

приемлемо, т.к. глубина фасонного профиля больше выбранных диаметров. Анализ результатов моделирования показывает, что на выбор диаметра круга влияет не только количество зубьев, но и высота профиля фрезы, принятая схема обработки (одним кругом или несколькими) и угол установки круга относительно шлифуемой поверхности. Таким образом, замена опытных испытаний виртуальными по предложенному методу при решении проблем затылования фасонных фрез становится важным средством снижения затрат на подготовку производства и связанной с ней стоимостью и конкурентоспособностью изготавливаемого инструмента.

### *Литература*

1. Семенченко И.И., Матюшна В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. - М.: МАШГИЗ, 1963 - 952 с.

УДК 621.039.53

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСОВ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ**

*Дячэк О.А., научный руководитель – Герасимова А.Г., к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет  
e-mail: ljolja@list.ru*

**Summary.** *The article analyzes the use of witness samples to determine the state of materials for VVER vessels. Three methods of obtaining information about the irradiated materials of the reactor vessel are considered. Requirements for the unloading of sample-sweepers are listed. The advantages and disadvantages of testing on witness samples are described.*

Корпус ядерного реактора является одной из основных преград для выхода продуктов деления во внешнюю среду. Ввиду этого сохранение целостности корпуса считается одной из важных задач в любых штатных и нештатных режимах работы АЭС.

Целью работы является изучение разрушающих методов контроля корпусов реакторов ВВЭР посредством образцов-свидетелей.

Характеристики охрупчивания материала снижаются из-за продолжительного воздействия рабочих температур (тепловое охрупчивание) и нейтронного облучения (радиационное охрупчивание). Радиационный ресурс материала корпуса во многом определяет эксплуатационный ресурс всей АЭС.

В настоящее время есть 3 способа получить информацию об облученных материалах корпуса реактора:

1. В исследовательских реакторах образцы подвергаются предварительному ускоренному облучению. Определяются механические свойства, изучается фазовое структурное состояние материалов.
2. Стандартные образцы-свидетели облучаются непосредственно в реакторах АЭС.
3. Исследуют материалы выводимых из эксплуатации корпусов реакторов. [1]

В связи с тем, что предсказать радиационное охрупчивание материалов при продолжительном воздействии невозможно осуществляются программы контроля по образцам-свидетелям.

Образцы-свидетели используются для мониторинга: изменений механических характеристик металла (временное сопротивление, относительное сжатие и удлинение, предел текучести), характеристик сопротивления хрупкому разрушению (крипическое раскрытие трещин или вязкость разрушения, критическая температура хрупкости), характеристик локальной и сплошной коррозии (коррозия под напряжением, язвенная коррозия, межкристаллитная). [2]

В реактор загружают шесть наборов облучаемых образцов-свидетелей. Они помещаются у внутренней стенки шахты реактора. Помимо образцов-свидетелей загружают в реактор 6 наборов «температурных» образцов, которые размещаются на внутренней поверхности опорной обечайки блока защитных труб. «Температурные» образцы используются для оценки изменений свойств металла, связанных с эффектом старения при продолжительном воздействии температур и нейтронного облучения. [3]

При каждой выгрузке топлива извлекают минимум:

- 6 образцов для определения механических характеристик (3 при комнатной температуре и 3 при расчетной);
- 15 образцов для нахождения критической температуры хрупкости;
- 15 образцов для нахождения критического раскрытия трещины или вязкости разрушения;
- 15 образцов для изучения характеристик коррозии.

#### **Требования к выгрузке образцов-свидетелей**

Облучаемые образцы-свидетели:

- первое извлечение – через 5 лет после начала работы реакторной установки;
- второе извлечение – через 9 лет после начала работы реакторной установки;
- третье извлечение – через 17 лет после начала работы реакторной установки.

Сроки выгрузки остальных наборов образцов-свидетелей устанавливаются по результатам исследования первых наборов образцов.

Температурные образцы-свидетели:

- выгружаются из блока защитных труб в период останова реактора. [3]

#### **Преимущества и недостатки испытаний на образцах-свидетелях.**

Основные преимущества:

- Относительная равномерность облучения образцов-свидетелей.
- Возможность получения опытных данных с флюенсами, которые существенно превышают проектные значения для корпуса реактора.

Второе преимущество дало возможность обосновать продление срока службы корпусов ВВЭР-440/213 в России и за рубежом без компенсирующих мероприятий.

Основные недостатки:

- Образцы, облученные в одном контейнере могут иметь расхождение по флюенсу нейтронов в несколько раз. Это связано с установкой образцов в местах с высоким градиентом плотности потока быстрых нейтронов.

- Высокий коэффициент опережения для ВВЭР-440 при облучении образцов по сравнению с внутренней поверхностью стенки корпуса реактора. В ВВЭР-1000 учли этот недостаток.

- Разброс получаемых из-за неудачного места извлечения образцов основного металла. Из-за этого невозможно оценить термическое старение и как следствие это приводит к сверхконсервативным оценкам радиационного охрупчивания металла корпуса реактора ВВЭР-1000 [2]

**Вывод.** Реализация программы образцов-свидетелей позволяет на основе комплекса материаловедческих исследований убедительно обосновать возможность продления срока службы корпуса, а также разрабатывать новые модели радиационного охрупчивания с учетом фактора времени и реальные механизмы повреждения при облучении.

#### *Литература*

1. Герасимова А. Г., Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС и АЭС : учеб. пособие / А. Г. Герасимова. – Минск : Выш. шк., 2011. – 272 с.
2. Николаев Ю.А., Использование образцов-свидетелей для определения термического охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 / Ю.А. Николаев // Статья НИЦ

Курчатовский институт [Электронный ресурс]: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2012/documents/kms2012-046.pdf> (дата доступа 21.10.2020).

3. Чернов А.А., Исследование состояния металла корпуса водо-водяных реакторов на образцах-свидетелях // Актуальные проблемы энергетики – 2016 – с. 339-347

## РЕАКТИВНЫЙ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК HfO<sub>2</sub>

Зырянова А. С.

Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

e-mail: zyrianova5555@mail.ru

**Summary.** *The effect of the composition of the working gas, the substrate temperature and the target potential and characteristics of thin films of hafnium dioxide on a silicon substrate, obtained by reactive ion-beam sputtering of a metal target, has been studied. It has been established that with an increase in the partial pressure of oxygen from  $2.52 \cdot 10^{-2}$  to  $5.85 \cdot 10^{-2}$  Pa, the dielectric constant decreases by almost 2 times. The transmission and absorption of the films only slightly depend on the composition of the working gas. The band gap is equal to 5.63 eV. With an increase in the substrate temperature, the dielectric constant increases, but at the same time the dielectric losses sharply increase, and a decrease in the specific volume resistance is also observed. Moreover, an increase in the substrate temperature to 573 K leads to a deterioration in the optical characteristics. There is a decrease in transmission and an increase in absorption in the range 450–800 nm. These processes can be associated with the desorption of oxygen from the growing HfO<sub>2</sub> film. At a target potential of  $U_t = 40\text{--}80$  V, a significant decrease in dielectric losses occurred, and at  $U_t = 40$  V, a sharp increase in the specific volume resistance (almost 5 times) was observed, which indicates an intensification of the interaction between oxygen and hafnium.*

Исследовано влияние состава рабочего газа, температуры подложки и потенциала мишени на характеристики тонких пленок диоксида гафния на кремниевой подложке, полученных реактивным ионно-лучевым распылением металлической мишени. Установлено, что при увеличении парциального давления кислорода с  $2,52 \cdot 10^{-2}$  до  $5,85 \cdot 10^{-2}$  Па диэлектрическая проницаемость снижается почти в 2 раза. Пропускание и поглощение пленок незначительно зависели от состава рабочего газа. Ширина запрещенной зоны составила 5,63 эВ. При повышении температуры подложки диэлектрическая проницаемость увеличивается, однако при этом резко увеличиваются диэлектрические потери, а также наблюдается снижение удельного объемного сопротивления. Более того, повышение температуры подложки до 573 К привело к ухудшению оптических характеристик. Произошло снижение пропускания и рост поглощения в диапазоне 450–800 нм. Эти процессы могут быть связаны с десорбцией кислорода из растущей пленки HfO<sub>2</sub>. При потенциале мишени  $U_m = 40\text{--}80$  В происходило значительное снижение диэлектрических потерь, а при  $U_m = 40$  В наблюдалось резкое увеличение удельного объемного сопротивления (почти в 5 раз), что свидетельствует об интенсификации взаимодействия между кислородом и гафнием.

В настоящее время в микроэлектронике отмечается повышенный интерес к тонкослойным пленочным структурам на кремниевой подложке, одним из основных компонентов для которых является гафний. Структуры на его основе могут использоваться в качестве диффузионных барьеров для металлизации (силицид гафния) или материала оптических покрытий (диоксид гафния) [1,2]. Широкий круг соединений гафния относится к так называемым «high-k» материалам, которые перспективны для формирования тонкого подзатворного диэлектрика МОП транзисторов [3].