Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени А.И. Лейпунского

На правах рукописи УДК 621.039.531

04200953011 Поролло Сергей Иванович

РАСПУХАНИЕ И МИКРОСТРУКТУРА ОБОЛОЧЕЧНЫХ СТАЛЕЙ ЭИ-847, ЭП-172, ЧС-68 ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТВЭЛОВ РЕАКТОРА БН-600

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность 05.14.03 — «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

Научный руководитель: доктор физ. мат. наук, профессор Ю.В. Конобеев

Обнинск - 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 6

ГЛАВА 1 МЕХАНИЗМЫ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ ПРИ ВЫСОКИХ УРОВНЯХ ВЫГОРАНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА 12

1.1 Характер повреждения оболочек твэлов реактора БН-600 12

1.2 Деградация прочностных свойств и охрупчивание материала оболочек твэлов 20

1.3 Снижение коррозионной стойкости материала

оболочек твэлов 24

1.4 Напряженно-деформированное состояние оболочек твэлов в

сечениях максимального увеличения диаметра 26

Выводы к Главе 1 33

ГЛАВА 2 АУСТЕНИТНЫЕ ХРОМО-НИКЕЛЕВЫЕ СТАЛИ

КАК МАТЕРИАЛ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ С НАТРИЕВЫМ

ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ 34

2.1 Требования к материалу оболочек твэлов

быстрых реакторов 34

2.2 Анализ зарубежных программ по разработке материалов для оболочек твэлов быстрых реакторов 40

2.2.1 США 40

2.2.2 Япония 47

2.2.3 Европа 50

2.3 Фазовый состав сталей аустенитного класса в исходном состоянии и после термических выдержек 54

2.4 Фазовый состав сталей аустенитного класса

после нейтронного облучения 56

Выводы к Главе 2 61

ГЛАВА 3 МИКРОСТРУКТУРА И РАСПУХАНИЕ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ, ОБЛУЧЕННЫХ В КАЧЕСТВЕ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ РЕАКТОРА БН-600 62

3.1 Материалы и методики эксперимента 62

3.1.1 Конструкция твэла и ТВС реактора БН-600 62

3.1.2 Характеристика материала оболочек твэлов 63

3.2 Условия эксплуатации твэлов 69

3.3 Методики исследования 72

3.3.1 Измерение диаметра твэлов 72

3.3.2 Гидростатическое взвешивание 73

3.3.3 Электронно-микроскопические исследования 73

3.4 Сталь ЭИ-847 (0Х16Н15МЗБ) в аустенизированном состоянии 76

3.5 Сталь ЭИ-847 (0Х16Н15МЗБ) в холодно-деформированном состоянии 93

3.6 Сталь ЭП-172 (0Х16Н15МЗБР) в холодно-деформированном состоянии 101

3.7 Сталь ЧС-68 (06Х16Н15М2Г2ТФР) в холодно-деформированном состоянии 112

Выводы к Главе 3 123

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ СТАЛЕЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ИХ СОПРОТИВЛЕНИЯ К ВАКАНСИОННОМУ РАСПУХАНИЮ 125

4.1 Анализ дозно-температурных зависимостей распухания

сталей ЭИ-847А, ЭИ-847 х.д., ЭП-172 х.д. и ЧС-68 х.д 125

4.1.1 Сталь ЭИ-847 в аустенизированном состоянии 125

4.1.2 Сталь ЭИ-847, 20 % х.д 128

4.1.3 Стали ЭП-172 и ЧС-68 в холодно-деформированном состоянии... 129

4.2 Влияние содержание кремния на распухание стали

ЭИ-847 в аустенизированном состоянии 133

4.3 Расчет фактора предпочтения для исследованных сталей

на основе полученных микроструктурных данных 136

4.3.1 Сталь ЭИ-847 х.д 137

4.3.2 Сталь ЭП-172 х.д 137

4.3.3 Сталь ЧС-68 х.д 138

4.4 Оценка влияния различных микроструктурных составляющих

на распухание аустенитных нержавеющих сталей 139

4.4.1 Фазовый состав 139

4.4.2 Дислокационная структура 144

Выводы к Главе 4 145

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 147

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 149

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПроведенныеисследованияраспуханияимикроструктурыоболочектвэловизготовленныхизаустенитныхнержавеющихсталейЭИЭПиЧСпослеоблучениявреактореБНвдиапазоневыгоранийтопливатаиповреждающихдозснапозволилиполучитьследующиенаучныерезультаты

 ПоказаночтооднимизосновныхфакторовограничивающихработоспособностьтвэловреактораБНявляетсявысокоераспуханиематериалаоболочекприводящеекихохрупчиваниюикоррозионномурастрескиванию

 УстановленочтоважныйвкладвнапряженнодеформированноесостояниеоболочектвэловподоблучениемвносятнапряженияобусловленныенеравномерностьюраспуханияпотолщинеоболочкиприводякихразрушениюприпослереакторныхисследованияхУровеньэтихнапряженийопределяетсякакабсолютнойвеличинойраспуханиятакиформойтемпературнойзависимостираспухания

 ОпределенытемпературнодозовыехарактеристикивакансионныхпордислокационнойструктурыиобластисуществованиявторичныхфазвсталяхЭИЭПиЧС

 ПоказаночтонаибольшеевлияниенаразвитиепористостивисследованныхсталяхоказываютмелкодисперсныевыделениятипаивыделенияфазыВыделениятипаподавляютзарождениепорпутемзахватагелияиобразующихсяприоблученииточечныхдефектовповерхностьюразделавыделениематрицаОбразованиевыделенийфазыускоряетраспуханиеиззаобедненияматрицыкремниеминикелем

 ВрезультатепроведенныхмикроструктурныхисследованийопределеновлияниемикролегированиясталейЭПиЧСборомДобавкабораприводиткзамедлениюэволюциидислокационнойструктурысталиподоблучениемзадерживаяпревращениедефектныхпетельФранкаи

совершенныедислокационныепетлиисеткудислокаций

 ВпервыеустановленочтораспуханиеоболочектвэловизсталиЭИваустенизированномсостоянииизменяетсяпривариациисодержаниякремниявпределахопределяемыхтехническимиусловиямиСкоростьраспуханиясталиснижаетсясснадоснаприувеличениисодержаниякремниясмасдомае

 НаименьшеераспуханиесредиисследованныхсталейЭИЭПиЧСвхолоднодеформированномсостоянииимеетстальЧССтальЧСхдприэтомимеетболеепологуютемпературнуюзависимостьраспуханияпосравнениюсостальюЭПхдчтоснижаетуровеньнапряженийвоболочкахтвэлов

ПолученныевданнойработенаучныерезультатыпозволилиустановитьэксплуатационныересурсыоболочектвэловизсталейЭИЭПиЧСирекомендоватьстальЧСвхолоднодеформированномнасостояниивкачествештатногоматериалаоболочектвэловреактораБНРезультатыданнойработыбылииспользованыприповышениирадиационнойстойкостисталиЧСзасчетоптимизациихимическогосоставаиструктурнофазовогосостоянияматериалаатакжеприразработкеновойсталидляоболочектвэловЭК