

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ НА ПРОЧНОСТЬ ОБОЛОЧЕК ИЗ СПЛАВА Э110 В УСЛОВИЯХ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

А.С. Сотников

en7@power.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Выполнен анализ данных по влиянию технологических дефектов на длительную прочность трубок $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм из сплава Э110 в условиях коррозионного растрескивания под напряжением в среде йода, полученных на протяжении последних лет. Проведено сравнение экспериментальных результатов коррозионного растрескивания под напряжением трубок в среде йода с данными испытаний трубок из сплава Э110 в состоянии поставки, с искусственными и технологическими дефектами на внутренней поверхности. На основании экспериментальных результатов исследований коррозионного растрескивания под напряжением облученных трубок $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм из сплава Э110 рекомендовано значение порогового напряжения ~ 280 МПа при температуре 350 °С в среде йода (концентрация йода $\sim 0,2$ мг/см²)

Ключевые слова

Циркониевый сплав Э110, оболочка твэла, напряжение, внутренняя поверхность, технологический дефект, коррозионное растрескивание под напряжением

Поступила 14.12.2018

© Автор(ы), 2019

Введение. Опыт эксплуатации твэлов для водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) показывает, что большая часть от общего числа отказов твэлов связана с эксплуатацией в переходных режимах или с нарушением эксплуатационного регламента и технических условий водно-химического режима [1].

В настоящее время по отказам твэлов типа ВВЭР отсутствуют прямые свидетельства по влиянию технологических дефектов, хотя отдельные исследования отработавших твэлов косвенно подтверждают эту версию.

Определенные ограничения на эксплуатацию твэлов связывают с взаимодействием топлива и оболочки (ВТО) и, как следствие, с коррозионным растрескиванием под напряжением (КРН) их оболочек, а также с возможностью развития водородного охрупчивания.

Расчетные и экспериментальные исследования показывают, что прочность оболочек в стационарных и переходных режимах эксплуатации определяется уровнем окружных растягивающих напряжений. Поэтому при прочностном анализе оболочек твэлов [2] основное внимание уделяется именно этим напряжениям.

При этом одним из требований к оболочкам твэлов нового поколения (толщиной до $\sim 0,57$ мм) [3] является обеспечение более высокой надежности контроля технологических дефектов.

Поведение циркониевых сплавов в условиях КРН при исследовании в различных условиях (температура, концентрация йода) особенно зависит от состояния внутренней поверхности оболочек, которые могут иметь различные дефекты (в виде рисок, ямок травления и др.), что естественно может сказаться на процессе КРН.

Это подтверждает важность аналитического подхода к всестороннему изучению свойств оболочек, которые должны использоваться при расчетах работоспособности твэлов [2–4].

Поверхностные дефекты в виде царапин или незначительных ямок травления после технологических операций имеют максимальную глубину 15...20 мкм. В случае трубчатых образцов, нагруженных внутренним давлением инертного газа, присутствие йода вызывает образование питтингов, которые могут служить местами зарождения трещин [5, 6]. Эти дефекты, представляющие собой углубления в материале, заполненные продуктами коррозии, образуются на цирконии при наличии галогенов в реакционной среде.

Зарождение трещин происходит на различных дефектных участках: границах зерен, питтингах, в местах химической неоднородности металла, выделения вторых фаз, микромеханических повреждений и других местах, которые являются концентраторами напряжений.

При этом для оболочек твэлов должно быть принято во внимание конкретное воздействие облучения нейтронами и осколками деления. Обладая высокой энергией, осколки деления могут проникать в материал оболочки на глубину ~ 10 мкм. Известно, что в процессе облучения твэла энергетического реактора эти осколки деления имплантируются в оболочку со стороны внутренней поверхности, в результате чего образуется тонкий слой циркониевого сплава с концентрацией легирующих продуктов деления более 1 %.

Присутствие ионов некоторых элементов (Mo, Cs, I, Ag, Cd) может явиться причиной охрупчивания такого слоя.

В результате материаловедческих исследований опытных твэлов ВВЭР в ГНЦ РФ «НИИ атомных реакторов» (НИИАР) (г. Димитровград) выявлено, что физико-химическое взаимодействие топлива с оболочкой способствует обогащению ураном, цезием и другими продуктами деления внутреннего слоя оболочки толщиной до ~ 10 мкм, что, по-видимому, приводит к его охрупчиванию и образованию микротрещин при механических испытаниях на растяжение кольцевых образцов. Кратковременная прочность оболочек отработанных твэлов оказалась сравнима с кратковременной прочностью необлученных оболочек.

Поскольку глубина реальных технологических дефектов почти в 2–3 раза больше глубины высоколегированного хрупкого слоя на внутренней поверхности оболочки, то необходимо учитывать наличие таких дефектов и вероятность их развития, особенно в маневренных режимах эксплуатации и при глубоких выгораниях.

Учитывая, что в процессе эксплуатации твэлов контроль за разгерметизацией тепловыделяющих сборок в случае наличия на внутренней поверхности оболочек незначительного дефекта (технологического, по величине меньше или равного допустимому значению) затруднен, такие твэлы могут находиться в активной зоне в этом состоянии продолжительное время, достаточное для развития вторичного повреждения.

Необходимо отметить, что по лицензионным требованиям при обосновании топлива внедряемых усовершенствованных топливных циклов приходится консервативно постулировать наличие максимально допустимого исходного острого дефекта глубиной 30^{+5} мкм в оболочке каждого твэла в зоне действия максимальных растягивающих напряжений.

Если вероятностный характер вида и глубина дефекта не учитываются, это приводит к излишнему консерватизму, что неблагоприятно с позиции конкурентоспособности отечественного топлива.

Поэтому важны исследования оболочек с реальными дефектами на внутренней поверхности труб (вид, глубина, особенно по острым дефектам, соизмеримым с допустимым значением 30^{+5} мкм) для выяснения влияния этих дефектов при испытании трубчатых образцов на коррозионное растрескивание под напряжением в среде йода. Привлечение вероятностных анализов позволит оценить качество трубной и твэльной продукции, а также обеспечить надежность твэлов в маневренных (переходных) режимах эксплуатации и при глубоких выгораниях.

Характеристика исследуемых оболочечных труб ВВЭР из сплава Э110. Для исследования коррозионно-прочностных свойств труб $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм из сплава Э110 с реальными технологическими дефектами

на внутренней поверхности были отобраны на АО «ЧМЗ» (Чепецкий механический завод, Удмуртия, г. Глазов) образцы труб из сплава Э110.

Анализ качества циркониевой продукции (твэльных труб $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм) показал, что брак по сплошности при приборном ультразвуковом контроле труб из сплава Э110 составлял в среднем за месяц не более 3,7 %. Примерно 85 % всех исследованных дефектов выявлены на внутренней поверхности, из них: 20 % — риски, продольный закат; ~ 5 % — раковины или «вдав», отпечатки; 70 % — «плён» и ~ 5 % — др.

Отметим, что показатели по сплошности (качеству оболочечных твэльных труб) в настоящее время значительно улучшены благодаря совершенствованию технологии их производства на АО «ЧМЗ».

Для проведения работ было отобрано 600 шт. штатных полномасштабных труб из семи партий, забракованных по сплошности при приемочном контроле контролерами ОТК. Приемочный контроль труб проводился с настройкой установки по искусственным отражателям (ИО), выполненным в виде рисок V-образного профиля с углом раскрытия $(60 \pm 5)^\circ$, длиной $(2,0 \pm 0,2)$ мм, продольной и поперечной ориентации. При проведении приемочного контроля чувствительность каналов контроля сплошности повышалась на 4 дБ по сравнению с уровнем настройки по ИО.

Поэтому для исследования отобраны трубы с технологическими дефектами, амплитуда сигналов от которых находилась в интервале от -4 дБ до +2 дБ относительно уровня настройки по ИО. Как оказалось, такие дефекты были выявлены только поперечными каналами.

Из этих труб вырезаны образцы длиной ~ 0,5 м в количестве 60 шт. для последующих исследований.

На основании анализа значений амплитуд ультразвукового контроля по двум (поперечным) каналам установки контроля сплошности и просмотра забракованных труб на эндоскопе фирмы «Olympus» определяли характер дефектов на внутренней поверхности труб. Внешний вид и поперечное сечение типичного дефекта типа «плён» приведены на рис. 1.

При контроле труб из сплава Э110 с настройкой по ИО глубиной (30 ± 5) мкм и отборе труб с дефектами указанного диапазона выявлены преимущественно дефекты типа «плён», представляющие собой отслоения металла, глубина которых, как показал металлографический анализ, достигала 28...50 мкм.

Кроме того, на АО «ЧМЗ» изготовлены опытные трубчатые образцы $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм из сплава Э110 с искусственными дефектами на внутренней поверхности глубиной 60 и 100 мкм в соответствии с методикой, изложенной в отраслевой инструкции ОИ 95.01-43-76.

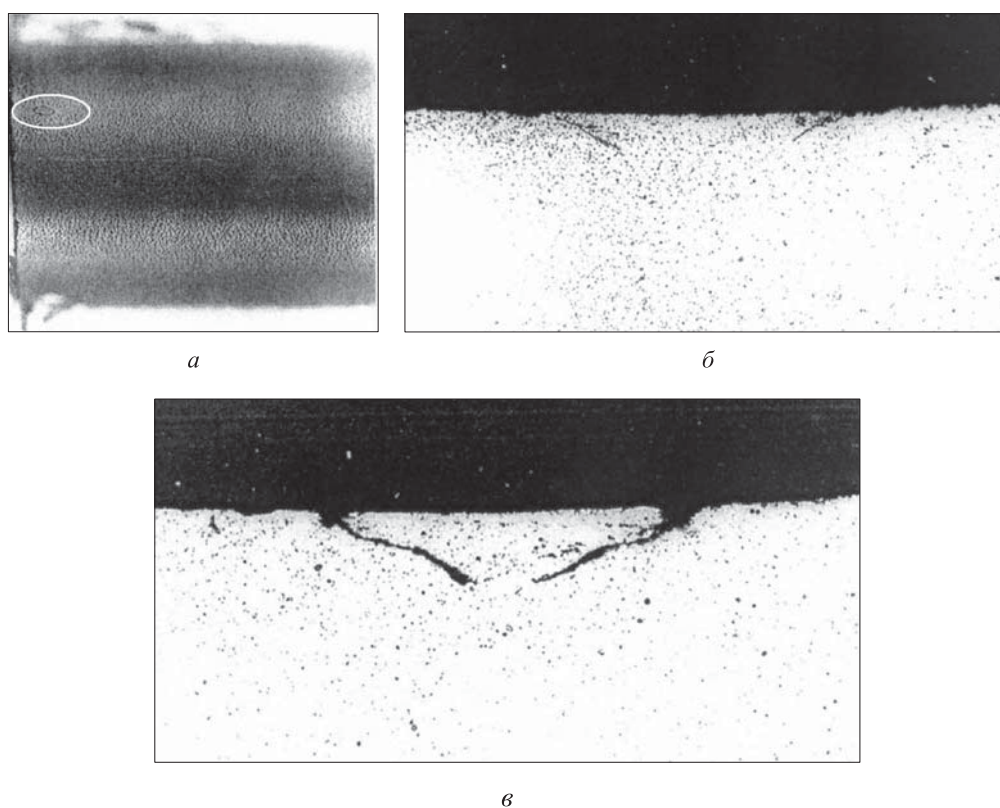


Рис. 1. Трубка (а, увеличение $\times 5$) с макротрещиной (область макротрещины выделена) и поперечное сечение (б, в, увеличение $\times 200$) дефекта типа «плён» трубки $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм из сплава Э110

Фактическая геометрия искусственных дефектов определялась для каждой партии образцов (до 30...50 шт.), изготовленных одним резцом.

Характеристика дефектов: длина (6 ± 1) мм; глубина $((60-100) \pm 10)$ мкм; профиль — риска треугольной формы с углом раскрытия $(30 \pm 5)^\circ$; радиус при вершине 10...20 мкм; ориентация профильная, осевая, внутренняя.

Анализ и обобщение сравнительных исследований по влиянию технологических дефектов на внутренней поверхности оболочечных труб из сплава Э110 на КРН в среде йода. Согласно разработанной методике [5], испытания в условиях КРН на длительную прочность проводили в среде йода на трубчатых образцах $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм из сплава Э110, которые герметизировали с обоих концов контактно-стыковой сваркой. Внутри трубчатого образца перед герметизацией размещали навеску йода в количестве, которое обеспечивало поверхностную концентрацию йода $\sim 0,2$ мг/см².

Для создания необходимого уровня растягивающих напряжений опытный образец с утоненной трубкой (трубку изготавливали тоньше для

получения повышенных напряжений на рабочей части образца) заполнялся инертным газом (аргоном). При использовании неутоненных трубок в состоянии поставки инертный газ подавали внутрь образца через трубу, подведенную к опытному образцу от нагнетателя давления [6].

Расчет окружных напряжений σ в трубчатых образцах проводился по формуле $\sigma = P_T d_{cp} / 2h$, где P_T — давление инертного газа (аргон) при температуре испытаний; d_{cp} — среднее значение среднего диаметра трубки; h — среднее значение толщины трубки.

Для выяснения характера поведения реальных технологических дефектов на трубках $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм из сплава Э110 при испытаниях на КРН в среде йода на АО «ЧМЗ» были отобраны трубы с дефектами глубиной 30...50 мкм.

На первом этапе исследований отобраны трубки из сплава Э110 с технологическими неострыми дефектами в виде раковин или типа «вдав» и «плён» и проведены исследования на длительную прочность в условиях КРН.

При дальнейших исследованиях были отобраны трубки с дефектами в виде продольных рисок, представляющих наибольший интерес для исследований на КРН с точки зрения механики разрушения.

Результаты исследований на КРН при температурах 350 и 380 °С трубок $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм из сплава Э110 в состоянии поставки и с технологическими дефектами приведены на рис. 2 и 3.

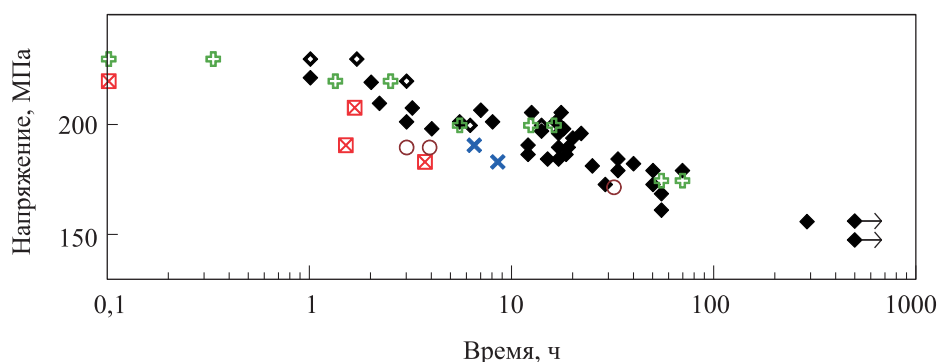


Рис. 2. Результаты лабораторных испытаний на длительную прочность трубок (необлученных) $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм с технологическими дефектами из сплава Э110 в условиях КРН при $T_{исп} = 380$ °С и концентрации йода $\sim 0,2$ мг/см²:

◆ — утоненные; ◆→ — образцы не разрушились; ◇ — в состоянии поставки; + — с производственным дефектом типа «вдав» глубиной 30 мкм; × и ⊠ — с производственным дефектом типа «риска» глубиной 30 и 50 мкм; ○ — с производственным дефектом типа «плён» глубиной 30 мкм

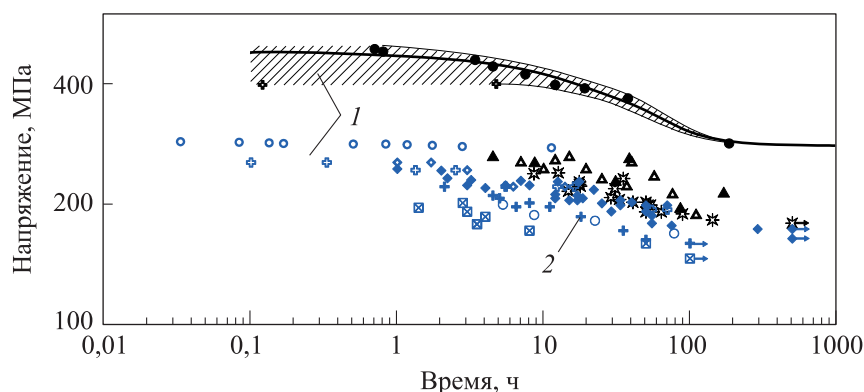


Рис. 3. Результаты сравнительных испытаний на длительную прочность трубок $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм в состоянии поставки, с технологическими и искусственными дефектами из сплава Э110 в условиях КРН (концентрация йода $\sim 0,2$ мг/см²); при $T_{\text{исп}} = 380$ °С:

- и ◇ — неутоненные в состоянии поставки; ◆ — утоненные в состоянии поставки;
- ⊕ и ○ — неутоненные и утоненные с дефектом 35 мкм; ⊕ и ⊠ — утоненные с искусственным дефектом 60 и 100 мкм; → — образцы не разрушились;
- при $T_{\text{исп}} = 350$ °С: ●, ▲ — неутоненные в состоянии поставки; ⊕ — неутоненные с дефектом 35 мкм; △, * — утоненные в состоянии поставки; 1 и 2 — облученные и необлученные оболочки; — — обобщенные экспериментальные данные на облученных трубках

Для сравнения на рис. 3 приведены данные по испытаниям при температуре 380 °С на КРН трубок из сплава Э110 в состоянии поставки и с искусственными дефектами глубиной 60 и 100 мкм в виде риски треугольной формы с углом раскрытия $(30 \pm 5)^\circ$ и длиной $(6,0 \pm 1,0)$ мм [5].

Эти результаты показали, что искусственные дефекты на внутренней поверхности трубок снижают длительную прочность при испытаниях на КРН в среде йода по сравнению с результатами подобных испытаний трубок в состоянии поставки, т. е. они снижают сопротивление трубок йодной коррозии. При увеличении глубины дефекта от 30 до 100 мкм повышается чувствительность твэльных трубок типа ВВЭР к йодной коррозии.

Что касается реальных технологических дефектов, выявлено, что дефекты в виде рисок, раковин или типа «вдав» и «плён» глубиной $\sim 30 \dots 35$ мкм на внутренней поверхности трубок $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм из сплава Э110 не влияют на их длительную прочность в условиях КРН, а технологические дефекты глубиной более допустимых значений (35 мкм) оказывают влияние на КРН трубок $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм из сплава Э110 (время до разрушения трубок уменьшается по сравнению с трубками в состоянии поставки).

Реакторные испытания трубок $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм из сплава Э110 с дефектами на внутренней поверхности показали, что наличие дефектов глубиной 30^{+5} мкм не приводит к уменьшению их прочности (флюенс быстрых нейтронов составлял $\sim 1,1 \cdot 10^{22}$ см⁻²).

На основании экспериментальных исследований КРН облученных трубок $\varnothing 9,1 \times 0,65$ мм из сплава Э110 и их экстраполяции на базе 1000 ч испытаний (см. рис. 3, сплошная линия) рекомендовано значение порогового напряжения $\sigma_{\text{КРН}} = \sim 280$ МПа при температуре 350 °С в среде йода (концентрация йода $\sim 0,2$ мг/см²) применительно к длительным топливным циклам и повышенной мощности реакторных установок ВВЭР.

Таким образом, наличие технологических дефектов на внутренней поверхности твэльных оболочек может повлиять на характер зарождения и развития трещин в условиях КРН, и, как следствие, на фактическое значение пороговых напряжений коррозионного растрескивания.

Подход, принятый в расчетах по твэльному топливному коду Старт-3А [7] в АО «ВНИИНМ» (ВНИИ неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара), предполагает наличие порогового напряжения КРН, ниже которого не происходит развитие возможного технологического дефекта и исключено зарождение трещин в твэльной оболочке. По результатам проведенных расчетов [7] получен массив данных в виде напряжения в оболочке твэла, скачка линейной мощности и локального выгорания топлива в нескольких расчетных сечениях твэлов.

По этим данным построена поверхность в трехмерном пространстве с координатами: напряжение в оболочке твэла, скачок линейной мощности и локальное выгорание топлива. Данная поверхность с кривой, определяющей допустимые значения напряжений КРН, приведена на рис. 4 [7].

Полученная кривая, наряду с определением допустимых значений, $\sigma_{\text{КРН}}$ рассматривается как кривая, ограничивающая скачок линейной мощности для заданного значения локального выгорания, из соображений не превышения допустимого значения окружных напряжений в оболочке твэла.

Следовательно, на основании представлений о пороговых значениях напряжений коррозионного растрескивания можно оценить допустимую скорость и абсолютное значение подъема мощности реакторной установки, безопасные для эксплуатации твэлов. Но и в этом случае не устраняется вероятность выхода из строя твэлов, что связано с присутствием начальных технологических дефектов. Основную роль в зарождении трещин играют механические повреждения и характер их распределения. Если дефекты глубиной 2...3 % толщины оболочки не оказывают замет-

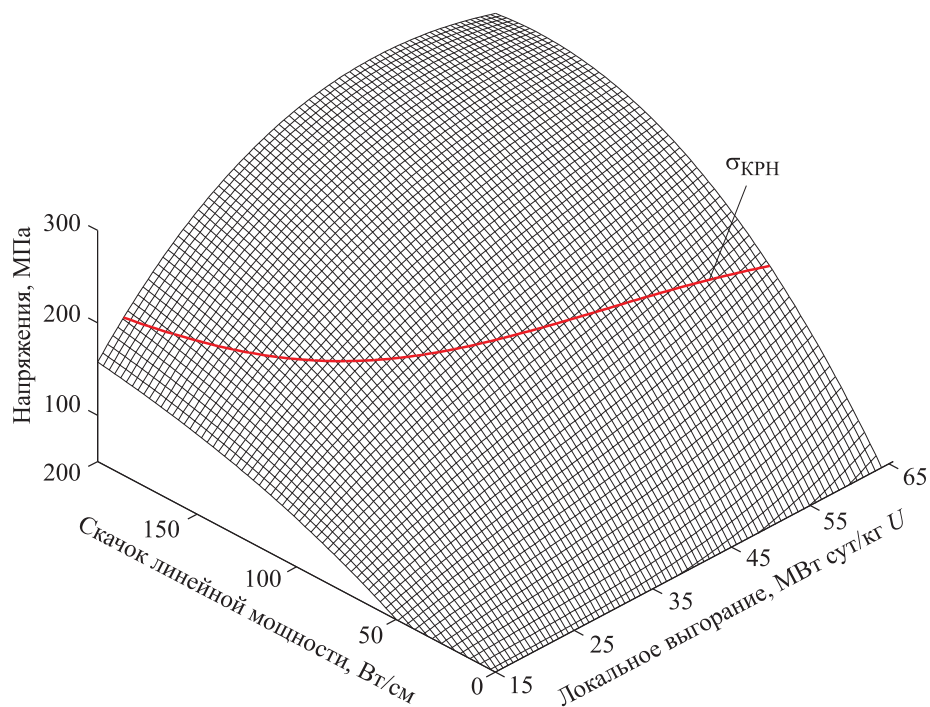


Рис. 4. Поверхность напряжений в координатах локальные выгорания — локальные скачки линейной мощности [7], кривая — допустимые значения напряжений КРН

ного влияния на время до разрушения, то дефекты глубиной 5 % и более от толщины оболочки существенно снижают сопротивление коррозии под напряжением.

Именно поэтому выход из строя твэлов, изготовленных по одинаковой технологии и оказавшихся в одинаковых условиях эксплуатации, объясняют присутствием в твэльных оболочках невыявленных дефектов меньшего размера по сравнению со значением допустимого дефекта [8].

Отсутствие разрушения по механизму КРН должно быть обеспечено в любой точке активной зоны реактора в режимах нормальной и ненормативной эксплуатации. Для этого проводят потвэльный расчет активной зоны с учетом предыстории работы топлива, используя нейтронно-физические и твэльные топливные коды. Этот расчет является основой для определения требований к безопасному управлению реактором.

По-видимому, снизить вероятность разрушения оболочек по механизму КРН можно за счет улучшения качества внутренней поверхности циркониевых твэльных оболочек и использования твэльных оболочек из циркониевых сплавов с повышенными коррозионными и прочностными свойствами.

Отметим, что эксперименты с трубками под внутренним давлением инертного газа (аргон) являются максимально консервативны по отношению к условиям работы топлива в активной зоне как по типу нагружения трубки (длительное давление в экспериментах в отличие от кинематического нагружения в реальных условиях), так и по состоянию агрессивной среды под оболочкой (несвязанный йод с концентрацией $\sim 0,2 \text{ мг/см}^2$) в экспериментах в отличие от динамически изменяющейся среды в реальных условиях.

Поэтому исследования, обеспечивающие близкое к реальному НДС трубки, в твэле при взаимодействии топлива с оболочкой в экспериментах при кинематическом нагружении крайне необходимы. За рубежом [9] и в России [10, 11] усилия исследователей направляются на создание экспериментальной установки по определению деформационной способности (механических характеристик) оболочек твэлов в условиях ВТО при заданных и контролируемых условиях по следующим параметрам: температура, скорость деформации, концентрация водорода в оболочке, концентрация коррозионно-агрессивной среды (йод).

Заключение. Проанализированы и систематизированы экспериментальные данные лабораторных и реакторных исследований по влиянию технологических дефектов на длительную прочность трубок $\varnothing 9,1 \times 0,65 \text{ мм}$ из сплава Э110 в условиях коррозионного растрескивания под напряжением в среде йода ($C_I = 0,2 \text{ мг/см}^2$).

Полученные экспериментальные результаты по КРН в среде йода сравниваются с данными по испытаниям трубок $\varnothing 9,1 \times 0,65 \text{ мм}$ из сплава Э110 в состоянии поставки, с искусственными и технологическими дефектами.

Определено, что технологические дефекты, такие как риски, раковины или типа «вдав» и «плён» глубиной 30...35 мкм на внутренней поверхности трубок $\varnothing 9,1 \times 0,65 \text{ мм}$ из сплава Э110 не влияют на длительную прочность в условиях КРН, а технологические дефекты глубиной более допустимых значений (35 мкм) оказывают влияние на КРН трубок $\varnothing 9,1 \times 0,65 \text{ мм}$ из сплава Э110 (время до разрушения трубок уменьшается по сравнению с трубками в состоянии поставки).

На основании экспериментальных результатов исследований КРН облученных трубок $\varnothing 9,1 \times 0,65 \text{ мм}$ из сплава Э110 при флюенсе быстрых нейтронов $\sim 1,1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ рекомендовано значение порогового напряжения $\sigma_{\text{КРН}} = \sim 280 \text{ МПа}$ при $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ в среде йода (концентрация йода $\sim 0,2 \text{ мг/см}^2$).

На основе реакторных испытаний трубок из сплава Э110 установлено, что наличие дефектов глубиной 30^{+5} мкм на их внутренней поверхности не приводит к уменьшению их длительной прочности в условиях КРН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лавренюк П.И., Долгов А.Б. Перспективные направления развития ядерного топлива для АЭС России. Докл. науч.-техн. конф. АО «ТВЭЛ»: Ядерное топливо нового поколения для АЭС. М., АО «ВНИИНМ», 2016.
- [2] Кузнецов В.И., Крупкин А.В. Разработка связанного кода СТАРТ-РАПТА и развитие 3D-моделирования твэлов. Докл. науч.-техн. конф. АО «ТВЭЛ»: Ядерное топливо нового поколения для АЭС. М., АО «ВНИИНМ», 2016.
- [3] Марков Д.В., Павлов С.В. Топливо ВВЭР и РБМК нового поколения: результаты послереакторных исследований, обоснование надежности и работоспособности. Докл. IX Росс. конф. по реакторному материаловедению. Димитровград, ОАО «ГНЦ НИИАР», 2009.
- [4] Филин В.М., Новиков В.В., Сотников А.С. и др. Особенности влияния внутритвэльной среды топлива высокого выгорания на коррозионное растрескивание под напряжением оболочек твэлов. *Атомная энергия*, 2013, т. 115, № 5, с. 260–264.
- [5] Сотников А.С. Влияние йода и йодида цезия на коррозионное растрескивание под напряжением оболочек из сплава Zr–1%Nb твэлов водоохлаждаемых реакторов. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, ВНИИНМ, 1989.
- [6] Никулин С.А., Рожнов А.Б. Коррозионное растрескивание циркониевых оболочечных труб. 1. Методы исследования и механизмы разрушения. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2005, № 2, с. 31–39.
- [7] Програмное средство СТАРТ-3А. М., НТЦ ЯРБ Ростехнадзора, 2013.
- [8] Материалы по отказам твэлов водоохлаждаемых реакторов. МАГАТЭ, 1996.
- [9] Anghel C., Alvarez A.M., Lysell G., et al. An out-of-pile method to investigate iodine — induced SCC of irradiated cladding. *Proc. Top Fuel*, 2009, Paper 2179. DOI: 10.1051/rgn/20102057
- [10] Солонин В.И., Сотников А.С., Сергиенко И.Р. Механическое нагружающее устройство для проведения испытаний циркониевых оболочек в условиях, имитирующих взаимодействие топлива с оболочкой. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 6. DOI: 10.7463/0614.0715393
- [11] Сотников А.С., Новиков В.В., Солонин В.И., и др. Установка для механических испытаний оболочек твэлов в условиях моделирования взаимодействия топливо–оболочка. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы*, 2014, № 1, с. 21–30.

Сотников Анатолий Семёнович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сотников А.С. Сравнительный анализ влияния технологических дефектов на прочность оболочек из сплава Э110 в условиях коррозионного растрескивания под напряжением. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 6, с. 138–150. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-6-138-150

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECT OF TECHNOLOGICAL DEFECTS ON THE STRENGTH OF E110 ALLOY FUEL CLADDING UNDER STRESS CORROSION CRACKING

A.S. Sotnikov

en7@power.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article provides comparative analysis of data on the influence of technological defects on the long-term strength of fuel cladding $\varnothing 9,1 \times 0,65$ mm of alloy E110 (Э110) under conditions of stress-corrosion cracking in the environment of iodine, obtained in recent years. The experimental results of stress corrosion cracking of fuel cladding in iodine environment are compared with the test data of fuel cladding made of alloy E110 in the state of delivery, with artificial and technological defects on the inner surface. On the basis of experimental results of stress-corrosion cracking research of irradiation fuel cladding $\varnothing 9,1 \times 0,65$ mm E110 of the alloy E110 it is recommended to use the value of the threshold stress as $\sigma_{sc} = \sim 280$ MPa at the temperature $T = 350$ °C in environment of iodine (iodine concentration $\sim 0,2$ mg/sm²)

Keywords

E110 zirconium alloy, fuel cladding, corrosion, stress, internal surface, technological defect, stress corrosion cracking

Received 14.12.2018

© Author(s), 2019

REFERENCES

- [1] Lavrenyuk P.I., Dolgov A.B. [Prospective development lines of nuclear fuel for Russian atomic power plants]. *Dokl. nauch.-tekh. konf. AO "TVEL": Yadernoje toplivo novogo pokoleniya dlya AES* [Proc. Sc.-Tech. Conf. AO "TVEL": Nuclear fuel of new generation for atomic power plants]. Moscow, AO "VNIINM" Publ., 2016 (in Russ.).
- [2] Kuznetsov V.I., Krupkin A.V. [Development of related START-RAPT code and development of fuel element 3D modelling]. *Dokl. nauch.-tekh. konf. AO "TVEL": Yadernoje toplivo novogo pokoleniya dlya AES* [Proc. Sc.-Tech. Conf. AO "TVEL": Nuclear fuel of new generation for atomic power plants]. Moscow, AO "VNIINM" Publ., 2016 (in Russ.).

- [3] Markov D.V., Pavlov S.V. [VVER and RBMK fuel of new generation: results of postirradiation examination, substantiation of reliability and working capacity]. *Dokl. IX Ross. konf. po reaktornomu materialovedeniyu* [Proc. IX Russ. Conf. on Reactor Material Engineering]. Dimitrovgrad, OAO "GNTs NIAR", 2009 (in Russ.).
- [4] Filin V.M., Novikov V.V., Sotnikov A.S., et al. The features of the influence of high burn-up internal fuel rod chemistry on stress corrosion cracking behaviour of the fuel claddings. *Atomnaya energiya*, 2013, vol. 115, no. 5, pp. 260–264 (in Russ.).
- [5] Sotnikov A.S. Vliyanie yoda i yodida tseziya na korrozionnoe rastreskivanie pod napryazheniem obolochek iz splava Zr–1%Nb tvelov vodookhlazhdaemykh reaktorov. Dis. kand. tekhn. nauk [Effect of iodine and cesium iodide on corrosion cracking of fuel element shells made from Zr–1%-alloy for water-cooled reactor under tension. Cand. Sc. (Eng.) Diss.]. Moscow, VNIINM Publ., 1989.
- [6] Nikulin S.A., Rozhnov A.B. Corrosion cracking of zirconium cladding tubes (a review). I. Methods of study and mechanisms of fracture. *Met. Sc. Heat. Treat.*, 2005, vol. 47, no. 1-2, pp. 71–79. DOI: 10.1007/s11041-005-0034
- [7] Programnoe sredstvo START-3A [START-3A software]. Moscow, NTTs YaRB Rostekhnadzora Publ., 2013.
- [8] Materialy po otkazam tvelov vodookhlazhdaemykh reaktorov. MAGATE, 1996 (in Russ.).
- [9] Anghel C., Alvarez A.M., Lysell G., et al. An out-of-pile method to investigate iodine — induced SCC of irradiated cladding. *Proc. Top Fuel*, 2009, Paper 2179. DOI: 10.1051/rgn/20102057
- [10] Solonin V.I., Sotnikov A.S., Sergienko I.R. Development of mechanical loading device for testing the zirconium cladding under the pellet-cladding interaction conditions. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication], 2014, no. 6 (in Russ.). DOI: 10.7463/0614.0715393
- [11] Sotnikov A.S., Novikov V.V., Solonin V.I., et al. The laboratory equipment for mechanical testing of fuel cladding in condition of modeling pellet-clad interaction (PCI). *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Materialovedenie i novye materialy*, 2014, no. 1, pp. 21–30 (in Russ.).

Sotnikov A.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Sotnikov A.S. Comparative analysis of the effect of technological defects on the strength of E110 alloy fuel cladding under stress corrosion cracking. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 6, pp. 138–150 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2019-6-138-150