выгорание бора, %	Рекомендации по ресурсу, эфф. сут.
АР, 1047-0	Герметичный	66	60	6,4	165
АЗ, 1049-0	Герметичный	66		3,5	170
АЗ, 1049-А	Герметичный	75		3,5	216
АЗ, 1049-А	Герметичный	206		3,8	365
АЗ, 1049-Б	Негерметичный	305		7,3	365
ТК, 1051-А	Герметичный	194		6,2	365
АР, 1047-А	Негерметичный	187		10,7	300
АР, 1047-А	Негерметичный	267		14,2	300
АЗ-ТК	Герметичный	194	86-93	18,5	–
АР, 1047-0	Герметичный	167	60	8,3	–

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ СБОРКИ

Для получения данных по радиационной стойкости конструкционных материалов при высоких повреждающих дозах в реакторе БН-350 была облучена серия материаловедческихборок. Конструкцияборок была разработана в АО «ОКБМ», оснащениеборок материаловедческими образцами проводилось в АО «ВНИИНМ». В составборок входили образцы

- аустенитных сталей ЭИ-847, ЭП-172, ЧС-68, 0Х18Н10Т;
- ферритно-мартенситных сталей ЭП-450, ЭП-823, ЭП-549;
- высоконикелевых сплавов ЭП-753, РЕ-16;
- чистые металлы Fe, Ni.

В ГЛ были исследованы десять материаловедческихборок с образцами в виде ампул под давлением, малогагаринских образцов, колец Одинга, облученных при температурах 330–700°C в диапазоне повреждающих доз от 20 до 91 сна. Всего было исследовано более 10 000 образцов.

К наиболее значимым результатам проведенных исследований следует отнести

- данные по характеристикам набухания и радиационной ползучести аустенитных и ферритно-мартенситных сталей, высоконикелевых сплавов, облученных в широком диапазоне температуры и повреждающей дозы;
- данные по изменению механических свойств и микроструктуры аустенитных и ферритно-мартенситных сталей, высоконикелевых сплавов под действием высокодозного облучения [4, 5];
- выявленные закономерности высокотемпературного радиационного охрупчивания аустенитных нержавеющих сталей и данные по длительной прочности облученных аустенитных и ферритно-мартенситных сталей.

Важность полученных результатов трудно переоценить, большинство полученных данных актуально и в настоящее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В послереакторных исследованиях топливных, конструкционных и поглощающих материалов реактора БН-350, в дополнение к авторам, в разное время участвовало большое число работников горячей лаборатории ГНЦ РФ – ФЭИ, и среди основных

участников этой работы – Быков В.Н., Дмитриев В.Д., Руденко В.А., Конобеев Ю.В., Галков В.И., Хабаров В.С., Щербак В.И., Вахтин А.Г., Воробьев А.Н., Шаповалов В.Г., Александров Ю.И., Мосеев Л.И., Кирьянов Б.С., Девятченко Г.С., Климов В.Д., Мельниченко Н.А., Гентош А.И.

Литература

1. Поролло С.И., Конобеев Ю.В., Гарнер Ф.А. Распухание направляющих гильз стержней СУЗ быстрых реакторов в неоднородных температурных и радиационных полях // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – №1. – С. 66-75.
2. Moseev L.I., Vorobyov A.N., Zabudko L.M., Kiryanov B.S., Porollo S.I., Shoulepin S.V., Antipov S.A., Menshikova T.S. In-pile tests and post-reactor investigations of fuel elements with U-Pu fuel. / Proc. of the Technical Committee Meeting «Influence of High Dose Irradiation on Core Structural and Fuel Materials in Advanced Reactor», Obninsk, Russia. – IAEA-TECDOC-1039, 1998, – PP. 107-118.
3. Tarasikov V.P., Voznesenski R.M., Rudenko V.A. The experience of post irradiation investigations of the BN-350, BN-600 Control rods. / Proc. of the Technical Committee meeting held in Obninsk, Russian Federation, 3-7 July 1995. – IAEA-TECDOC-884, 1996. – PP. 153-160.
4. Khabarov V.S., Dvoriashin A.M., Porollo S.I. Microstructure, irradiation hardening and embrittlement of 13Cr2MoNbVB ferritic-martensitic steel after neutron irradiation at low temperatures. // Journal of Nuclear Materials. – 1996. “Vol. 233-237. – PP. 236-239.
5. Поролло С.И., Иванов А.А., Шулепин С.В., Дворяшин А.М., Иванов С.Н., Конобеев Ю.В. Структура и кратковременные механические свойства опытных вариантов ферритно-мартенситных сталей после низкотемпературного облучения в реакторе БН-350. // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. “2021. – Вып. 1(107). – С. 32-46.

Поступила в редакцию 07.08.2023 г.

Авторы

Поролло Сергей Иванович, в.н.с., канд. техн. наук,

E-mail: porollo@ippe.ru

Дворяшин Александр Михайлович, с.н.с.,

E-mail: dvoriashin@ippe.ru

Тарасиков Владимир Прокофьевич, в.н.с., канд. техн. наук

E-mail: tarasikov@ippe.ru

Иванов Андрей Алексеевич, начальник лаборатории,

E-mail: ivanov@ippe.ru

Шулепин Сергей Викторович, зам. директора,

E-mail: ympev@ippe.ru

UDC 621.039.59

Studies of the BN-350 Reactor Fuel, Structural and Absorbing Materials at the Hot Laboratory of the IPPE

Porollo S.I., Dvoriashin A.M., Tarasikov V.P., Ivanov A.A., Shulepin S.V.

IPPE JSC

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

ABSTRACT

Studies of the BN-350 reactor fuel, structural and absorbing materials conducted at the hot laboratory of the IPPE are described in brief. In total, five driver and four experimental fuel assemblies, two safety rod guide tubes, and ten control rods were investigated. In addition, more than 10,000 material test samples of austenitic and ferrite-martensitic steels, high-nickel alloys and pure metals were studied.

Key words: BN-350 reactor, fuel element, corrosion, fuel composition, material test samples, swelling, radiation creep.

For citation: Porollo S.I., Dvoriashin A.M., Tarasikov V.P., Ivanov A.A., Shulepin S.V. Studies of the BN-350 Reactor Fuel, Structural And Absorbing Materials at the Hot Laboratory of the IPPE. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 3, pp. 153-158; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.14> (in Russian).

REFERENCES

1. *Porollo S.I., Yu.V. Konobeev, Garner F.A.* Swelling of Safety Rod Guide Tubes in Nonuniform Fields of Temperature and Irradiation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2015, no.1, pp. 66-75 (in Russian).
2. *Moseev L.I., Vorobyov A.N., Zabudko L.M., Kiryanov B.S., Porollo S.I., Shulepin S.V., Antipov S.A., Menshikova T.S.* In-Pile Tests and Post-Reactor Investigations of Fuel Elements with U-Pu Fuel. Proc. of the Technical Committee Meeting «Influence of High Dose Irradiation on Core Structural and Fuel Materials in Advanced Reactor», Obninsk, Russia. IAEA-TECDOC-1039, 1998, pp. 107-118.
3. *Tarasikov V.P., Voznesenski R.M., Rudenko V.A.* The Experience of Post Irradiation Investigations of the BN-350, BN-600 Control Rods. Proc. of the Technical Committee meeting held in Obninsk, Russian Federation, Jul. 3-7, 1995. IAEA-TECDOC-884, 1996, pp. 153-160.
4. *Khabarov V.S., Dvoriashin A.M., Porollo S.I.* Microstructure, Irradiation Hardening and Embrittlement of 13Cr2MoNbVB Ferritic-Martensitic Steel after Neutron Irradiation at Low Temperatures. *Journal of Nuclear Materials*. 1996, v. 233-237, pp. 236-239.
5. *Porollo S.I., Ivanov A.A., Shulepin S.V., Dvoriashin A.M., Ivanov S.N., Konobeev Yu.V.* Structure and Short-Term Mechanical Properties Experimental Variants of Ferrite-Martensitic Steels after Low-Temperature Irradiation in BN-350 Reactor. *VANT. Ser. Materialovedenie i Novye Materialy*. 2021, iss. 1 (107), pp. 32-46 (in Russian).

Authors

Sergey I. [Porollo](mailto:porollo@ippe.ru), Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: porollo@ippe.ru

Aleksandr M. [Dvoriashin](mailto:dvoriashin@ippe.ru), Senior Researcher,

E-mail: dvoriashin@ippe.ru

Vladimir P. [Tarasikov](mailto:tarasikov@ippe.ru), Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: tarasikov@ippe.ru

Andrey A. [Ivanov](mailto:ivanov@ippe.ru), Head of Laboratory,

E-mail: ivanov@ippe.ru

Sergey V. [Shulepin](mailto:ympev@ippe.ru), Deputy Director,

E-mail: ympev@ippe.ru