

УДК 621.039.546.048:669.14.018.8

EDN CVXLEU

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИИ В ОБОЛОЧКАХ ОБЛУЧЕННЫХ ТВЭЛОВ ИЗ СТАЛИ ЭП823-Ш СО СНУП-ТОПЛИВОМ

Ф.Н. Крюков¹, А.В. Беляева¹, Е.И. Персиянова^{2,3}, А.П. Долгодворов³

¹АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов», Димитровград

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

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва

Выполнен анализ данных ПРИ твэлов экспериментальных сборок КЭТВС-3, ЭТВС-5, ЭТВС-9, ЭТВС-11, ЭТВС-16 на наличие и характер коррозии оболочек из стали ЭП823-Ш. Коррозия носит язвенный характер, виды очагов которой были охарактеризованы как фронтальная, островная и полуостровная. Отчетливая связь между параметрами облучения твэла и масштабом проявления коррозии не обнаружена. Однако есть указания на влияние изначальной примеси кислорода в топливе на степень проявления коррозии твэлов после облучения. Построена линейная регрессия зависимости глубины коррозии от высоты сечения топливной части твэла. Показан слабый характер данной зависимости: с увеличением высоты сечения твэла наблюдается небольшое увеличение глубины коррозии.

Ключевые слова: коррозия, послереакторные исследования, ЭП823-Ш

INVESTIGATION OF CORROSION IN EP823-Sh STEEL CLADDING OF IRRADIATED RODS WITH THE SNUP FUEL

F.N. Krukov¹, A.V. Belaeva¹, E.I. Persyanova, A.P. Dolgodvorov³

¹JSC State Scientific Center of the Russian Federation – Research Institute of Atomic Reactors, Dimitrovgrad

²JSC «A. A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials», Moscow

³Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

An analysis of data from the fuel rods of experimental assemblies KETVS-3, ETVS-5, ETVS-9, ETVS-11, and ETVS-16 was conducted to assess the presence and nature of corrosion. The corrosion was found to be of a pitting character, with the types of corrosion sites characterized as frontal, insular, and peninsular. No clear correlation was identified between the irradiation parameters of the fuel rods and the extent of corrosion manifestation. However, there are indications that the initial oxygen impurity content in fuel influences the degree of corrosion in irradiated fuel rods. A linear regression model was constructed to describe the dependence of corrosion depth on height of rod fuel part cross-section. The weak nature of this dependence is shown: with an increase in rod cross-section, a slight increase in the corrosion depth is observed.

Key words: corrosion, post-irradiation investigations, EP823-Sh

Введение

С целью обоснования безопасности проектируемого опытно-демонстрационного быстрого реактора БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем ведутся широкие теоретические и экспериментальные исследования по изучению поведения как комплексов систем реактора, так и частных физико-химических явлений. Особого внимания заслуживают частные явления, происходящие в твэлах проектируемого реактора со смешанным нитридным уран-плутониевым (СНУП) топливом и с оболочками из ферритно-мартенситной стали ЭП823-Ш [1]. Проводимые в АО «ГНЦ НИИАР» послереакторные исследования (ПРИ) облученных в реакторе БН-600 экспериментальных твэлов, служащих прототипом твэлов БРЕСТ-ОД-300, показывают наличие коррозии на внутренней поверхности оболочек из стали ЭП823-Ш, при этом степень проявления коррозии при взаимодействии СНУП топлива со стальной оболочкой больше, чем оксидного топлива [2-12]. Таким образом, исследование физико-химического взаимодействия оболочек твэлов из стали ЭП823-Ш и СНУП топлива имеет особую значимость.

В настоящей работе проведен анализ результатов ПРИ облученных в БН-600 твэлов экспериментальных сборок КЭТВС-3, ЭТВС-5, -9, -11, -16 с целью выявления зависимости глубины коррозии оболочек из

стали ЭП823-Ш от высоты рассматриваемого сечения твэла.

Характеристика объектов исследования

Проведен анализ результатов разрушающих ПРИ твэлов экспериментальных тепловыделяющих сборок КЭТВС-3, ЭТВС-5, -9, -11, -16. Исследована глубина коррозии оболочек из стали ЭП823-Ш со стороны СНУП топлива.

Все перечисленные сборки облучались в реакторе БН-600 до различных значений выгорания топлива. Диапазон значений достигнутого выгорания для твэлов, отобранных для разрушающих ПРИ, составил от 3,64% (твэл № 32 ЭТВС-5, твэл № 35 ЭТВС-9) до 8,93% (твэл № 11 ЭТВС-11). Диапазон значений максимальной линейной мощности изменялся от 34,9 кВт/м (твэл № 40 КЭТВС-3) до 39,9 кВт/м (твэл № 121 ЭТВС-16). Все твэлы (кроме негерметичного твэла № 34 ЭТВС-16) сохранили работоспособность. Твэлы ЭТВС-16 относятся к разряду «тонких», т.е. имеющих значения внутреннего и внешнего диаметров оболочки 6,1 мм и 6,9 мм соответственно. Остальные сборки имели значения внутреннего и внешнего диаметров оболочки твэлов 8,7 мм и 9,7 мм соответственно. Геометрические характеристики, состав топлива и параметры облучения твэлов, отобранных для разрушающих ПРИ экспериментальных тепловыделяющих сборок КЭТВС-3, ЭТВС-5, -9, -11, -16, представлены в таблице 1

Таблица 1

Геометрические характеристики, состав топлива и параметры облучения твэлов, отобранных для разрушающих ПРИ экспериментальных тепловыделяющих сборок КЭТВС-3, ЭТВС-5, -9, -11, -16: 1 – номер твэла; 2 – период облучения, микрокампании (МКК); 3 – суммарная наработка, количество МКК и эфф. сут.; 4 – размер оболочки: значения внешнего и внутреннего диаметров, мм (высота топливного столба, мм); 5 – номинальная массовая доля Pu в смеси U и Pu в СНУП топливе, %; 6 – максимальная линейная мощность, кВт/м; 7 – максимальное выгорание топлива, % т. а; 8 – максимальная повреждающая доза на оболочку твэла, сна; 9 – номинальная температура внутренней поверхности оболочки твэла, °С; 10 – массовая доля примеси кислорода в свежем топливе, % (для топлива, состоящего из таблеток разных партий, приведено максимальное значение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
КЭТВС-3									
26	67-71	5	9,7x8,7 (1100)	9,8	37,6	4,54	53,0	584	0,14
35		726,3			36,7	4,43	51,4	584	0,1
31					36,0	4,34	49,7	584	0,08
40					34,9	4,20	47,5	583	0,12
ЭТВС-5									
51	68-71	4	9,7x8,7 (1100)	9,8	39,9	3,80	47,5	521	0,07
32		589,2			38,2	3,64	44,1	582	0,052
37					38,8	3,70	45,3	571	0,053
42					39,7	3,78	47,0	540	0,15

ЭТВС-9									
11	69-72	4	9,7x8,7	9,8	39,8	3,95	49,2	517	0,073
34		591,3	(1100)		38,8	3,85	45,7	566	0,073
35					36,7	3,64	41,0	577	0,078
38					40,3	4,0	48,2	537	0,053
ЭТВС-11									
16	70-79	10	9,7x8,7	9,8	36,8	8,66	102,8	546	0,076
20		1479,3	(1100)		38,0	8,93	106,6	529	0,102
ЭТВС-16									
64	74-76	3	6,9x6,1	11,7	39,4	5,90	63,7	622	0,09
77		458,1	(1030)		39,4	5,91	63,6	622	0,1
116					39,8	5,98	62,5	604	0,1
121					39,9	6,00	62,2	588	0,045

Анализ формы и размеров коррозии

Проведен анализ форм язвенной коррозии твэлов, отобранных для разрушающих ПРИ экспериментальных тепловыделяющих сборок КЭТВС-3, ЭТВС-5, -9, -11, -16. ПРИ коррозии оболочек проведены на металлографических шлифах в 5 сечениях по высоте каждого твэла. При этом координаты вырезки металлографических шлифов, отсчитываемые от низа топливного столба, одинаковы для всех твэлов одной и той же экспериментальной сборки и несколько отличаются по разным сборкам.

Установлено, что коррозия в оболочках твэлов имеет преимущественно язвенный характер. На участках коррозии наблюдается повышенное содержание кислорода и хрома и пониженное содержание железа по сравнению с составом стали [3].

Форма язвенной коррозии на двумерных поперечных срезах носит различный характер: фронтальный (неравномерная сплошная коррозия [13, 14]), островной (коррозия пятнами [13, 14]) и полуостровной (местная подповерхностная язвенная коррозия [13, 14]). Как правило, фронтальная коррозия имеет малую глубину до ~ 50 мкм при значительной протяженности (порядка 1 мм и более) по сравнению с размерами очага локализованной язвенной коррозии. Граница участка с коррозией в стали при фронтальной коррозии имеет сложную форму. В качестве примера на рис. 1 представлена фронтальная коррозия, наблюдаемая в образце М3 (сечение 550 мм от низа топливного столба) твэла № 11 ЭТВС-9.

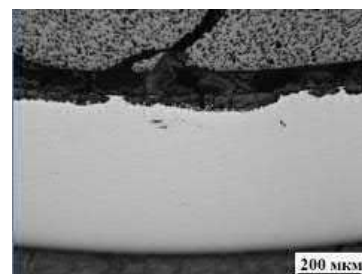


Рис. 1. Вид фронтальной коррозии, наблюдаемый в образце М3 (сечение 550 мм от низа топливного столба) твэла № 11 ЭТВС-9 с неровной формой границы между участком коррозии и сталью оболочки

На некоторых поперечных срезах замечена островная коррозия, обладающая сложной формой границы. Островная коррозия характеризуется очагом, удаленным от внутренней поверхности оболочки твэла (рис. 2.) на значительную глубину (более 50 мкм).

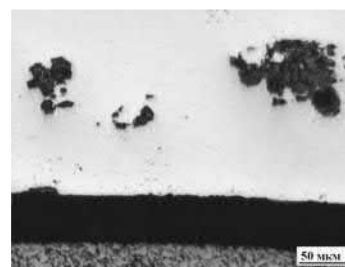
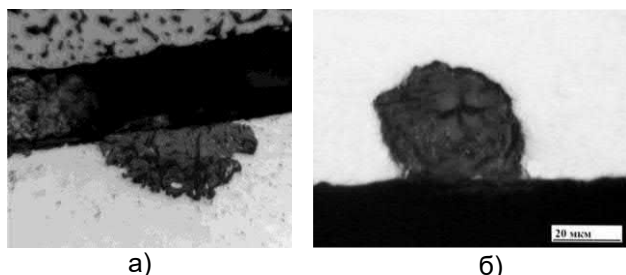


Рис. 2. Островная коррозия на примере образца М4 (сечение 835 мм от низа топливного столба) твэла № 26 КЭТВС-3

Установлено, что наиболее распространенный вид язвенной коррозии – полуостровной (рис. 3), обнаруженный практически в каждом твэле, где имеет место проявление коррозии, и обладающий различной формой и глубиной.



а) б)
Рис. 3. Полуостровной вид коррозии а) в образце М3 (сечение 581 мм от низа топливного столба) твэла № 32 ЭТВС-5 и б) в образце М4 (сечение 835 мм от низа топливного столба) твэла № 26 КЭТВС-3

Результат обработки данных по максимальной глубине коррозии в твэлах, отобранных для разрушающих ПРИ экспериментальных тепловыделяющих сборок КЭТВС-3, ЭТВС-5, -9, -11, -16, представлен в таблице 2.

Таблица 2
Значение максимальной глубины коррозии в твэлах, отобранных для разрушающих ПРИ экспериментальных тепловыделяющих сборок КЭТВС-3, ЭТВС-5, -9, -11, -16

№ твэла	Максимальная глубина коррозии, мкм
КЭТВС-3	
26	170
31	50
35	50
40	100
ЭТВС-5	
32	50-60
37	20-30
42	30-40
51	40-50
ЭТВС-9	
11	150
34	100
35	100
38	100
ЭТВС-11	
16	120
20	70
ЭТВС-16	
64	30
77	0
116	0
121	50

Из таблицы 2 видно, что в среднем максимальная глубина коррозии в твэлах находится на уровне до 100 мкм, при этом максимальное значение зарегистрировано у островного очага коррозии твэла № 26 КЭТВС-3 – 170 мкм. Содержание примеси кислорода в топливе твэла № 26 КЭТВС-3 – наибольшее из всех рассмотренных твэлов (0,14% масс.). Таким образом, содержание кислорода в свежем топливе влияет на степень коррозии оболочки, однако при малых значениях примеси (< 0,1% масс.) зависимость проявляется не столь явно. Топливо подавляющего большинства твэлов содержало примесь кислорода в количестве менее 0,1% масс., при этом глубина коррозии варьировалась достаточно случайно в пределах 100 мкм. Таким образом, содержание примеси кислорода 0,1% масс. может быть рассмотрено как некоторое пороговое значение, выше которого коррозия будет явно проявлять себя, а ниже – явление будет носить случайный характер. Здесь важно учитывать, что степень коррозии может зависеть не только от количества примеси кислорода, но и от количества примеси углерода, т.к. химический процесс коррозии может носить более сложный характер [15].

Количественные оценки глубины коррозии

Получены параметры линейной регрессии на основе данных о глубине язвенной коррозии образцов твэлов, отобранных для разрушающих ПРИ экспериментальных тепловыделяющих сборок КЭТВС-3, ЭТВС-5, -9, -11, -16 (рис. 4):

$$y = 31 + 0,008x,$$

где x – высота от низа топливного столба в мм, y – глубина коррозии в мкм. Коэффициент детерминации, R^2 , имеет значение $\approx 0,006$, что говорит об очень слабой тенденции к линейной зависимости глубины коррозии от высоты сечения твэла. Действительно, проявление коррозии носит в большей степени случайный характер, помимо этого, имеется слабая зависимость, либо вовсе отсутствие зависимости от параметров эксплуатации твэлов (выгорания и температуры). Тем не менее, принимая во внимание особенности рассматриваемого явления, прямая линейной регрессии показывает небольшой рост глубины коррозии в верхних сечениях твэлов.

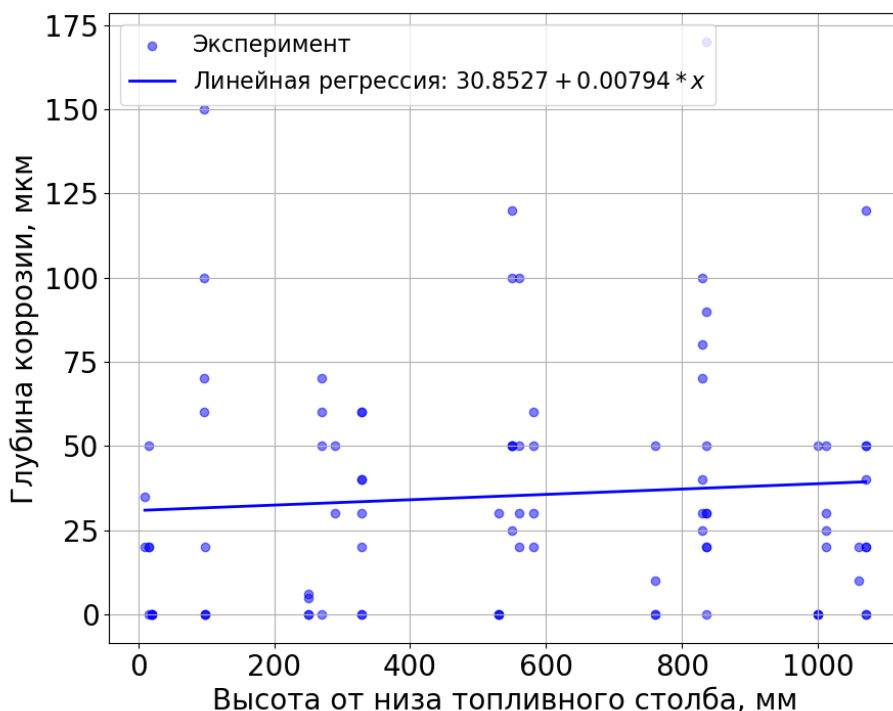


Рис. 4. Прямая линейной регрессии, построенная на основе анализа глубины коррозии в твэлах, отобранных для разрушающих ПРИ экспериментальных тепловыделяющих сборок КЭТВС-3, ЭТВС-5, -9, -11, -16

Заключение

Анализ данных ПРИ по состоянию оболочек из стали ЭП823-Ш твэлов со СНУП топливом экспериментальных тепловыделяющих сборок КЭТВС-3, ЭТВС-5, -9, -11, -16 после облучения в реакторе БН-600 до различных выгораний показывает следующее:

- контуры коррозии могут носить различный характер, в работе они охарактеризованы как фронтальный, островной и полуостровной;
- глубина коррозии варьируется от 0 мкм до 170 мкм, причем максимальное значение 170 мкм наблюдается у твэла с наибольшим

количеством примеси кислорода (более 0,1% масс.);

- для твэлов с примесью кислорода менее 0,1% масс. проявление коррозии носит скорее случайный характер и может зависеть от других параметров топлива, например количества примеси углерода;
- не прослеживается явной зависимости степени коррозии от выгорания топлива;
- линейная регрессия зависимости глубины коррозии от высоты сечения твэла слабо описывает данный процесс (коэффициент детерминации $R^2 \approx 0,006$), однако показывает небольшой рост глубины коррозии в верхних сечениях твэлов.

Список литературы

1. Адамов Е.О., Алексахин Р.М., Большов Л.А. и др. Проект «Прорыв» — технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики. — Изв. Академии наук. Энергетика, 2015, № 1, с. 5-12.
2. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» (отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2024 г.) / под общей ред. д-ра техн. наук, проф. В. В. Калыгина. — Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2025. С. 121.
3. Звир Е.А., Крюков Ф.Н., Гринь П.И., Строжук А.В., Сагалов С.С., Никитин О.Н., Беляева А.В., Кузьмин С.В., Федосеев А.Е., Скупов М.В., Иванов Ю.А. Результаты исследования твэлов сборки ЭТВС-5 после испытаний в реакторе БН-600 // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР», 2019, Вып. 3, С. 32-40.

4. Grachev A.F. et al. Development of innovative fast reactor nitride fuel in Russian Federation: State-of-art // International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17) Programme and Papers. International Atomic Energy Agency (IAEA), 2017. P. v.

5. Грачев А.Ф. и др. Сравнительный анализ результатов послереакторных исследований твэлов экспериментальных тепловыделяющих сборок со смешанным нитридным топливом, облученных в реакторах БОР-60 и БН-600: влияние параметров эксплуатации на основные повреждающие факторы в твэле // XI конференция по реакторному материаловедению, посвященная 55-летию отделения реакторного материаловедения АО «ГНЦ НИИАР». – 2019. С. 27-30.

6. Гринь П.И., Никитин О.Н., Беляева А.В. Основные результаты исследований твэлов экспериментальныхборок ЭТВС-9 и ЭТВС-10 после облучения в реакторе БН-600 // Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» (отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2019 г.). – 2020. – С. 110-112.

7. Звир Е.А. и др. Результаты исследования экспериментального твэла с уран-плутониевым нитридным топливом после второго этапа облучения в реакторе БОР-60 // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». – 2017. – №3. – С. 66-75.

8. Грачев А.Ф. и др. Послереакторные исследования твэлов с нитридным уран-плутониевым топливом с газовым и жидкометаллическим подслоем // Атомная энергия. – 2020. – Т. 129. – №6. – С. 311-316.

9. Р.Ш. Исаев, И.С. Джумаев, М.В. Леонтьева-Смирнова, И.А. Науменко Коррозионные свойства хромового покрытия на внутренней поверхности оболочки твэла из ферритно-мартенситной стали ЭП823-Ш. ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2024. Выпуск 2 (123)

10. Грачев А.Ф., Жеребцов А.А., Забудько Л.М. и др. Результаты исследования твэлов реактора типа БРЕСТ со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом, облученных в БОР-60 и БН-600 // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125. – вып. 5. – С. 278 – 281.

11. А.В. Беляева, Ф.Н. Крюков, О.Н. Никитин, Ильнур Ф. Гильмутдинов, П.И. Гринь Результаты материаловедческих исследований экспериментальных твэлов с ураноплутониевым нитридным топливом после облучения в реакторе БН-600 до максимального выгорания 9 % тяжелых атомов. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» (отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2022 г.) / под общей ред. д-ра техн. наук, проф. В.В. Калыгина. — Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2023. С. 137 – 139.

12. А.В. Беляева, Ф.Н. Крюков, П.А. Ильин, В.Г. Теплов, О.Н. Никитин, П.И. Гринь, Ильнур Ф. Гильмутдинов Исследования твэлов экспериментальной тепловыделяющей сборки после облучения в реакторе БН-600. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» (отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2020 г.) / под общей ред. д-ра техн. наук, проф. В.В. Калыгина. — Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2021. С. 103 – 106.

13. ГОСТ 9.106–2021 Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозия металлов. Термины и определения.

14. ГОСТ 5272–68 Защита от коррозии. Часть 4. Методы натуральных испытаний.

15. В.А. Русинкевич, А.С. Иванов Некоторые особенности взаимодействия нитридного топлива с оболочками твэлов из аустенитной и ферритно-мартенситной стали. — Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: физика ядерных реакторов, 2024, вып. 2, с. 134-142.

Поступила в редакцию / Received 18.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.07.2025

Принята к публикации / Accepted 22.08.2025