

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТВЭЛОВ С НАТРИЕВЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Е.А. Кинев, В.А. Цыгвинцев, А.В. Барыбин

ОАО «Институт реакторных материалов», г. Заречный



Рассматривается специфика дефектов твэлов с разрывом оболочки и газовой негерметичностью. Первый род дефектов сложно идентифицировать по признаку «первичный - вторичный». Другой вид труден для локализации. Для надежной оценки повреждений требуется комплекс исследований, включая результаты моделирования дефектов. Данные иллюстрируют насущную необходимость безводной технологии подготовки дефектных твэлов к послереакторным исследованиям.

Ключевые слова: твэл, оболочка, дефект, разрыв, плавление, структура, дефектоскопия, натрий, цезий, уранат.

Key words: pin, cladding, defect, rupture, melting, structure, defectoscopy, sodium, caesium, uranate.

ВВЕДЕНИЕ

Единичные случаи досрочной разгерметизации твэлов неизменно связаны с наличием дефектов производственного происхождения [1]. В ряде случаев возможно влияние мигрирующих продуктов деления [2]. Обнаружение и анализ дефектов является важной задачей послереакторных исследований. Однако операция отмывки негерметичных ТВС от натрия и длительный период послереакторного охлаждения могут вносить существенные изменения в структуру топлива и искажать истинную форму крупных дефектов оболочек. Микроскопические дефекты оболочек негерметичных по газу твэлов не критичны к условиям отмывки, но поиск их местоположения является сложной процедурой.

Традиционная оптическая металлография не позволяет получать полное представление о характере и причинах возникновения дефектов. Требуются сопровождающие исследования методами дефектоскопии (капиллярной, электропотенциометрических измерений, пневмогидравлической опрессовки и др.), гамма-сканирования, фрактографии, рентгенографии. Для адекватной интерпретации данных металлографии актуальны структурные исследования модельных дефектов тонкостенных оболочек.

СПЕЦИФИКА СТРУКТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунке 1а представлено два характерных вида разрыва оболочки твэла, отличающихся степенью раскрытия. Визуальный поиск дефектов такого рода не вызывает сложностей ввиду их значительных размеров в осевом направлении. Профилометрией наружного диаметра оболочки также отражается степень раскрытия и локальное мес-

© Е.А. Кинев, В.А. Цыгвинцев, А.В. Барыбин, 2013

торасположение дефектов.

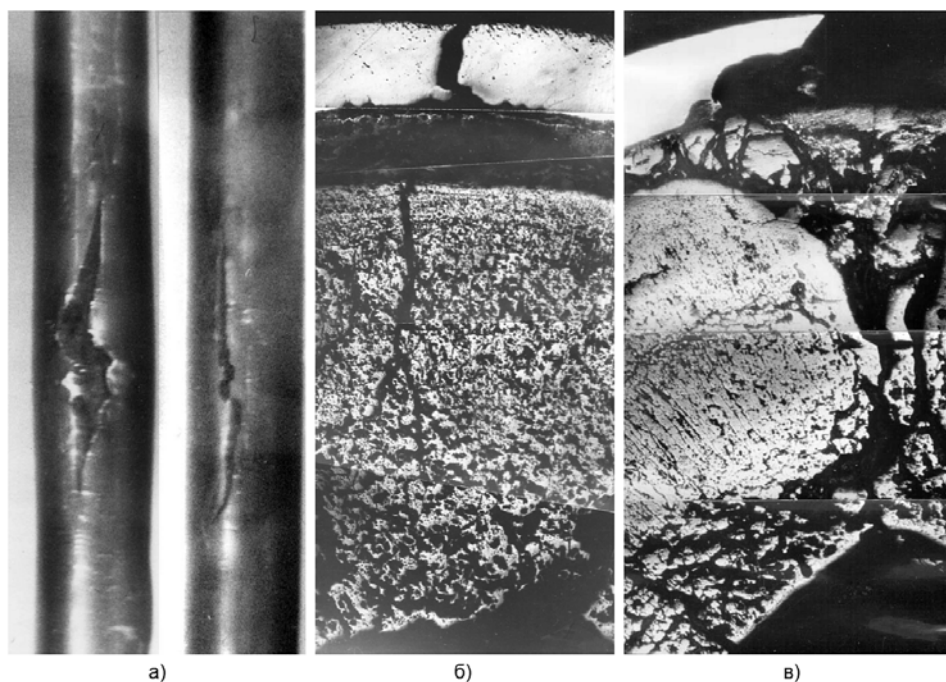


Рис. 1. Состояние оболочки и топливного сердечника дефектных твэлов: а) – продольный разрыв с раскрытием и без раскрытия; б) – сечение с механическим разрывом; в) – сечение с дефектом плавления

Структурные состояния топлива и оболочки в поперечных сечениях вышеуказанных дефектов могут существенно различаться. Первый вид разрыва оболочки типичен для условий кратковременных механических испытаний. Деформация металла в зоне разрыва происходит с образованием шейки, а разрушение – путем отрыва или среза (рис. 1б). Второй вид разрыва имеет внутреннюю лунку в оболочке, характерную для оплавления (рис. 1в). Главной особенностью сечений с разрывом механического типа является наличие широкого остаточного зазора, пустого на момент исследования или заполненного уранатными фазами. Разрыв оболочки является следствием превышения предела прочности стали под действием внутреннего давления. Наличие пустого зазора отвечает случаю натриевого заполнения. При операциях отмывки и технологической разделки твэлов для исследований натрий (гидроксид натрия) взаимодействует с водой и вымывается из зазора. Уранатные фазы на основе осколочного цезия и натрия менее подвержены вымыванию.

Натриевый подслои внутри твэла образуется после возникновения в оболочке первичной сквозной трещины. Сценарий его взаимодействия с топливом зависит от многих факторов. При пассивном контакте во время облучения натрий увеличивает теплопроводность зазора и снижает температуру сердечника. При этом зона столбчатых зерен в оксидном топливе не образуется (рис. 1б). Бурное взаимодействие натрия, воды и топлива при отмывке сопровождается глубокой перестройкой сердечника с образованием радиальных каналов столбчатой структуры (рис. 1в). Местный перегрев топлива может сопровождаться его плавлением и стеканием в нижние сечения твэла; изнутри оболочки формируются условия для ее оплавления. Формальным признаком плавления оболочки является наличие внутренней лунки с прилегающими металлическими корольками.

Парадоксальным является существенная сложность идентификации методом оптической металлографии крупных сквозных дефектов оболочки по признаку «первичный-вторичный». Причинами являются маскирующий фактор воздействия продуктов реак-

ции «натрий-вода» и консервативный уровень структурных изменений материала оболочки в области разрыва. Действие реакции «натрий-вода» создает очаг высоких механических напряжений, в результате которого оболочка в области дефекта пластически деформируется, с течением времени отмечается постепенное раскрытие трещин. При бурном окислении натрия может возникать ансамбль вторичных трещин.

Типичная толщина оболочки составляет 0,4 мм, а снаружи она омывается натрием (при эксплуатации), паром (при отмывке) или водой (при хранении). В этом случае даже при высокотемпературном плавлении оболочки градиент температуры по ее толщине не в состоянии вызвать существенные структурные изменения, в частности, отсутствуют зона термического влияния и рост зерна.

При наличии исходной холодной деформации оболочек из аустенитных сталей и дополнительном влиянии радиационного упрочнения наклеп материала оболочки вблизи трещин незначителен, изменения микротвердости стали около дефекта и вдали от него не превышают погрешность измерения, деформация зерна малозаметна.

С целью обнаружения первичного дефекта оболочки в ансамбле трещин и установления причин, ответственных за его возникновение, в ОАО «ИРМ» используется комплекс дополнительных мер и исследовательских методик.

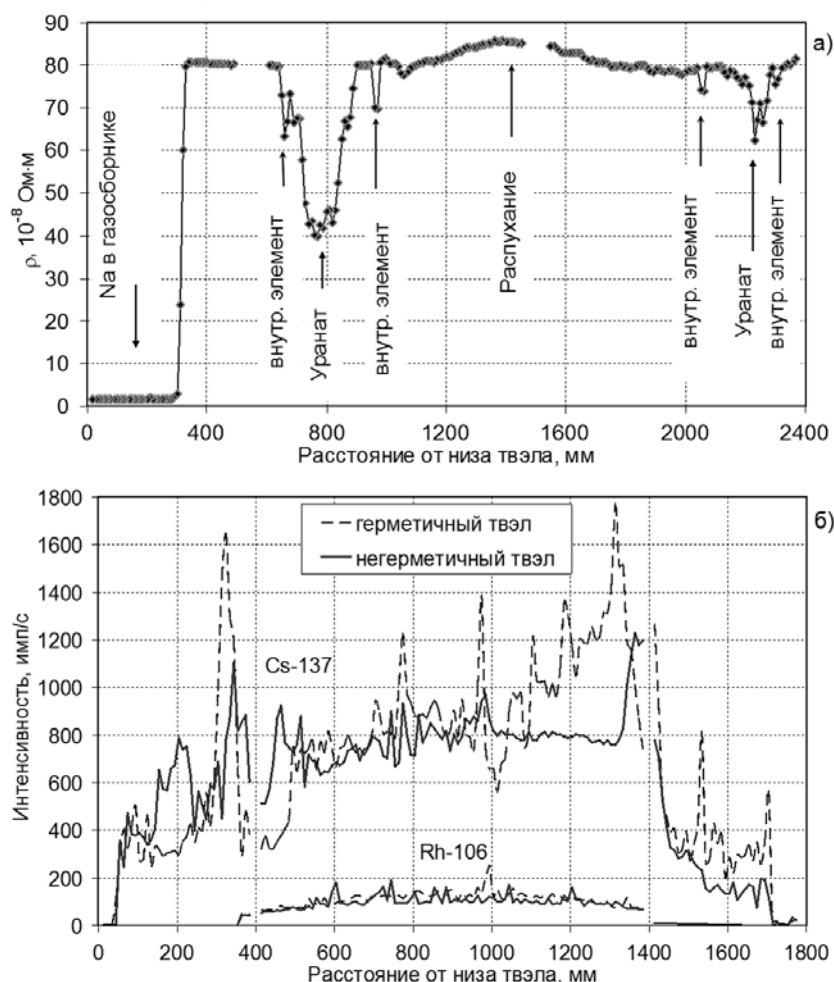


Рис. 2. Данные сопровождающих методов исследования негерметичных твэлов: а) – резистограмма; б) – спектры гамма-излучающих продуктов

Сопровождающие методики предназначены для локализации дефектных участков и

интерпретации результатов структурных исследований. Измерение электросопротивления оболочки установкой электропотенциального контроля регистрирует сквозные дефекты диаметром более 0,5 мм, фиксирует эпицентры залегания уранатов и внутритвальной коррозии, наличие натрия в газосборнике, внутренние конструкционные элементы (рис. 2а). Гамма-сканирование дает картину осевого перераспределения мигрирующих и тугоплавких продуктов деления (рис. 2б). Пневмогидравлическая опрессовка гелием давлением 0,1–1,0 МПа выявляет дефекты типа «газовая течь» в сварных соединениях концевых деталей и зонах приварки дистанционирующей проволоки при локальной язвенной коррозии. Фрактография поверхности дефектов позволяет разделить зоны эксплуатационного разрушения и дорыва за счет разделения участков хрупкого и пластичного разрушения оболочек. Рентгенография контролирует фазовый состав, уровень микроискажений, параметр кристаллической решетки и стехиометрию топлива. Без комплекса исследований шансы регистрации «газовой течи» маловероятны, а выявление первичного дефекта в ансамбле трещин просто невозможно.

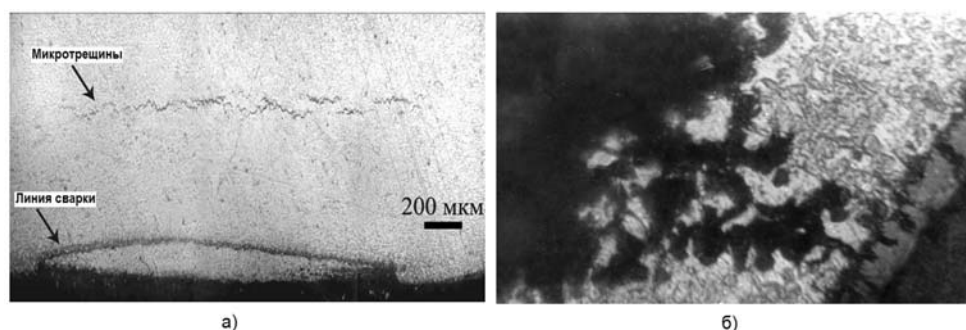


Рис. 3. Дефекты типа «газовая течь» в зоне контактной сварки дистанционирующей проволоки (а) и наружной язвенной коррозии оболочки из стали ЭП-450 (б)

На рисунке 3а приведен вид дефекта «газовая течь» в зоне контактной сварки дистанционирующей проволоки. Разветвленность микротрещин с раскрытием не более 0,5 мкм создает высокую сложность их выявления даже методом гелиевой опрессовки. Только послойная металлография зоны сварки с шагом сошлифовки металла на глубину 0,2–0,4 мм позволяет с большой вероятностью судить о наличии сквозного микроканала сквозь оболочку.

Другим примером успешного использования методик опрессовки и послойной металлографии является исследование оболочек из ферритно-мартенситной стали после длительного хранения в бассейне выдержки. Визуально на поверхности твэла наблюдались множественные точки язвенной коррозии, но сквозная течь диаметром ~1 мкм (рис. 3б) была локализована только в месте образования и медленного роста воздушного пузырька в ампуле пневмогидравлического стенда.

В конструкции твэла предусматривается свободная миграция газообразных продуктов деления в газосборник. В этом аспекте актуально отсутствие зон высокого газового сопротивления, обусловленных закупоркой центрального канала или зазора «топливо-оболочка». Соответственно, структурным исследованиям должны предшествовать гамма-сканирование и пневмогидравлическая опрессовка. Спектры осевого распределения цезия и рутения (рис. 2б) регистрируют зоны их аномальной концентрации, а металлография дает наглядное представление о реальной структуре сердечника (рис. 4а).

Наиболее сложным является анализ дефектного твэла, под оболочкой которого скопился натрий, а послереакторная стадия не исключала контакт твэла с водой или водноспиртовым раствором. Гидрооксид натрия и уранат натрия – это основные фазы с большим удельным объемом, ответственные за механическую деформацию негерметич-

ной оболочки. При температурах ниже 500 °С вероятно образование Na_2O [3]. Уранат цезия способен деформировать даже герметичный твэл [2].

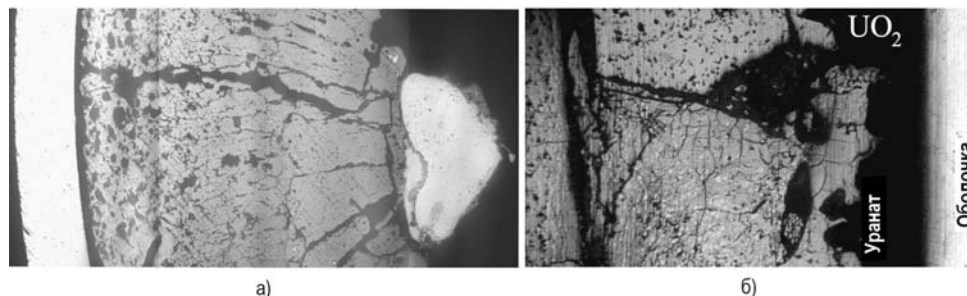


Рис. 4. Аномальная концентрация продуктов деления: а) – королёк рутения в центральной полости; б) – уранатные фазы в технологическом зазоре «топливо-оболочка»

Структурное разделение уранатных фаз на основе цезия и натрия представляет сложную методическую задачу. Обе фазы имеют низкую пористость и крупнозернистую фрагментацию, располагаются в узком зазоре под оболочкой, имеют переходные зоны взаимодействия с характерными пятнистыми включениями оксидного топлива (см. продольный шлиф на рис. 4б). Визуальное наблюдение уранатов возможно только в полированном состоянии; при травлении кислотными реактивами они чернеют. Расположенная непосредственно под разрывом оболочки фаза (вероятно, уранат натрия) имеет микротвердость в интервале 1200–3000 МПа (рис. 1в). Вдали разрушения, в частности вверху активной части сердечника, микротвердость ураната (вероятно, соединение цезия) составляет 3000–4000 МПа (рис. 4б).

Рентгенография соединений уранатов трудоемка ввиду их низкой отражательной способности, высокого радиационного фона образцов, малого объемного количества. Опыт исследований в этом направлении связан со специальными методами подготовки шлифов. Снижение радиационного фона достигается уменьшением образцов до размеров, предотвращающих выкрашивание топлива и уранатов. Увеличение площади съемки достигается продольной фиксацией образцов с последующей вышлифовкой на глубину залегания ураната по безводной технологии. Наиболее уникальным способом является ступенчатая фиксация образца, когда поверхности образца и фиксирующего компаунда находятся в разных плоскостях, что снижает фоновые пики компаунда в области малых углов отражения 10–20°.

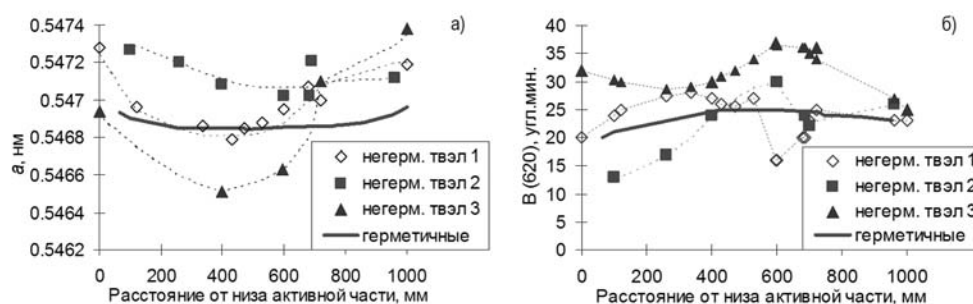


Рис. 5. Параметр кристаллической решетки (а) и полуширина рефлекса (622) (б) топливной композиции дефектных и герметичных твэлов

Параметр кристаллической решетки и полуширина рефлекса (622) (монитор микроискажений) топливной композиции негерметичных твэлов существенно отличаются от таковых в составе герметичных твэлов (рис. 5). Но несмотря на достаточно полные представления о влиянии структуры, стехиометрии топлива и продуктов деления, радиационных повреждений и срока охлаждения на рентгеноструктурные характеристики, анализ их аномального поведения в дефектных твэлах является сложнейшей аналитической задачей. Главным требованием для ее решения является, во-первых, наличие полной информации по исходному состоянию топлива, во-вторых, принятие мер, пре-

дотвращающих внутритвельную реакцию «натрий-вода».

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ

Для интерпретации структурных особенностей реальных дефектов выполнен комплекс исследований модельных дефектов тонкостенных оболочек после одноосного растяжения колец, внутреннего давления твердым заполнителем (ВДТЗ) и электрогравировки. Условия испытаний были типичны для активной зоны быстрого реактора и даны в табл. 1. Образцы предварительно отжигались при $T = 500$ °С. Электрогравировка выполнялась на горячей подложке при 400 °С. Измерения микротвердости (H_v) проводили на шлифах образцов. Дефект электрогравировки дополнительно анализировали после вторичного отжига при 500 °С.

Таблица 1

Характеристики испытанных образцов (сталь ЧС-68хд, труба 6,9х0,4 мм)

Метод испытания	Исходные данные образца	Микротвердость, МПа*	Толщина оболочки, мм*	Общее удлинение, %	Форма зоны дефекта
Одноосное растяжение	$T_{отж} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_{отж} = 30\text{ мин}$ $H_v = 3100\text{ МПа}$ $T_{исп} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$	3700/3100	0,39/0,40	1,5	Срез под 45°. Деформация зерен на удалении до 50 мкм.
ВДТЗ	Без отжига $H_v = 2900\text{ МПа}$ $T_{исп} = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$	3700/3700	0,36/0,36	26	Срез под 45°. Деформация зерен на удалении до 20 мкм.
Электро- гравировка	$T_{отж} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_{отж} = 30\text{ мин}$ $H_v = 3100\text{ МПа}$	2500/3100 (6200 –для W)	0,30/0,40	нет	Лунка с наплавом вольфрама. Зона термического влияния до 500 мкм без роста зерна.
	Повторный отжиг после электро-гравировки	2500/3200 2900 ¹⁾ /2700 ²⁾			
* – значения числителя для зоны дефекта/значения знаменателя для удаленных зон; 1)/2) – значения под лункой в центре и снаружи оболочки соответственно					

При испытаниях необлученной стали ВДТЗ деформация оболочки происходит равномерно по периметру, а при одноосном растяжении локализована в шейке разрыва (см. табл. 1). Разрушение типичное вязкое транскристаллитное срезом под углом 45° к оси растяжения.

Зерна металла вблизи разрыва одноосным растяжением деформируются в направлении усилия нагрузки на участке длиной менее 50 мкм (рис. 6а). Микротвердость в зоне деформации достигает 3700 МПа, а на удалении сохраняет исходное значение после первичного отжига. При ВДТЗ ширина зоны деформированного зерна не превышает 20 мкм, но наклеп металла – равномерный по всему периметру образца (табл. 1).

Структура оболочки в лунке электрогравировки представлена на рис. 6б. Внутри дефекта присутствуют корольки вольфрамового электрода. Важным является отсутствие структурных признаков оплавления материала оболочки и зоны термического роста зерен. Перегрев удастся зарегистрировать только фактом снижения микротвердости около дефекта (см. табл. 1), причем ширина зоны не превышает 400–500 мкм. Отжиг металла в зоне термического влияния происходит неоднородно, т.к. в центре оболочки под лункой микротвердость оказывается выше, чем снаружи. Дополнительный отжиг образца с лункой показывает тенденцию роста микротвердости в зоне термического влияния (см. табл. 1). Подобный эффект также наблюдался при сопоставлении исходной микротвердости материала оболочки с таковой

после первичного отжига при 500 °С.

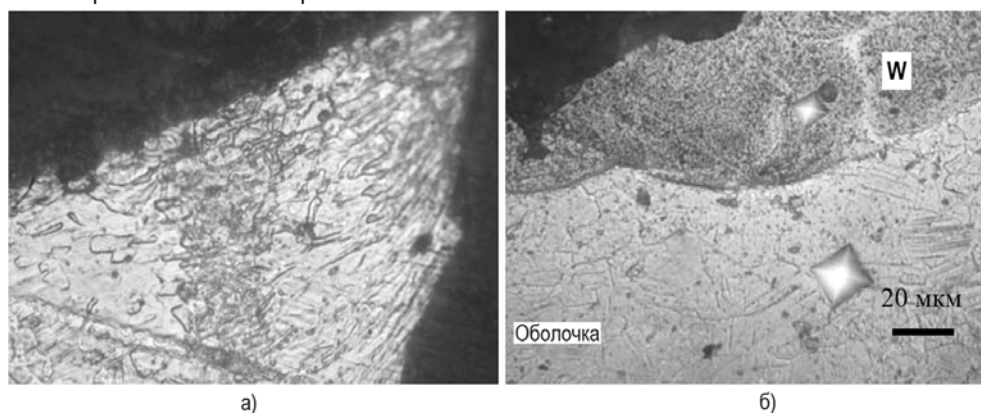


Рис. 6. Структура материала оболочки в шейке имитационного разрыва одноосным растяжением при температуре 500 °С (а) и лунке язвенной электрогравировки с отпечатками микротвердости (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специфика теплофизических условий эксплуатации, послереакторные операции отмывки натрия и длительного хранения создают значительные сложности интерпретации причинно-следственных структурных изменений материалов негерметичных твэлов быстрых реакторов. Кардинальным способом решения проблемы является технология послереакторной подготовки, исключающей вероятность внутритвэльной реакции «натрий-вода». Это возможно реализовать, проводя удаление натрия с поверхности твэлов промывкой в чистом этаноле, последующим хранением твэлов в сухих герметичных пеналах, безводным охлаждением дезинтегрирующего инструмента при разделке.

Без фактора косвенной механической деформации вероятность развития ансамбля вторичных повреждений твэлов снижается. Создаются условия для адекватной интерпретации структурных изменений, их взаимосвязи с первопричинами разгерметизации оболочек.

Исследования модельных дефектов тонкостенных оболочек наглядно демонстрируют консерватизм изменений структуры тонкостенного металла в случаях локальных термических и механических воздействий. Соответствующими аналогами могут считаться реальные дефекты эвтектического плавления при аномальном скоплении агрессивных продуктов деления в пустотах топливного сердечника и любые концентраторы напряжений оболочки.

Случаи аномальной концентрации цезия с равномерным распределением по периметру, равномерное распухание топливного сердечника либо давление газовых продуктов деления аналогичны модельным испытаниям ВДТЗ. В данной схеме нагружения структура материала оболочек подвержена большим изменениям, а их анализ сопряжен с меньшими сложностями. Тем не менее, сопровождение структурных исследований комплексом вспомогательных методик для всех дефектных твэлов является обязательным.

Литература

1. Ошканов Н.Н., Баканов М.В., Мальцев В.В. и др. Основные результаты эксплуатации материалов в первых натриевых контурах установок БН-600 и БОР-60. / Сб. докл. III Международной научно-технической конференции «Развитие атомной энергетики на основе замкнутого топливного цикла с реакторами на быстрых нейтронах», г. Москва, 2009 г. – М.: Росэнергоатом. – 32 с.
2. Павлов С.В., Сухих А.В., Сагалов С.С. Влияние цезия на эксплуатационную надежность твэлов БН-реакторов с оксидным топливом. / Сб. докл. IX Российской конференции по реакторному материаловедению, г. Дмитровград, 2009 г. – Дмитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», С.330-334.
3. Mignanelli M.A., Potter P.E. An investigation of the reaction between sodium and hyperstoichiometric urania. / J. Nucl. Mater. V.114 (1983). P. 168-180.

Поступила в редакцию 26.03.2013

oxygenated electrolyte with different measuring electrodes and reference electrodes. Experimental results prove the possibility of applying of the gas phase electrochemical oxygen sensor with a solid oxygenated electrolyte for control the content of hydrogen in gas phase of loop of reactors with heavy liquid metal coolants.

УДК 53.082.731:543.272.2

The study of temperature influence on the performance of conductometric hydrogen sensor element based on Pd-Ag alloy \ Skomorokhov A.N., Shelemt'ev V.M., Askhadulin R.Sh., Storozhenko A.N., Skomorokhova S.N., Sitnikov I.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 8 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 4 titles.

Temperature influence on such characteristics of the conductometric hydrogen sensor elements response time and magnitude of variation of the electric resistance in the temperature range from 180 up to 310°C has been investigated. Type of functional dependence of variation of the electric resistance in dependence from hydrogen concentration at various temperatures was determined.

УДК 621.039.548

The methodical features of structural investigations for sodium cooling pins \ Kinyov E.A., Tsygvintsev V.A., Barybin A.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 10 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 3 titles.

The specificity of rupture pin defect and gas flow pin defect are examined. It is complicated to identify the first type of defects about its feature: initial or secondary. It is hard to localize the other flow defect. Depth analysis is demanded of the complex investigation including the defect modeling results. Article data illustrates the urgent need of waterless technology is one must during preparation of faulty pins for post reactor investigations.

УДК 621.039.53

Analysis of approaches to the simulations of the processes of radioactive deposits formations on the contour's walls of the fast sodium reactors \ Korsun A.S., Kharitonov V.S., Filippov M.F.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 5 pages. – References, 7 titles.

The paper presents analysis of approaches to the simulations of the processes of radioactive deposits formations on the contour's walls of the fast sodium reactors.

УДК 621.039.526.034

Design substantiation of electricity-heated reactor model construction with supercritical parameters \ Avdeev E.F., Chusov I.A., Shelegov A.S., Ukraintsev V.F., Titov D.M., Ragulin S.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 9 pages, 4 tables, 3 illustrations. – References, 11 titles.

The paper presents the Russian concept of electrically heated supercritical reactor model. Coolant with such parameters can enhance efficiency of facility to 45-49%. Russian concept of new generation NPP's based on supercritical parameters of coolant not limited only reactor facility. The development of new electricity generating facility based on Brayton cycle with recuperative heat exchangers is considered. Basic concept of reactor facility model is based on transition possibility between one-way and two-way core models by minimal change in reactor core model design. Reactor facility model has been developed with geometry distortion with scale factor (full scale reactor/reactor model) 1:5. In this paper the main requirements has been formulated for design of reactor model. Design justification of reactor model based on energy equation for coolant flow and closure equations for cell and assembly model flow rates. In the energy equation included the heat part generated by the friction and loses on acceleration. The original system of equations was performed by iteration. Calculations were performed for three types of media: water, carbon dioxide and Freon-134. Estimation results of thermal-hydraulic characteristics for supercritical reactor model shows that parameter of water, carbon dioxide and Freon-134 achieved on 31 MWt, 3,9 MWt and 4,0 MWt respectively.