

## ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ОБОЛОЧЕК ИЗ СПЛАВА Э110 В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР 673...843 К

*Г.П. Кобылянский, В.К. Шамардин, С.Г. Еремин, И.М. Кадарметов\*, А.В. Медведев\**  
ГНЦ РФ НИИАР, г. Димитровград, Россия; \* ГНЦ РФ ВНИИНМ, г. Москва, Россия

Приведено результати випробувань оболочкових труб із сплаву E110 ( Zr-1%Nb) внутрішнім газовим тиском до руйнування в області температур 673...843 К. Проведено порівняння характеристик тривалої міцності неопромінених і опромінених в реакторі БОР-60 зразків, а також оболонок, що відпрацювали до вигорання 29...47 МВт·доба/kgU твєлів ВВЕР-1000. Побудовано параметрична залежність тривалої міцності, що встановлює зв'язок між напруженням, часом до руйнування і температурою. Дані трактування ефектів, що спостерігаються, і попередні оцінки стійкості оболочкових труб із сплаву E110 до руйнування в діапазоні напружень і температур, що розглядається.

Приведены результаты испытаний оболочечных труб из сплава Э110 ( Zr-1%Nb) внутренним газовым давлением до разрушения в области температур 673...843 К. Проведено сравнение характеристик длительной прочности необлученных и облученных в реакторе БОР-60 образцов, а также оболочек отработавших до выгорания 29...47 МВтсут/kgU твэлов ВВЭР-1000. Построены параметрические зависимости длительной прочности, устанавливающие связь между напряжением, временем до разрушения и температурой. Даны трактовки наблюдаемых эффектов и предварительные оценки стойкости оболочечных труб из сплава Э110 к разрушению в рассматриваемом диапазоне напряжений и температур.

The paper describes the testing results of the clad tubes of the E110 alloy (Zr-1%Nb) by internal gas pressure to failure in the temperature range from 673 to 843 K. The long-term strength characteristics of non-irradiated specimens, specimens irradiated in the BOR-60 reactor and the VVER-1000 fuel rod claddings of 29...47 MWday/kgU burnup are compared. The parametric dependences of the long-term strength establishing the relationship between stress, time before failure and temperature were built. The interpretation of the effects observed is provided. The resistance of the E110 clad tubes to failure is preliminary assessed for the given stress and temperature range.

### ВВЕДЕНИЕ

Прочностные характеристики оболочек твэлов при длительном температурно-силовом воздействии необходимо изучать для прогнозирования поведения твэлов в различных случаях: при нормальной эксплуатации; отклонениях от нормальных режимов работы; авариях и аварийных ситуациях; хранении и перевозках. Разрушение оболочек из циркониевых сплавов происходит вследствие исчерпания их деформационной способности, за исключением случаев хрупкого разрушения, связанных, как правило, с их повышенным гидрированием.

Наиболее подробно деформационное поведение оболочек из сплава Э110 (Zr-1%Nb) исследовано в области температур 570...670 К [1-3]. В последнее время внимание исследователей обращено к изучению свойств этого сплава при высоких (1100...1500 К) температурах в связи с необходимостью верификации расчетных кодов при моделировании аварийных ситуаций в водоохлаждаемых атомных реакторах. Промежуточная область температур (673...843 К) представляет интерес, с точки зрения изучения переходных процессов в твэле и оценки резервов по деформационной способности, долговечности и т.д. до наступления критических параметров, величина которых определяется допустимыми для выбранных сценариев развития ситуаций уровнями.

Известно, что при нагревании облученных образцов до температур, превышающих температуру об-

лучения ~ 623 К, происходит интенсивный отжиг радиационных дефектов, приводящий к полному возврату механических свойств облученного сплава Zr-1%Nb при температуре 823 К [4]. Это дает основание полагать, что в области температур 773...843 К длительные механические свойства облученного сплава будут такими же, как и необлученного. При меньших температурах из-за торможения движению дислокаций препятствиями в виде сохранившихся радиационных дефектов скорость деформирования облученного сплава должна быть меньше, чем необлученного. Но наличие радиационных дефектов, с другой стороны, снижает запас деформационной способности материала. Таким образом, длительная прочность оболочек будет зависеть от соотношения влияния факторов радиационного упрочнения и снижения деформационной способности. Следует отметить также, что оболочки твэлов в процессе эксплуатации окисляются с наружной и внутренней стороны с образованием более прочного, чем матрица подслоя с повышенным содержанием кислорода. Этот фактор может также оказать влияние на кинетику деформирования оболочки. Кроме того, известно [5], что структура сплава Э110 в оболочке отработавшего твэла после высокотемпературного отжига не полностью совпадает с соответствующей структурой необлученного сплава, и это несоответствие зависит от режимов проведения отжига. Следовательно, температурно-силовое воздействие на оболочку отработавшего твэла может

иметь иные последствия, чем для облученных в инертной среде образцов и необлученных оболочек.

В статье представлены данные начального этапа выявления закономерностей длительной прочности оболочек отработавших твэлов в области температур 673...843 К и их сравнения с соответствующим поведением облученных в инертной среде и необлученных образцов.

## 1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения экспериментов были выбраны фрагменты твэлов реактора ВВЭР-1000, отработавших в составе штатных ТВС 5-го блока Нововоронежской АЭС. Выгорание топлива в этих фрагментах было практически постоянным по всей длине и достигало в различных твэлах ~29...47 МВт·сут/кгU.

На отрезном станке в защитной камере фрагменты твэлов разрезали на отрезки длиной 80 и 150 мм. Топливо из одной (первой) партии отрезков удаляли химическим методом путем выдержки в нагретой азотной кислоте, а из другой (второй) – механическим выдавливанием специальным плунжером.

После снятия заусениц и измерения со стороны торцов внутреннего диаметра оболочек из прутка необлученного сплава Zr-1%Nb были изготовлены концевые детали (пробки), входящие в отрезки первой партии оболочек по плотной посадке. Перед посадкой пробок в оболочки поверхности соприкосновения обезжировали и просушивали. С одного из концов приваривали к образцу пробку аргонодуговой сваркой в автоматическом режиме. В пробке для другого конца образца предусматривали отверстие, через которое в специальной камере образец нагружали выбранным давлением аргона с одновременной аргонодуговой сваркой. После герметизации образцы проверяли на герметичность жидкостным методом.

Герметизацию газонаполненных необлученных трубчатых образцов производили на том же оборудовании, что и для облученных образцов.

Вторую партию отрезков труб не герметизировали, а концы подсоединяли механически к нагружающей системе непосредственно в испытательной установке, включающей гидравлический насос, с помощью специальных прокладок, обеспечивающих герметичное соединение [6].

Для проведения экспериментов были использованы также трубчатые образцы (по конструкции аналогичные образцам первой партии) из сплава Э110, нагруженные при комнатной температуре внутренним давлением гелия и облученные в натриевом теплоносителе реактора БОР-60 в температурной области 320...350 °С до различных уровней флюенса быстрых ( $E > 0,1$  МэВ) нейтронов. В результате реакторных испытаний у образцов произошло увеличение диаметра вследствие радиационно-термической ползучести. Поэтому значения диаметров у облученных образцов перед термическими ис-

пытаниями были выше, чем у необлученных образцов и образцов, изготовленных из оболочки отработавшего твэла. В таблице приведены сведения о характеристиках исследуемых образцов и параметры их испытаний в защитной камере.

Для проведения испытаний первой партии трубчатых образцов на ползучесть в инертной среде использовали специальный стенд в защитной камере, состоящий из следующих основных узлов: нагревательной печи и системы контроля и поддержания температуры; системы, обеспечивающей вакуум во внутреннем пространстве печи; ампул с образцами; системы регистрации момента возможного разрушения образца.

Ампулы с образцами и нагревательная печь размещены в защитной камере; приборы для записи и поддержания температуры и регистрации момента разгерметизации расположены в операторском помещении.

Образцы для проведения испытаний на ползучесть в составе ампул размещали в металлическом стакане, расположенном в нагревательной печи. Печь со стаканом герметично закрывали и производили откачку воздуха из пространства, окружающего образцы. В этом пространстве поддерживали разрежение (вакуум ~0,15 Па), которое фиксировали на диаграммной ленте с помощью прибора КСП-2. Устанавливали необходимый уровень температуры на образцах регулированием электрического тока в печи с помощью прибора ВРТ-3. Контроль температуры осуществляли посредством ТЭП. Поддержание температуры в печи автоматическое ( $\pm 4$  °С).

Необходимый уровень механических напряжений в образце устанавливали исходя из его геометрических размеров, значения давления газа при комнатной температуре и значения температуры выдержки образца. Тангенциальное напряжение в стенке трубчатого образца подсчитывали по формуле:

$$\sigma = P \cdot D T / 2 t \cdot 293, \quad (1)$$

где  $P$  - давление в образце при комнатной температуре (МПа);  $D$  - средний диаметр образца (мм);  $t$  - толщина стенки (мм);  $T$  - температура образца в печи (К).

Для определения деформации ползучести трубчатых образцов в поперечном направлении производили измерения их наружного диаметра в двух взаимно перпендикулярных направлениях до нагревания и после каждого этапа выдержки с выбранной периодичностью в печи. Кинетику деформирования образцов определяли путем получения отношений прироста диаметра после каждого этапа испытаний к диаметру образца до испытания.

Испытания трубчатых образцов второй партии, изготовленных из оболочек отработавших до выгорания 40...47 МВт·сут/кгU твэлов, проводили на установке [6], содержащей систему создания высокого давления; систему поддержания заданной разности давления между внутренней и внешней поверхностями; герметичную электропечь, размещен-

ную в защитной камере; систему электропитания и управления; запорную арматуру и измерительную аппаратуру. Для герметизации образца использовали специальные приспособления, размещенные в защитной камере. Образец, разогретый в печи до требуемой температуры, нагружали аргоном до давления, соответствующего заданному напряжению (по формуле (1)), и выдерживали при этих параметрах до разгерметизации, момент наступления которой определяли по резкому падению давления в системе.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения исчерпывающих сведений о характеристиках длительной прочности в широком диапазоне температур и напряжений требуется большой объем испытаний, что трудно выполнимо для облученных материалов. В этом случае применяют ускоренные методы испытаний и так называемые параметрические способы оценки сопротивления ползучести и длительной прочности с помощью известных из литературы параметрических зависимостей [7]. Располагая некоторым количеством экспериментальных точек, можно расчетно-графическим путем найти серию зависимостей времени до разрушения от напряжения при различных уровнях температуры или от температуры при различных напряжениях.

Как видно из таблицы, наиболее статистически представительной для построения параметрических зависимостей является серия результатов, полученных при испытании облученных в реакторе БОР-60 образцов. Анализ температурно-временных зависимостей характеристик жаропрочности образцов этой серии указывает на слабое влияние флюенса нейтронов на время до разрушения - в пределах погрешностей оно не является статистически значимым. Среди известных параметрических зависимостей эти результаты наиболее адекватно описывают зависимости Шерби и Дорна [6]:

$$P = F(\sigma) = \lg \tau - B/T, \quad (2)$$

где  $\tau$  - время до разрушения;  $B$  - постоянная, определяемая как тангенс угла наклона семейства параллельных прямых в зависимости логарифма долговечности от обратной температуры при  $\sigma = const$ .

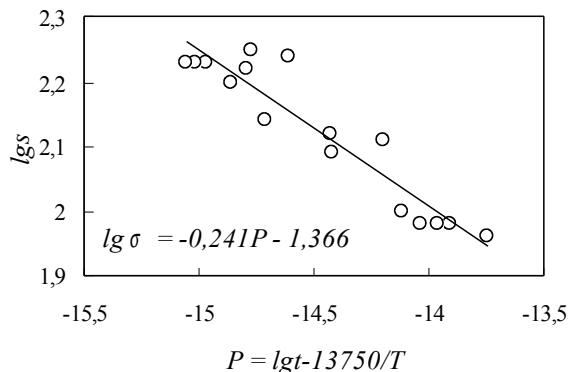


Рис. 1. Параметрическая зависимость Шерби и Дорна длительной прочности образцов, облученных в реакторе БОР-60 и затем испытанных в температурном диапазоне 773...843К

Анализ семейства параллельных прямых в координатной плоскости « $1/T - \lg \tau$ », полученных в том числе и при использовании линейной интерполяции напряжений к выбранным наиболее характерным значениям, позволил определить, что в первом приближении  $B=13750$ . Зависимость логарифма напряжения от параметра Шерби и Дорна  $P = \lg \tau - B/T$  (рис.1) является параметрической кривой (в нашем случае полосой), определяющей долговечность образцов из сплава Zr-1%Nb при заданных температурах и напряжениях в приближении отсутствия вклада накопленной в образцах деформации радиационно-термической ползучести в общий запас их деформационной способности.

Однако при наличии такого вклада (что подтверждается данными работы [1]) время до разрушения деформированных до термических испытаний образцов будет меньше, чем, если бы они не были деформированы. Для лучшего моделирования состояния облученных оболочек твэлов при построении параметрических зависимостей были использованы результаты испытаний тех образцов, у которых деформация радиационно-термической ползучести была достаточно мала, по сравнению с общей деформацией, достигнутой при его разрушении. Так, длительная прочность образцов, радиационно-термическая ползучесть которых не превышала 3 %, массив данных лучше описываются параметрической зависимостью Ларсона и Миллера, в которой, как и для большинства материалов [7], константа  $C=20$  (рис.2). В этом случае зависимость, описываемая выражением

$$\lg \sigma = -0,0002P - 6,1941, \quad (3)$$

позволяет прогнозировать характеристики длительной прочности облученных оболочек в области температур 773...843 К.

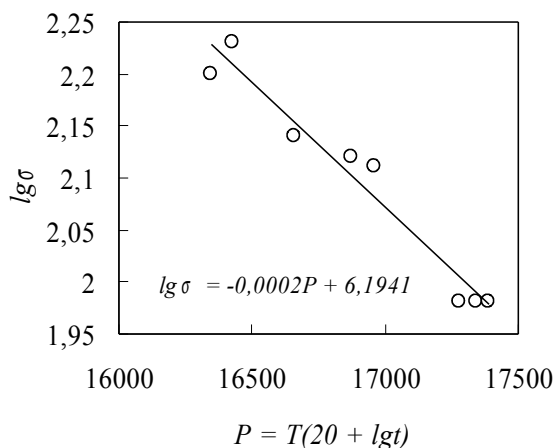


Рис. 2. Параметрическая зависимость длительной прочности Ларсона-Миллера образцов, облученных и слабо (<3%) деформированных в реакторе БОР-60, а затем испытанных при температурах 773...843К

Совокупность результатов испытаний оболочек отработавших твэлов так же, как и облученных в реакторе БОР-60 образцов (выбранный массив), хорошо аппроксимируется зависимостями Ларсона и Миллера (рис.3).

### Характеристики образцов, условия испытаний и параметры их разрушения

Тип образцов	Условия облучения				Температура испытания, К	Тангенциальное напряжение, МПа
	Реактор	Выгорание, МВтсут/кгU	Флюенс, $10^{26} \text{ м}^{-2}$ ( $E > 0,1 \text{ МэВ}$ )	Деформация перед испытаниями, %		
С уплотнительным соединением	ВВЭР-1000	~47	-	-	673	228
						245
						270
Газонаполненные	ВВЭР-1000	~40	-	-	723	140
						102
						77
						80
						96
						108
						843
Без облучения	БОР-60	-	-	-	-	157
						165
						170
						128
						168
						131
						170
						174
						99
						95
						95
						96
						139
						177
						92
80						
108						

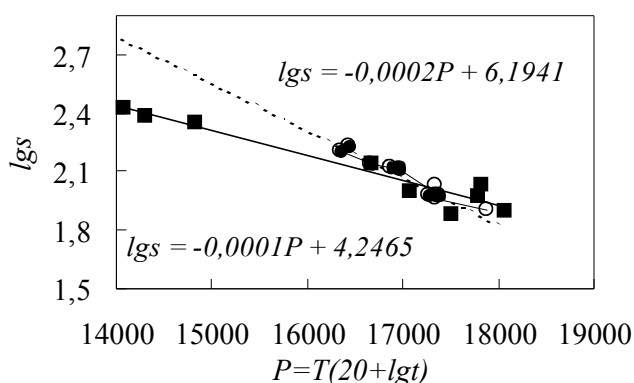


Рис. 3. Параметрические зависимости длительной прочности Ларсона и Миллера для оболочек отработавших твэлов, необлученных твэлов и слабо деформированных образцов, облученных в реакторе БОР-60: ■ - оболочки, отработавших твэлов; ● - образцы, облученные в БОР-60; ○ - необлученные образцы

В области высоких температур (выше 773 К) напряжения разрушения необлученных образцов практически совпадают с напряжениями разруше-

ния образцов, облученных в реакторе БОР-60, а оболочки твэлов, отработавшие до выгорания 29... 40 МВтсут/кгU, разрушаются либо при практически таких же напряжениях, либо при более высоких. Однако, при снижении температуры испытания до 673 К оболочки отработавших до выгорания 40... 47 МВтсут/кгU твэлов разрушаются при меньших напряжениях, чем это можно было бы ожидать при соответствующей экстраполяции выражения (3). Для всего исследованного интервала температур параметрическая зависимость оболочек отработавших твэлов имеет вид:

$$lg\sigma = -0,0001P + 4,3677, \quad (4)$$

т.е. наклон прямой у этой зависимости в два раза меньше, чем на рис. 2.

Очевидно, что при одинаковом времени испытаний уровень разрушающих напряжений в низкотемпературной области выше, чем в высокотемпературной (в частности, в результате дополнительного вклада радиационного упрочнения [1, 4]). Но, поскольку радиационное упрочнение сопровождается снижением пластичности материала, то при низких температурах (при одинаковых напряжениях) разрушение образцов произойдет быстрее, чем при высоких. По-видимому, второй процесс является преобладающим. Следует, однако, отметить, что нельзя

исключить и возможное влияние на снижение разрушающего напряжения оболочки более высокого выгорания топлива (которое было выбрано для проведения экспериментов при температуре 673 К) из-за ее дополнительного повреждения продуктами деления топлива. Для выяснения этого вопроса, а также для повышения статистической достоверности полученных оценок требуется продолжение экспериментов.

Если провести сравнение (среди тех данных, которые можно сравнивать) характеристик длительной прочности оболочек отработавших твэлов и образцов, облученных в реакторе БОР-60, то можно отметить, что при высоких температурах 813...843 К стойкость к разрушению оболочек отработавших твэлов выше, чем необлученных или облученных в реакторе БОР-60 образцов. Обнаруженное различие необлученных образцов и оболочки отработавшего твэла может быть обусловлено тем, что в отличие от необлученной трубы в оболочке отработавшего твэла наружная поверхность покрыта оксидной пленкой толщиной до 2 мкм, а внутренняя - до 5 мкм [8]. По-видимому, более жаропрочная, чем материал оболочки оксидная пленка, а также подокисный слой, обогащенный кислородом, вносят существенный вклад в сопротивление деформированию оболочки и увеличивают ее длительную прочность. При снижении температуры этот вклад должен уменьшаться из-за повышения уровня разрушающего напряжения материала оболочки вследствие составляющей радиационного упрочнения. Этот эффект подтверждается тем фактом, что при температуре 773 К длительная прочность оболочки отработавшего твэла входит в полосу результатов необлученных и облученных в реакторе БОР-60 образцов, описываемых зависимостью Ларсона и Миллера.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность результатов испытаний в диапазоне температур 673...843 К необлученных и облученных в реакторе БОР-60 образцов, а также оболочек отработавших до выгорания 29...47 МВтсут/кгU твэлов ВВЭР-1000 в первом приближении аппроксимируется параметрической зависимостью Ларсона и Миллера, позволяющей экстраполировать и интерполировать данные длительной прочности на неизученные области значений напряжения, температуры и времени.

Время до разрушения оболочек твэлов, отработавших до выгорания ~29 МВтсут/кгU, при температурах 813...843 К выше, чем необлученных и облученных до флюенса быстрых ( $E > 0,1$  МэВ) нейтронов  $(1...2) \cdot 10^{22}$  см<sup>-2</sup> трубчатых образцов. Длительная прочность оболочек твэлов, отработавших до выгорания ~47 МВтсут/кгU, при снижении температуры испытаний до 673 К ниже, чем это можно было бы ожидать от экстраполяции высокотемпературных данных, полученных на облученных образцах.

Объем экспериментальных данных по длительной прочности оболочек из сплава Э110 пока позво-

ляет производить лишь предварительные оценки по обоснованию параметров, характерных для отклонений от нормальных режимов работы; аварий и аварийных ситуаций; мокрого и сухого хранения и перевозок. Необходимо продолжение экспериментов для накопления недостающих данных, в особенности, испытаний оболочек отработавших до высоких выгораний твэлов при температурах 573...673 К и напряжениях значительно меньших предела текучести.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г.П. Кобылянский, А.Е. Новоселов. *Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе*: Справочные материалы по реакторному материаловедению / Под ред. В.А. Цыканова. Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1996, 175 с.
2. А.С. Займовский, А.В. Никулина, Н.Г. Решетников. *Циркониевые сплавы в атомной энергетике*. М.: «Энергоиздат», 1981, 256 с.
3. Е.Ю. Ривкин, Б.С. Родченков, В.М. Филатов. *Прочность сплавов циркония*. М.: «Атомиздат», 1974.
4. Г.П. Кобылянский, А.С. Покровский, В.К. Шармардин. Эффекты облучения в сплаве Zr-1%Nb. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1983, вып. 2(25), с. 51-56.
5. Г.П. Кобылянский, З.Е. Островский, В.К. Шармардин. Структурные изменения в оболочках твэлов из сплава Н-1 после высокотемпературных отжигов // *Сб. докладов четвертой Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. Димитровград, 15-19 мая 1995 г.* Т.2. Димитровград, 1996, с. 236-244.
6. Ю.К. Бибилашвили, В.Н. Голованов, С.Г. Еремин и др. Установка для испытаний на длительную прочность под внутренним давлением в присутствии агрессивной среды оболочек твэлов типа ВВЭР // *Сб. докладов четвертой Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. Димитровград, 15-19 мая 1995 г.* В 4-х томах. Т.2. Димитровград, 1996, с.148-155.
7. *Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов*: Справочное пособие в 3-х томах / Под общей редакцией чл.-корр. АН СССР А.Т. Туманова. Т.2. Методы исследования механических свойств металлов. М.: «Машиностроение», 1974, с. 308-318.
8. В.Б. Иванов, Б.А. Канашов, В.И. Кузьмин и др. Исследование работоспособности твэлов реакторов ВВЭР-1000 // *Третья Межотраслевая конференция по реакторному материаловедению. Димитровград, 27-30 октября 1992 г.*: Сборник докладов: В 2-х т. Т.1. Димитровград, 1994, с.73-87.