

УДК 621.039.542

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ ЧС68 В ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

М.В. Баканов*, В.В. Чуев*, О.В. Крюков, А.В. Лукин**,
С.А. Бычков**, Ю.П. Буданов***, О.С. Коростин***,
А.В. Целищев***, В.Б. Тарасюк*****

* Белоярская АЭС, г. Заречный

** ОАО «Машиностроительный завод»

*** ФГУП ВНИИНМ



Кратко описана технология изготовления особотонкостенных холоднодеформированных труб размером 6,9×0,4 мм из стали ЧС68. Рассмотрены пути совершенствования технологии изготовления твэлов с целью повышения их радиационной стойкости в реакторе БН-600. Показано, что трубы, изготовленные по усовершенствованной технологии, по характеристикам длительной прочности превосходят поставляемые ранее трубы.

ВВЕДЕНИЕ

В качестве штатного материала оболочек твэлов реактора БН-600 используется сталь аустенитного класса ЧС68 в холоднодеформированном (х.д.) состоянии [1]. Использование данного материала обеспечило надежную работу активной зоны реактора БН-600 при проектном выгорании 10% т.а. и повреждающей дозе 75 с.н.а. [2,3]. В настоящее время осуществляется переход от активной зоны О1 М1 на активную зону О1М2 с максимальным выгоранием 11,2% т.а. и максимальной повреждающей дозой на твэл 82 с.н.а.

Анализ данных по распуханию материала оболочек твэлов (рис.1), изготовленных из стали ЧС68 х.д. и эксплуатировавшихся в реакторе БН-600 на разных стадиях освоения этого материала, показывает, что все данные распадаются на два массива: массив данных, полученный на экспериментальных ТВС, и массив, относящийся к штатным ТВС. Существенное отличие в таких параметрах, как величина и скорость распухания оболочек твэлов штатных и экспериментальных ТВС обусловлено снижением уровня служебных свойств оболочек промышленного изготовления в исходном состоянии. Разброс свойств при больших дозах облучения свидетельствует о резерве повышения выгорания, и выход на нижнюю границу «веера» (см. рис.1) разброса свойств путем оптимизации химического состава и структуры оболочек из стали ЧС68 х.д. может увеличить ресурс примерно на 20 с.н.а.

© М.В. Баканов, В.В. Чуев, О.В. Крюков, А.В. Лукин, С.А. Бычков, Ю.П. Буданов, О.С. Коростин, А.В. Целищев, В.Б. Тарасюк, 2005

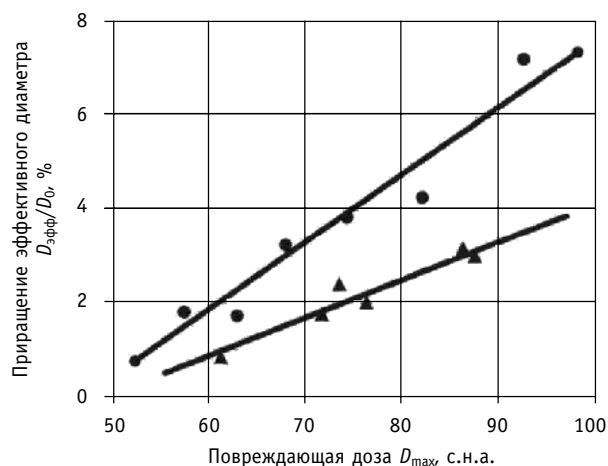


Рис. 1. Зависимость формоизменения оболочек твэлов из стали ЧС68 от повреждающей дозы ($T = 450 - 490^\circ\text{C}$): Δ массив1; \bullet массив2

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СТАЛИ ЧС68 х.д.

Появление первых признаков снижения радиационной стойкости оболочек твэлов из стали ЧС68 х.д. побудило к проведению работ по выявлению факторов, обусловивших такое поведение материала.

Прежде всего, внимание было обращено на операцию контроля герметичности готового твэла, в ходе которой допускался нагрев оболочки твэла до 650°C и выдержка при этой температуре до 6 ч. С позиций сохранения исходного холоднодеформированного состояния была определена допустимая температура нагрева оболочек $(500 + 50)^\circ\text{C}$ при максимальном (суммарном) времени выдержки не более 5 ч.

На основании проведенного статистического анализа сертификатных данных по содержанию легирующих элементов в материале оболочечных труб из стали ЧС68 было установлено, что содержание бора в 55% от объема выплавленного металла составило 0,001% и соответствовало нижнему пределу содержания бора, играющего важную роль в поведении материала под облучением (рис. 2). В ходе данной рабо-

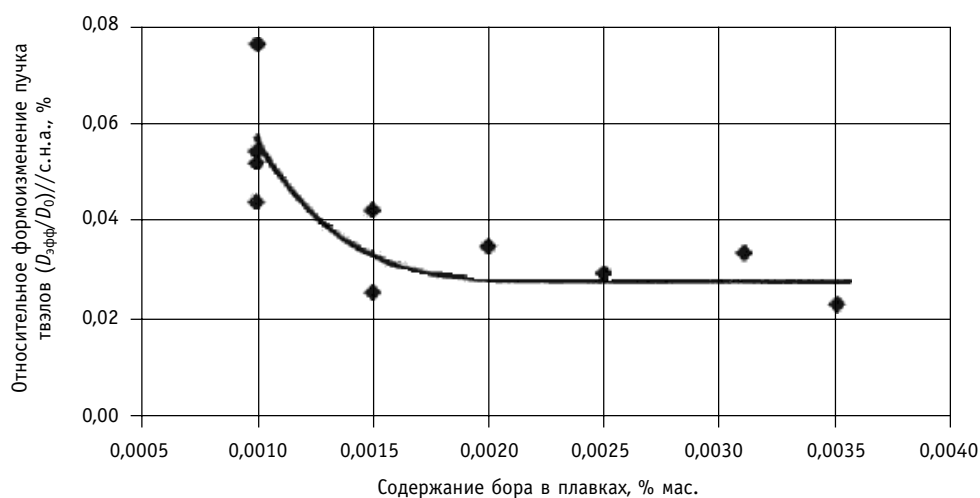


Рис. 2. Относительное формоизменение пучка твэлов из стали ЧС68 х.д. в зависимости от содержания бора в плавках

ты были внесены изменения в ТУ и нижний предел содержания бора в стали ЧС68 был повышен с 0,001 до 0,002% мас. при сохранении верхнего предела 0,005%, что позволило повысить среднее содержание бора в плавках.

В связи со значительным ростом цен на металл и энергоносители возникла необходимость в организации на ОАО «МСЗ» собственного производства оболочечных труб [4]. На это решение положительно повлияла территориальная близость металлургического завода «Электросталь» – основного поставщика металла. Осложняющим фактором являлись жесткие требования по охране окружающей среды, которые не допускают использования в технологическом процессе химических и других операций, связанных с загрязненными стоками.

В 1999 г. на ОАО «МСЗ» начато освоение производства особотонкостенных труб для оболочек твэлов реактора БН-600. На основании анализа технологических маршрутов холодной деформации для изготовления особотонкостенных оболочечных труб из аустенитных нержавеющих сталей типа X16H15 и опыта производства подобных труб в условиях ОАО «ПНТЗ», был разработан маршрут холодной деформации труб с использованием прокатки на станах ХПТР на готовый размер. Маршрут холодной прокатки труб приведен в табл. 1.

Таблица 1

Маршрут холодной деформации опытной партии труб из стали ЧС68 с использованием прокатки на станах ХПТР

| № п/п | Размер труб, мм | Операция, оборудование | Вытяжка; степень деформации, % |
|-------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 0. | 0 65 | Исходная трубная заготовка | |
| 1. | 57×8,5 | Обточка, сверление, расточка, т.о. | |
| 2. | 38×5,2 | Прокатка ХПТ-55, т.о. | 2,417; 58,6 |
| 3. | 24×3,5 | Прокатка ХПТ-55, т.о. | 2,377; 57,9 |
| 4. | 21×2,5 | Прокатка ХПТ-32, т.о. | 1,551; 35,5 |
| 5. | 18×1,6 | Прокатка ХПТР 15-30, т.о. | 1,763; 43,3 |
| 6. | 16×1,0 | Прокатка ХПТР 15-30, т.о. | 1,749; 42,8 |
| 7. | 10×1,0 | Безоправочное волочение (б/о), т.о. | 1,667; 40,0 |
| 8. | 8,4×0,7 | Прокатка ХПТР 8-15, т.о. | 1,670; 40,1 |
| 9. | 7,23×0,48 | Прокатка ХПТР 8-15, т.о. | 1,664; 39,9 |
| 10. | 6,9×0,4 | Прокатка ХПТР 4-15, 20 % х.д. | 1,246; 19,7 |

По маршруту, приведенному в табл. 1, была изготовлена первая опытная партия труб размером 0 6,9 х вн. 6,1×2500 мм в объеме ≈ 600 м. Отличительной особенностью технологии производства труб на ОАО «МСЗ» является отсутствие операции горячей деформации трубной заготовки, взамен которой используется сверление, обточка и расточка исходной трубной заготовки 0,65 мм для получения гильзы 57×8,5 мм.

Как видно из табл. 1, маршрут изготовления труб включает большое количество операций прокатки на станах ХПТР, что снижает производительность изготовления. Учитывая это и планируемые объемы производства (до 300 тыс. м труб в год), специалистами ОАО «МСЗ» и ВНИИНМ было предложено и реализовано следующее:

- новый маршрут прокатки с использованием станов валковой прокатки ХПТ и КРВ вместо ХПТР, позволяющий значительно сократить число проходов за счет увеличения обжатия за один проход до 57–65% против ~ 40% (на станах ХПТР);
- короткооправочное волочение труб (КОВ) на готовый размер (взамен роликовой прокатки), что позволяет при простоте оборудования, наряду с высокой производи-

Таблица 2

Маршрут холодной деформации опытной партии труб из стали с использованием волочения на короткой оправке

| № п/п | Размер труб, мм | Операция, оборудование | Вытяжка; степень деформации, % |
|-------|-----------------|------------------------------|--------------------------------|
| 0. | 0 65 | Исходная трубная заготовка | |
| 1. | 57×8,5 | Обточка, сверление, расточка | |
| 2. | 42×4,8 | Прокатка ХПТ-55, т.о. | 2,309; 57,0 |
| 3. | 28×2,6 | Прокатка ХПТ-55, т.о. | 2,860; 63,0 |
| 4. | 18×1,5 | Прокатка ХПТ-30, т.о. | 2,668; 62,5 |
| 5. | 11,6×0,82 | Прокатка КРВ-18, т.о. | 2,704; 65,0 |
| 6. | 7,2×0,48 | Прокатка КРВ-18, т.о. | 2,680; 62,7 |
| 7. | 6,9×0,4 | КОВ СХКВ-2000, х.д. | 1,240; 19,4 |

тельностью изготовления труб, получать узкие поля допусков на наружный и внутренний диаметры (до ± 15 мкм), снижать шероховатость по поверхности и количество дефектов на поверхности труб.

Новый технологический маршрут холодной деформации труб из стали ЧС68 с использованием волочения на короткой оправке приведен в табл. 2.

В дальнейшем (начиная с 2003 г.) изготовление труб для оболочек твэлов реак-

тора БН-600 осуществляется на ОАО «МСЗ» только с использованием метода короткооправочного волочения.

Результаты послереакторных испытаний позволили определить дальнейшие направления повышения радиационной стойкости оболочек твэлов из стали ЧС68 за счет оптимизации их структуры и усовершенствования технологии изготовления [5]:

- оптимизация режимов термообработки труб промежуточных и предготового размеров;

- внедрение диффузионного отжига (ДО) на передельной трубе размером $0\ 42 \times 4,8$ мм;

- повышение степени заключительной холодной деформации с величины $20 \pm 3\%$ до $(20-25)\%$.

Эффективность использования подходов, заложенных при разработке стали ЧС68, достигается при максимальном переводе легирующих элементов (углерод, титан, бор и др.) в твердый раствор при аустенитизирующей термообработке труб на предготовом размере, что соответствует структуре, приведенной на рис. 3а. В то же время проведенный анализ микро-

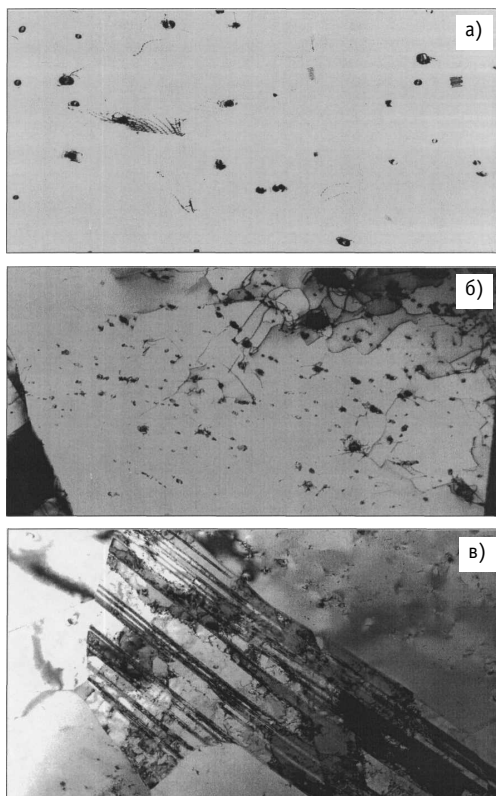


Рис. 3. Микроструктура образцов труб из стали ЧС68 на предготовом размере: а) производство ОАО «МСЗ»; б, в) производство ОАО «ПНТЗ», $\times 20000$

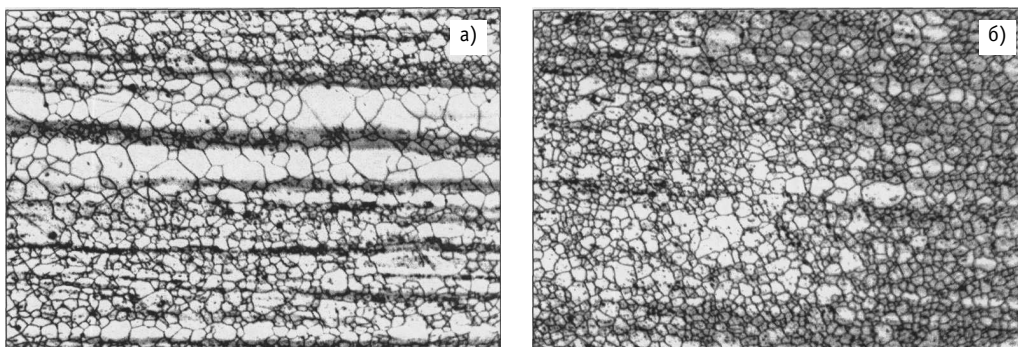


Рис. 4. Микроструктура труб из стали ЧС68: × 350 а) после отжига 1060°C, 20 мин на размере 0 42 мм; б) после отжига 1180°C, 3 ч на размере 0 42 мм

производства ОАО «ПНТЗ» выявил наличие мелкодисперсных вторичных карбидов титана и участки нерекристаллизованной матрицы (рис. 3б, 3в), что делало структуру этих труб неоптимальной по стойкости к распуханию.

Оптимизация режимов термообработки труб промежуточных и предготового размеров (температура нагрева до 1060°C) позволила устранить отмеченные недостатки и одновременно удовлетворить требованиям технических условий 8009.00.004ТУ по размеру зерна.

В результате комплекса исследований металла трубной заготовки было обнаружено, что имеющаяся химическая неоднородность по ее сечению наследуется при дальнейшем трубном переделе и проявляется в виде ликвационной полосчатости структуры и зеренной неоднородности материала труб как передельных, так и готового размеров (рис. 4а). По предложению ВНИИНМ с целью уменьшения химической неоднородности и полосчатости металла труб опробован и внедрен с апреля 2003 г. режим термической обработки труб промежуточного размера 42×4,8 мм – диффузионный отжиг по режиму: 1180°C, выдержка 3 ч. Как следует из рис. 3б, применение диффузионного отжига позволяет существенно повысить однородность структуры материала труб.

Согласно современным представлениям, положительное влияние холодной деформации на снижение распухания выражено, в основном, в продлении инкубационного периода распухания [6, 7]. Однако ответ на вопрос: до каких повреждающих доз сохранится положительное влияние увеличения степени предварительной холодной деформации, можно получить только экспериментальным путем. Следует отметить, что оптимизация степени холодной деформации является компромиссной задачей и необходимо учитывать влияние холодной деформации на снижение температуры рекристаллизации и характеристик длительной прочности и пластичности материала.

Большое внимание при производстве труб было уделено вопросам удаления технологических смазок. Важной частью проведенной работы было внедрение и внесение в техпроцесс операции обезжиривания поверхности труб на готовом размере 6,9 х вн. 6,1 мм методом ультразвуковой мойки на установке «Поток-1». Одним из важных требований к оболочкам твэлов быстрых реакторов на этапе дореакторных исследований является обеспечение стабильности микроструктуры и высоких характеристик прочности и пластичности при испытаниях на ползучесть и длительную прочность. Предпосылкой для такого подхода являлось то, что повышенная стабильность исходной дислокационной структуры и замедленные процессы эволюции фаз коррелируют с повышенной радиационной стойкостью материала. Кривые длительной прочности труб из стали ЧС68 х.д. приведены на рис. 5.

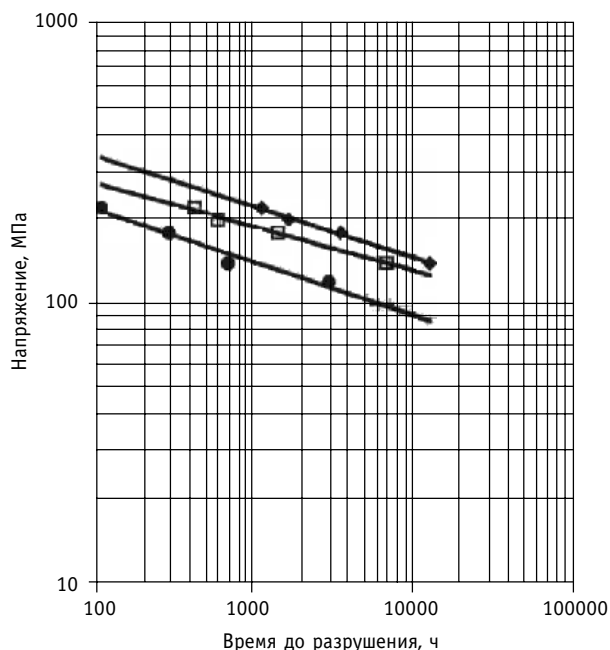


Рис. 5. Длительная прочность труб 6,9 х вн. 6,1 из стали ЧС68 х.д.
 $T_{исп} = 700^{\circ}\text{C}$: ◆ МСЗ ДО КОВ; □ МСЗ без ДО КОВ; ● ПНТЗ

Как видно из приведенных на рис. 5 данных, длительная прочность при температуре 700°C оболочечных труб производства ОАО «МСЗ» выше, чем у труб производства ОАО «ПНТЗ».

Наибольшей длительной прочностью обладали трубы производства ОАО «МСЗ», изготовленные с использованием диффузионного отжига и короткооправочного волочения.

Повышение радиационной стойкости материала является задачей многопараметрической оптимизации, что обусловлено сложными, нелинейными связями химического состава и структурно-фазового состояния металла со свойствами оболочечных труб из аустенитных нержавеющих сталей. Поэтому для более глубокого изучения и пол-

ного использования эффективности рассматриваемых способов повышения работоспособности твэлов, в реакторе БН-600 проводится облучение восьми ТВС (4-е ТВС 3Б0, 2-е ТВС 3С0, 2-е ТВС 3М0), изготовленных в «реперном» исполнении. В настоящее время три из них, по одной из зон большого, среднего и малого обогащения отработали в активной зоне в течение 558,4 эфф.сут без замечаний и достигли значений максимальной повреждающей дозы ($70 \div 78$) с.н.а. и максимального выгорания ($10,4 \div 9,2$)% т.а. соответственно. Они намечены к выгрузке в весеннюю перегрузку 2005 г., в конце 2005 г. планируется выгрузить из реактора еще одну «реперную» ТВС с наработкой ~560 эфф. сут, в 2006 г. – по две в каждую из перегрузок. Послереакторные исследования первой ТВС планируется начать во второй половине 2005 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На ОАО «МСЗ» организовано и освоено производство особотонкостенных труб из стали ЧС68 х.д., которые полностью отвечают требованиям технических условий.
2. На ОАО «МСЗ» внедрено производство труб для оболочек твэлов реактора БН-600 с применением операции диффузионного отжига, оптимизированных режимов рекристаллизационного отжига и метода короткооправочного волочения на конечном размере.
3. Оболочечные трубы из стали ЧС68 х.д., изготовленные по усовершенствованной технологии, превосходят по характеристикам длительной прочности трубы, поставляемые ранее ОАО «ПНТЗ».
4. Проведенный комплекс материаловедческих и технологических работ позволяет полагать, что усовершенствование технологии изготовления оболочек твэлов из стали ЧС68 обеспечит надежную работу реактора БН-600 с кампанией ТВС активной зоны 560 эфф.сут.

Литература

1. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Романев В.В. и др. Исследования конструкционных материалов элементов активной зоны быстрых натриевых реакторов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1994. – С. 189-199.
2. Ошканов Н.Н. Опыт эксплуатации реактора БН-600/Российский научно-технический форум. – Обнинск, 2003.
3. Чуев В.В., Росляков В.Ф., Мальцев В.В. Особенности поведения конструкционных материалов в спектре нейтронов быстрого реактора большой мощности//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – № 1.
4. Хаустов Г.И., Правдин Ю.М., Фролов В.Ф. и др. Организация производства особотонкостенных труб из коррозионностойких сталей и сплавов ОАО «Машиностроительный завод»/Атомная энергетика на пороге XXI века: Тр. Международной конф. – Электросталь, 2000. – С. 159-165.
5. Ватулин А.В., Целищев А.В. Конструкционные стали для активной зоны реакторов на быстрых нейтронах. – МИТОМ. – 2004. – № 11. – С. 13-19.
6. Красноселов В.А., Прохоров В.И., Колесников А.Н. и др. Влияние предварительной термической и механической обработки на распухание нержавеющей стали ОХ16Н15МЗБ//Атомная энергия. – 1983. – Т. 54. – Вып. 2. – С. 111-114.
7. Seran J.L., Levy V., Dubuisson H. et al. Behavior under neutron irradiation of the 15-15Ti and EM10 steels used as standard materials of the Phenix fuel subassembly, Effects of radiation on materials: 15th International Symposium, ASTM STP 1125, 1992. – P. 1209-1233.

Поступила в редакцию 22.02.2005

The behaviour of the sodium-heated once-through steam generator evaporator stage hydrodynamic instability range boundaries has been analyzed. The recommendations on the evaporator stage stability improvement under startup transients are given.

УДК 621.039.526

About Connection of the Sodium Flow Rate Distribution in the BN-600 Reactor Primary Circuit with the Reactor Vessel Thermocouples Reading Pattern \A.A. Bychkov, I.M. Krysan'tev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 5 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 2 titles.

The authors present analysis results of the reading of the thermocouples for sodium temperature measurements into the BN-600 reactor vessel (reactor vessel thermocouple) for several operating cycles the BN-600 reactor. The reactor vessel thermocouples reading dependence from hydraulic condition of the BN-600 reactor primary circuit is presented in this article.

УДК 621.039.542

Features of Constructional Materials' Behavior within Fast High-Power Reactor's Spectrum of Neutrons \V.V. Chuyev, V.F. Rosljakov, V.V. Maltsev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 14 pages, 5 tables, 13 illustrations. – References, 5 titles.

Present work reviews basic research results of the of experimental and regular fuel subassemblies and fuel pins using an example of reactor's FN-600 for its transformation to the fuel burn out ~11 % h.a.. These results are necessary for substantiation of constructional materials' safe and reliable work within an active third modernization zone.

УДК 621.039.526

Radiation Swelling of Steels in the Fast Reactor Neutron Field \E.A. Kozmanov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 9 titles.

At present the vast experimental material validating the fact that the pores in steel are formed during in-reactor irradiation due to the unbalanced strains induced by the structural stresses caused by the processes of forming the secondary phases against a background of the degraded internal links. The loss of the phase stability causes an essential change in the physical and mechanical properties of the irradiated materials. The sizes and concentration of pores and precipitations are dependent on temperature. In this paper the phenomenologic presentation of the steel swelling process in the fast reactor neutron field is made on the basis of the applicable experimental data.

УДК 621.039.526

Confirmation of the Design Lifetime of the Test Safety Rods Manufactured of Refabricated Boron Carbide after Operation in the BN600 Reactor \A.V. Zakharov, A.I. Karpenko, E.A. Kozmanov, V.V. Maltsev, V.D. Risovany, A.A. Khudyakov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 6 pages, 2 tables, 4 illustrations.

The main results of the in-reactor testing and integrated research conducted by the Russian nuclear reactor research centre and Beloyarsk NPP in support of the utilization of the safety rods manufactured of refabricated boron carbide in the fast reactor are presented. The test rods have smoothly operated under actual conditions without any damage or any change in dimensions or geometry. The total results of the in-reactor testing and primary and scientific post-irradiation examinations of the test safety rods allow the use of the design of these rods having got design lifetime of 580 efpd as a standard one for the BN600 reactor to be recommended.

УДК 621.039.542

Optimization of the Structural Condition of Fuel Cladding Material \M.V. Bakanov, V.V. Chuev, O.V. Kryukov, A.V. Lukin, S.A. Bychkov, Yu.P. Budanov, O.S. Korostin, A.V. Tselishchev, V.B. Tarasyuk; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 7 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References, 7 titles.

The technology of the especially thin-walled cold-worked tubes sizing 6.9 by 0.4 mm of '4C68' steel is outlined. The ways of the fuel pin technology advancement aimed at obtaining better fuel pin radiation resistance in the BN600 reactor are reviewed. The long-term strength of the tubes manufactured following the advanced technology is better than that of the tubes supplied earlier.