

ВНУТРИТВЭЛЬНАЯ КОРРОЗИЯ ОБОЛОЧЕК ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Е.А. Кинёв

ФГУП Институт реакторных материалов, г. Заречный



Обобщены результаты металлографических исследований внутритвэльной коррозии оболочек твэлов быстрого реактора. Проведена идентификация типов коррозии сталей, использованных для изготовления оболочек. Построены зависимости глубины коррозионных повреждений от эксплуатационных параметров.

ВВЕДЕНИЕ

Для изготовления оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах применяются нержавеющие стали с повышенной жаропрочностью. В России наиболее широкое распространение получили стали аустенитного класса типа 16Cr-15Ni. Перспективным материалом оболочек твэлов также признаны стали ферритно-мартенситного класса с содержанием хрома 12–13% [1].

Оболочки работают в сложных эксплуатационных условиях. Их работоспособность в значительной степени определяется уровнем внутритвэльной коррозии, возникающей вследствие физико-химического взаимодействия материалов топлива и оболочки (ФХВТО). В обзоре обобщены результаты металлографических исследований внутритвэльной коррозии оболочек, изготовленных из сталей аустенитного и ферритно-мартенситного классов.

МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом исследования являлись оболочки твэлов, изготовленные из сталей 08X16H15M3Б (аустенизированное состояние), 08X16H15M3Б в холоднодеформированном (х.д.) состоянии, 06X16H15M3БР (х.д.), 06X16H15M2Г2ТФР (х.д.), 12X13МБФР.

Условия эксплуатации оболочек следующие:

- длительные сроки облучения, достигающие двух лет;
- значительные повреждающие дозы (выше 40 сна);
- температура облучения в диапазоне от 400 до 650°C;
- агрессивная внутритвэльная среда, характеризующаяся наличием коррозионно-активных продуктов деления топлива;
- высокое давление внутритвэльной атмосферы (при нормальных условиях превышает 10 атм);
- наличие термомеханических нагрузок со стороны сердечника и окружающих твэлов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

ФХВТО в твэлах с оболочками из стали 08X16H15M3Б

Послереакторные исследования твэлов с оболочками из стали 08X16H15M3Б в аустенизированном состоянии показали низкую стойкость данного материала к внутритвэльной межкристаллитной коррозии (МКК), развивающейся на фоне высокого радиационного распухания при температурах эксплуатации выше 450°C. Глубина МКК со стороны внутренней поверхности составляла 30–50% от толщины оболочек твэлов. На участках, ослабленных интенсивным развитием МКК, возникали глубокие и сквозные трещины, приводящие к разгерметизации твэлов при дозах менее 40 сна (рис.1а).

Эффективным способом подавления распухания и внутритвэльной коррозии оболочек, изготовленных из сталей аустенитного класса, оказалось создание в готовых трубных заготовках предварительной холодной деформации на уровне 20% [2]. Состояние внутренней поверхности оболочки из холоднодеформированной стали при температуре облучения, близкой к максимальной, демонстрирует рис. 1б. В этом случае видны лишь признаки МКК в виде повышенной травимости границ зерен в поверхностном слое. В интервале средних эксплуатационных температур (500–550°C) при повреждающих дозах, достигавших 60 сна, ФХВТО в оболочках из данного материала проявлялось наличием МКК и развитием отдельных межкристаллитных трещин на глубину не более 1/10 толщины оболочки. Ресурс оболочек в х.д. состоянии ограничивался лишь недостаточной стойкостью к распуханию.

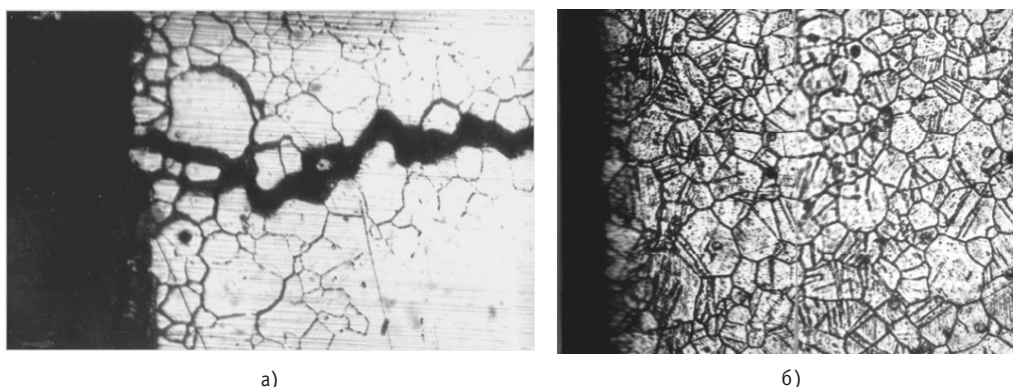


Рис. 1. Характер ФХВТО в оболочках из материала 08X16H15M3Б: а – аустенизированное состояние ($T_{обл.} \sim 520^\circ\text{C}$, $D \sim 35$ сна); б – х.д. состояние ($T_{обл.} \sim 600^\circ\text{C}$, $D \sim 39$ сна)

ФХВТО в оболочках из стали 08X16H15M3БР (х.д.) и 06X16H15M2Г2ТФР (х.д.)

Стали с повышенной стойкостью к радиационному распуханию 08X16H15M3БР (х.д.) и 06X16H15M2Г2ТФР (х.д.) эксплуатируются в качестве оболочек твэлов до повреждающих доз 80–90 сна.

Принципиальных различий по характеру внутритвэльной коррозии в сталях данных марок не установлено. Типичное состояние внутренней поверхности оболочек твэлов на основе двуокиси урана показано на рис. 2.

Внутритвэльная коррозия в твэлах данного типа идентифицирована по трем основным механизмам: коррозионное растрескивание под напряжением (КР), МКК и фронтальная матричная (ФК) коррозия. Типичной является комбинация двух или всех перечисленных типов коррозии. Смешанный характер коррозии преоблада-

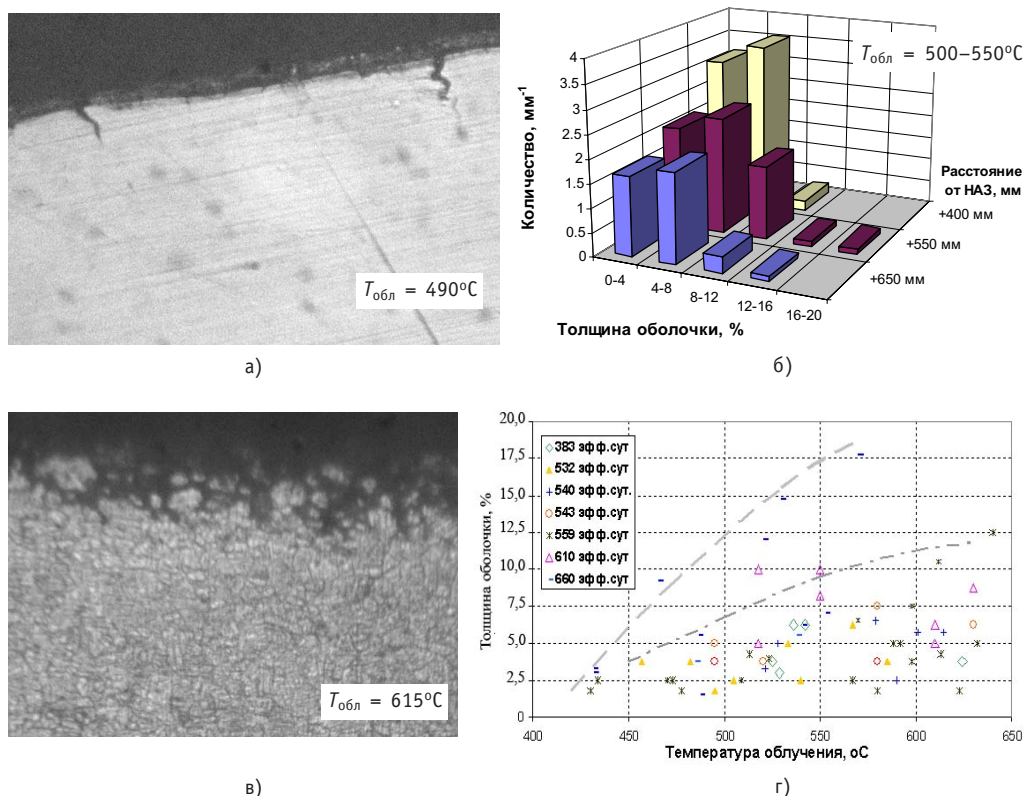


Рис. 2. Влияние облучения на форму и глубину развития ФХВТО: а, б – КР; в, г – смешанная коррозия (механизм МКК+ФК)

ет в оболочках твэлов с повышенным ресурсом эксплуатации.

Дифференцированный анализ форм проявления ФХВТО показал, что на участках оболочек, соответствующим зонам максимального энерговыделения твэлов, наиболее ярко проявляется коррозия по типу КР (рис. 2а). Развитие КР по периметру оболочек происходит неравномерно. Типичный характер распределения микротрещин по размерам в отдельных сечениях активной части твэлов с максимальной повреждающей дозой ~ 75 сна иллюстрирует рис. 2б. Подавляющее число микротрещин внутренней поверхности не превышает $1/10$ толщины оболочек при плотности распределения по периметру $2-4 \text{ мм}^{-1}$. Значительно реже, в сечениях максимального распухания сталей, регистрируются единичные микротрещины на глубину не более $1/6$ толщины (частота обнаружения менее $0,5 \text{ мм}^{-1}$).

Теплофизические условия существования растрескивания оболочек следующие: повреждающие дозы выше 60 сна, температурный интервал от 450 до 550°C . В области более высоких температур облучения КР оболочек отсутствует. Увеличение срока эксплуатации отрицательно влияет на коррозионное состояние оболочек, глубина и интенсивность КР возрастают. При повреждающих дозах 90 сна средний размер микротрещин составляет $\sim 1/8$ толщины оболочек с частотой их обнаружения на внутренней поверхности около 3 мм^{-1} ; предельная глубина локальных микротрещин достигает $1/5$ толщины.

Смешанная коррозия по типам ФК и МКК оболочек твэлов с сердечником из диоксида урана в условиях роста температуры и повреждающей дозы носит принципиально отличный от КР характер (рис. 2в). Отчетливой прямо пропорциональной зависимости между развитием коррозии и дозы не наблюдается. Определяю-

щим фактором глубины коррозионных повреждений является температура внутренней поверхности оболочки (рис. 2г). При температуре облучения ниже 450°C коррозионные повреждения оболочек незначительны и проявляются в форме мелких дефектов. С ростом температуры ФК и МКК оболочек усиливаются и проникают на 1/8 толщины оболочки при 570–620°C (рис. 2г). При максимальных сроках эксплуатации глубина внутритвальной коррозии возрастает до 1/6 толщины в области средних температур.

Дозная зависимость смешанной коррозии имеет сложный характер. При максимальных дозах 70–90 сна и температурах облучения 480–530°C глубина коррозии

обычно не превышает 1/10 толщины оболочек. Часто межкристаллитная составляющая коррозии отсутствует и на фоне локальных микротрещин КР наблюдается ФК минимальной глубины (рис. 2а). На участках максимума внутритвальной коррозии смешанного типа в области высоких температур повреждающие дозы уменьшаются. Тем не менее, общая тенденция усиления ФХВТО (тип МКК+ФК) с ростом повреждающих доз в температурном интервале своего существования сохраняется.

Определяющим типом ФХВТО в твэлах на основе МОКС-топлива является МКК стали. Фактов КР оболочек не установлено до максимальных повреждающих доз ~ 80 сна.

Кинетику развития коррозии оболочек определяет температура. Ниже 450 °C коррозия не актуальна. Рост температуры облучения провоцирует развитие МКК. В области температур 600–650°C глубина повреждения материала оболочек с максимальным ресурсом эксплуатации достигает 1/6 толщины (рис. 3а, в). При максимальных повреждающих дозах на уровне 80 сна и температурах 480–530°C глубина ФХВТО не превышает 1/20 толщины оболочек.

Немонотонный рост глубины коррозии в интервале температур 500–550°C отчасти обусловлен экранирующим действием топливного перегондсата, осаждающегося на внутренней поверхности металла (рис. 3б), и малой величиной остаточного зазора между сердечником и оболочкой.

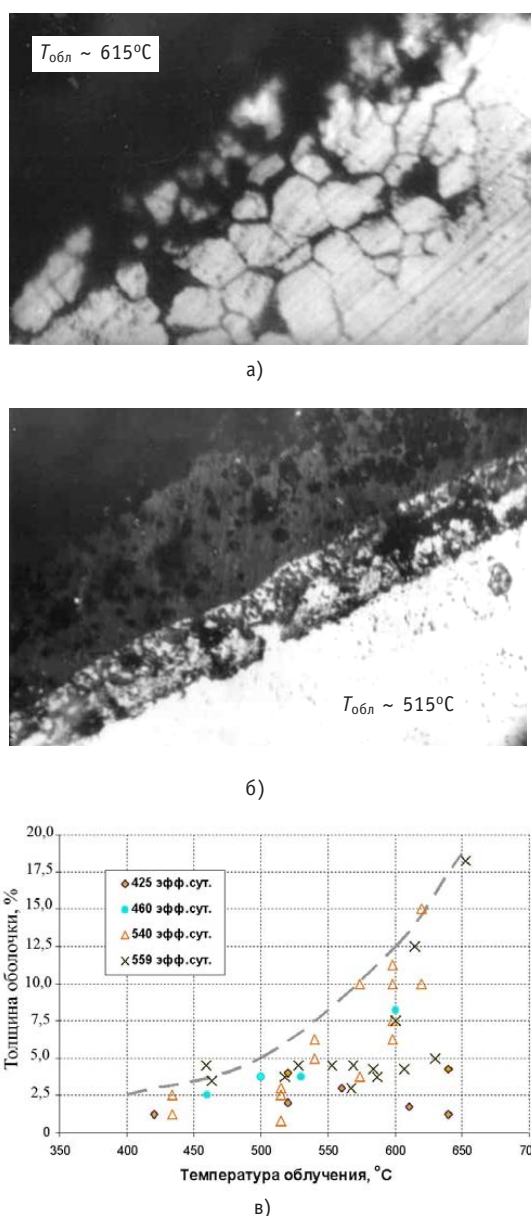


Рис. 3. Влияние облучения на ФХВТО в твэлах с МОКС-топливом: а; б – состояние внутренней поверхности; в – температурная зависимость глубины коррозии

При максимальных эксплуатационных температурах зависимость глубины коррозии оболочек от времени облучения близка к линейной (рис. 3в).

ФХВТО в оболочках из стали 12Х13МБФР

Доминирующий вид взаимодействия оболочек, изготовленных из ферритно-мартенситной стали, с диоксидом урана в условиях быстрого реактора – язвенная коррозия металла. По природе развития такая коррозия относится к избирательной коррозии, коррозии по карбидосодержащей сорбитной составляющей. Области феррита остаются практически неповрежденными в окружении продуктов коррозии. Процесс коррозии протекает исключительно по зернам сорбита, что приводит к островной эрозии металла и образованию язв, заполненных продуктами взаимодействия и топливной композицией (рис. 4а, б).

Коррозия развивается крайне неравномерно как по периметру, так и в аксиальном направлении оболочек. Температурная зависимость ФХВТО в стали 12Х13МБФР имеет три характерных участка (рис. 4в). В той или иной степени язвенная коррозия стали наблюдается в температурных диапазонах 380–460 и 520–570°C, а в области средних температур (470–510°C) и максимальных доз ее развитие менее вероятно. Увеличение выгорания топлива (повреждающих доз) сопровождается ростом глубины и площади очагов коррозии, но четкого представления о кинетике процесса в настоящее время не разработано.

Долю внутренней поверхности оболочек, пораженных язвами, демонстрирует рис. 4г.

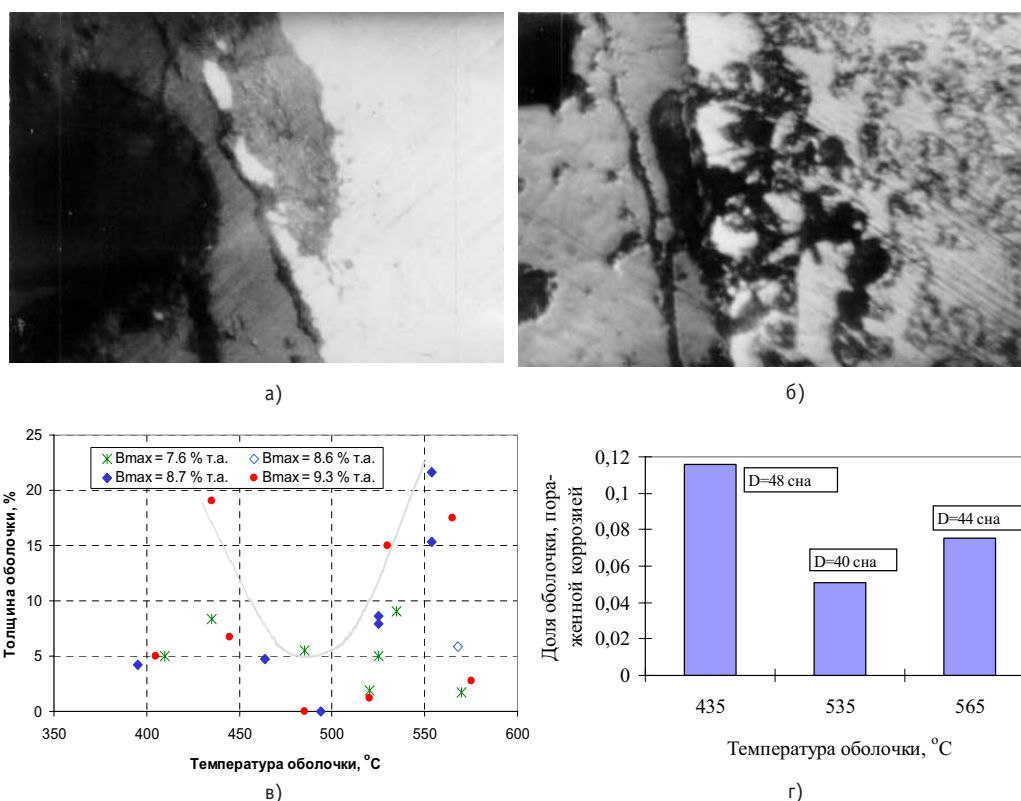


Рис. 4. Влияние облучения на ФХВТО в твэлах с оболочками из стали 12Х13МБФР: а, б – состояние внутренней поверхности ($T_{\text{обл.}} = 535^\circ\text{C}$, $D = 40$ сна); в, г – зависимость от параметров облучения

Максимальная глубина язв составляет 1/5 толщины оболочек. Диаметр язвенных очагов коррозии стали достигает нескольких сотен микрометров. Наиболее типичными местами образования очагов коррозии являются участки контакта топливного сердечника с оболочкой, а также устья крупных радиальных трещин в топливе.

Особенности матричного ФХВТО

Классический вид матричного ФХВТО по типу ФК в оболочках из аустенитных сталей представляет сплошную неизбирательную коррозию металла и легко идентифицируется визуально и по снижению микротвердости в слое взаимодействия (рис. 5а). В этом случае «живое» сечение металла уменьшается как и в случае МКК.

При исследовании ФХВТО встречается специфический вид матричного взаимодействия. В этом случае при химическом выявлении структуры металла с внутренней стороны оболочек идентифицируется слой матричного взаимодействия повышенной или пониженной травимости (рис. 5б). После полировки эта зона находится в нормальном состоянии, без признаков объемного разрушения и утонения металла. Прирост микротвердости в слое аномальной травимости достигает 100–200% относительно матрицы металла (удаленных от поверхности слоев оболочки) (рис. 5в, г). В той или иной степени данный тип ФХВТО встречается во всех исследованных твэлах.

Предполагается, что специфический тип матричного ФХВТО является следствием диффузионного легирования внутренней поверхности оболочки технологичес-

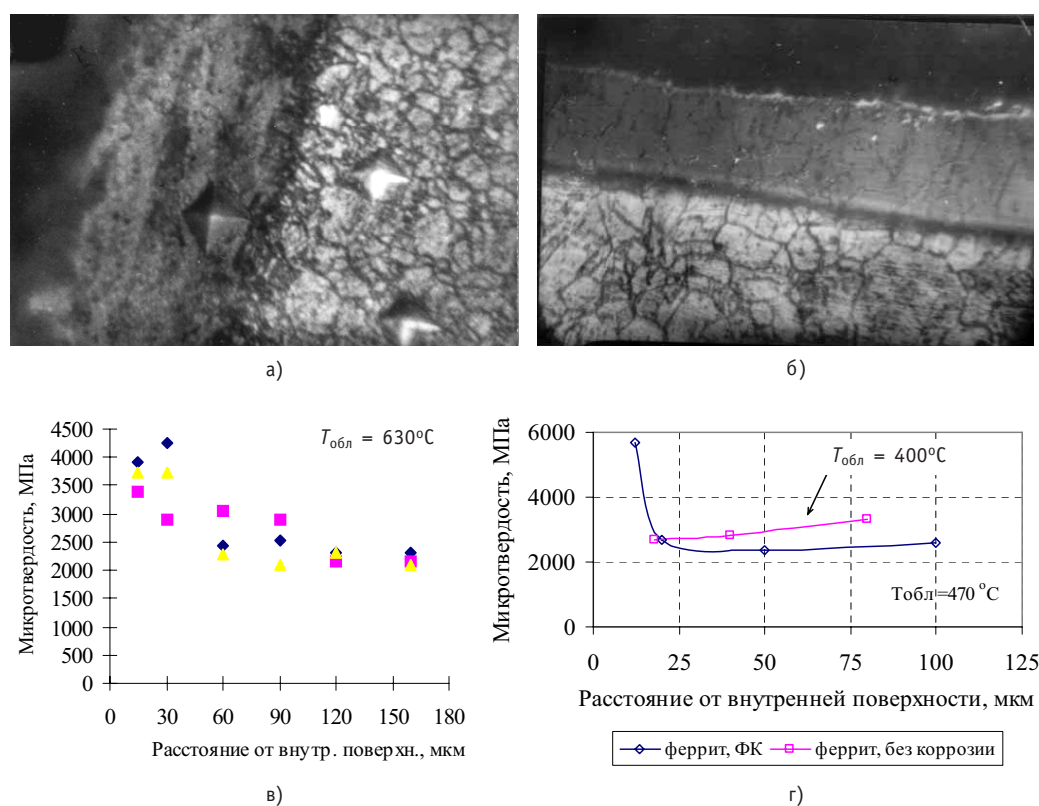


Рис. 5. Матричный характер ФХВТО в аустенитной (а–в) и ферритно-мартенситной (г) сталях: а – ФК; б – диффузионное легирование; в, г – характер изменения микротвердости в слое диффузионного легирования

кими примесями и продуктами деления топлива. До последнего времени целенаправленного исследования механизма образования и влияния условий облучения на поведение зон диффузионного легирования в оболочках твэлов не проводилось. Как правило, формирование зон аномальной травимости носит случайный характер. Максимальная глубина взаимодействия ограничена глубиной не более $1/8$ толщины оболочек. В интервале средних температур облучения ($520\text{--}580^\circ\text{C}$) эффект диффузионного легирования оболочек менее вероятен, т.к. превалируют механизмы КР и МКК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе послереакторных исследований твэлов быстрого реактора получен значительный объем данных относительно внутритвэльной коррозии оболочек, изготовленных из различных сталей. Наиболее подробно изучены стали аустенитного класса типа 16Cr–15Ni. Показано, что в холоднодеформированном состоянии эти стали проявляют более высокую устойчивость против внутритвэльной коррозии, чем в аустенизированном состоянии. Ферритно-мартенситная сталь 12Х13МБФР в качестве материала оболочек твэлов реактора на быстрых нейтронах исследована менее детально. При этом установлены существенные различия проявления ФХВТО, выраженного в форме внутритвэльной коррозии металла, в сравнении с твэлами на основе аустенитных материалов.

Анализ результатов исследований показывает, что среди контролируемых эксплуатационных параметров температура облучения конструкционного материала наиболее сильно влияет на степень развития ФХВТО. Влияние повреждающей дозы на внутреннюю коррозию оболочек твэлов быстрого реактора выражено менее ярко.

Применительно к сталям типа 16Cr–15Ni в х.д. состоянии обнаружено существенное влияние материала тепловыделяющей композиции на характер развития ФХВТО.

Общей чертой развития ФХВТО в оболочках твэлов, изготовленных из разных материалов, является пространственное разграничение в реакторных условиях зон максимальных повреждающих доз и максимальных коррозионных повреждений.

Литература

1. Ватулин А.В., Целищев А.В. Конструкционные стали для активной зоны реакторов на быстрых нейтронах // Металловедение и термообработка металлов. – 2004. – № 11. – С. 13–18.
2. Бибилашвили Ю.К., Решетников Ф.Г., Митрофанова Н.М. и др. Исследование структуры и определение допустимых температурно-временных режимов, обеспечивающих сохранение исходного холоднодеформированного состояния оболочечных труб из стали ЧС-68 реакторов БН/Сб. докл. VI Российской конференции по реакторному материаловедению (г. Димитровград, 11–15 сентября 2000 г.). – Димитровград, 2001. – Т.3. – Ч.1. – С. 313–321.

Поступила в редакцию 12.12.2007

УДК 621.039.51

The Hardware-Software Complex for Measurements of Neutron-Physical Characteristics During First Criticality and Power Start-up of the Kalinin NPP Third Unit \ V. Lititsky, B. Kutin, V. Parshutin; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 6 pages, 4 illustrations.

This article describes the complex of hardware and software instruments for measurements of neutron-physical characteristics during first criticality, power start-up and operation of the Kalinin NPP third unit.

УДК 621.039.54

System of Numerical Benchmarks for VVER Neutronics \ I.R. Suslov; Editorial board of journal «Izvestia vusshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 1 table. – References – 18 titles.

A system of computational neutronic benchmarks has been developed over the last four years. This system is intended to complement the Atomic Energy Research (AER) benchmarks. This paper presents a summary of the development and a brief description of the benchmarks. The set is primarily comprised of interrelated benchmarks that share situation descriptions and data. The system covers the VVER 440 and VVER 1000 reactors extensively, and in a few cases the newer VVER 640 reactor design. Benchmarks within the system address the static, dynamic (with and without feedback), fuel depletion and fuel loading optimization, and normal as well as accident situations.

УДК 621.039.5

Optimization Tasks of Non-Hermetic Fuel Assemblies Extraction in RBMK Nuclear Reactor \ A.M. Zagrebayev, N.V. Ovsyannikova, A.E. Rechkiman; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 9 pages, 3 illustrations. – References – 5 titles.

The possibility of optimization of non-hermetic fuel assemblies schedule in a nuclear reactor at different criteria and restrictions is considered. The solution of optimization tasks with maximum permissible emission limit and under penalty is given.

УДК 621.039.51

Model of VVER -1000 Reactor for Training Course \ V.I. Belozarov, V.V. Sergeev, A.A. Kazantsev, A.N. Pozdnyakov, M.Yu. Kanyshv; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages, 3 illustrations. – References – 3 titles.

Because of absence of professors in the locations of NPP some of functions of training and maintenance of qualification can be performed by means of computer training courses.

The developed didactic model of reactor VVER -1000 enables one to perform the comparative analysis of transient operation mode and for some emergency processes also in dependence both from an initial condition (the period of campaign, position of control rods, power level, previous history of power and so on), and from composition of core itself. Based upon of transient completely non-equilibrium thermal-hydraulic code from 6 conservation equations and neutron-physical model the model of reactor VVER -1000 is developed for a training course.

The scope of simulation was chosen as optimum for the given task. Unlike a program of creating the models for NPP simulator, the model was performed with higher accuracy, but with smaller volume of the main equipment, than in full-scale simulators, that essentially improves understanding of physics.

УДК 321.039.531: 620.193

Inside Cladding Corrosion of Stainless Steel in Reactor Conditions \ E. Kinev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 5 illustrations. – References – 2 titles.

Fuel cladding corrosion of annealed 0.08C 16Cr15Ni3MoNb stainless steel, .08C16Cr15Ni3MoNb cold-worked (CW), 0.06C16Cr15Ni3MoNb CWsteel, 0.06C16Cr15Ni2Mo2MnTiVB CWsteel, and

.12C13CrMoNbVB stainless steel were researched after different irradiation conditions in a fast reactor. Maximum depth of inter granular corrosion have been observed in austenitic CWsteels at high temperature irradiation. The stress corrosion cracking of austenitic steels is typical effect within of pins on the dioxide uranium base. In ferritic/martensitic steel the ulcer corrosion flow from sorbite phase and take place at low or high temperature. The depth of local ulcers and micro cracks may be about 20% of cladding thickness. As a rule, the picks of both steel corrosion and neutron damage do not coincide.

Уважаемые читатели!

В номере 1(2008) по вине редакции в статье «Некоторые нейтронно-физические и теплогидравлические характеристики усовершенствованной конструкции реактора «МАСТЕР» была пропущена фамилия одного из соавторов.

На странице 41 следует читать

УДК 621.039.5

Некоторые нейтронно-физические и теплогидравлические характеристики усовершенствованной конструкции реактора «МАСТЕР»

Ю.А. Казанский, В.А. Левченко, Ю.С. Юрьев, В.А. Баршевцев, В.А. Белугин,
С.Л. Дорохович, А.А. Казанцев, А.В. Левченко, Ю.Д. Левченко, Д.М. Титов

Редакция приносит Ю.Д. Левченко глубочайшие извинения.