

05.1;08

## **Усталостные испытания материалов в экстремальных условиях с применением акустического метода**

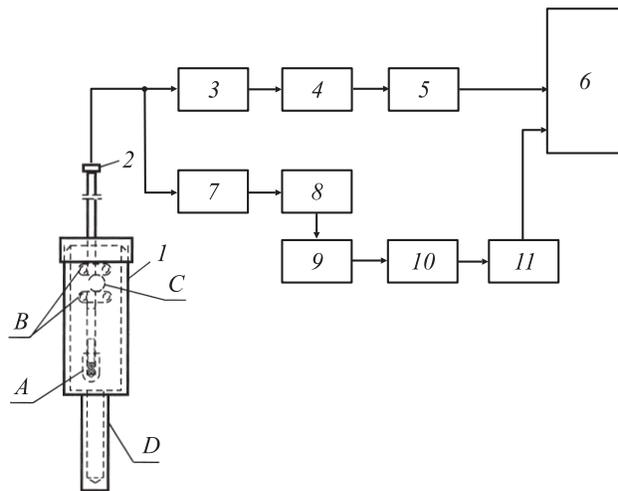
© В.М. Баранов, Ю.К. Бибилашвили, В.А. Карасевич, Г.А. Сарычев

Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет)  
E-mail: bar@kpu.mephi.ru

Поступило в Редакцию 7 июля 2003 г.

Продление кампании ядерного топлива требует усталостных испытаний материалов оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) ядерных реакторов. Испытания облученных материалов при высокой температуре сложны и трудоемки. Применение акустического метода облегчает решение задачи, обеспечивая наблюдение динамики повреждения, контроль параметров эксперимента, определение динамического предела текучести исследуемого материала. Приведены усталостные испытания облученных флюенсом до  $2.2 \cdot 10^{26}$  fast neutron/m<sup>2</sup> кольцевых образцов, вырезанных из циркониевых оболочек ТВЭЛ, при температуре до 360–400°C, включая испытания в иодном паре — продукте деления урана, способном вызвать коррозионное растрескивание ТВЭЛ.

Авторами разработаны [1] методики и капсулы, в которых испытываются разрезанные кольцевые образцы высотой 1–5 mm, изготовленные из оболочек ТВЭЛ (внешний диаметр 9.15 mm, толщина стенки 0.7 mm); электромагнитное возбуждение образца, находящегося в герметичной капсуле малых размеров (диаметр 32 mm, высота 70 mm); использование образца в качестве элемента колебательной системы, соединяющего неподвижный и подвижный захваты образца; наличие на неподвижном захвате, выполненном в виде длинного стержня, вводимого через сварное соединение, пьезопреобразователя, регистрирующего акустические сигналы. Последние используются для наблюдения за развитием усталостных трещин с помощью акустической эмиссии (АЭ); счета числа циклов и регистрации момента разрушения образца; контроля содержания агрессивной среды в капсуле по акустическому шуму испарения; определения температуры образца посредством измерения резонансной частоты измерительной системы; контроля качества за-



Схематический вид испытательной капсулы с системой регистрации и обработки акустических сигналов: 1 — капсула с образцом; 2 — пьезопреобразователь; 3, 7 — усилитель; 4 — фильтр нижних частот; 5, 11 — интерфейс; 6 — ПЭВМ; 8 — фильтр верхних частот; 9 — преобразователь частоты; 10 — амплитудный демодулятор. А — груз; В — захваты; С — образец; D — парогенератор.

щемления образца в захватах по сигналам, возникающим при появлении люфта; определения амплитудной зависимости декремента колебаний системы для оценки динамического предела текучести образца.

Особенности измерительной системы отражены на рисунке. В герметизируемую капсулу с образцом вварен стержневой (диаметром 5 мм и длиной 30 см) звукопровод с пьезопреобразователем из керамики ЦТС-26. К звукопроводу приварен неподвижный захват для защемления образца. К образцу крепится нижний подвижный захват, к которому прикреплен груз из магнитного материала, выполняющий роль маятника, приводимого в движение внешним магнитным полем. Для заполнения объема агрессивной средой используется парогенератор в виде трубки, заполняемой кристаллическим иодом, испаряющимся по мере повышения температуры парогенератора. При испарении иода объем камеры постепенно заполняется иодным паром, который как более тяжелый, чем воздух, газ собирается в нижней части камеры и постепенно вытесняет воздух через капилляр, вваренный в крышку капсулы.

Капсула помещается между полюсами электромагнита. В процессе испытания либо возбуждаются резонансные колебания колебательной системы с образцом в его плоскости, либо капсула покачивается относительно горизонтальной оси (от полюса к полюсу), благодаря чему происходят циклический перебор груза от одной стенки к другой и деформация образца. Максимальный угол отклонения регулируется перемещением груза вдоль стержня по резьбе. Асимметрия цикла задается боковым смещением образца в захватах и поворотом груза в вертикальной плоскости. Точная настройка параметров цикла достигается юстировкой на прозрачном аналоге капсулы посредством инструментального визуального контроля деформации образца. Детальное изучение деформирования образца проводили оптическим методом на укрупненной модели измерительного узла и кольцевых образцах из полиэтиленовых труб диаметром 63 мм, применяемых в газовой промышленности. Перед изготовлением образцов трубы обтачивали для обеспечения геометрического подобия модельных и исследуемых образцов.

Акустические сигналы регистрировали в двух каналах — низкочастотном и высокочастотном, и записывали на жесткий или компакт-диск. Для повышения реальной чувствительности системы применяли компьютерную обработку сигналов — оптимальную фильтрацию, прецизионную амплитудную и частотную демодуляцию, спектральный, корреляционный и вейвлет-анализ. Сигналы АЭ выделяли как высокочастотную составляющую сигналов пьезопреобразователя в узкой полосе частот вблизи его основного резонанса в интервале от 50 до 1000 кГц. На рисунке канал регистрации АЭ отражен нижней ветвью схемы. Модулированный по амплитуде сигнал демодулировали, огибающую подвергали амплитудному и временному анализу. Остальные задачи решали регистрацией сигналов в области частот, не превышающих 20 кГц.

Решение задачи счета циклов очевидно: при соударениях груза со стенкой капсулы возникают импульсы, исчезновение которых свидетельствует о разрушении образца. Контроль качества зацемяния образца в захватах важен для контроля эксперимента: ослабление зацемяния из-за релаксации напряжений делает бессмысленным продолжение испытаний. Задача решается выявлением характерных сигналов, возникающих при появлении люфта в захватах. При возникновении таких сигналов эксперимент прекращается и анализируется накопленный материал. Измерение декремента колебаний служит для определения параметров

кривой циклического нагружения. Для определения декремента используется регистрация затухающих колебаний системы после выключения электромагнита. При большой амплитуде колебаний зависимость логарифма амплитуды собственных колебаний от номера полцикла нелинейна, переход к линейному закону соответствует переходу к упругой деформации, и указывает на достижение предела упругости. По известным соотношениям [2] деформация образца пересчитана в максимальные напряжения в нем. Для определения температуры образца используется температурная зависимость модуля упругости исследуемого материала. Резонансная частота колебательной системы определяется наиболее легко деформируемой частью, которой является сечение образца в месте его закрепления в неподвижном захвате. По изменению импеданса преобразователя определяли резонансную частоту. В предварительных градуировочных опытах последнюю связывали с уровнем температуры. Экспериментально показана возможность измерения температуры данным способом с погрешностью 2–3°.

Необходимость контроля наличия агрессивной среды в объеме капсулы связана с наблюдавшимися фактами неверных выводов об отсутствии воздействия на образец среды, которая утекала из объема установки. С целью контроля осуществляли нагрев парогенератора со скоростью 10–20 К/мин, приводящий к испарению иода и возникновению акустического шума. При необходимости циклическое нагружение образца кратковременно прерывали и регистрировали сигналы без наложения на них шумов установки.

С помощью описанных средств проведены исследования усталостной долговечности циркониевых сплавов, облученных флюенсом до  $2 \cdot 10^{26}$  fast neutron/m<sup>2</sup> ( $E > 0.1$  MeV). Температура испытаний (360°С) соответствовала рабочей температуре. Для примера в таблице приведены данные об усталостной долговечности облученного сплава Zr–1.2%Sn–1%Nb–0.4%Fe в инертной среде и в иодном паре. В последнем случае экспозиция составляла 50 h. Ограниченность опытных данных и малое время экспозиции пока не позволяют сделать надежного вывода о влиянии иодного пара на усталостную долговечность сплава.

Установлено, что заметная АЭ соответствует скачку трещины, равному 2–4 μm. По данным испытаний 66 не облученных образцов, моменты появления трещины, выраженные в долях числа циклов до разрушения, подчиняются нормальному распределению  $N(0.65; 0.026)$ . Распределения не различаются значимо при варьировании коэффициента асимметрии и напряжений в цикле. Поэтому по возникновению АЭ с

Результаты усталостных испытаний облученного сплава Zr–1.2%Sn–1%Nb–0.4%Fe при воздействии и без воздействия иодного пара при температуре испытаний 360°С и частоте нагружения 0.5 cycles/s

Концентрация иодного пара, mg/cm <sup>2</sup>	Максимальное напряжение в цикле $\sigma_{\max}$ , МПа	Минимальное напряжение в цикле $\sigma_{\min}$ , МПа	Число циклов до возникновения АЭ, $N_{АЭ}$	Число циклов до разрушения, $N_p$
0	280	–100	125300	162180
0.6	"	"	117800	194980
0	320	–80	142400	173780
0.2	"	"	85030	95500
0.6	320	–100	41220	53700

определенной достоверностью можно предсказать момент разрушения и досрочно прекратить испытания. В случае облученных образцов среднее значение  $N_{АЭ}/N_p$  возрастает до 0.77, что естественно связано с охрупчиванием материала и уменьшением относительного времени долома образца.

Проведенная разработка может быть использована в различных отраслях промышленности. Наиболее эффективно ее применение при создании перспективных материалов для работы в экстремальных условиях — при воздействии высокой температуры, агрессивных сред, ионизирующих излучений.

## Список литературы

- [1] Баранов В.М., Карасевич В.А. // „Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления“. Сб. материалов 14-й науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов. М.: МГИЭМ, 2002. С. 204–205.
- [2] Прочность, устойчивость, колебания: Справочник. В 3-х т. / Под общ. ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. Т. 1. 832 с.
- [3] Дремин И.М. // УФН. 2000. Т. 170. № 11. С. 1235–1244.