

АНАЛИЗ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ И ГИДРИДНОГО РАЗРУШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ АКТИВНЫХ ЗОН ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Г.О. Бобков

gerbobkov@yandex.ru

SPIN-код: 8100-9092

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

Аннотация

Проанализированы представленные в специальной литературе данные о причинах водородного охрупчивания и гидридного разрушения циркониевых изделий активных зон ядерных энергетических установок. Рассмотрены механизмы деградации и разрушения наводороженных изделий из сплавов циркония. Представлены закономерности замедленного гидридного растрескивания циркониевых изделий и способы его возможного предотвращения. Представлена модель переориентации гидридов в оболочках твэлов из циркониевых сплавов Э110 и Э635, которые используются в твэлах активных зон атомных ледоколов и плавучих энергоблоков. Изложены некоторые особенности методики наводороживания твэльных циркониевых оболочек из твердой водородосодержащей фазы.

Ключевые слова

Водородное охрупчивание, гидридное разрушение, механизм деградации, замедленное гидридное растрескивание, твэл, ядерный реактор, ядерная энергетическая установка, циркониевый сплав, оболочка твэл

Поступила в редакцию 25.05.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. В процессе эксплуатации в результате взаимодействия с теплоносителем, водой под давлением в реакторах типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) и кипящей водой в реакторах типа РБМК (реактор большой мощности канальный) происходит наводороживание компонентов активных зон (АЗ) из циркониевых сплавов ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Наиболее опасным является охрупчивание компонентов АЗ в результате наводороживания, которое может привести к их разрушению при эксплуатации, выгрузке из реактора, транспортировке или последующем длительном хранении. Поэтому уровень наводороживания в значительной степени определяет возможный ресурс работы компонентов АЗ. Особенно это актуально для твэлов и циркониевых изделий (ЦИ) тепловыделяющих сборок (ТВС), которые являются тонкостенными с толщиной 0,25...1,00 мм.

Суммарное содержание водорода в ЦИ АЗ реакторов на тепловых нейтронах (ВВЭР и РБМК) при эксплуатации, как правило, относительно невелико, и при равномерном распределении в изделии его отрицательное влияние на работоспособность было бы не столь существенно. Однако водород обладает способностью диффундировать в области действия наименьших температур и наибольших растягивающих напряжений, приводя к образованию локальных

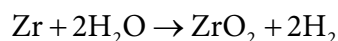
зон с повышенным содержанием водорода. Таким образом, при эксплуатации может происходить перераспределение поглощенного ЦИ водорода в результате его диффузии под действием возникающих в изделии градиентов температур и напряжений с образованием отдельных хрупких зон.

Впервые проблема воздействия водорода на снижение работоспособности ЦИ возникла в 70–80-х годах XX в. для труб давления реакторов типа BWR после ряда аварий на зарубежных атомных электростанциях (АЭС) с реакторами CANDU, вызванных разрушением труб давления [1]. Аналогичные случаи разрушения циркониевых труб каналов системы управления и защиты (СУЗ) и технологических каналов (ТК), подобных по условиям эксплуатации трубам давления реакторов CANDU, были и на российских АЭС [2, 3]. Однако снижение уровня остаточных напряжений путем совершенствования технологии изготовления этих изделий и уменьшение глубины допускаемых в них после изготовления дефектов позволили продлить срок их эксплуатации и снизить вероятность разрушения в результате замедленного гидридного растрескивания (ЗГР).

Анализ возможных причин наводороживания циркониевых изделий в реакторах на тепловых нейтронах и его влияния на их работоспособность. Поглощение водорода Zr. Основным источником водорода при работе циркониевых изделий в реакторе является газообразный водород, образующийся в процессе коррозии при взаимодействии циркония с водой. Растворимость водорода в α -Zr-фазе мала: 6,1 % (ат.) при эвтектоидной температуре 550 °С и 0,0015 % (ат.) при комнатной температуре, поэтому он образует с цирконием гидриды ZrH₂. При рабочей температуре 350...400 °С в цирконии растворяется около 0,02 % (мас.) водорода, поэтому только часть водорода находится в гидридах (другая часть — в твердом растворе). Однако при $T = 20$ °С практически весь водород переходит в гидриды. В системе Zr–H присутствуют гидриды трех типов: γ -ZrH, δ -ZrH₂ и ϵ -ZrH₂, различающиеся параметрами кристаллической решетки [4].

Степень охрупчивания сплава зависит от температуры и ориентации гидрида по отношению к возникающим напряжениям. Пластичность сплава резко снижается при температуре ниже 200 °С. Так, при изменении температуры от 200 до 100 °С относительное сужение образца ψ падает от 60 до 5 %. Низкое значение пластичности приводит к охрупчиванию сплавов циркония.

Поведение элемента конструкции АЗ из циркониевого сплава в среде водорода выглядит следующим образом. При взаимодействии циркония и его сплавов с водой в результате химической реакции образуется водород:



Он обладает высокой диффузионной подвижностью уже при комнатной температуре. При рабочей температуре (300...350 °С) водород находится в виде твердого раствора. В окрестности структурных несовершенств образуются при-

месные атмосферы из атомов водорода. Быстрее всего формируются примесные атмосферы в окрестностях тройных стыков зерен. При понижении температуры растворимость водорода падает и образуются гидридные фазы.

Влияние легирующих элементов на поглощение водорода цирконием (в процентах теоретически возможного значения) иллюстрирует рис. 1 [4]. Так, известно, что оболочки твэлов из циркалоя-2 и циркалоя-4 поглощают при равномерной коррозии в реакторных условиях (особенно в реакторах PWR) до 500 ppm водорода. Растворимость водорода в цирконии уменьшается, если в нем содержатся другие примеси внедрения (например, кислород).

Наводороживание циркониевых изделий во время изготовления. В любом ЦИ после изготовления содержится определенное количество водорода. Исходный уровень наводороживания ЦИ зависит от способа производства, технических возможностей используемого оборудования и качества изготовления.

Главными источниками попадания водорода в ЦИ являются:

- исходные шихтовые материалы;
- среда, в которой выполняются технологические операции на всех стадиях получения и обработки металла: плавка, горячая пластическая деформация, термическая обработка, сварка;
- процессы травления в кислотах.

Анализ технологического процесса изготовления и исследование готовых труб изделий ТВС показали, что чем меньше толщина стенки трубы, тем выше уровень ее наводороживания после изготовления. Обусловлено это тем, что чем тоньше труба, тем большее число прокаток, а следовательно, и промежуточных вакуумных отжигов требуется для ее изготовления. Сравнительные автоклавные испытания труб из сплава Э110, подвергавшихся операции травления и не травленных, показали, что травление приводит к увеличению доли поглощаемого трубами водорода.

Другой технологический процесс, способствующий насыщению металла водородом, — сварка. Поэтому важнейшее условие предупреждения попадания водорода в металл шва — чистота применяемых защитных газов и, главным образом, их низкая влажность.

Водород обладает способностью диффундировать в области действия наибольших растягивающих напряжений, скапливаясь там и приводя к повышению содержания водорода в этих областях по сравнению со средним содержанием водорода в изделии в целом.

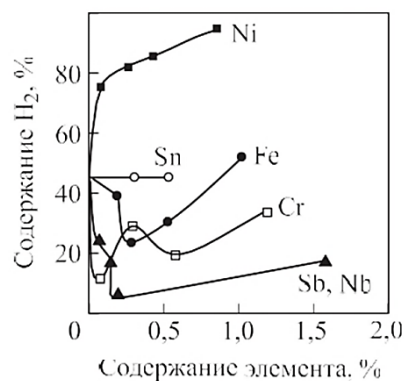


Рис. 1. Влияние легирующих элементов на поглощение водорода цирконием при коррозии в воде ($T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Наводороживание циркониевых изделий в процессе эксплуатации. В результате γ -радиолиза воды образуется некоторое количество кислорода и водорода, а также ряд короткоживущих радикалов, что оказывает заметное влияние на коррозионную стойкость и наводороживание ЦИ. На интенсивность процессов коррозии и наводороживания ЦИ влияют также компоненты теплоносителя, вводимые для регулирования водно-химического режима (ВХР), химические элементы и соединения, образующиеся в теплоносителе в результате протекания химических реакций.

Большое влияние на кинетику поглощения водорода металлом оказывает качество его поверхности. Водород собирается в любых несплошностях и дефектах на поверхности металла. Поэтому, чем больше дефектов и несплошностей на поверхности ЦИ (даже дефектов, допускаемых техническими условиями: риск, отпечатков, царапин, наколов и т. п.), тем большее количество водорода абсорбирует металл. Оксидные пленки сильно затрудняют проникновение водорода в металл.

Поглощение водорода циркониевыми сплавами может стать причиной их охрупчивания и последующего разрушения. Степень охрупчивания циркониевых сплавов в результате наводороживания зависит от количества поглощенного водорода и формы его присутствия в структуре сплава: в твердом растворе или в виде гидридной фазы, что определяется предельной растворимостью водорода в данном сплаве [4]. Наибольший охрупчивающий эффект на циркониевые сплавы оказывает присутствие водорода в виде гидридов.

При охлаждении реактора почти весь водород в циркониевых сплавах выделяется в виде гидридов. Гидриды приводят к охрупчиванию сплавов — существенно снижаются пластичность и трещиностойкость сплавов, сопротивление коррозионному растрескиванию и другие механические и коррозионные свойства. Степень охрупчивания повышается при увеличении содержания водорода, размера частиц гидридов, а также увеличении доли радиально ориентированных гидридов (рис. 2) [4, 5].

Гидриды снижают пластичность сплавов при комнатной температуре и меньше влияют на пластичность при повышенной температуре ($T = 300...350$ °С).

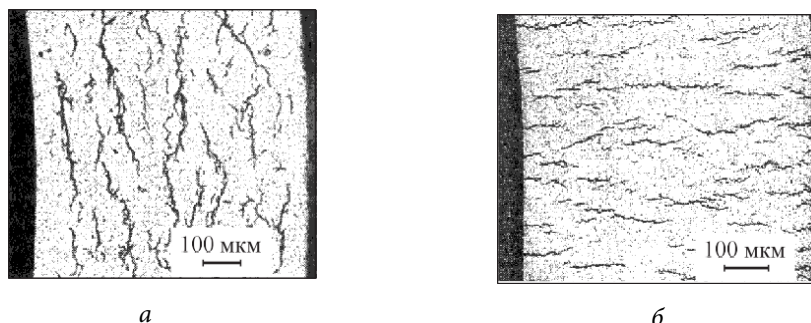


Рис. 2. Тангенциальная (а) и радиальная (б) ориентация гидридов в оболочках твэлов

Механизмы деградации и разрушения наводороженных сплавов циркония. Водородное охрупчивание. Степень снижения пластичности гидрированного сплава зависит от температуры, объемной доли, размера, морфологии и ориентации гидридов по отношению к действующим напряжениям. При этом факторы температуры и ориентации чаще всего являются определяющими. Наибольшее охрупчивание вызывают пластинки гидридов, ориентированные перпендикулярно направлению действия главных растягивающих напряжений. Таким образом, в случае технологического канала или оболочки твэла опасны, прежде всего, гидриды, которые ориентированы в радиальном направлении изделий (рис. 3). Количественной характеристикой ориентации выделений в трубах является показатель

$$f_n = \frac{f_{45}}{f_{06}},$$

где f_{45} — количество гидридных пластин с нормальми, ориентированными к радиусу трубы под углом более 45° , f_{06} — общее количество гидридов. Показатель f_n принят в качестве критерия отбраковки труб, его значение колеблется в пределах $0,1 \dots 0,3$ [5].

В общем случае разрушение гидрированного материала включает образование трещин в хрупкой фазе, разрушение гидридов и выход трещин в металлическую матрицу. При низкой вязкости разрушения сплава происходит растрескивание перемычек, ведущее к слиянию гидридных трещин и макроскопически хрупкому разрушению образца. В случае вязкой матрицы деформация локализуется вблизи гидридных пластин, в результате чего образуются поры и разрушение принимает макровязкий характер [6].

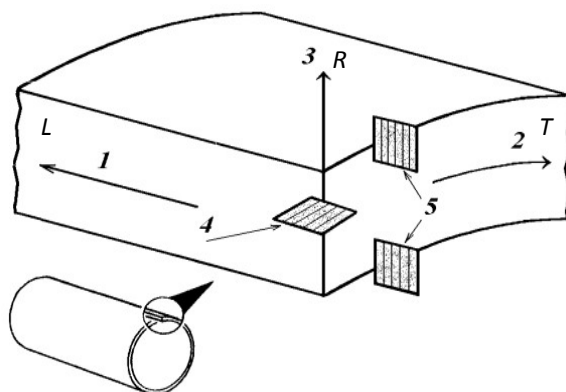


Рис. 3. Ориентация гидридов в циркониевых трубах [6]: 1 — осевое направление L ; 2 — тангенциальное направление T ; 3 — радиальное направление R ; 4 — окружная ориентация гидридов; 5 — радиальная ориентация гидридов

В целях контроля герметичности, уменьшения выхода газообразных продуктов деления (ГПД) из топлива и для предотвращения эффекта «схлопывания» оболочек внутритвэльное пространство заполняют гелием. По мере выгорания топлива и при хранении отработанных ТВС часть ГПД выходит под оболочку, образуя там газовую смесь. Более того, при высоких значениях выгорания происходит механическое нагружение оболочки таблетками из диоксида урана (UO_2). Все это увеличивает внутреннее давление и повышает уровень тангенциальных напряжений

$$\sigma_r = \frac{\Delta p \cdot r}{h_0},$$

где Δp — разность давления внутри и снаружи твэла; r и h_0 — средний радиус и толщина оболочки соответственно.

Ситуацию с водородным охрупчиванием оболочек усугубляет негативное действие кислорода, неоднородное распределение которого по толщине изделий приводит к формированию склонных к растрескиванию слоев $Zr(O)$. Охрупченные оболочки не способны выдерживать большие термические и механические нагрузки. Поэтому дополнительные напряжения, возникающие, например, в условиях резкого изменения мощности, при выгрузке отработанных ТВС или при падении контейнера с отработанным ядерным топливом (ОЯТ), могут привести к разрушению хрупких зон и разгерметизации твэлов.

Необходимо отметить данные работ [7, 8] по исследованию ориентации гидридов в оболочках циркониевых сплавах Э110 и Э635, которые используются в твэлах активных зон атомных ледоколов и плавучих энергоблоков, где растягивающие напряжения в оболочках постоянно присутствуют при работе на мощности. Показано, что изменение ориентации гидридов на радиальную происходит в диапазоне напряжений 70...90 МПа, что может привести к охрупчиванию оболочек при расхолаживании твэлов вследствие снижения пластичности оболочек [9, 10].

Модель переориентации гидридов можно представить в виде заданной последовательности:

1) при растягивающих напряжениях гидриды в оболочке могут менять ориентацию на радиальную, при этом происходит снижение предельной деформации оболочки и возможно зарождение радиальных трещин, сопровождающееся образованием микротрещин по механизму коррозионного растрескивания под напряжением и ЗГР;

2) в твердом растворе присутствует водород — его распределение между гидридной фазой и твердым раствором определяется кривой растворимости;

3) водород находится в гидридной фазе, т. е. он может располагаться как в тангенциальных (T), так и в радиальных (R) гидридах, и доля R - и T -гидридов зависит от разности энергий образования в анизотропных кристаллах циркония при заданных напряжениях и текстуре сплава.

Расчетные коды, обеспечивающие обоснование основных процессов, которые могут приводить к разгерметизации оболочек твэлов, должны отслеживать как минимум явления на стадии термической ползучести, т. е. температуру и уровень напряжений. Для этого статистические исследования необходимо проводить в лабораторных условиях на оболочках и канальных трубах нового поколения с учетом структуры, текстуры и анизотропии свойств.

Наиболее перспективным способом наводороживания твэльных циркониевых оболочек и канальных труб, по нашему мнению, может быть метод «сухого» газового насыщения в соответствии со стандартом ASTM B-811. Для достижения равномерности наводороживания и исследования свойств оболочек в области RIM наружного слоя и ориентации гидридов процесс проводят в автоклавах, оснащенных контрольной аппаратурой под управлением ЭВМ. Отличительной особенностью способа является наводороживание из твердой фазы, например, с использованием крупки из гидрида титана или циркония, расчетная навеска которой засыпается внутрь автоклава, нагревается в инертной атмосфере при температуре 450...500 °С в течение нескольких минут (расчетное время). Кроме того, одной из отличительных особенностей процесса наводороживания является равномерное гидрирование по длине твэльной оболочки, что важно при дальнейших исследованиях для получения достоверных результатов.

Общие сведения о замедленном гидридном растрескивании. Общая схема развития ЗГР (рис. 4) предполагает диффузионное накопление водорода у концентратора растягивающих напряжений, образование гидридных пластин, ориентированных перпендикулярно приложенной нагрузке, их рост до некоторого критического размера и разрушение охрупченной гидридами области. Циклическое повторение указанных процессов приводит к постепенному разрушению изделия, а время, необходимое для образования первого «критического» гидрида, определяет инкубационный период ЗГР.

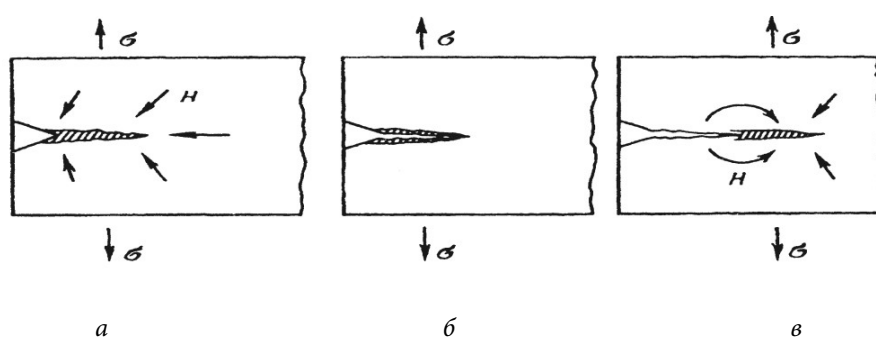


Рис. 4. Схема процесса ЗГР [4, 11]: а — фаза образования гидрида; б — фаза разрушения гидрида; в — фаза перерастворения гидрида

В роли концентраторов растягивающих напряжений, инициирующих ЗГР, могут выступать технологические или эксплуатационные дефекты, в том числе

нодули, фреттинг-повреждения. Негативный эффект трещиноподобных повреждений усиливается при увеличении их остроты. Способные к последующему распространению трещины могут образоваться, например, в хрупком слое металла непосредственно под оксидом, вследствие повреждения изделий дебризами, при разрушении неблагоприятно ориентированных мелких гидридов или механическом взаимодействии оболочек с топливом (рис. 5) [1].

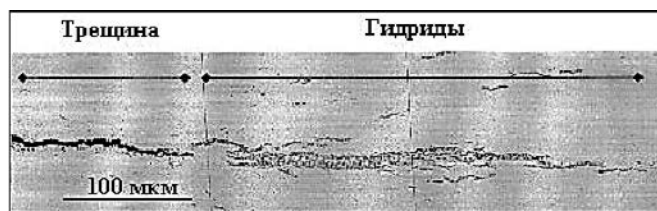


Рис. 5. Макроскопический гидрид в осевом направлении оболочки твэла BWR [1]

При высоких рабочих напряжениях в трубах, характеризующихся исходной тангенциальной ориентацией гидридов, происходит их переориентация с расположением в радиальном направлении. Водород концентрируется в местах с наибольшими растягивающими напряжениями, и выделяющиеся в этих зонах гидриды ориентируются в направлении развития трещины и становятся источником последующего развития процесса ЗГР.

Процесс ЗГР описывается соотношением скорости роста трещины и приложенного коэффициента интенсивности напряжений (КИН) (рис. 6). Основными параметрами ЗГР являются пороговый коэффициент интенсивности напряжений K_I (ниже которого ЗГР не происходит) и скорость роста гидридной трещины — скорость ЗГР при стабильном развитии процесса ЗГР (стадия II, см. рис. 6).

Замедленное гидридное растрескивание носит пороговый характер. Зависимость скорости разрушения наводороженного образца от КИН показана схематично на рис. 6.

Критерием разрушения является соотношение

$$K_I \geq K_{IH},$$

где K_{IH} — пороговый КИН для ЗГР.

Видно, что на участке I скорость растрескивания $v_{ЗГР}$ чувствительна к значениям КИН, тогда как на участке II она практически постоянна вплоть до значений, характеризующих трещиностойкость материала. Как видно на рис. 6, механизм ЗГР реализуется при $K_I \ll K_{IC}$. Это позволяет рассматривать ЗГР как наиболее опасный случай деградации наводороженных циркониевых изделий ЯЭУ.

Таким образом, гидриды снижают способность циркониевых материалов к пластической деформации и уменьшают их трещиностойкость. Наибольшее охрупчивание циркониевых труб под давлением вызывают пластинки гидридов, ориентированные по радиусу трубы. Механизм гидридного разрушения цирко-

ниевых элементов ЯЭУ является сложным и многофакторным, поэтому его изучение исключительно экспериментальным путем непродуктивно. Опубликованные экспериментальные данные о ЗГР получены разными методами на образцах, имевших разный химический и структурно-фазовый состав, разную геометрию и микроструктуру, что затрудняет понимание особенностей ЗГР и снижает ценность проведенных испытаний. Одним из способов решения указанной проблемы является разработка «объединяющих» математических моделей как инструмента для анализа уже накопленной информации и прогнозирования свойств новых материалов.

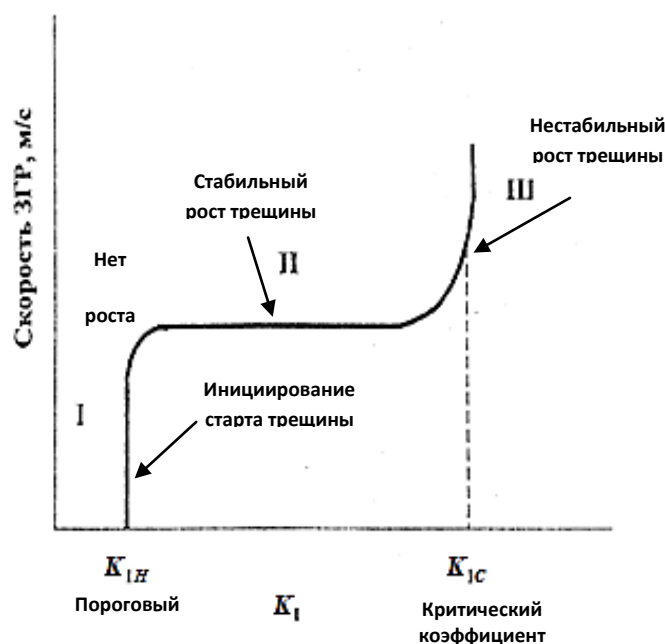


Рис. 6. Зависимость скорости ЗГР от приложенного коэффициента интенсивности напряжения K_I

Способы предотвращения водородного охрупчивания и ЗГР. Реальными способами борьбы с водородным охрупчиванием и гидридным растрескиванием циркониевых компонентов водоохлаждаемых ЯЭУ являются:

- максимально возможное устранение остаточных напряжений, влаги в таблетках ядерного топлива и внутритвэльном пространстве; ужесточение требований по качеству изделий в плане уменьшения размера технологических дефектов;

- снижение количества неблагоприятно ориентированных гидридов путем создания тангенциальной текстуры;

- соблюдение ВХР теплоносителя и регламента эксплуатации ТВС, исключая возможность нештатных колебаний мощности, появления в теплоносителе посторонних предметов (дебризов), а также снижающее интенсивность очаговой коррозии;

- оптимизация конструктивных решений, позволяющих уменьшить фреттинг-взаимодействие оболочек твэлов с дистанционирующими решетками;
- уточнение состава и структурно-фазового состояния циркониевых сплавов с целью оптимизации их коррозионной стойкости, пластичности и трещиностойкости.

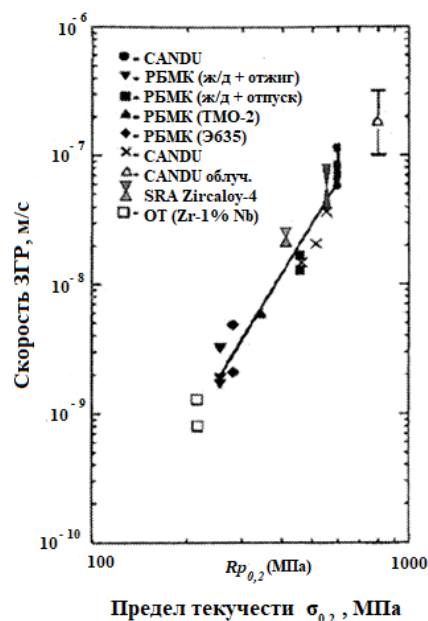
Структура циркониевых изделий определяется химическим составом и технологией производства. Особенности структуры (в том числе текстуры) находят отражение в стандартных характеристиках материала — коэффициентах K_{IC} и значениях $\sigma_{0,2}$, которые являются базовыми параметрами в расчетах на сопротивление хрупкому разрушению. Под действием окружных напряжений наиболее вероятно разрушение труб по аксиально-радиальным сечениям $L-R$ (см. рис. 3). Вероятно, можно выделить три фактора, определяющих стойкость трубы к ЗГР: исходная (без водорода) вязкость разрушения материала K_{IC} ; прочность в тангенциальном направлении $\sigma_{0,2}$; текстурное отношение f_R/f_T , характеризующее количество кристаллографических плоскостей, благоприятных для образования радиальных гидридов и распространения трещин. Вероятность ЗГР снижается при увеличении трещиностойкости K_{IC} , текстурного отношения f_R/f_T и уменьшении предела текучести $\sigma_{0,2}$.

Современное производство позволяет обеспечить выпуск труб с благоприятной радиальной текстурой. При заданном отношении f_R/f_T прочность и трещиностойкость зависят от структурно-фазового состояния образцов.

На скорость роста трещины при ЗГР влияет дисперсность гидридов и прочность матрицы. Чем мельче гидриды, тем выше скорость роста трещины при одинаковом содержании водорода в трубе. Оба параметра ЗГР зависят от текстуры, поэтому они различаются в зависимости от ориентации трещины в трубе. Для труб давления и оболочек твэлов наиболее низкие параметры ЗГР наблюдаются при растрескивании в радиально-осевой плоскости трубы. Чем более радиальный тип текстуры имеет труба, тем выше значения K_I и сопротивление ЗГР при прочих равных условиях.

На рис. 7 приведены результаты испытаний на ЗГР образцов труб давления реактора CANDU из сплава Zr – 2,5 % Nb, образцов труб давления реактора РБМК из сплавов Э125 и Э635, изготовленных по различным технологиям [12]. Предварительно наводороженные (до 60...100 ppm водорода) образцы испытывались при температуре $T = 250$ °С с определением скорости роста трещины. Наиболее высокая скорость ЗГР $((5,83...11,56) \cdot 10^{-8}$ м/с) наблюдалась для труб давления реактора CANDU. Наиболее низкая скорость ЗГР $((1,7...3,2) \cdot 10^{-9}$ м/с) была у труб давления реактора РБМК из сплава Э125, изготовленных по штатной технологии. Видно, что скорость ЗГР увеличивается с повышением прочности сплавов.

Рис. 7. Зависимость скорости ЗГР при температуре $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ от предела текучести в поперечном направлении труб давления и оболочечных труб из различных сплавов циркония (Циркалой-4, Э635, Zr – 1 % Nb, Zr – 2,5 % Nb)



Таким образом, требование минимального формоизменения (максимальной прочности) труб должно сочетаться с требованием их достаточной вязкости. Кроме того, важно отметить, что когда гидриды находятся в состоянии сжатия, они обладают достаточно высокой трещиностойкостью. Релаксация упругих напряжений (например, при термоциклировании) приводит к тому, что гидрид оказывается в «свободном» состоянии и его трещиностойкость понижается до $1...3\text{ МПа}\cdot\sqrt{\text{м}}$. В результате этого эффективная трещиностойкость материала в плоскости трещины может оказаться более низкой.

Заключение. В ходе данной работы выполнен анализ причин водородного охрупчивания и гидридного разрушения циркониевых изделий активных зон ядерных энергетических установок. Оригинальность представленных результатов определяется возможными путями предотвращения охрупчивания и гидридного разрушения циркониевых изделий активных зон ядерных энергетических установок. Рассмотрены результаты распределения гидридов как функции напряженно-деформированного состояния твэлов применительно к плавучим энергоблокам и атомным ледоколам. Представлены закономерности замедленного гидридного растрескивания циркониевых изделий, которые используются при конструировании твэл.

Изложены некоторые особенности методики наводороживания твэльных циркониевых оболочек и канальных труб путем «сухого» насыщения из твердой водородосодержащей фазы. Одной из отличительных особенностей данного процесса наводороживания является равномерное гидрирование по длине исследуемых образцов твэльной оболочки и канальной трубы, что важно при последующих исследованиях для получения достоверных результатов.

Для анализа уже накопленной информации и прогнозирования свойств новых конструкционных материалов необходима разработка «объединяющих» математических моделей (расчетных кодов).

Литература

- [1] Edsinger K. Review of fuel degradation in BWRs. *Proc. Int. Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance*. American Nuclear Society, 2000, pp. 523–539.
- [2] Маркелов В.А., Котов П.В., Желтковская Т.Н. Температурная зависимость скорости замедленного гидридного растрескивания сплава Zr-2,5%Nb. *Материаловедение*, 2000, № 1, с. 52–59.
- [3] Иванова С.В. Замедленное гидридное растрескивание циркониевых канальных труб — фактор, определяющий их работоспособность. *Сб. док. 4-й межотраслевой конф. по реакторному материаловедению*. Димитровград, НИИАР, 1996, с. 61–70.
- [4] Калинин Б.А., ред. Физическое материаловедение. Т. 6. Конструкционные материалы ядерной техники. М., МИФИ, 2012.
- [5] Новиков В.В., Карпюк Л.А., Гаврилов Б.М. Методика измерений коэффициента ориентации гидридов в подготовленных методом «сухого» гидрирования образцов труб и листов из сплавов циркония методом цифровой обработки изображений. МВИ 533.788. 2011.
- [6] Никулин С.А., Маркелов В.А., Фатеев Б.М. и др. Цирконий в атомной промышленности. М., ЦНИИАтоминформ, 1989.
- [7] Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Коновалов Ю.В. и др. Анализ влияния напряженно-деформированного состояния облученных оболочек твэлов из циркониевых сплавов на ориентацию гидридов. *ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы*, 2014, № 1(76), с. 39–48.
- [8] Kulakov G.V., Vatulin A.V., Konovalov Y.V., et.al. Distribution of hydrides as a function of the stress-strain state. *TopFuel*, 2013, vol. 1, pp. 65–71.
- [9] Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Ершов С.А. и др. Разработка твэлов плавучих энергоблоков и атомных станций малой мощности. *ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы*, 2012, № 1(72), с. 14–25.
- [10] Min S.L., Kim M.S., Kim K.T. Cooling rate- and hydrogen content-dependent hydride reorientation and mechanical property degradation of Zr-Nb alloy claddings. *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 441, no. 1-3, pp. 306–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.06.006>
- [11] Бескорвайный Н.М., Калинин Б.А., Платонов П.А. и др. Конструкционные материалы ядерных реакторов. М., Энергоатомиздат, 1995.
- [12] Маркелов В.А. Замедленное гидридное растрескивание сплавов циркония: условия проявления и основные закономерности. *Деформация и разрушение материалов*, 2010, № 1, с. 31–37.

Бобков Герман Олегович — студент кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Сотников Анатолий Семёнович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бобков Г.О. Анализ водородного охрупчивания и гидридного разрушения компонентов активных зон ядерных энергетических установок. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 07(48). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-07-629>

ANALYSIS OF HYDROGEN EMBRITTLEMENT AND HYDRIDE DESTRUCTION OF CORE COMPONENTS OF NUCLEAR POWER PLANTS

G.O. Bobkov

gerbobkov@yandex.ru

SPIN-code: 8100-9092

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The data are analyzed on the causes of hydrogen embrittlement and hydride destruction of zirconium products in the core of nuclear power plants presented in the special literature. The mechanisms of degradation and destruction of hydrogenated parts made of zirconium alloys are considered. Regularities of delayed hydride cracking of zirconium products and ways of its possible prevention are presented. The article presents a model of reorientation of hydrides in cladding of fuel elements made of zirconium alloys E110 and E635, which are used in the fuel elements of the active zones of nuclear icebreakers and floating power units. Some features are outlined of the method of hydrogenation of zirconium fuel cladding from a solid hydrogen-containing phase.

Keywords

Hydrogen embrittlement, hydride destruction, degradation mechanism, delayed hydride cracking, fuel element, nuclear reactor, nuclear power plant, zirconium alloy, fuel element cladding

Received 25.05.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Edsinger K. Review of fuel degradation in BWRs. *Proc. Int. Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance*. American Nuclear Society, 2000, pp. 523–539.
- [2] Markelov V.A., Kotov P.V., Zheltkovskaya T.N. Temperature dependence of delayed development velocity of Zr-2,5% Nb alloy. *Materialovedenie [Material Science]*, 2000, no. 1, pp. 52–59 (in Russ.).
- [3] Ivanova S.V. [Delayed hydride cracking of zirconium canal pipes – a factor, defining their working efficiency]. *Sb. dok. 4-y mezhotraslevoy konf. po reaktornomu materialovedeniyu [Proc. 4th Intersectorial Conf. on Reactor Material Science]*. Dimitrovgrad, NIIAR Publ., 1996, pp. 61–70 (in Russ.).
- [4] Kalin B.A., ed. *Fizicheskoe materialovedenie. T. 6. Konstruktsionnye materialy yadernoy tekhniki [Physical material science. Vol. 6. Construction materials of nuclear technique]*. Moscow, MIFI Publ., 2012 (in Russ.).
- [5] Novikov V.V., Karpyuk L.A., Gavrilov B.M. Metodika izmereniy koeffitsienta orientatsii gidridov v podgotovlennykh metodom “sukhogo” gidrirovaniya obraztsov trub i listov iz splavov tsirkoniya metodom tsifrovoy obrabotki izobrazheniy. MVI 533.788. [Measuring technique of hydride orientation coefficient in samples of pipes and sheets, prepared by “dry” hydrogenation method from zirconium alloys by digital image processing method. 533.788 measurement procedure]. 2011 (in Russ.).
- [6] Nikulin S.A., Markelov V.A., Fateev B.M., et al. *Tsirkoniy v atomnoy promyshlennosti [Zirconium in nuclear industry]*. Moscow, TsNIIatominform Publ., 1989 (in Russ.).

-
- [7] Kulakov G.V., Vatulin A.V., Konovalov Yu.V., et al. Analysis of the stress-strain state effect of the zirconium-based alloys claddings on the orientation of hydrides. *VANT. Ser. Materialovedenie i novye materialy* [VANT. Ser. Material science and new materials], 2014, no. 1(76), pp. 39–48 (in Russ.).
- [8] Kulakov G.V., Vatulin A.V., Konovalov Y.V., et al. Distribution of hydrides as a function of the stress-strain state. *TopFuel*, 2013, vol. 1, pp. 65–71 (in Russ.).
- [9] Kulakov G.V., Vatulin A.V., Ershov S.A., et al. development of fuel rods for floating power units and low-power atomic power stations. *VANT. Ser. Materialovedenie i novye materialy* [VANT. Ser. Material science and new materials], 2012, no. 1(72), pp. 14–25 (in Russ.).
- [10] Min S.L., Kim M.S., Kim K.T. Cooling rate- and hydrogen content-dependent hydride reorientation and mechanical property degradation of Zr-Nb alloy claddings. *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 441, no. 1–3, pp. 306–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.06.006>
- [11] Beskorovaynyy N.M., Kalin B.A., Platonov P.A., et al. *Konstruktsionnye materialy yadernykh reaktorov* [Construction materials of nuclear reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995 (in Russ.).
- [12] Markelov V.A. Delayed hydride cracking of zirconium alloys: conditions of appearance and basic regularities. *Deformatsiya i razrushenie materialov* [Deformation and Fracture of Materials], 2010, no. 1, pp. 31–37 (in Russ.).

Bobkov G.O. — Student, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Sotnikov A.S., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Bobkov G.O. Analysis of hydrogen embrittlement and hydride destruction of core components of nuclear power plants. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 07(48). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-07-629.html> (in Russ.).