

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.039.526:621.3.014

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ ПО НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТРАБОТАВШИХ ТВС ВВЭР И РБМК

Костюченко А.Н. (ГНЦ РФ — НИИАР)

Эффективная и безопасная эксплуатация АЭС с ВВЭР и РБМК во многом определяется надежностью ТВС, которые должны работать в жестких условиях активной зоны в течение продолжительного времени. Элементы ТВС подвергаются чрезвычайно интенсивным и многообразным воздействиям нейтронных полей, высокой температуры, термических напряжений, статических и динамических нагрузок и др. Одним из факторов является коррозионное взаимодействие с теплоносителем, которое приводит к окислению и наводороживанию оболочек твэлов и направляющих каналов из циркониевых сплавов. В результате на поверхности твэлов образуется оксидная пленка, характеризующаяся невысоким коэффициентом теплопроводности и ограничивающая тепловой поток от твэла к теплоносителю. Образование диоксида циркония происходит за счет уменьшения массы циркония и соответствующего ухудшения механических свойств элементов ТВС [1].

В настоящее время основным способом получения достоверной информации о коррозионном повреждении ТВС ВВЭР и РБМК является проведение послереакторных исследований в защитных камерах. Толщину оксидной пленки традиционно определяют с помощью оптической микроскопии. Из-за невысокой производительности этого метода, ограниченной временем подготовки образцов (более 3 ч), а также необходимости последующей утилизации высокоактивных отходов объем проводимых исследований недостаточен для получения подробной информации об окислении элементов ТВС. Например, при исследовании состояния оболочки одного твэла или направляющего канала толщину оксидной пленки в большинстве случаев определяют только в 3—4 сечениях, что является недостаточно представительным [2].

Для получения статистически значимой информации о распределении оксидной пленки по поверхности твэлов и элементов конструкции ТВС водоохлаждаемых реакторов применен высокопроизводительный неразрушающий вихретоковый метод. Созданная на его базе методика [3] позволяет определять среднюю толщину оксидной пленки в преде-

лах локального участка длиной ~3 мм. На равномерно окисленных участках оболочки твэла погрешность результата измерения толщины оксидной пленки с доверительной вероятностью 95% для диапазона измерений 4—40 мкм не превышает ± 4 мкм. При исследовании неравномерно окисленных участков погрешность не превышает ± 17 мкм в диапазоне 20—400 мкм. На проведение одного измерения затрачивается менее 1 мин, что позволяет определять толщину оксидной пленки более чем на 1000 участках поверхности одного твэла за один рабочий день. Таким образом, может быть получено подробное распределение оксидной пленки по поверхности оболочки твэла или направляющего канала стержней управления и защиты.

В 2000—2006 гг. в защитных камерах НИИАРа проведены подобные исследования более 100 твэлов ВВЭР-440, -1000, РБМК-1000 и шести направляющих каналов ТВС ВВЭР-1000 (см. таблицу). Одно-

Основные характеристики исследованных
элементов ТВС

Объект исследования	Выгорание, МВТ·сут/кг	Материал	Максимальная толщина оксидной пленки, мкм
РБМК-1000 — 72 твэла 10 ТВС	5—32*	Э110	520
ВВЭР-440 — 25 твэлов 5 ТВС	30—60*	Э110	10
ВВЭР-1000: 38 твэлов 4 ТВС	36—53*	Э110	9
12 твэлов одной ТВС	34—44*	Э635	46
2 направляющих канала одной ТВС	49**	Э110	5
4 направляющих канала 2 ТВС	39, 44**	Э635	28

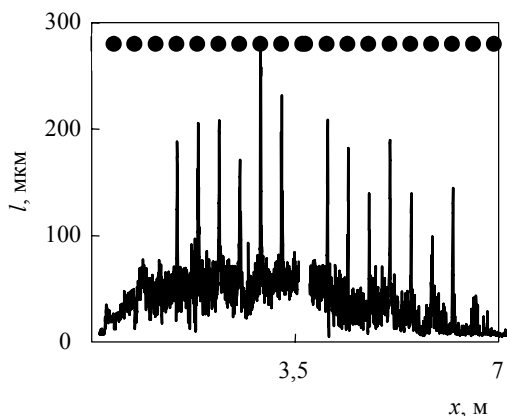
*, ** Выгорание топлива, усредненное по длине одного и всем твэлам ТВС соответственно

временно проводили металлографические исследования состояния оксидной пленки в контрольных сечениях. Сопоставление толщины оксидной пленки, полученной разными методами, показало хорошее совпадение результатов.

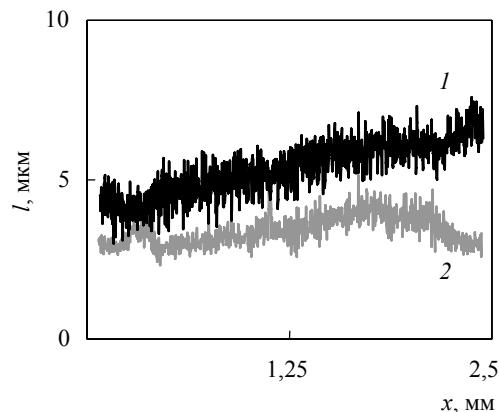
Оболочки твэлов РБМК-1000 (рис. 1). На поверхности наблюдаются многочисленные очаги коррозии, свидетельствующие о преимущественно локальном характере окисления. Толщина оксидной пленки существенно изменяется по высоте твэлов: в районе газосборников (верх и низ ТВС) она составляет от 1 до 5 мкм, ближе к центру ТВС — до 280 мкм, максимальная зарегистрирована на участках взаимодействия с выступами дистанционирующих решеток. Сравнение состояния оболочек твэлов ТВС с дистанционирующими решетками из коррозионно-стойкой стали и сплава Э110 показало, что в первом случае максимальная толщина оксидной пленки в 2—3 раза больше.

Окисление неравномерно по сечению пучка твэлов, состоящего из двух рядов — наружного и внутреннего. Толщина оксидной пленки на оболочках твэлов внутреннего ряда больше, чем наружного, в среднем на 20%. Участки, направленные к центру пучка, покрыты более толстой пленкой по сравнению с направленными от центра. Основным фактором, определяющим толщину оксидной пленки на оболочках твэлов, является продолжительность эксплуатации. Это подтверждается тем, что максимальная толщина зарегистрирована при исследовании ТВС, находившейся в активной зоне дольше других (11 лет) и отработавшей до среднего выгорания 24 МВт·сут/кг.

Оболочки твэлов ВВЭР-440. Толщина оксидной пленки на поверхности твэлов, отработавших до среднего выгорания топлива 30 МВт·сут/кг, изменяется от 2 мкм в нижней до 4 мкм в верхней части, при выгорании 60 МВт·сут/кг — от 5 до 8 мкм (рис. 2). Характер окисления равномерный, без локальных аномалий.



Р и с. 1. Распределение оксидной пленки по длине твэлов РБМК-1000 при среднем выгорании топлива 20 МВт·сут/кг: ● — расположение дистанционирующих решеток; l — толщина пленки; x — расстояние от низа ТВС



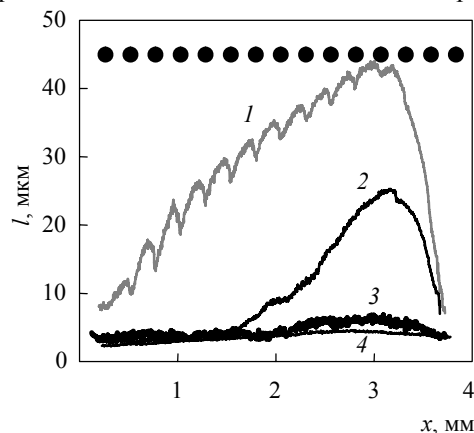
Р и с. 2. Распределение оксидной пленки по длине твэлов ВВЭР-440 при среднем выгорании 58 (1), 30 МВт·сут/кг (2)

Оболочки твэлов ВВЭР-1000. Толщина оксидной пленки на поверхности твэлов с оболочками из сплава Э110, отработавших до среднего выгорания топлива 36 МВт·сут/кг, изменяется от 3 мкм в нижней до 5 мкм в верхней части, при выгорании 53 МВт·сут/кг — от 5 до 9 мкм (рис. 3).

Оболочки твэлов из сплава Э635 окисляются более интенсивно. Толщина оксидной пленки на наружной поверхности оболочки твэла, отработавшего до выгорания 44 МВт·сут/кг, увеличивается от 6 мкм в нижней части до 46 мкм на участке с координатами 2,8—3,3 м и далее снижается до 7 мкм (газосборник). Участки поверхности вблизи дистанционирующих решеток покрыты более тонким слоем ZrO_2 по сравнению с располагавшимися на значительном расстоянии от них.

Характер окисления оболочек твэлов ВВЭР-1000 из сплава как Э110, так и Э635 равномерный, без локальных аномалий. Неравномерность окисления твэлов в пучке и азимутальная неравномерность окисления оболочек не зарегистрированы.

Направляющие каналы стержней управления и защиты ТВС ВВЭР-1000. Их также изготавливают из циркониевых сплавов Э110 и Э635. Направляю-



Р и с. 3. Распределение оксидной пленки по длине твэлов ТВС ВВЭР-1000 с оболочками из сплава Э635 (1), Э110 (3) и направляющих каналов СУЗ (2, 4 соответственно) при среднем выгорании топлива 39 (1, 2), 49 МВт·сут/кг (3, 4)

щие каналы из сплава Э635 по сравнению с оболочками твэлов из этого же сплава, отработавших в одной ТВС до выгорания 39 МВт-сут/кг, окислены меньше (см. рис. 3). Средняя толщина слоя ZrO_2 составила 11 и 29 мкм соответственно. В нижней половине направляющего канала толщина оксидной пленки слабо меняется по высоте и составляет в среднем 2—8 мкм, в верхней она увеличивается до участка с координатами 2,8—3,3 м, где достигает 20—28 мкм, затем снижается до 7—11 мкм.

Существенных различий (больше погрешности методики измерений) между распределением оксидной пленки по поверхности направляющих каналов из сплава Э110 и оболочек твэлов из этого же сплава не обнаружено.

Заключение. Внедрение в практику послереакторных исследований вихретоковой методики позволило получить новые экспериментальные результаты, характеризующие окисление цилиндрических элементов ТВС водоохлаждаемых энергетических реакторов. Получено подробное распределение толщины оксидной пленки по длине цилиндрических элементов ТВС РБМК-1000, ВВЭР-440, -1000 в нормальных условиях эксплуатации. Установлено, что утонение металлической части оболочки твэла, изготовленной из сплава Э110, в ВВЭР-440, -1000 не превышает 2% исходной толщины стенки оболочки, в

РБМК-1000 может достигать 30%. Утонение металлической части элементов ТВС, изготовленных из сплава Э635, в условиях ВВЭР-1000 не превышает 4% исходной толщины стенки.

Проведенная работа является важным этапом комплексных послереакторных исследований отработавших ТВС, проводимых в НИИАРе. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых элементов активных зон энергетических реакторов и уточнении моделей коррозии циркониевых сплавов в условиях воздействия мощных нейтронных полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Займовский А.С., Калашников В.В., Головин И.С. Тепловыделяющие элементы атомных реакторов. М.: Госатомиздат, 1962.
2. Кобылянский Г.П., Новоселов А.Е. Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе. Справочные материалы по реакторному материаловедению. Димитровград, НИИАР, 1996.
3. Смирнова И.М., Кучкина И.Н., Костюченко А.Н., Купrienko М.В. Определение состава продуктов отложений и толщины оксидной пленки на поверхности твэлов ВВЭР и РБМК. — Атомная энергия, 2005, т. 98, вып. 1, с. 50—54.

Поступило в Редакцию 21.12.06

УДК 621.376.234

ДИФфуЗИОННЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ *i*-ОБЛАСТИ В Si(Li)-ДЕТЕКТОРАХ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Раджапов С.А. (Физико-технический ин-т НПО «Физика—Солнце» АН РУз)

Самый длительный и энергоемкий процесс в технологии Si(Li)-детекторов ядерного излучения — формирование *i*-области методом дрейфа ионов лития. Так, для создания чувствительной области детектора толщиной более 2 мм требуются месяцы. В настоящей статье описан бездрейфовый способ изготовления Si(Li)-детекторов с протяженной чувствительной областью.

Для изготовления детектора на основе кремния *p*-типа ионы лития вводят методом тепловой диффузии в интервале 200—450 °С с учетом того, что компенсация акцепторов обеспечивается их перераспределением по всему объему кристалла. Для ускорения компенсации *i*-области диффузию ионов лития осуществляют одновременно с двух противоположных

торцевых поверхностей кристалла.* Концентрация ионов лития в детекторе устанавливается с учетом концентрации акцепторов и ловушек в исходном материале. Таким образом, длительный и сложный процесс дрейфа ионов лития в электрическом поле заменяется диффузионным отжигом при температуре от 200 до 450 °С.

На рис. 1 приведено расчетное распределение лития в кристалле (кривая 1) и экспериментально полученное распределение падения напряжения в *i*-области Si(Li)-детектора (кривая 2). Здесь же приведены данные для ширины компенсированной области, где AA1 — расчетная, BB1 — экспериментальная.

Si(Li)-детекторы ядерного излучения изготавливали следующим образом: из слитка кремния удельным сопротивлением 10 Ом·см перпендикулярно оси <111> вырезали шайбы толщиной 3 мм. Для решения уравнения диффузии определяли граничные условия для данного случая, исходя из того, что концентра-

* Муминов Р.А., Раджапов С.А., Сагындыков Н.А. Низкофононая установка для спектрометрии β -излучения с комбинированными детектирующими модулями. — Приборы и техника exper., 2005, № 1, с. 56—57.