

УДК 621.039.546:620.193

## ЛОКАЛЬНОЕ ПОВЫШЕННОЕ ОКИСЛЕНИЕ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ РЕАКТОРОВ С ВОДОЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ (ОБЗОР)

*А.С. Семёновых*  
*АО «ВНИИАЭС», Москва*  
*asemenovukh@vniiaes.ru*

*В настоящем обзоре проведено обобщение имеющейся на данный момент информации об обстоятельствах и возможных причинах локального повышенного окисления оболочек твэлов реакторов с водой под давлением, а также компенсирующих мероприятий, реализованных для минимизации указанного явления.*

Ключевые слова: ВВЭР, PWR, EPR, циркониевый сплав, оболочка твэла, коррозия, окисление.

## LOCAL INCREASED OXIDATION OF PRESSURIZED WATER REACTORS FUEL ROD CLADDINGS (SURVEY)

*A.S. Semenovukh*  
*JSC «VNIAES, Moscow*

*The review summarizes the currently available information on the circumstances and possible causes of local increased oxidation of pressurized water reactors fuel rod claddings, as well as corrective actions implemented to mitigate this phenomenon.*

Keywords: VVER, PWR, EPR, zirconium alloy, fuel rod cladding, corrosion, oxidation.

Проведенные исследования и накопленный к середине 90х годов прошлого века опыт эксплуатации твэлов реакторов с водой под давлением (PWR) показали, что коррозия оболочек из циркониевых сплавов не ограничивает работу твэлов вплоть до глубин выгорания от 35 до 40 МВт.сут/кгU [1]. При этом отмечалось, что при дальнейшем повышении глубины выгорания ядерного топлива (ЯТ) коррозия наружной поверхности оболочек может являться одним из основных факторов, ограничивающим ресурс работы твэлов [2].

После удлинения топливных кампаний и начала работы РУ на повышенной мощности тепловыделяющие сборки (ТВС) реакторов ВВЭР эксплуатируются в относительно более жестких условиях. Одним из побочных эффектов данных изменений, выявленных в отдельных случаях на практике, являются случаи локального

повышенного окисления отдельных твэлов («побеление», «белый налет»). За рубежом указанное явление зарегистрировано, как минимум, в четырех странах мира, эксплуатирующих АЭС с легководными реакторами PWR и EPR.

В настоящем обзоре проведено обобщение имеющейся на данный момент информации об обстоятельствах и возможных причинах локального повышенного окисления оболочек твэлов реакторов с водой под давлением, а также компенсирующих мероприятий, реализованных для минимизации указанного явления.

### АЭС с ВВЭР-1000 (РФ)

Для реализации перевода эксплуатируемых на АЭС («Концерн Росэнергоатом») энергоблоков ВВЭР-1000 на 18-месячный топливный цикл с одновременным повышением мощности реакторных установок до 104% от номинальной разработаны твэлы с увеличенной загрузкой топлива, эксплуатируемые на АЭС в составе ТВС-2М и ТВСА-PLUS. При проведении визуального осмотра ТВС новых модификаций в период плановых ремонтов Балаковской и Ростовской АЭС в верхней части отдельных твэлов обнаружено изменение цвета поверхности оболочек твэлов с светло-серого на белый. Наиболее заметное побеление оболочек твэлов наблюдалось под двенадцатой дистанционирующей решеткой (ДР12) и выше, вплоть до ДР13 [3], на участке расположения верхней границы топливного столба и газосборника (рис. 1).

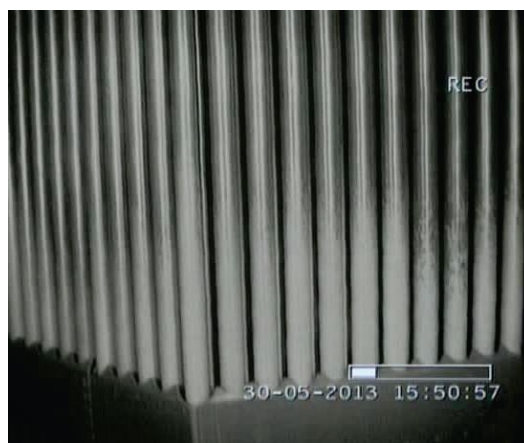


Рис. 1. Внешний вид ТВС-2М с повышенным окислением оболочек твэлов [4]

По результатам проведенных в АО «ГНЦ НИИАР» послереакторных исследований ТВС-2М, отработавшей на энергоблоке № 4 Балаковской АЭС в течение одной топливной кампании, сделано заключение, что побеление поверхности твэлов в пролете между ДР12 и ДР13 обусловлено увеличением толщины и изменением структуры оксидной плёнки в результате повышенного окисления оболочек. Измеренная толщина оксидной плёнки на участках побеления поверхности твэлов указанной ТВС изменяется в диапазоне от 10 до 30 мкм, что определяет наблюдаемое различие оттенков белого цвета. На участках твэлов, соответствующих верхней части

газосборника, отмечены случаи частичного отслоения оксидной пленки с возвращением темного тона поверхности оболочек. Дополнительно установлено, что оксидная плёнка на поверхности твэла приобретает белый цвет, начиная с толщины, равной примерно от 7 до 8 мкм [5].

Наиболее вероятной причиной коррозионного повреждения оболочек твэлов ВВЭР-1000 на участках побеления поверхности, согласно выводам специалистов АО «ГНЦ НИИАР», является повышенное паросодержание теплоносителя первого контура вследствие его подкипания, которое может быть обусловлено как гидравлическими характеристиками ТВС-2М, так и особенностями эксплуатации ТВС при работе РУ на повышенной мощности [5]. По данным специалистов НИЦ «Курчатовский институт» при подкипании происходит снижение концентрации водорода в теплоносителе первого контура, что приводит к существенному изменению параметров водно-химического режима (ВХР). При этом резко уменьшается эффективность подавления радиолиза теплоносителя, и концентрация кислорода в теплоносителе может существенно возрасти, что может привести к локальному повышенному окислению оболочек твэлов [6, 7]. Повышенный выход газообразного  $H_2$  из водной в паровую фазу относительно  $O_2$  обусловлен различными значениями коэффициентов Генри [8].

При проведении в АО «ГНЦ НИИАР» последующих исследований трех других ТВС-2М с оболочками из сплава Э110, отработавших на энергоблоках Балаковской АЭС одну, две и три топливные кампании при мощности РУ 104% от номинальной, сделано заключение, что толщина оксидной пленки на участках локального повышенного окисления зависит от среднего выгорания и длительности эксплуатации ТВС. Показано, что максимальная толщина оксидной пленки на поверхности твэлов ТВС, отработавшей одну топливную кампанию, не превышает 9 мкм. Для ТВС, отработавшей три топливные кампании, аналогичное значение составляет от 12 до 38 мкм. Отмечено, что локальная коррозия твэлов в пределах одной ТВС существенно зависит от их расположения в пучке вследствие различных теплогидравлических условий эксплуатации твэлов периферийного и внутренних рядов (расход, давление и температура теплоносителя) [9].

Следует отметить, что, согласно п.2.2.5 НП-082-07 [10], окисление оболочек твэлов в процессе эксплуатации РУ не должно приводить к их чрезмерному охрупчиванию. Одним из требований к материалам для оболочек твэлов и элементов каркаса ТВС является высокая коррозионная стойкость – толщина оксидной пленки не должна превышать 60 мкм [11].

### **АЭС «Брокдорф», «Гронде» и «Филиппсбург» (Германия)**

В 2005 году при проведении визуального осмотра отработавших ТВС после завершения 20 топливной кампании энергоблока №2 АЭС «Филиппсбург» отмечен

необычный внешний вид поверхности оболочек твэлов из сплава М5 в пролете между восьмой и девятой ДР (граница верхнего конца топливного столба и газосборника). По результатам измерений установлено, что максимальная толщина оксидной пленки на данном участке достигает 70 мкм [12]. При этом ниже восьмой ДР замечания к коррозионному состоянию оболочек твэлов отсутствовали.

Для установления причин повышенного окисления оболочек твэлов проведен анализ по следующим направлениям [12]:

- химический состав и структура конструкционных материалов;
- производство ЯТ (включая реагенты, используемые для обработки твэлов после приварки концевых заглушек);
- теплогидравлические условия эксплуатации (паросодержание на выходе из ТВС);
- линейное энерговыделение твэлов;
- ВХР теплоносителя первого контура.

По результатам проведенного анализа сделано заключение, что ни один из указанных факторов не может быть определен в качестве единственной основной причины повышенного окисления оболочек твэлов на энергоблоке №2 АЭС «Филиппсбург».

При последующих материаловедческих исследованиях образцов оболочек твэлов не выявлено различий между участками с повышенным окислением и без него, которые могли бы объяснить наблюдаемое явление. При этом показано, что толщина измеренной оксидной пленки на поверхности оболочки твэла коррелирует с содержанием железа в конструкционном материале (сплав М5<sup>1</sup>).

В период с 2012 по 2019 год признаки повышенного окисления оболочек в верхней части твэлов наблюдались на АЭС с PWR проекта «Pre-Konvoi» (энергоблоки №2 АЭС «Филиппсбург», №1 АЭС «Гронде» и №1 АЭС «Брокдорф») и в гораздо меньшей степени на АЭС с PWR проекта «Konvoi» (энергоблок №2 АЭС «Изар») [13].

Отдельно следует отметить событие на энергоблоке №1 АЭС «Брокдорф», когда в период планового ремонта в феврале 2017 года при перегрузке ЯТ после завершения 29 топливной кампании в теплоносителе первого контура было обнаружено присутствие необычно большого количества посторонних частиц, которые оказались фрагментами оксидной пленки, отслоившейся с поверхности твэлов. При визуальном осмотре ТВС выявлено повышенное окисление и отслоение оксидной пленки с поверхности твэлов из сплава М5 в пролете между восьмой и девятой ДР. По результатам проведенных измерений установлено, что толщина оксидной пленки на локальных участках отдельных твэлов значительно превышает прогнозируемые значения [14].

<sup>1</sup> Циркониевый сплав с 1% ниобия, 0,14% кислорода и 20 мг/кг серы. Кроме этого, 27 элементов заявлены как примеси (так называемое остаточное загрязнение), включая железо (менее 500 мг/кг) [12].

Максимальная толщина оксидной пленки за весь срок эксплуатации ТВС на АЭС в Германии (как правило, примерно пять лет) не должна превышать 100 мкм в среднем по поверхности твэла и 130 мкм на локальных участках [12]. В рассматриваемом случае на отдельных твэлах ТВС с энергоблока №1 АЭС «Брокдорф» впервые выявлен факт превышения указанного предела. При этом данные твэлы эксплуатировались в течение только двух топливных кампаний, последняя из которых была достаточно короткой.

Как правило, в пролете между восьмой и девятой ДР ТВС западного дизайна толщина оксидной пленки не превышает 25 мкм [12]. По результатам измерения толщины оксидной пленки на поверхности 5405 твэлов с оболочками твэлов из сплава М5 из состава 92 ТВС с АЭС «Брокдорф» установлено, что на поверхности 464 твэлов с признаками повышенного окисления толщина оксидной пленки не превышает указанного выше допустимого значения. Толщина оксидной пленки более 100 мкм обнаружена на 10 твэлах в трех ТВС, в одном случае измеренная толщина составила 152 мкм [15]. Состояние поверхности твэлов на участках ниже восьмой ДР соответствовало ожидаемому воздействию общей коррозии, учтенной в проекте.

По результатам анализа события на АЭС «Брокдорф» сформулировано несколько гипотез о возможном механизме локального повышенного окисления оболочек твэлов. По состоянию на 2020 год Комиссия по безопасности реакторов Германии (RSK) считала, что требуется дальнейшая проработка двух следующих гипотез [12].

Согласно первой гипотезе, предполагается, что повышенное окисление оболочек твэлов происходит в результате локального увеличения содержания окислительных продуктов в теплоносителе первого контура. Увеличение концентрации окислительных продуктов радиолиза в теплоносителе обусловлено снижением содержания растворенного в теплоносителе водорода. Дегазация происходит, в том числе за счет поступления водорода в пар, который образуется при подкипании теплоносителя первого контура в верхней части ТВС.

По второй гипотезе наблюдаемое повышенное окисление оболочек в верхней части твэлов обусловлено нарушением кристаллизации, в частности, во время формирования защитной оксидной пленки, обусловленное тем, что воздействие теплоносителя создает циклические термические напряжения из-за турбулентных поперечных перетоков в верхней части активной зоны. Нарушение кристаллизации приводит к более неоднородной кристаллической структуре на границе раздела металл/оксид и, как следствие, к увеличению образования трещин в оксидной пленке. Это приводит к нарушению оксидного покровного слоя, защищающего металл от дальнейшего окисления до такой степени, что он полностью или частично теряет свой защитный характер. На основе данной гипотезы сделано заключение, что локальную ускоренную коррозию можно предупредить путем ограничения линейного энерговыделения в верхней области топливного столба, так как это позволит снизить циклические термические напряжения.

По мнению атомного надзорного органа земли Шлезвиг-Гольштейн (Германия), кроме особенностей конструкционного материала повышенному окислению оболочек твэлов на АЭС «Брокдорф» способствовали жесткие условия эксплуатации ТВС: высокая плотность энерговыделения и работа энергоблоков АЭС в маневренном режиме [14]. Так, в 2006 году АЭС «Брокдорф» получила разрешение на работу на повышенной мощности (1480 МВт). Начиная с 2011 года данная АЭС работала в маневренном режиме, особенно часто с начала 2015 года. Признаки повышения окисления оболочек твэлов появились в 2011 году, при этом факт превышения предельно допустимого значения толщины оксидной пленки впервые зарегистрирован в 2017 году. До и после 2006 года для изготовления оболочек твэлов использовался один и тот же конструкционный материал – сплав М5. Но в связи с изменением условий эксплуатации РУ на отдельных оболочках твэлов, изготовленных из достаточно коррозионностойкого материала, стал происходить рост толщины оксидной пленки в верхней части ТВС, где этого не ожидалось, и со скоростью роста, превышающей расчетные значения.

По результатам расследований событий на АЭС «Брокдорф» (февраль 2017) и АЭС «Филиппсбург-2» (май 2019) для отдельных энергоблоков на АЭС в Германии были установлены следующие эксплуатационные ограничения, направленные на минимизацию или подавление механизма локального повышенного окисления оболочек твэлов [12]:

- ограничение мощности РУ до 95% номинальной, в отдельных случаях в сочетании со снижением средней температуры теплоносителя первого контура на 3 °С;
- ограничения работы энергоблоков в маневренном режиме;
- ограничение плотности энерговыделения в верхней части активной зоны (АЭС «Брокдорф») или ограничение линейного энерговыделения для верхних 12 см топливного столба твэлов уровнем 150 Вт/см (энергоблок №2 АЭС «Филиппсбург»);
- поддержание концентрации водорода (H<sub>2</sub>) в теплоносителе первого контура на уровне от 3 до 4 мг/кг.

### **АЭС «Ангра» (Бразилия)**

В июне 2020 года в период планового ремонта энергоблока №2 АЭС «Ангра» по завершению 16 топливной кампании при проведении перегрузки ЯТ отмечен выход «мелких блестящих частиц» из отдельных ТВС (рис. 2).

Для определения возможных причин данного события организовано проведение расследования. В первую очередь проведен визуальный осмотр выгружаемых из активной зоны ТВС с помощью телевизионной системы.

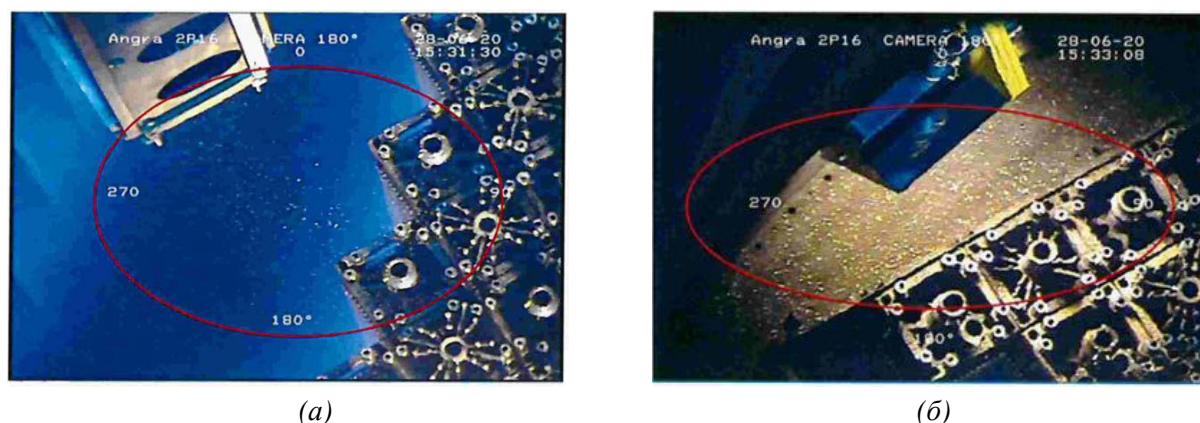


Рис. 2. Поступление фрагментов отслоившейся оксидной пленки из ТВС в теплоноситель при проведении транспортно-технологических операций (а) с последующим оседанием на поверхности внутрикорпусных устройств (б) (энергоблок №2 АЭС «Ангра», Бразилия) [13]

Установлено, что все 52 ТВС, отработавшие одну топливную кампанию, имеют признаки повышенного окисления оболочек твэлов, в том числе с отслаиванием оксидной пленки в пролете между восьмой и верхней девятой ДР. Коррозионное состояние поверхности твэлов различалось от едва заметного более яркого серого оттенка до обширного отслаивания оксидной пленки. Признаки повышенного окисления оболочек твэлов наблюдались как на периферийном ряду, так и на твэлах внутренних рядов (рис. 3).

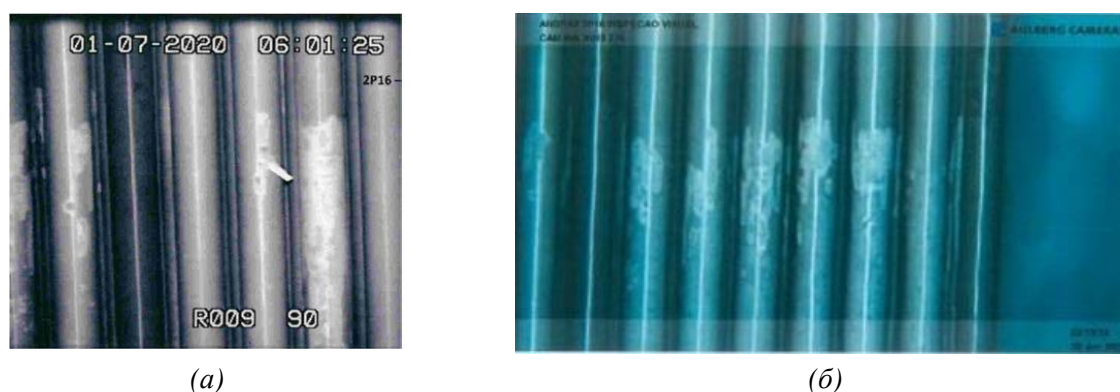


Рис. 3 – Внешний вид ТВС с герметичными (а) и негерметичными (б) твэлами (энергоблок №2 АЭС «Ангра», Бразилия) [13]

После этого, с помощью оборудования для поиска и извлечения посторонних предметов (FOSAR), взяты пробы частиц белого цвета из системы теплоносителя реактора. По результатам химического анализа данных частиц установлено, что они в основном состоят из циркония (Zr), небольшого количества (Nb) и других веществ. Данный результат указывает на то, что их источником является материал оболочки твэла, циркониевого сплава М5 (98,93% Zr, 1% Nb и 0,07% примесей). Твэлы с оболочками из сплава М5 эксплуатируются на энергоблоке №2 АЭС «Ангра» начиная

с восьмой топливной кампанией (2009 год). При этом до 2020 года никаких проблем с данным сплавом не возникало.

По результатам контроля герметичности оболочек твэлов на остановленной РУ одна из ТВС с повышенным окислением оболочек твэлов признана содержащей негерметичные твэлы. Считается, что указанные повреждения произошли независимо друг от друга. Факт разгерметизации твэлов на энергоблоке №2 АЭС «Ангра» установлен в самом начале 16 топливной кампании, когда был зарегистрирован рост удельной активности  $^{131}\text{I}$  и  $^{133}\text{Xe}$  в теплоносителе первого контура. С учетом опыта эксплуатации АЭС «Ангра» сделано предположение, что разгерметизация твэлов ТВС «R013» произошла в результате взаимодействия с посторонним предметом (debris-повреждение). При этом по результатам визуального осмотра негерметичной ТВС не выявлено повреждений твэлов периферийного ряда. Посторонние предметы в данной ТВС не обнаружены [13].

С учетом опыта эксплуатации АЭС в Германии сделано предположение, что локальное повышенное окисление оболочек твэлов на энергоблоке №2 АЭС «Ангра» произошло в результате сочетания нескольких факторов. К ним могут быть отнесены состав конструкционного материала оболочки твэлов, процесс изготовления оболочки, обращение, хранение и условия эксплуатации ТВС (распределение энерговыделения, ВХР, нейтронно-физические и теплогидравлические параметры работы РУ). Проводится анализ в указанных направлениях с целью выявления коренной причины повышенного окисления оболочек твэлов [13].

Эксплуатирующая организация приняла решение исключить ТВС с признаками повышенного окисления оболочек твэлов из состава 17 топливной загрузки энергоблока №2 АЭС «Ангра-2» в связи с отсутствием возможности проведения измерений толщины оксидной пленки и утонения твэлов. Кроме того, с целью минимизации риска повышенного окисления оболочек твэлов в ходе 17 топливной кампании РУ будет эксплуатироваться на пониженной мощности, примерно на 5%. Ситуация с повышенным окислением оболочек твэлов находится на контроле у надзорного органа, Национальной комиссии по ядерной энергии Бразилии (CNEN) [13].

### **АЭС «Шо Б», «Сиво» и «Каттеном» (Франция)**

В июле 2021 года компания EDF объявила о выявлении на трех энергоблоках случаев локального повышенного окисления оболочек твэлов [16].

При проведении перегрузки ЯТ на энергоблоке №2 АЭС «Шо Б» в феврале 2021 года обнаружено большое количество посторонних частиц белого цвета размером в несколько миллиметров. Предварительный анализ показал, что данные частицы состоят из диоксида циркония. С помощью телевизионной системы установлено, что имеет место более сильная, чем ожидалось, коррозия оболочек в верхней части отдельных твэлов 15 ТВС, отработавших одну и две топливные кампании [17]. Кроме

того, подтверждено, что указанные частицы образовались в результате отслаивания оксидной пленки с внешней поверхности оболочек ТВЭлов (рис. 4).

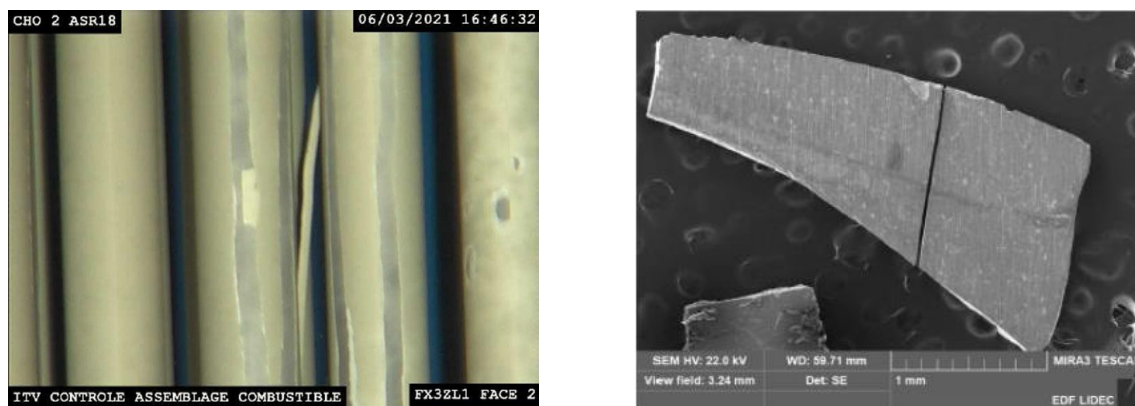


Рис. 4. Внешний вид твэлов ТВС энергоблока АЭС «Шо Б» с признаками локального повышенного окисления (а) и фрагмент отслоившейся оксидной пленки (б) [18]

Два других случая произошли на следующих энергоблоках [17]:

- энергоблок №2 АЭС «Сиво» (РУ проекта N4, 1450 МВт): отслоение оксидной пленки на одном твэле;
- энергоблок №3 АЭС «Каттеном» (РУ мощностью 1300 МВт): локальное окисление оболочек твэлов без отслаивания оксидной пленки на твэлах нескольких ТВС.

Так как следы локального повышенного окисления оболочек твэлов обнаружены только на отдельных твэлах, компания EDF провела анализ производства всех партий оболочек твэлов из состава 18 топливной загрузки энергоблока №2 АЭС «Шо Б». По результатам проведенного анализа не установлены какие-либо несоответствия или аномальные события, которые могли бы быть единственной причиной локального повышенного окисления оболочек твэлов. По результатам проведенного анализа условий эксплуатации энергоблока №2 АЭС «Шо Б» в ходе последних двух топливных кампаний не выявлено каких-либо особенностей по сравнению с предыдущими периодами работы энергоблоков с РУ проекта N4. ВХР теплоносителя первого контура поддерживался в соответствии с установленными требованиями, отклонений в части радионуклидного состава теплоносителя не зарегистрировано [17].

Тем не менее, с учетом международного опыта эксплуатации, компания EDF заявила о потенциальной связи между скоростью коррозии оболочек твэлов и содержанием железа в конструкционном материале, из которого они изготовлены. Установлено, что оболочки твэлов, наиболее подверженные ускоренной коррозии, изготовлены из отливок сплава М5 с относительно низким содержанием железа. По данным Органа регулирования ядерной безопасности Франции (ASN) при содержании железа в сплаве М5 в диапазоне примерно от 370 до 400 мг/кг толщина оксидной пленки не превышала 75 мкм. При более низком содержании железа в диапазоне

от 290 до 330 мг/кг максимальная измеренная толщина оксидной пленки составляла от 60 до 210 мкм (рис. 5).

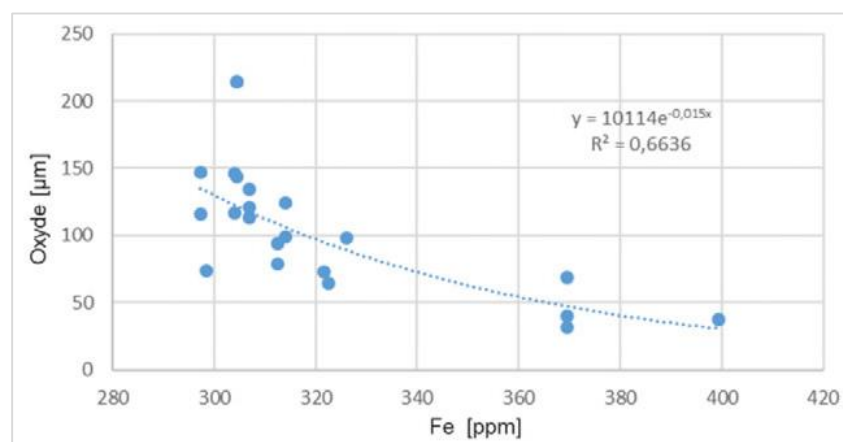


Рис. 5. Зависимость максимальной толщины оксидной пленки на участках локального повышенного окисления оболочек твэлов от содержания железа в конструкционном материале [18]

Кроме этого, компания EDF считает, что работа энергоблоков с РУ проекта N4 в удлиненных топливных кампаниях способствует формированию режима пузырькового кипения на границе между теплоносителем первого контура и оболочками твэлов на участках, соответствующих верхнему концу топливных столбов [17].

Таким образом, по мнению компании EDF, основными причинами локальной ускоренной коррозии твэлов на энергоблоках АЭС «Шо Б», «Сиво» и «Каттеном» являются подкипание теплоносителя в верхней части активной зоны и относительно низкое содержание железа в сплаве М5, из которого изготовлены оболочки данных твэлов.

В связи с тем что содержание железа в отдельных плавках сплава М5 является одной из причин локального повышенного окисления оболочек твэлов, компания EDF планирует пересмотреть требования к химическому составу данного сплава с целью повышения минимального содержания железа [17].

При формировании 19 топливной загрузки энергоблока №2 АЭС «Шо Б» компания EDF провела классификацию отработавших ТВС на основе визуального осмотра и результатов измерения толщины оксидной пленки на поверхности твэлов, при этом было предложено [17]:

- исключить из состава очередной загрузки ТВС, для которых при проведении визуального осмотра установлен факт отслаивания оксидной пленки с поверхности оболочек твэлов;

- включить в состав загрузки только те ТВС, для которых по результатам проведения измерений и оценок с необходимым запасом, позволяющим учесть текущее понимание рассматриваемого явления и неопределенность экспериментальных данных, было обосновано отсутствие отслаивания оксидной пленки с поверхности твэлов во время работы в следующую топливную кампанию.

При проведении оценок определялись предельно допустимые толщины оксидной пленки на твэлах ТВС, отработавших одну или две топливные кампании, для которых с учетом прогнозируемого роста толщины оксидной пленки в ходе 19 топливной кампании энергоблока №2 АЭС «Шо Б» не будет превышен так называемый порог отслаивания. Данный порог был определен по результатам измерения толщины оксидной пленки на твэлах со следами ее отслаивания. На основе анализа экспериментальных данных установлено, что для сплава М5 пороговое значение толщины оксидной пленки, при превышении которого не исключен риск ее отслаивания, составляет 71 мкм. Следует отметить, что для сплава Циркалой-4 (Zy-4) порог отслаивания оксидной пленки оценивается в 80 мкм [17].

В дополнение к отбору отработавших ТВС с признаками локального повышенного окисления твэлов для продолжения эксплуатации на проблемных энергоблоках компанией EDF были реализованы следующие компенсирующие мероприятия, направленные на ограничение максимальной толщины оксидной пленки и снижение риска ее отслаивания [17]:

- ограничение максимальной мощности РУ уровнем 92,6% от номинальной;
- увеличение концентрации растворенного в теплоносителе водорода в пределах, разрешенных требованиями ВХР;
- сохранение рекомендуемого положения органов регулирования СУЗ;
- снижение количества маневренных режимов (для РУ проекта N4, кроме энергоблока №2 АЭС «Шо Б»);
- оценка эффективности указанных выше мероприятий в период очередного планового ремонта.

Проведенный к маю 2022 года анализ архивов видеозаписей результатов визуального осмотра ТВС РУ мощностью 900 МВт и 1300 МВт, сделанных при перегрузке ЯТ за последние десять лет подтвердил наличие локального повышенного окисления оболочек твэлов и на других энергоблоках компании EDF, но без отслаивания оксидной пленки. При этом анализ результатов измерений толщины оксидной пленки показал, что твэлы МОКС-ТВС подвержены повышенному окислению в значительно меньшей степени по сравнению с твэлами с урановым топливом ( $UO_2$ ) [19].

По состоянию на конец 2022 года, после проведения технических обсуждений вопроса локального повышенного окисления оболочек твэлов, компенсирующие мероприятия, реализованные компанией EDF на энергоблоках с РУ мощностью 900 и 1300 МВт, были отменены [20].

### **АЭС «Тайшань» (Китай), энергоблок № 3 АЭС «Фламанвиль» (Франция)**

Ввод в эксплуатацию и последующая эксплуатация первых энергоблоков с флагманскими реакторами EPR поколения III+ (1650 МВт) сопровождалась проблемами, связанными с надежностью ЯТ. При проведении визуального осмотра ТВС во время перегрузки активной зоны на энергоблоке №1 АЭС «Тайшань» выявлено

локальное повышенное окисление оболочек твэлов с отслаиванием оксидной пленки с внешней поверхности оболочки твэлов. Как и в аналогичных случаях на АЭС во Франции и других зарубежных странах, скорость роста оксидной пленки в верхней части твэлов, изготовленных из сплава М5, оказалась выше ожидаемой [21].

По результатам анализа опыта эксплуатации реакторов EPR установлено, что на локальное повышенное окисление оболочек твэлов из сплава М5 оказывают влияние флюенс нейтронов и начальное обогащение топлива по  $^{235}\text{U}$ . По данным компании EDF, флюенс нейтронов способствует изменению микроструктуры материала оболочки твэла на начальном этапе эксплуатации, что приводит к повышению коррозионной стойкости. На начальном этапе эксплуатации реакторов EPR оболочки твэлов подвергались относительно низкому облучению в активной зоне, что привело к недостаточной коррозионной стойкости. Кроме этого, выявлено, что максимальная толщина оксидной пленки наблюдается на твэлах, содержащих топливо с относительно повышенным начальным обогащением по  $^{235}\text{U}$  [21].

Компания EDF учла опыт эксплуатации реакторов EPR при формировании первой топливной загрузки энергоблока №3 АЭС «Фламанвиль», пуск которого запланирован на 2024 год. Во-первых, для размещения на периферии активной зоны изготовлены новые ТВС усиленной конструкции с оболочками твэлов из циркониевого сплава с повышенным содержанием железа. Во-вторых, с целью минимизации локального повышенного окисления оболочек твэлов первая топливная загрузка энергоблока №3 АЭС «Фламанвиль» сформирована из ТВС с топливом относительно меньшего начального обогащения по  $^{235}\text{U}$ , чем на энергоблоках EPR, введенных в эксплуатацию в Китае. Кроме этого, ТВС с большим количеством твэлов, изготовленных из сплава М5 с относительно низким содержанием железа, поставленные на указанный энергоблок до выявления проблем с ЯТ на АЭС «Тайшань», заменены в первой топливной загрузке на аналогичные ТВС с твэлами такого же обогащения с оболочками из сплава М5 с повышенным содержанием железа. Также в состав первой топливной загрузки энергоблока №3 АЭС «Фламанвиль» включены ранее поставленные ТВС, твэлы которых изготовлены из отливок сплава М5 с относительно повышенным содержанием железа, в том числе с максимальным начальным обогащением топлива по  $^{235}\text{U}$  [21].

В заключении Института ядерной и радиационной безопасности Франции IRSN отмечается, что локальное повышенное окисление оболочек твэлов из сплава М5 в ходе первой топливной кампании энергоблока №3 АЭС «Фламанвиль» будет ограничено за счет сочетания оптимизации состава топливной загрузки с априори более благоприятными условиями эксплуатации РУ по сравнению с энергоблоками АЭС «Тайшань» [21]. Конкретные условия эксплуатации РУ данного энергоблока в заключении IRSN не указаны. При этом, по данным французского делового издания «L'Usine Nouvelle», из-за возможного повышенного окисления оболочек твэлов из сплава М5 энергоблок № 3 АЭС «Фламанвиль» не будет эксплуатироваться на номинальной мощности до 2027 или, возможно, 2028 года [22].

**Взаимодействие оболочек твэлов из циркониевых сплавов с теплоносителем, возможные последствия повышенного окисления оболочек твэлов**

Отвод тепла от твэлов реакторов с водой под давлением осуществляется теплоносителем первого контура. Под действием нейтронов и гамма-излучения происходит радиолиз водного теплоносителя с образованием водорода, кислорода и ряда короткоживущих радикалов. При работе РУ на мощности кислород может вступать в реакцию с горячей металлической поверхностью оболочки твэла, в результате на ней образуется тонкая оксидная пленка. Данный процесс учитывается при проектировании РУ. При этом толщина оксидной пленки не должна превышать определенного значения.

Локальное повышенное окисление оболочек твэлов реакторов с водой под давлением может иметь несколько последствий с точки зрения безопасности эксплуатации РУ, так как оно может повысить вероятность сквозного повреждения оболочек твэлов. В случае массовой разгерметизации твэлов может произойти значительная утечка продуктов деления в теплоноситель первого контура с достижением соответствующих эксплуатационных пределов и необходимостью проведения внепланового останова РУ.

Наличие толстой оксидной пленки может привести к ухудшению теплообмена между оболочкой твэла и теплоносителем первого контура и, соответственно, к повышению температуры топлива и оболочки.

Возможное отслаивание оксидной пленки может оказать влияние на обоснование безопасности РУ при аварии с извлечением стержней СУЗ. Это связано с тем, что, в случае отслаивания оксидной пленки, на поверхности оболочки твэла образуется относительно холодный участок (по сравнению с участками, где за счет наличия оксидной пленки повышается температура оболочки), поэтому на данном участке при работе РУ на мощности может происходить выпадение гидридов, которое приводит к охрупчиванию циркониевого сплава [17]. При этом на данный момент компания EDF показала, что коррозия оболочек твэлов из сплава М5 не сопровождается гидрированием, что могло бы ослабить оболочку в аварийных режимах работы [17, 23].

Отслаивание оксидной пленки с поверхности оболочек твэлов может привести к значительному поступлению посторонних частиц в теплоноситель первого контура. Однако считается, что данные частицы не будут представлять никакой опасности с учетом их размера и низкой механической прочности. По данным компании EDF, отслоившиеся фрагменты оксидной пленки очень хрупкие [17].

### **Локальное повышенное окисление оболочек твэлов реакторов с водой под давлением**

Однотипные случаи локального повышенного окисления оболочек в верхней части твэлов реакторов с водой под давлением (ВВЭР, PWR и EPR) наблюдаются, по крайней мере, начиная с 2005 года. Данное явление зарегистрировано на энергоблоках, эксплуатируемых в РФ, Германии, Бразилии, Франции и Китае. Нельзя исключать, что данное явление наблюдается и на АЭС в других странах. Например, из-за запретов и ограничений, связанных с экспортным контролем, отсутствуют данные о коррозионном состоянии твэлов на АЭС в США [23].

Во всех известных на данный момент случаях локальное повышенное окисление оболочек твэлов реакторов с водой под давлением наблюдалось в пролете между двумя верхними ДР, на границе верхнего конца топливного столба и газосборника. По имеющейся информации, на зарубежных АЭС рассматриваемое явление наблюдалось только на оболочках твэлов из сплава М5, изготовленных компанией Framatome, при этом не на всех твэлах из данного сплава. Количество ТВС с твэлами с повышенной толщиной оксидной пленки в составе отдельной топливной загрузки может варьироваться от нескольких штук до нескольких десятков.

Максимальная зарегистрированная толщина оксидной пленки на участках локального повышенного окисления оболочек твэлов реакторов PWR составляет порядка 200 мкм, что эквивалентно примерно 30% толщины оболочки. На отдельных АЭС зарегистрированы случаи отслаивания оксидной пленки с поверхности твэлов. Фрагменты оксидной пленки присутствовали на антидебризных фильтрах, а также поступали из ТВС в теплоноситель при проведении транспортно-технологических операций (рис. 2а). По всей видимости, в последнем случае отслоение оксидной пленки происходило в результате значительного изменения температуры оболочек твэлов после останова РУ.

Точное понимание явления локального повышенного окисления оболочек твэлов реакторов с водой под давлением на данный момент отсутствует. К основным факторам, провоцирующим данное явление относят:

- подкипание теплоносителя первого контура в верхней части ТВС, способствующее формированию в теплоносителе первого контура окислительной среды;
- относительно низкое содержание железа в конструкционном материале оболочек твэлов;
- низкий флюенс нейтронов на начальном этапе эксплуатации ТВС;
- эксплуатацию РУ на повышенной мощности;
- работу энергоблоков АЭС в маневренном режиме.

Для ограничения локального повышенного окисления поверхности твэлов на зарубежных АЭС был реализован ряд компенсирующих мероприятий:

– ограничение максимальной мощности РУ с целью уменьшения подкипания теплоносителя первого контура в верхней части активной зоны, что является одной из основных причин повышенного окисления оболочек твэлов;

– при работе в удлиненной части топливной кампании поддержание группы органов регулирования СУЗ в положении, рекомендуемом для конца штатной (не удлиненной) топливной кампании, с целью ограничения энерговыделения в верхней части активной зоны и, соответственно, подкипания теплоносителя первого контура [17];

– снижение количества маневренных режимов, как одного из возможных влияющих факторов;

– увеличение концентрации растворенного в теплоносителе водорода для подавления образования окислительных продуктов радиолиза;

– повышение содержания железа в конструкционном материале, используемом для изготовления оболочек твэлов как примеси, которая положительно влияет на коррозионную стойкость циркониевых сплавов при повышенной температуре [24];

– визуальный осмотр ТВС, измерение толщины оксидной пленки и утонения оболочки на отдельных твэлах в период очередного планового ремонта;

– оценка эффективности и, при необходимости, корректировка реализуемых мероприятий.

Так как в ряде случаев локальное повышенное окисление оболочек твэлов произошло после начала эксплуатации РУ на повышенной мощности, в том числе в сочетании с работой РУ в маневренном режиме, при отсутствии изменения конструкционного материала, то логика отдельных компенсирующих мероприятий заключается в возвращении условий эксплуатации РУ к тем параметрам, когда опыт эксплуатации в части коррозионного состояния твэлов в целом был положительным.

### **Выводы**

Ограничение локального повышенного окисления оболочек твэлов реакторов с водой под давлением является важным с точки зрения безопасности РУ. Коренные причины данного вида коррозии на данный момент неизвестны и ее последствия невозможно спрогнозировать путем проведения расчетов. Рассматриваемое явление может приводить к значительным финансовым издержкам и потерям за счет незапланированного удлинения плановых ремонтов энергоблоков АЭС, затратам на реализацию специальных мероприятий, в том числе связанных с необходимостью эксплуатации РУ на пониженной мощности. Поэтому вопрос обеспечения коррозионной стойкости конструкционных материалов оболочек твэлов реакторов с водой под давлением при изменении условий эксплуатации ТВС в сторону ужесточения продолжает оставаться актуальным.

**Список литературы**

1. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головнин И.С. и др. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов: в 2 кн. М.: Энергоатомиздат, 1995.
2. Петельгузов И.А. Работоспособность тепловыделяющих элементов энергетических атомных реакторов типа ВВЭР, PWR и BWR: Обзор. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 1999.
3. Волкова И.Н., Горячев А.В., Звир Е.А., Жителев В.А., Никитин О.Н., Строжук А.В. Результаты исследования структуры оксидной плёнки на участках повышенного окисления оболочек твэлов ТВС-2М, отработавшей на 4-м энергоблоке Балаковской АЭС в течение одной ТК. – В сб.: Одиннадцатая международная научно-техническая конференция МНТК-2018. Москва, Россия.
4. О. Аудемиров. Experience of nuclear fuel exploitation at VVER-1000 NPPs. 12th International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support. Bulgaria, Nesebar, 2017 [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/50/006/50006656.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/006/50006656.pdf) (дата обращения 23.04.2024).
5. Научный годовой отчёт АО «ГНЦ НИИАР» (отчёт об основных исследовательских работах, выполненных в 2016 г.) / под общей ред. д-ра техн. наук, проф. В.В. Калыгина. — Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2017. – 230 с.
6. Иванов А.С., Калашикова П.А., Ковалишин А.А., Повещенко О.Ю., Таран М.Д. Радиолит теплоносителя при распаде раствора водорода вблизи температуры насыщения в реакторах ВВЭР. ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов, 2022, Вып. 2.
7. Иванов А.С., Ковалишин А.А., Лихоманова П.А., Таран М.Д. Локальное нарушение водно-химического режима как причина повышенного окисления оболочек твэлов ВВЭР-1000. ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов, 2021, Вып. 1.
8. В. Г. Крицкий, И.Г. Березина, Е.А. Моткова. Модель коррозии циркониевых сплавов в водном теплоносителе ВВЭР при нормальной эксплуатации. Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. Периодический рецензируемый научно-технический сборник №4 (10). ФЯО ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», Сосновый Бор, 2017.
9. Сагалов С.С., Звир Е.А., Строжук А.В. Коррозионное состояние твэлов и твэгов ТВС-2М, отработавших от одной до трёх топливных кампаний при повышенной мощности энергоблока. Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». Вып. №2, 2022. Димитровград, 2022.
10. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП-082-07// Ядерная и радиационная безопасность. – 2008. – №1. – С. 52-77.
11. Лавренюк П.И., Долгов А.Б. Разработка и усовершенствование ядерного топлива для активных зон энергетических установок. Девятая международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Москва, 21-23 мая 2014 года.
12. Erhöhte Oxidschichtdicken im oberen Bereich von Brennstäben mit M5-Hüllrohren. RSK-Empfehlung (514. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 12.02. 2020). [https://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/epanlagersk514hp\\_0.pdf](https://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/epanlagersk514hp_0.pdf). (дата обращения 23.04.2024).

13. N. Lapa, A. Madeira, R. Nery. *Fuel Failure in Normal Operation of Angra 2 Brazilian Nuclear Power Plant*. IAEA-TECDOC-2004 «Fuel Failure in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Causes and Mitigation». IAEA, Vienna, 2022.
14. *Fragen und Antworten zu überhöhten Oxidschichtdicken an Brennstäben im Kernkraftwerk Brokdorf*. 17.12.2020 [https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/R/reaktorsicherheit/faq\\_KKW\\_Brokdorf\\_Oxidschichtdicken.html](https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/R/reaktorsicherheit/faq_KKW_Brokdorf_Oxidschichtdicken.html) (дата обращения 23.04.2024).
15. *Kernkraftwerk Brokdorf: Erhöhte Leistung und intensiverer Lastwechsel haben Oxidation von Brennstäben verstärkt*. 17.07.2017. [https://www.schleswig-holstein.de/DE/landesregierung/ministerien-behoerden/V/Presse/PI/2017\\_neu/0717/MELUR\\_170717\\_Korrosion\\_Brokdorf.html](https://www.schleswig-holstein.de/DE/landesregierung/ministerien-behoerden/V/Presse/PI/2017_neu/0717/MELUR_170717_Korrosion_Brokdorf.html) (дата обращения 23.04.2024).
16. *Constat d'un phénomène de corrosion atypique sur les gaines de crayons de combustible de trois réacteurs*. EDF. Note d'information, 13 juillet 2021 [https://www.edf.fr/sites/groupe/files/ess\\_gen\\_niv0\\_k\\_juillet2021\\_0.pdf](https://www.edf.fr/sites/groupe/files/ess_gen_niv0_k_juillet2021_0.pdf) (дата обращения 23.04.2024).
17. *Réacteurs électronucléaires EDF - Exploitation des réacteurs du palier N4 concernés par le phénomène de corrosion accélérée des gaines de combustible en alliage M5*. AVIS IRSN № 2021-00151. Fontenay-aux-Roses, le 6 août 2021
18. *Corrosion atypique des gaines d'assemblages combustible*. ASN/DCN/BCE, 9 novembre 2021 [https://www.moselle.fr/jcms/pl\\_28038/fr/5-2-asn-corrosion-ak-m5](https://www.moselle.fr/jcms/pl_28038/fr/5-2-asn-corrosion-ak-m5) (дата обращения 23.04.2024)
19. *Réacteurs électronucléaires EDF – Tous réacteurs – Corrosion du gainage en alliage M5 des assemblages de combustible – Modifications des mesures compensatoires*. AVIS IRSN № 2022-00105. Fontenay-aux-Roses, le 13 mai 2022.
20. *ASN Report on the state of nuclear safety and radiation protection in France in 2022*, p.290 [https://www.french-nuclear-safety.fr/annual\\_report/2022gb/](https://www.french-nuclear-safety.fr/annual_report/2022gb/) (дата обращения 23.04.2024)
21. *Réacteurs électronucléaires EDF – EPR – Corrosion du gainage en alliage M5 des assemblages de combustible*. AVIS IRSN № 2023-00151. Fontenay-aux-Roses, le 13 octobre 2023.
22. *Derniers tests D'EDF pour démarrer Flamanville 3 en 2024*. L'Usine Nouvelle 3724 - Novembre 2023 <https://www.usinenouvelle.com/article/derniers-tests-d-edf-pour-demarrer-flamanville-3-en-2024.N2189293> (дата обращения 03.01.2024).
23. *The Inspector General's report on Nuclear Safety and Radiation Protection*. EDF, 2022, pp.18, 43 <https://igsnr.com/wp-content/uploads/2023/02/IGSNR-Report-2022.pdf> (дата обращения 23.04.2024).
24. Duan Z. et al., *Current status of materials development of nuclear fuel cladding tubes for light water reactors*, *Nuclear Engineering and Design* 316 (2017) 131-150.