

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К.В. Павлий

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: kvint@kipt.kharkov.ua

Рассмотрен вопрос о методическом обеспечении экспериментальных работ по изучению пластических характеристик топливных материалов в поле облучения, основанный на циклическом деформировании прямоугольных образцов изгибающим моментом. Разработана экспериментальная установка, реализующая данный методический подход.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для атомной энергетики Украины вопрос о продлении срока эксплуатации энергоблоков АЭС становится актуальным [1, 2]. Поэтому изучение упругопластических характеристик материалов, используемых в конструкциях энергоблоков, как в лабораторных условиях, так и в процессе облучения требует повышенного внимания. В ННЦ ХФТИ получили широкое развитие работы по исследованию физических свойств конструкционных материалов [3, 4].

Переходные режимы эксплуатации тепловыделяющих элементов в АЭС являются наиболее опасными для работоспособности твэла, так как предел пластичности и скоростные деформационные характеристики топлива постоянно изменяются. Для оптимальных режимов скорости изменения мощности ядерно-энергетических установок необходимы данные по упругопластическим свойствам топлива на различных уровнях выгорания в зависимости от внешних параметров воздействия и характеристик топливного материала. В последние годы разрабатываются модифицированные композиции окисного топлива и изучаются их пластические характеристики [5, 6]. Модификация диоксида урана путем легирования в настоящее время принята всеми ведущими мировыми компаниями, и, наиболее перспективным направлением решения проблемы снижения сопротивления деформированию является легирование соединениями, образующими выделения с низким сопротивлением сдвигу по границам зерен, и твердые растворы в матрице топлива. Однако экспериментальные данные по упругопластическим свойствам модифицированного топлива практически отсутствуют. Следовательно, разработка и создание экспериментальной базы для изучения упругопластических свойств топлива становятся более актуальными.

Цель настоящей работы - создание методики и экспериментальных средств исследования упругопластических характеристик ядерного топлива в поле облучения при циклическом нагружении образца.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения больших объемов исследования и ускорения получения экспериментальных результатов необходимо использовать высокопроизводительные методы и устройства, обеспечивающие

полную автоматизацию процессов измерения, сбора и первичной обработки информации.

При циклическом деформировании существуют два основных вида нагружения – с заданной амплитудой по нагрузке (мягкое нагружение) и с заданной амплитудой по деформации (жесткое нагружение). Истинный характер изменения деформаций и напряжений в зоне концентрации при циклическом нагружении является нестационарным и лежит в области между мягким и жестким режимами. Можно считать, что эти два вида нагружения охватывают предельные случаи работы элементов конструкций в упруго-пластической области. Следовательно, диаграмма циклического деформирования должна давать связь напряжений и деформаций как при стационарных, так и при нестационарных нагружениях, охватывающих режимы между мягким и жестким нагружениями.

При разработке установки следует учитывать характеристики испытываемых образцов, которые по своим циклическим свойствам подразделяются на упрочняющиеся, разупрочняющиеся и стабилизирующиеся. В зависимости от типа материала процесс изменения напряжений и деформаций сопровождается увеличением (или уменьшением) сопротивления циклическому деформированию при жестком нагружении и снижению (или ростом) величин необратимых пластических деформаций при мягком нагружении. При этом для циклически упрочняющихся материалов свойственно уменьшение остаточной деформации за полуцикл (ширина петли), а необратимая деформация стремится к некоторой постоянной величине. Для циклически разупрочняющихся материалов характерно увеличение ширины петли и увеличение полной деформации, причем накопление деформаций может происходить как в сторону растягивающей, так и в сторону сжимающей нагрузки. Циклически стабильные материалы обладают постоянной шириной петли в каждом полуцикле. Существенное значение на процесс циклического деформирования оказывает степень асимметрии цикла – чем она больше, тем интенсивнее происходит процесс накопления односторонних деформаций в сторону действия максимального напряжения цикла.

Исследования в лабораторных условиях диоксида урана при трехточечном изгибе говорят о том, что этот вид материала является циклически ста-

бильным материалом, что существенно облегчает изучение его радиационных характеристик при облучении. Наряду с изменением деформационных характеристик при упругопластическом циклическом деформировании происходит изменение предела пропорциональности с ростом числа циклов нагружения. Причем, как и при статическом нагружении, со сменой знака нагрузки проявляется эффект Баушингера [7] и в последующих циклах.

При проектировании экспериментальной установки следует учитывать влияние температуры на испытываемый образец и на конструкционные узлы установки. Наиболее целесообразно с учетом объекта исследований (ядерное топливо) и со спецификой проведения экспериментов (высокие температуры, большая плотность делений образцов, выделение газообразных продуктов деления и т.п.) выбрать мягкую схему нагружения, что облегчает разработку части установки, находящейся в поле облучения. Систему жесткого нагружения следует закладывать в схему установки, которая находится вне зоны облучения.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Использование метода циклического трехточечного изгиба с мягкой системой нагружения позволяет реализовать любые режимы в условиях облучения при требуемых параметрах эксплуатации ядерного топлива, хотя в первую очередь следует обратить внимание на радиационные характеристики исследуемых материалов. Они проявляются для диоксида урана, как правило, в диапазоне температур 300...1000 °С [6, 8].

На рис. 1 показана схема облучаемой части установки, позволяющая реализовать практически все вышеперечисленные режимы.

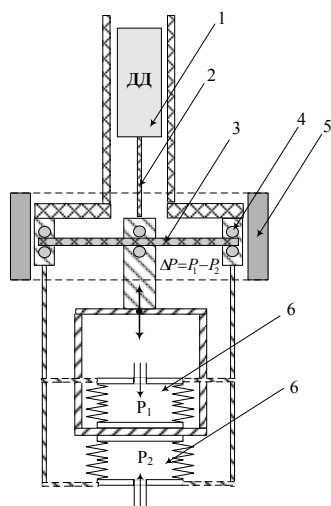


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – датчик деформации; 2 – измерительный шток;
- 3 – образец; 4 – пуансоны; 5 – нагреватель;
- 6 – нагружающие сиффоны

Особое внимание при разработке следует уделять измерительным и нагружающим устройствам, которые обеспечивают надежность и точность в условиях повышенных температур и радиации. Для нагружения образца изгибающим моментом исполь-

зуется система, выполненная в виде двух соосно соединенных сиффонов, работающих в гидравлическом, пневматическом или смешанном режимах при повышенных температурах (до 300 °С). Для таких систем характерно изменение жесткости под действием внешних условий, в основном возмущающим фактором является температурный фактор. Зависимость модуля упругости материала сиффона от температуры можно представить в виде

$$E(T) = E^* \exp(\rho/T).$$

Используя выражение для жесткости сиффона, имеем

$$C_c(T) = \frac{2E^* \exp(\rho/T) \delta^3}{AnD_0^2 [1 + \alpha(T - T_0)]^2},$$

где n - число гофр, δ - усредненная толщина стенок; D_0 - наружный диаметр; A - коэффициент. Для эффективной площади сиффона легко получить

$$F_{эф}(T) = (\pi/16)(D_0 + d_0)^2 (1 + \alpha\Delta T)^2,$$

где D_0 и d_0 - начальные значения внешнего и внутреннего диаметров; α - температурный коэффициент удлинения, ΔT - изменение температуры сиффона. В то же время начальная длина сиффона изменяется под действием температуры на величину $\lambda_0(T)$, тогда зависимость перемещения сиффона от температуры имеет вид:

$$\lambda(T) = \lambda_0(T) + \frac{PF_{эф}(T)}{C_c(T)} = \lambda_0(T) + Pq(1 + \alpha\Delta T)^4 \exp\left(\frac{\rho}{T}\right),$$

где $\rho = \pi n A D_0 (D_0 + d_0)^2 / 32 E^* \delta^3$; q - коэффициент пропорциональности; P - давление. Для переменных давлений должна учитываться частотная характеристика системы нагружения, т. е.

$$\omega = (1/2\pi) \sqrt{C/m},$$

где C , m - жесткость и масса соответственно. Поскольку $C(T) \propto C_0 \exp(\rho/T)$, зависимость частоты собственных колебаний от температуры определяется

$$\omega(T) = (1/2\pi) \sqrt{(C_0/m) \exp(\rho/T)}.$$

Тогда для реальной системы нагружения установки (см. рис. 1) расчетная формула имеет вид:

$$\lambda = \frac{(P_1 F_1 - P_2 F_2) f_1 f_2}{f_1 + f_2},$$

где P, F, f - давление, площадь и податливость ($f = 1/C$) сиффонов. При равенстве диаметров и жесткости сиффонов имеем:

$$\lambda = (1/2)(P_1 - P_2) F f.$$

Не трудно получить температурную зависимость системы нагружения, которая должна учитываться при проведении экспериментов:

$$\lambda = \frac{An(P_1 - P_2) D_0^2 (D_0 + d_0)^2 (1 + \alpha\Delta T)^4}{32 \cdot 2E^* \delta^3 \exp(\rho/T)}.$$

Перемещения нагружающей системы под действием давления ($P = P_1 - P_2$) можно представить в виде $\lambda = P F f$, тогда:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta f}{f} \text{ или } \delta_\lambda = \delta_P + \delta_F + \delta_f,$$

где δ - относительные изменения соответствующих величин. Величина δ_P определяется классом точности соответствующего прибора и задающим устройством давления. δ_F уменьшается с понижением рабочей температуры и (или) уменьшением диаметра сильфонов. Относительная погрешность δ_f связана с отклонением расчетной величины f от реальной.

Для максимальной и относительной динамических погрешностей нагружающего устройства можно записать [9]:

$$\Delta\lambda_D = \pi f \frac{\dot{Q}_{\max}}{\omega},$$

$$\delta_D = \frac{\Delta\lambda_D}{\lambda} = \frac{\pi \dot{Q}_{\max}}{\omega Q},$$

где ω - частота собственных колебаний нагружающих сильфонов, \dot{Q}_{\max} - максимальная скорость изменения давления.

На жесткость нагружающего устройства оказывает влияние доза облучения при эксплуатационных значениях температуры (до 300 °С). Плотность нейтронного потока в месте установки сильфонов достигает $\leq 10^{-12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Из анализа литературных данных [10] следует, что влияние последней не оказывает существенного значения на изменения модуля упругости материала сильфона, следовательно, и на его жесткость, и лежит в интервале (0,1...0,5)% первоначальной жесткости сильфона. Учитывая вышесказанное, были выбраны сильфоны из стали марки X18H10T с внешним диаметром 27 мм, внутренним – 17,5 мм, эффективной площадью 3,88 см², толщиной стенки 0,14 мм, жесткостью 0,7 кг·мм⁻¹ и допустимым внутренним давлением до 12,5 кг/см², обладающие погрешностью воспроизведения характеристик в динамическом режиме не хуже 0,1%, а общая погрешность с учетом температурного и дозного факторов составила не хуже 0,2%.

Деформация образца (стрела прогиба) измеряется индуктивным преобразователем, имеющим линейный диапазон 7 мм, с общим диапазоном 15 мм [11]. Основной величиной влияющей на погрешность измерения деформации, является нестабильность температуры на конструкционных узлах установки. Однако подбором материалов и конструкцией измерительного узла удалось свести температурную чувствительность к минимуму, до 1,5 мкм на 100 °С. При разработке системы деформации рассматривался вопрос о влиянии дозы облучения на измерительные узлы системы. Учитывая результаты работ, приведенных в монографии [12], был сделан вывод о несущественном влиянии дозы облучения на распухание используемых материалов, а следовательно, на погрешность измерения, которая составила 0,1...0,2% от общей погрешности. В таблице приведены технические характеристики установки, полученные на основании расчетных данных и гра-

дуировочных испытаний в лабораторных условиях с учетом всех возмущающих факторов.

Температура образцов измеряется вольфрам-рениевыми и хромель-алюмелевыми термопарами. Интенсивность нейтронного потока будет измеряться непосредственно на месте установки образца с помощью стандартных термонейтронных датчиков (ТНД).

Технические характеристики установки

Показатель	Характеристики
Атмосфера испытаний	Инертный газ
Максимальное давление в нагружающих сильфонах	12 кг/см ²
Максимальная нагрузка на образец	60 Н
Погрешность нагружения	0,2 %
Температура испытаний	до 1200 °С
Приведенная погрешность измерения температуры	0,5...2 %
Линейный диапазон измерения деформации	7 мм
Максимальная деформация образца (стрела прогиба)	100 мкм
Приведенная погрешность измерения деформации	1% от диапазона
Температурная чувствительность измерения деформации	1,5 мкм на 100 °С

Следует отметить:

- Внутреннее давление в установке не влияет на нагрузку образца, что снижает погрешности измерения деформации и нагружения образца. Это позволяет корректировать температуру образца не только нагревателем, но и изменением среды при проведении экспериментов.
- Изменение температуры образца не приводит к изменению нагрузки на образец в связи с компенсационной схемой подключения нагружающих сильфонов (см. рис. 1). Кроме того, малая температурная чувствительность измерения деформации позволяет проводить испытания при неизотермическом процессе.

4. СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ И НАГРУЖЕНИЯ

Для реализации параметров эксперимента разработана система регистрации и управления с обратной связью по деформации, которая позволяет реализовать не только стандартные программы нагружения в мягком и жестком режимах (ползучесть, активное деформирование, релаксация напряжений), но и более сложные, связанные с изменением скорости нагружения и деформации, как при постоянных, так и при переменных температурах. Принципиальная блок-схема показана на рис. 2, в основу которой положен аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ZET-210 «Sigma USB», который имеет 16 синфазных или 8 дифференциальных входов с частотой преобразования до 500 кГц. Кроме этого, имеется два аналоговых (ЦАП) выхода (количество разрядов - 14) с частотой преобразования до 500 кГц, максимальным выходным напряжением $\pm 2,5$ В и выход-

ным током до 10 мА. ZET-210 подключается к компьютеру по USB-порту и имеет широкое программное обеспечение. Для регистрации: селективный вольтметр, вольтметр постоянного и переменного токов (регистрация питания двигателей и нагревателей); многоканальный осциллограф (визуализация работы датчика деформации); частотомер (измерение частоты на датчике деформации); XY – осциллограф, XY – плоттер (визуализации получаемых результатов); программа тензо- и термоизмерений (измерение температуры и давления); программа фильтрации сигналов и просмотра результатов (визуализации результатов); программа алгебраических операций сигналов (расчет разности давлений в нагружающих сильфонах с учетом жесткости). Для АЦП имеется программа генерации сигналов различной формы (до 500 Гц), которая используется для питания индукционного преобразователя (датчика деформации). Цифровой вход/выход служит для управления уровнями ТТЛ-логики, т. е. существует возможность для контроля и управления дискретными элементами, в нашем случае это РД-двигатель и нагревательные элементы, показанные на рис. 3, в схеме внешней системы нагружения.

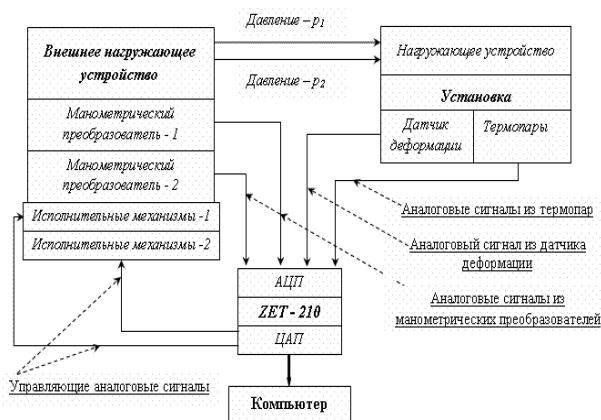


Рис. 2. Принципиальная блок-схема

Как следует из принципиальной блок-схемы установки (см. рис. 2), на АЦП ZET-210 заведены все термопары для измерения температуры на образце и узел экспериментальной установки, индукционный датчик деформации, преобразователи давления и питания двигателей и нагревателей (см. рис. 3).

Для нагружения образцов циклическими нагрузками разработано внешнее нагружающее устройство (ВНУ), схема которого показана на рис. 3. Это устройство может работать как в пневматическом, так и гидравлическом режимах. Однако наиболее предпочтителен смешанный режим работы, когда в облучаемой части установки для нагружения образца изгибающим моментом используется гидравлика, а во внешнем нагружающем устройстве - пневматика. Тем самым увеличивается диапазон нагрузок и сохраняется точность измерения и регулировки давлений в сильфонах с обратной связью по деформации.

Для регулирования давления в нагружающих сильфонах (см. рис. 1) используется два механизма изменения нагрузки. Это термическая система (4) (см. рис. 3) выполнена в виде двух нагревательных элементов, мощность каждого - 300 Вт, и механиче-

ская система (нагружающие сильфоны (1), двигатели РД-09 (2) (см. рис. 3)). Термическая система позволяет практически вдвое изменять давление в системе нагружения, т. е. при изменении температуры в каждом из нагружающих сильфонов изменяется прикладываемая нагрузка к образцу. Механическая система осуществляет изменение (корректировку) давления на 30%, а, именно при изменении объема каждого нагружающего сильфона меняется нагрузка на образец.

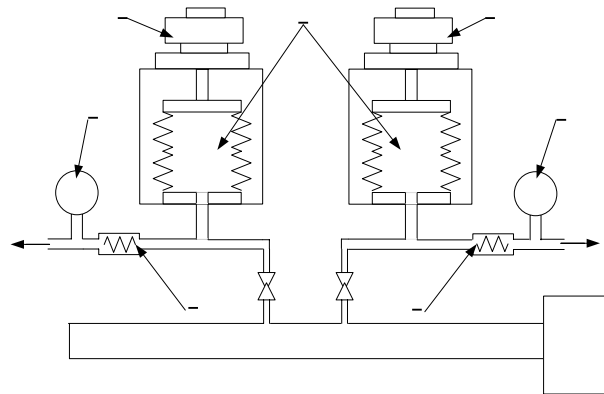


Рис. 3. Схема системы нагружения:
1 – нагружающие сильфоны; 2 – двигатели РД;
3 – манометрические преобразователи;
4 – нагревательные элементы

Исследуемый образец в виде балки имеет размеры 20 мм – длина, 4 мм – ширина и 2...2,4 мм – толщина. Ожидаемая деформация (стрела прогиба) образца в пластической области в поле нейтронного облучения не более 100 мкм. При этом максимальная нагрузка при циклическом деформировании составляет не более 30 Н. Деформацию можно будет увеличить за счет уменьшения толщины образца ($\lambda \propto b^3$, где λ – стрела прогиба, b – толщина). Это увеличит точность получаемых экспериментальных результатов и уменьшит погрешность измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения упругопластических характеристик топливных материалов методом трехточечного циклического изгиба предложены методика и установка, позволяющие реализовать эксплуатационные параметры работы сердечников твэлов энергетических реакторов в поле нейтронного облучения. Работоспособность экспериментальной установки подтверждена анализом расчетных ошибок и методическими экспериментами, приведенными в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.М. Неклюдов. Состояние и проблемы атомной энергетики в Украине // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ.* 2007, №2, с. 3-9.
2. И.М. Неклюдов. Современное состояние и перспективы развития атомной энергетики в Украине // *Энергетическая политика Украины.* Киев, 2006, с. 385-390.
3. В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. Современный статус материалов ядерной энергетики - микроструктурная эволюция и радиационная стойкость

- // Труды XVIII Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. Алушта, 2008, с. 4-5.*
4. В.А. Бомко, А.М. Егоров, Б.В. Зайцев и др. Развитие комплекса ЛУМЗИ для ядерно-физических исследований // *ВАНТ. Серия ЯФИ.* 2008, № 3, с. 100-104.
 5. И.С. Курина, В.В. Попов, В.Н. Румянцев. Свойства модифицированного диоксида урана // *Ядерная энергетика.* 2007, № 1, с. 34-41.
 6. В.Б. Малыгин, А.Н. Соколов. Радиационная ползучесть диоксида урана с низким сопротивлением деформированию // *Физика ядерных реакторов. Инженерная физика.* 2004, № 2, с. 38-40.
 7. Г.С. Писаренко, Н.С. Мотаровский. *Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести.* Киев: «Наукова думка», 1981, с. 247.
 8. Ю.Г. Дегальцев, Н.Н. Понамарев-Степной, В.Ф. Кузнецов. *Поведение высокотемпературного ядерного топлива при облучении.* М.: «Энергоатомиздат», 1987.
 9. Я.Г. Пановко, И.И. Губанов. *Устойчивость и колебания упругих систем.* М.: «Наука», 1967, с. 420.
 10. Г.С. Писаренко, В.П. Киселевский. *Прочность и пластичность материалов в радиационных потоках.* Киев: «Наукова думка», 1979, с. 239-250.
 11. В.А. Бомко, С.Н. Дубнюк, Б.В. Зайцев и др. Экспериментальный комплекс для изучения деформации материалов под пучком ионов азота // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ.* 2008, №2, с. 187-190.
 12. В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, Т.П. Черняева. *Радиационные дефекты и набухание металлов.* Киев: «Наукова думка», 1988, с. 102-109.

Статья поступила в редакцию 12.04.2010 г.

УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІАЦІЙНИХ ПЛАСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЛИВНИХ МАТЕРІАЛІВ

К.В. Павлій

Розглянуто питання про методичне забезпечення експериментальних робіт з вивчення пластичних характеристик паливних матеріалів у полі опромінення, засновано на циклічному деформуванні прямокутних зразків згинальним моментом. Розроблена експериментальна установка, що реалізує даний методичний підхід.

PLANT FOR INVESTIGATING THE RADIATION PLASTIC CHARACTERISTICS OF THE FUEL MATERIALS

K. Pavlii

Is examined the question about the systematic guarantee of experimental works on the study of the plastic characteristics of fuel materials in the field of irradiation, based on the repeated deformation of rectangular models with the bending moment. Is developed the experimental plant, which realizes this systematic approach.