

0,08 с на ЭВМ БЭСМ-6 (при этом не используются какие-либо аппроксимации при описании сопряженных сечений). Для достижения статистической погрешности 30% для $Z \geq 200$ см (что эквивалентно ослаблению потока излучения на 10 порядков и более) для одной группы быстрых нейтронов оказалось достаточным промоделировать 15000—20000 историй псевдонейтронов, на что затрачивается 20—30 мин на ЭВМ БЭСМ-6. Это время практически не меняется с ростом Z , из чего следует, что данный алгоритм целесообразно использовать при расчетах для очень больших глубин (фактически значение степени ослабления ограничено разрядной сеткой ЭВМ и точностью нейтронных констант).

В заключение следует отметить, что выполненные для медленных нейтронов ($E \simeq 1$ эВ) расчеты позволяют утверждать, что $D\xi$ при отсутствии сильных флюктуаций сечений определяется в основном степенью ослабления излучения, а не значениями глубины Z и энергии излучения E в отдельности, что вполне очевидно с физической точки зрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марчук Г. И., Ермаков С. М., Михайлов Г. А. О некоторых проблемах метода Монте-Карло в вычислительной математике и математической физике. — В кн.: Методы Монте-Карло в вычислительной математике и математической физике. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1974, с. 7—23.
2. Спанье Дж., Гельбард Э. Метод Монте-Карло и задачи переноса нейтронов/Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1972.

3. Золотухин В. Г., Ермаков С. М. Применение метода Монте-Карло для расчета защиты от ядерных излучений. — В кн.: Вопросы физики защиты реакторов. М.: Госатомиздат, 1963, вып. 1, с. 7—24.
4. Eriksson B. e.a. Monte Carlo integration of the adjoint neutron transport equation. — Nucl. Sci. Engng, 1969, v. 37, N 3, p. 410—422.
5. Hoogenboom J. A practical adjoint Monte Carlo technique for fixed-source and eigenfunction neutron transport problems. — Ibid., 1981, v. 79, N 2, p. 357—373.
6. De Matteis A., Simonini R. A new Monte Carlo approach to the adjoint Boltzmann equation. — Ibid., 1978, v. 65, N 1, p. 93—105.
7. Kocić A. Direct and adjoint Monte Carlo sampling with reference to a resonance integral problem in a small phase element. — Ann. Nucl. Energy, 1975, v. 2, p. 555—564.
8. Levitt L., Spanier J. A new non-multigroup adjoint Monte Carlo technique. — Nucl. Sci. Engng, 1969, v. 37, N 2, p. 278—287.
9. Наумов В. А., Розин С. Г. Решение задач физики реакторов методом Монте-Карло. Минск: Наука и техника, 1978.
10. Рахно И. Л., Розин С. Г. Способ решения сопряженного уравнения переноса нейтронов методом Монте-Карло. — В сб.: VII Всес. совещ. «Методы Монте-Карло в вычислительной математике и математической физике». Тез. докл. 10—12 октября 1985. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1985, с. 305—308.
11. Андросенко А. А., Андросенко П. А. Комплекс программ BRAND для расчетов характеристик переноса излучения методом Монте-Карло. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1985, вып. 7, с. 33—37.
12. Гермогенова Т. А., Дегтярев С. В., Орлов В. В. и др. Перенос быстрых нейтронов в плоских защитах. М.: Атомиздат, 1971.
13. Казанский Ю. А., Кухтевич В. И., Матусевич Е. С. и др. Физические исследования защиты реакторов/Под ред. С. Г. Цыпина. М.: Атомиздат, 1966, с. 15—34.

Поступила в Редакцию 31.08.87

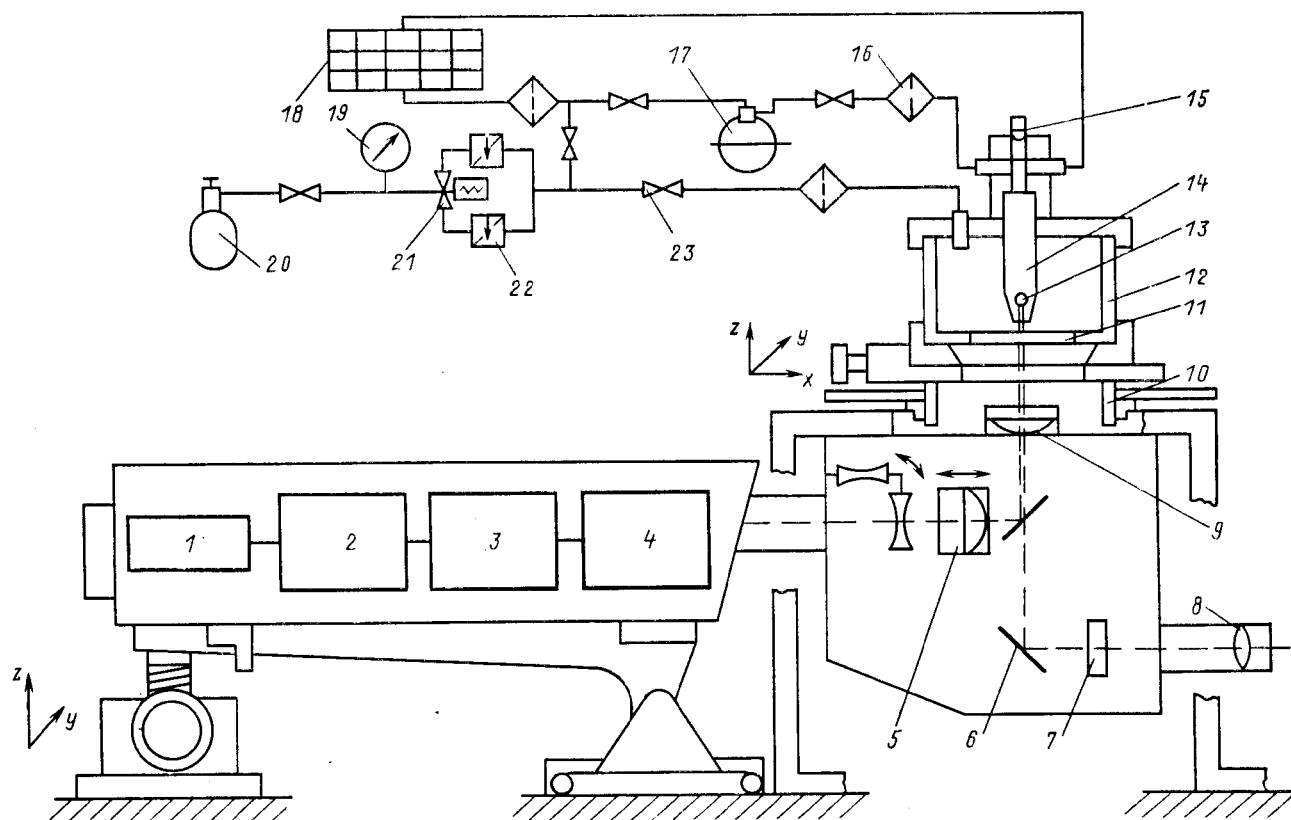
УДК 621.039.541

Метод отбора проб для измерения распределения ядерного топлива и продуктов его деления в микротвэлах ВТГР

ГУДКОВ А. Н., КАШПАРОВ В. А., КОЛОБАШКИН В. М., КОТЛЯРОВ А. А.,
КУРЕПИН А. Д., ПОНОМАРЕВ-СТЕПНОЙ Н. Н., ХРУЛЕВ А. А.

Для оптимизации конструкции и технологии изготовления микротвэлов ВТГР необходимы экспериментальные исследования как исходного технологического загрязнения делящимся материалом защитных покрытий микротвэлов, так и распределения ядерного топлива и продуктов деления в образцах, прошедших реакторные испытания. Трудности при проведении таких исследований вызваны: малыми размерами микротвэлов (диаметр меньше 1,5 мм, толщина покрытий 10—100 мкм); физико-химической стойкостью материалов микротвэла (оксиды и карбиды урана и тория,

карбиды кремния и циркония, пироуглерод); высокой радиоактивностью; чрезвычайно высоким градиентом концентрации топлива и продуктов деления в защитных покрытиях. Разработанные методы измерения распределения делящегося материала и продуктов деления можно разбить на две группы: а) нахождение распределения искомого компонента по меридиональному сечению микротвэла (электронно-зондовым микроанализом [1] или методом лазерного испарения [2]) и б) определение содержания искомого компонента в послойных пробах (методом ионного распыления [3])



Р и с. 1. Схема установки лазерного послойного отбора проб: 1 — рабочее тело (алюминитриевый гранат); 2 — апертурная диафрагма; 3 — акустооптический затвор; 4 — электромеханический затвор; 5 — телескопическая система; 6 — зеркало; 7 — светофильтр; 8 — окуляр; 9 — фокусирующий объектив; 10 — координатный столик; 11 — входное окно; 12 — камера; 13 — микровзл; 14 — коллектор; 15 — осветитель; 16 — аэрозольный фильтр; 17 — ловушка с активированным углем; 18 — хранилище микровзлов; 19 — манометр; 20 — баллон с инертным газом; 21 — управляемый клапан; 22 — натекатель; 23 — вентиль

или химическим анализом после растворения пробы [4]). Использование методов первой группы осложнено трудоемким изготовлением шлифа микровзла, имеющего высокую активность, а также возможностью искажения при этом истинного распределения анализируемого компонента по поверхности шлифа. Кроме того, электронно-зондовый микроанализ имеет недостаточную чувствительность, а лазерному испарению и ионному распылению свойственна низкая представительность по градиенту концентрации, поскольку анализируется только небольшая ($< 10\%$) доля соответствующего слоя микровзла. Химический анализ позволяет измерять весьма низкую концентрацию продуктов деления, но его трудно использовать для исследования инертных покрытий из карбидов кремния и циркония, а также низкоплотного пироуглерода. К тому же процесс растворения покрытий развивается в первую очередь на истинной поверхности образца и на него влияют открытая пористость и дефекты структуры, причем этот процесс идет довольно медленно

и при достаточно высокой температуре (до 1073 К), что в принципе может исказить фактическое распределение топлива и продуктов деления. Все вышеперечисленные методы связаны с большими затратами времени и не поддаются полной автоматизации, что делает их трудноприменимыми для технологического контроля качества микровзлов, а также для изучения поведения компонентов топлива и продуктов деления в различных топливных композициях.

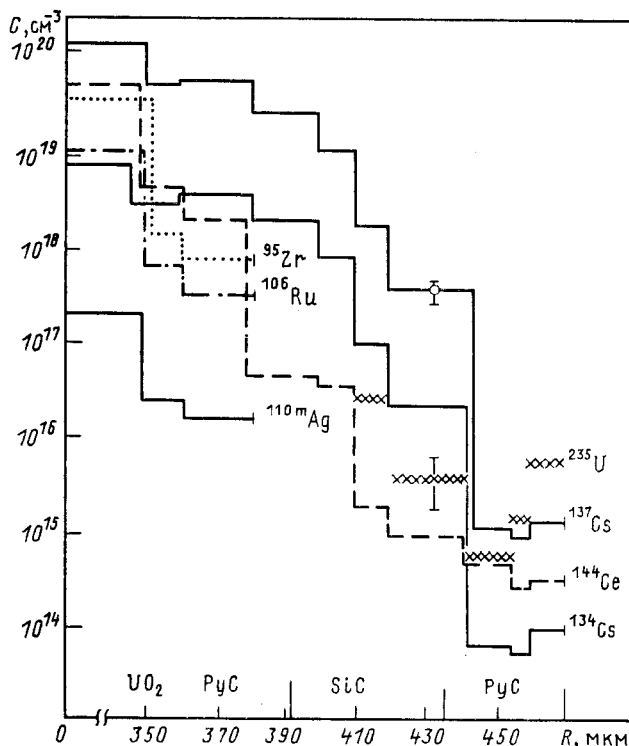
Основная идея предлагаемого метода [5], свободного от вышеперечисленных недостатков, заключается в следующем: воздействуя лучом лазера на поверхность хаотически вращающегося в струе газа образца, испарить тонкий шаровой слой материала и осадить его на пробоотборном коллекторе в целях дальнейшего анализа.

В экспериментальной установке, реализующей данный метод отбора проб (рис. 1), используется твердотельный импульсный лазер (длина волны излучения 1,06 мкм), работающий в режиме непрерывной накачки с модуляцией добротности

(TEM₀₀). Модулирующим устройством данного лазера является акустооптический затвор, позволяющий осуществлять генерацию достаточно мощных (1—10⁴ Вт) импульсов излучения длительностью (2 ÷ 5) 10⁻⁷ с и высокой частотой (5—50 кГц) следования. Последняя выбирается таким образом, чтобы избежать перекрытия областей воздействия двух последовательных импульсов и обеспечить минимальную продолжительность отбора пробы. Параметры лазерного излучения подбираются так, чтобы гарантировать равномерное снятие поверхностного шарового слоя при хаотическом вращении образца и предотвратить механическое разрушение и разогрев образца во время отбора пробы.

Для фокусировки лазерного луча в пятно диаметром 10—20 мкм используется оптическая система, позволяющая также визуально контролировать процесс распыления материала образца. Формирование лазерного луча осуществляется телескопической системой, оснащенной объективом с фокусным расстоянием 50 мм, при этом протяженность области с наибольшей плотностью энергии составляет ~ 1 мм.

Пробоотборное устройство представляет собой герметичную камеру с входным стеклянным окном и коллектором для осаждения испарившегося материала образца. Коллектором служит внутренняя поверхность сужающейся в нижней части (с углом при вершине конуса 30°—60°) кварцевой трубки, расположенной вертикально над входным окном. Кварцевое стекло используется из-за низкого содержания в нем ²³⁵U (менее 3·10¹¹ атом/см³). Внутри этой трубки помещается образец, а через ее нижнее отверстие вводятся луч лазера и несущий газ (неон, аргон). Скорость потока устанавливается натекателем таким образом, чтобы обеспечивался безопорный подвес образца ($\omega = 0,1 \div 1 \text{ см}^3/\text{с}$). Камера крепится на координатном столике, позволяющем передвигать ее в *x*—*y*—*z*-направлениях для ориентировки относительно лазерного луча. Профиль скоростей несущего газа в сечении «подвеса» образца, а также импульсы струй испаряемого материала приводят к хаотическому вращению микросферы с частотой (0,5 ÷ 1) 10² с⁻¹, обеспечивая равномерное снятие поверхностного слоя. Для транспортировки микрочастиц предусмотрено минишневопочта, исключающая контакт с распыляемым радиоактивным образцом. Переключение всех клапанов и вентилях происходит автоматически. После каждой операции пробоотбора образец по пневмопочте пересылается в хранилище, где измеряется толщина снятого шарового слоя, а кварцевая коническая трубка с отобранной пробой заменяется новой. Из хранилища образец возвращается в рабочую камеру, и процесс распыления повторяется. Аэрозольные фильтры защищают газовую систему от радиоактивного загрязнения в случае разрушения исследуемого микрочастицы. Несущий газ перед



Р и с. 2. Распределение продуктов деления и делящихся нуклидов в микрочастицах: UO_2 — материал зерна микрочастицы; PyC , SiC — покрытия из пироуглерода и карбида кремния

сбросом в систему вентиляции проходит через охлаждаемую жидким азотом угольную ловушку для удержания газообразных продуктов деления.

Для определения содержания продуктов деления в отобранных пробах используется гамма-спектрометр с высококачественной пассивной защитой от фонового излучения, датчиком служит диффузионно-дрейфовый полупроводниковый детектор. Достаточно высокое содержание делящихся нуклидов (более $1,5 \cdot 10^{12}$ атомов) измеряется с помощью нейтронно-активационного анализа, при этом идентификация состава ядерного топлива осуществляется путем сравнения количеств образовавшихся ^{103}Ru и ^{132}Te . Малые концентрации делящихся нуклидов определяются с помощью твердотельных трековых детекторов. Для этого полоска такого детектора помещается в кварцевый конус с отобранной пробой и облучается в потоке тепловых нейтронов, а затем по числу проявленных треков осколков деления вычисляется содержание делящегося нуклида. На рис. 2 представлены типичные результаты, полученные методом лазерного снятия слоев с поверхности микрочастицы, прошедших ресурсные реакторные испытания.

Метод лазерного послойного испарения материала образцов с последующим γ -спектрометрическим и активационным трековым анализом отбираемых проб по совокупности основных характеристик (быстродействие, пространственное разрешение, чувствительность) существенно превосходит все известные до сих пор: время отбора пробы 3—5 мин; эффективность пробоотбора $\sim 100\%$; пространственное разрешение ~ 5 мкм; надежно регистрируемая при шаге 10 мкм концентрация $^{137}\text{Cs} \geq 5 \cdot 10^{13}$ атом/см³ и $^{235}\text{U} \geq 1,5 \times 10^{13}$ атом/см³. Присущие ему доступность, практически полная автоматизация процессов послойного испарения, пробоотбора и управления ими, высокая производительность и малая трудоемкость, сочетающиеся с максимальной представительностью отбора по градиенту концентрации, достаточно высоким пространственным разрешением и низким порогом регистрации, позволяют работать с высокоактивными микротвэлами, существенно расширить номенклатуру радионуклидов, распределения которых могут быть измерены,

и, таким образом, наиболее корректно изучать с их помощью поведение компонентов ядерного топлива и продуктов деления в зависимости от конструкции, технологии изготовления и условий эксплуатации микротвэлов ВТГР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Friskney C., Simpson K. Fission product migration in the coatings of irradiated uranium dioxide HTR fuel particles. — J. Nucl. Mater., 1975, v. 57, p. 333—340.
2. Allelein H. e.a. Laser system for boring and sampling in coated-particle fuel. — Appl. Phys., 1979, v. 50, N 10, p. 6163—6167.
3. Betz G. e.a. Determination of the distribution of fission products in fuel particle coatings by the sputtering technique. — J. Nucl. Mater., 1971, v. 38, p. 77—82.
4. Fukuda K., Iwamoto K. Concentration profiles of fission products in the coating layers of irradiated fuel particles. — Ibid., 1977, v. 66, p. 55—63.
5. Гудков А. Н., Кашпаров В. А., Колобашкин В. М., Котляров А. А. Способ отбора проб и устройство для его осуществления: А. с. № 1149742. — БИ, 1985, № 36, с. 257.

Поступила в Редакцию 22.10.87

УДК 539.4

Влияние среды, имитирующей теплоноситель, на сопротивление материалов тонкостенных элементов и узлов росту усталостной трещины

ВАЙНЕР Л. А.

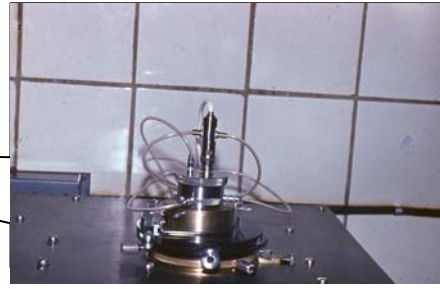
Исследование влияния предварительного нейтронного облучения на сопротивление аустенитных материалов росту усталостной трещины выполнено на плоских образцах толщиной 0,3 или 3 мм с центральным, сквозным надрезом [1] длиной 4 мм и шириной рабочей части 12 мм. Образцы толщиной 3 мм были изготовлены из металла трубной заготовки никелевого сплава X20H45. Заготовку разрезали на диски толщиной 40 мм, которые затем прокатывали до достижения образцом толщины 10 мм и подвергали отжигу при 1050°С в течение 1 ч. Образцы толщиной 0,3 мм вырезали из труб 26 × 0,3 мм, изготовленных из никелевого сплава X20H45 или из стали X14H15. Надрезы на образцах изготавливали электроэрозионным способом проволочным электродом диаметром 0,1 мм. Механические свойства исследованных материалов приведены в таблице. Образцы облучали в активных зонах реактора ВВР-М ИЯИ АН УССР и ЛИЯФ им. Б. П. Константинова. Условия облучения приведены в подрисочных подписях.

Характеристики сопротивления исследованных материалов росту усталостной трещины определяли путем циклического нагружения образцов при

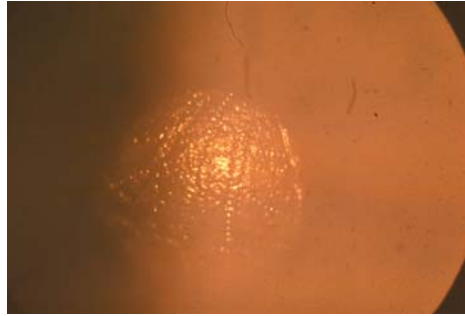
постоянной амплитуде нагрузки. Основные параметры цикла нагрузки: форма синусоидальная, $R \sim 0,1$, частота циклов 10—15 мин⁻¹. Кроме того, часть образцов сплава X20H45 толщиной 0,3 мм испытывали в коррозионной среде нагружением с частотой циклов 0,7—1 мин⁻¹. Образцы испытывали либо на воздухе при 20—350°С, либо в кипящих средах: дистиллированной воде или 3%-ном водном растворе NaCl. В процессе испытаний регистрировалась диаграмма нагрузки-перемещения по линии нагружения, что позволяло определять длину трещины в процессе ее роста по калибровочному графику зависимости податливости образцов от длины трещины. Точность определения длины трещины, размаха нагрузки и т. п. полностью соответствовали требованиям методических указаний [1], в соответствии с которыми обрабатывали результаты испытаний.

Полученные данные представлены на рис. 1, б в виде зависимости скорости роста усталостной трещины dl/dN от коэффициента интенсивности напряжений цикла ΔK .

Из рис. 1 следует, что повышение температуры испытаний от 20 до 350°С на воздухе при частоте циклов нагружения 10—15 мин⁻¹ практически не



Внешний вид установки лазерного пробоотбора с поверхности микровэлов ВТГР



Поверхность микровэла со следами испарения материала