

## ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СТАЛЕЙ ЭК164 И ЧС68 ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАКТОРЕ БН-600 В ТЕЧЕНИЕ ЧЕТЫРЕХ МИКРОКОМПАНИЙ

А.М. Мосин\*, М.В. Евсеев\*, И.А. Портных\*, Е.Н. Щербаков\*,  
В.С. Шихалев\*, Н.М. Митрофанова\*\*, А.В. Козлов\*

*\*Открытое акционерное общество «Институт реакторных материалов»,  
г. Заречный,*

*\*\*ОАО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара», г. Москва*



Приведены результаты исследований оболочек твэлов аустенитных сталей ЧС68 и ЭК164 после эксплуатации в реакторе БН-600. Определены изменение диаметров, распухание, механические свойства, электросопротивление, модуль Юнга материалов оболочек по длине твэлов.

**Ключевые слова:** аустенитная сталь, доза облучения, распухание, механические испытания, удельное электросопротивление, модуль Юнга.

**Key words:** austenitic steel, irradiation dose, swelling, mechanical tests, specific resistivity, Young modulus.

В настоящее время актуальной задачей является достижение высокого выгорания топлива в реакторах на быстрых нейтронах. Для этого используются твэлы с оболочками из аустенитной стали ЧС68, изготовленной по усовершенствованной технологии на МСЗ, а также твэлы с оболочками из разработанной во ВНИИНМ новой аустенитной стали ЭК164.

Цель работы заключалась в определении механических и физических свойств оболочек из стали ЧС-68, изготовленных по усовершенствованной технологии на МСЗ, и из стали ЭК-164 после их длительной эксплуатации в составе ТВС в реакторе БН-600 и сравнении остаточной работоспособности оболочек из этих сталей.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследованы семь твэлов из двух ТВС:

- № 5506 после эксплуатации в течение 560 эфф. сут до максимального выгорания 9,1% т.а. и достижения повреждающей дозы на оболочку 77,3 сна – четыре твэла с оболочками из стали 07X16H19M2Г2БТР (ЭК164) и один твэл с оболочкой из стали 06X16H15M2Г2ТФР (ЧС68);

© *А.М. Мосин, М.В. Евсеев, И.А. Портных, Е.Н. Щербаков, В.С. Шихалев, Н.М. Митрофанова, А.В. Козлов, 2011*

• № 5541, отработавшей 572 эфф.сут до максимального выгорания 9,6% т.а. и достижения повреждающей дозы на оболочку 82,4 сна, – два твэла с оболочками из стали 06X16H15M2ГТФР (ЧС68).

Трубы из стали ЭК164 были изготовлены по штатной технологии ОАО «ПНТЗ». Заключительная деформация ( $20 \pm 3$ )% создавалась методом холодной прокатки труб роликми [1].

Трубы из стали ЧС68 изготовлены по штатной технологии ОАО «МСЗ» с использованием диффузионного отжига по режиму 1180°C в течение трех часов на предготовом размере 42×4,8 мм и последующего аустенизирующего отжига по оптимальному режиму на промежуточных и предготовом размерах. Заключительная холодная деформация со степенью ( $20 \pm 3$ )% выполнялась методом короткооправочного волочения [1], химический состав стали приведен в табл. 1.

В процессе исследований у оболочек твэлов измерены наружный диаметр и распухание (гидростатическим методом) [2, 3], определены характеристики упругости (ультразвуковым резонансным методом) [4] и значения удельного электросопротивления оболочки (электродифференциальным методом) [5]. Получены механические свойства оболочек при одноосном растяжении кольцевых образцов [6] и при испытаниях трубчатых образцов внутренним давлением [7] при температурах 20, 400, 600°C и температуре эксплуатации исследованных участков оболочек твэлов.

Таблица 1

**Химический состав материалов сталей ЭК164 и ЧС68, использованных для изготовления оболочек твэлов ТВС № 5506 и № 5541**

Твэл	Содержание элементов, % масс.									
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Ti	V	Nb	B
ЭК164 (№ 5506)	0,07	15,91	19,39	2,26	1,60	0,41	0,30	0,13	0,17	0,004
ЧС68 (№ 5506)	0,06	16,39	14,81	2,37	1,37	0,46	0,41	0,21	–	0,003
ЧС68 (№ 5541)	0,07	16,48	14,73	2,30	1,68	0,48	0,36	0,22	–	0,003

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения диаметров и распухания у твэлов после эксплуатации в БН-600 показали, что их изменения в зависимости от положения исследованного участка в активной зоне для сталей ЧС68 и ЭК164 различаются. Максимум формоизменения и распухания у оболочек из стали ЧС68 различных твэлов расположен на участке с координатами от 350 до 500 мм от низа активной зоны (НАКЗ). Максимальное изменение диаметров лежит в диапазоне от 3 до 6,5% (рис. 1). У оболочек из стали ЭК164 максимальное значение диаметра наблюдается на участке с координатами от 200 до 400 мм от НАКЗ, и значение изменения диаметра не превышает 1,9% (рис. 1). Максимальные распухания показаны на рис. 2 и их значения для стали ЧС68 в полтора-два раза выше, чем у стали ЭК164 с одинаковыми параметрами облучения.

Исходные значения модуля упругости и удельного электросопротивления у данных сталей различны, что связано, в основном, с различиями химического со-

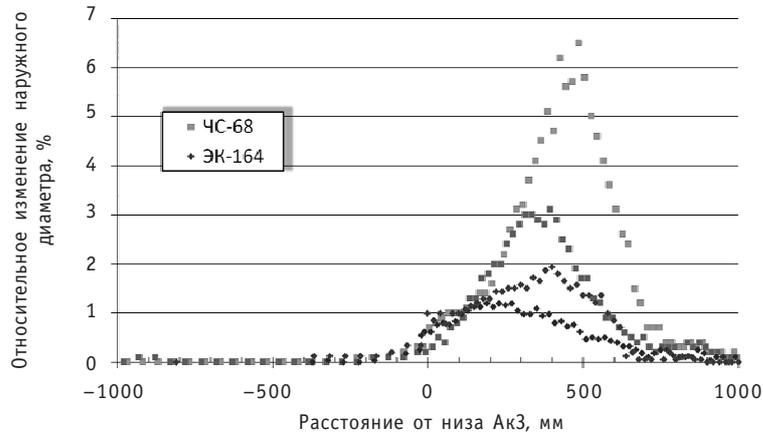


Рис. 1. Значение относительного изменения наружного диаметра по длине твэлов (стали ЭК164 и ЧС68)

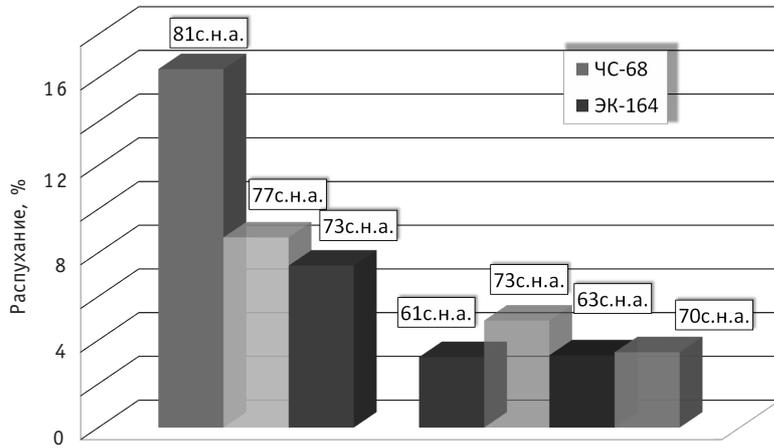


Рис. 2. Максимальные значения распухания твэлов (стали ЭК164 и ЧС68) с указанием дозы на данном участке

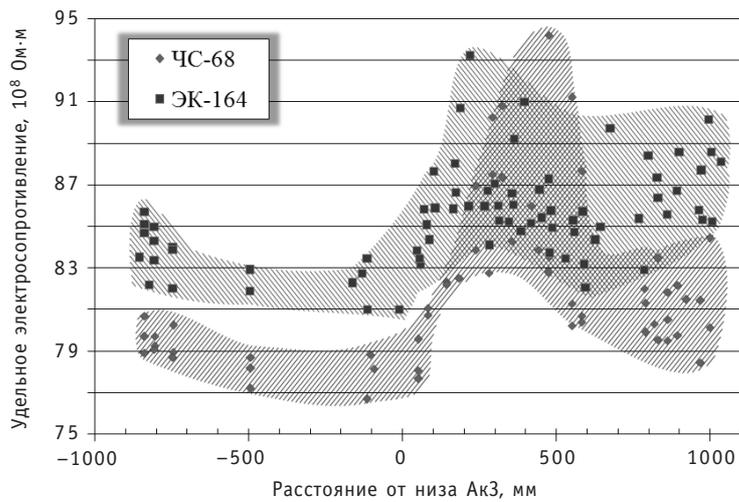


Рис. 3. Изменение электросопротивления по длине твэлов (стали ЭК164 и ЧС68)

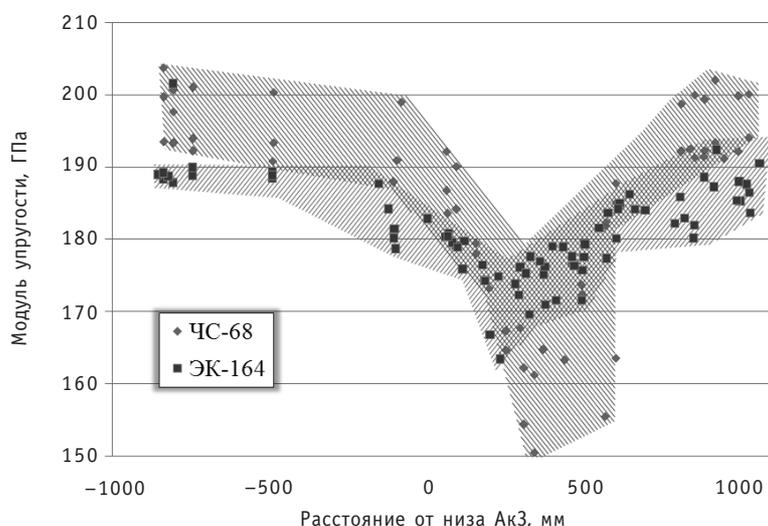


Рис. 4. Изменение модуля Юнга по длине твэлов (стали ЭК164 и ЧС68)

става и структуры материалов. Для исследованных сталей при облучении наблюдается рост электросопротивления и снижение модуля упругости, что связано с изменением структуры и, в первую очередь, с набуханием оболочек твэлов. Изменение этих свойств для стали ЧС68 почти в два раза больше, по сравнению со сталью ЭК164 (рис. 3, 4), что коррелирует с набуханием.

Измерение механических свойств было проведено двумя методами: одноосным растяжением кольцевых образцов и внутренним давлением трубчатых образцов. Метод одноосного растяжения кольцевых образцов является консервативным и не отражает в полной мере механические свойства материалов. Метод испытаний трубчатых образцов, вырезанных из облученных оболочек твэлов, внутренним давлением пластичного заполнителя более трудоемкий и требует более длинных, по сравнению с кольцевыми, образцов (15 мм вместо 3 мм). Вследствие значительных изменений температуры и дозы по длине твэла это не позволяет набрать достаточную статистику испытаний.

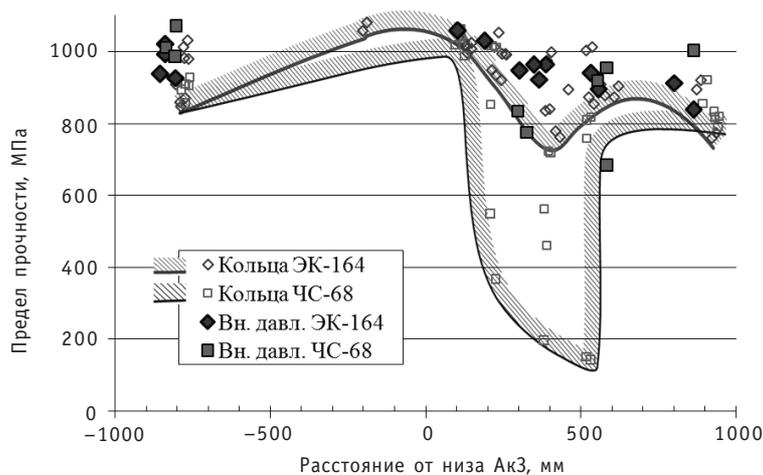


Рис. 5. Значение предела прочности по длине твэлов (стали ЭК-164 и ЧС-68), измеренного на кольцах и методом внутреннего давления, при температуре испытания 20°C

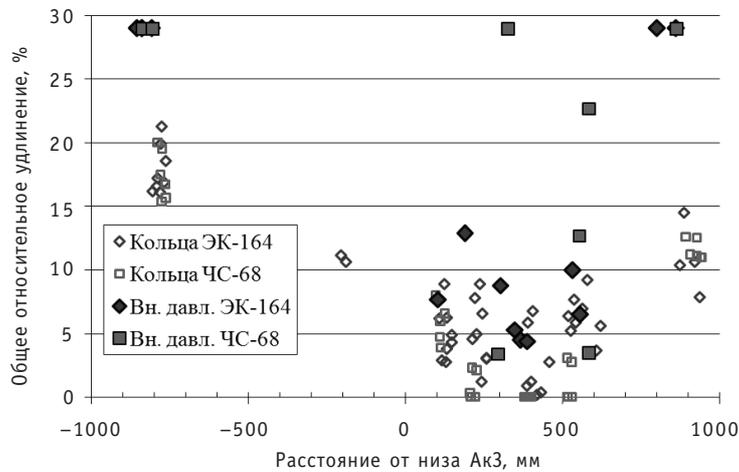


Рис. 6. Значение общего относительного удлинения по длине твэлов (стали ЭК-164 и ЧС-68), измеренного на кольцах и методом внутреннего давления, при температуре испытания 20°C

Зависимость изменений предела прочности и общего относительного удлинения при температуре испытаний 20°C от положения в АкЗ показана на рис. 5 и 6. По результатам испытаний методом одноосного растяжения прочность оболочек из стали ЧС68 снижается до значений ~150 МПа, в то время как у оболочек из стали ЭК164 минимальные значения предела прочности выше 750 МПа. Предел прочности, полученный при испытаниях внутренним давлением у стали ЧС68 превышает 700 МПа, а у стали ЭК164 – 850 МПа.

Относительное удлинение образцов оболочек твэлов из стали ЧС68, полученное при одноосном растяжении, равно нулю на довольно протяженном участке ниже центра активной зоны длиной около 300 мм. У кольцевых образцов из стали ЭК164 относительное удлинение также снижается, но нулевой пластичности не наблюдается и только отдельные значения ниже 2%. При испытаниях методом внутреннего давления в оболочке из стали ЧС68 в центре активной зоны пластичность принимает значения не ниже 3%, а для стали ЭК164 – выше 4%.

Испытания кольцевых образцов оболочек при температуре облучения (рабочей температуре) показывают, что минимальные значения предела прочности со-

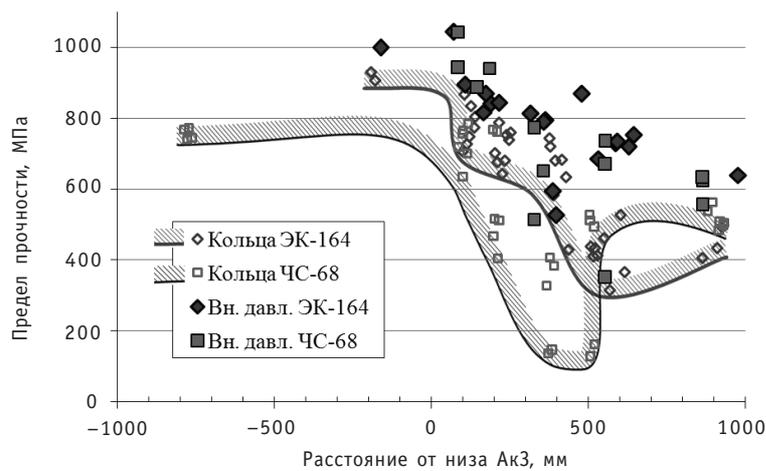


Рис. 7. Значение предела прочности по длине твэлов (стали ЭК-164 и ЧС-68), измеренного на кольцах и методом внутреннего давления, при рабочих температурах 370–660°C



6. МК-10.13/03 «Определение характеристик механических свойств при растяжении образцов продукции из конструкционных материалов». – ОАО «ИРМ», 2009. – 26 с.

7. МК-10.57/03 «Испытание тонкостенных трубчатых образцов внутренним давлением твердого заполнителя. Методика выполнения измерений». – ОАО «ИРМ», 2010. – 20 с.

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 energetica» (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 energetica» (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 energetica» (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 energetica» (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 energetica» (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.