

на операцию травления и автоклавирования.

Рассмотренная конструкция твэла реактора ВВЭР-1000 является основой для дальнейших разработок и испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Петросьянц. «Атомная энергия», 27, 263 (1969).
2. Power reactors «70». Nucl. Eng. Intern., 15, 120 (1970).

## Исследование твэлов кассеты, проработавшей 17 000 ч в активной зоне реактора ВК-50

В. С. БЕЛОКОПЫТОВ, С. Н. ВОТИНОВ, В. М. САРЫЧЕВ, М. А. ДЕМЬЯНОВИЧ, Г. П. ПЕТИН, А. Б. АНДРЕЕВА, М. Д. ДЕРИБИЗОВ, В. А. ЩЕПЕТИЛЬНИКОВ (С С С Р)

УДК 621.039.548

В Научно-исследовательском институте атомных реакторов им. В. И. Ленина с 1965 г. работает опытный кипящий реактор ВК-50, на котором проводится серия испытаний твэлов, оболочки которых выполнены из сплава  $Zr + 1\% Nb$ . На конференции СЭВ «ВВЭР-68» были доложены результаты исследований твэлов кассеты, проработавшей в активной зоне реактора 5000 ч [1]. В настоящем докладе приводятся данные исследований тепловыделяющей сборки, проработавшей длительное время (17 000 ч) в условиях кипящего реактора ВК-50.

### Условия работы кассеты

Как уже сообщалось [1, 2], кассета реактора ВК-50 представляет собой сборку из 126 стержневых твэлов с сердечниками из спеченной двуокиси урана 2%-ного обогащения. Оболочки твэлов выполнены из сплава  $Zr + 1\% Nb$ , а чехол сборки — из сплава  $Zr + 2,5\% Nb$ .

Кассета была загружена в активную зону реактора в октябре 1965 г. и извлечена в октябре 1968 г. Все это время условия работы кассеты и ее положение в активной зоне были постоянными. На рис. 1 показано расположение кассеты в активной зоне реактора.

Время работы кассеты на различной мощности составляет 17 375 ч. Средний интегральный поток нейтронов равен  $3,8 \cdot 10^{20}$  нейтр/см<sup>2</sup> ( $E > 0,1$  Мэв).

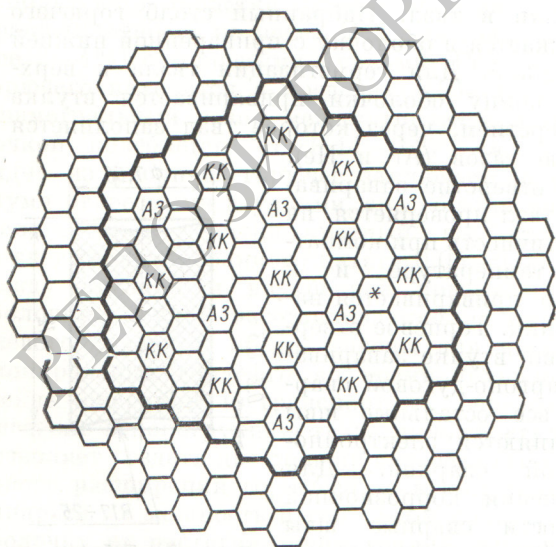
Максимальное выгорание топлива  $13,4 \times 10^3$  Мвт·сутки/т U. Максимальный тепловой поток  $0,85 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup>·ч. Химический состав котловой воды (для установившегося в последние годы водного режима) приведен ниже [3]:

pH . . . . .	6—8
Fe . . . . .	0,04—0,07 мг/кг
Cu . . . . .	до 0,01 мг/кг
Zn . . . . .	до 0,015 мг/кг
O <sub>2</sub> . . . . .	до 0,1 мг/кг
Соли жесткости	10—12 мг-эке/кг

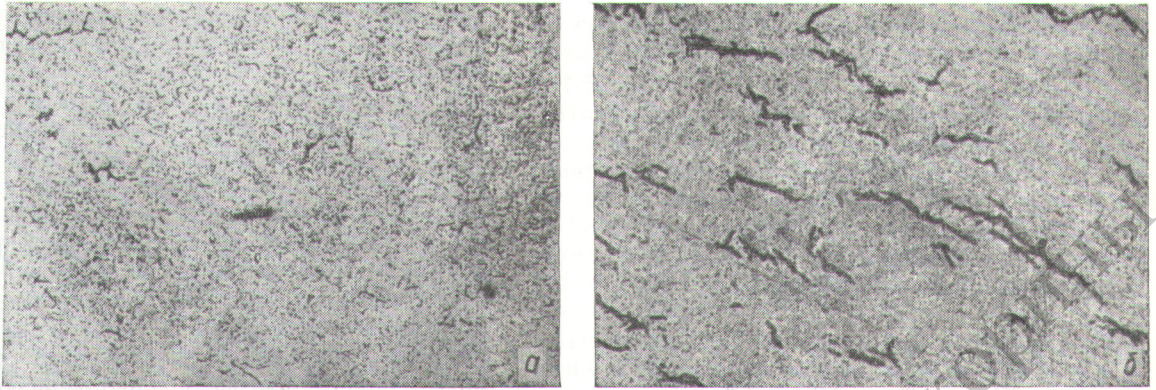
### Результаты исследований

Осмотр кассеты и твэлов, проведенный при первичных исследованиях сборки в «горячей камере» установки ВК-50 и последующих исследованиях в материаловедческом отделе, показал, что кожух кассеты не имеет признаков повышенного окисления: поверхность его серого цвета с небольшим количеством отложений продуктов коррозии контура. На твэлах, за исключением одного, видимых дефектов не обнаружено. Поверхность всех твэлов покрыта коричневым налетом продуктов коррозии. Толщина этих отложений изменяется по высоте элементов и достигает наибольшей величины (~ 0,15 мм) в максимально напряженных участках твэлов.

Для проведения механических и металлографических исследований оболочек были вырезаны образцы из областей максимального и минимального энерговыделения.



Р и с. 1. Расположение исследованной кассеты в активной зоне реактора ВК-50 (помечена крестиком).



Р и с. 2. Микроструктура оболочки твэлов:  
а — верх элемента; б — область максимального энерговыделения.

На рис. 2 приведены фотографии микроструктуры оболочки твэлов внешнего ряда из участков максимального и минимального (50—60 мм от верха элемента) энерговыделений.

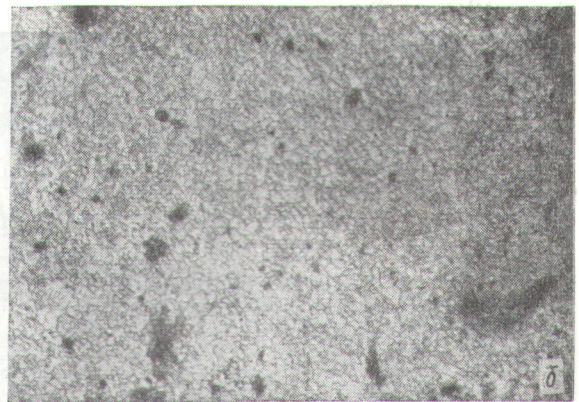
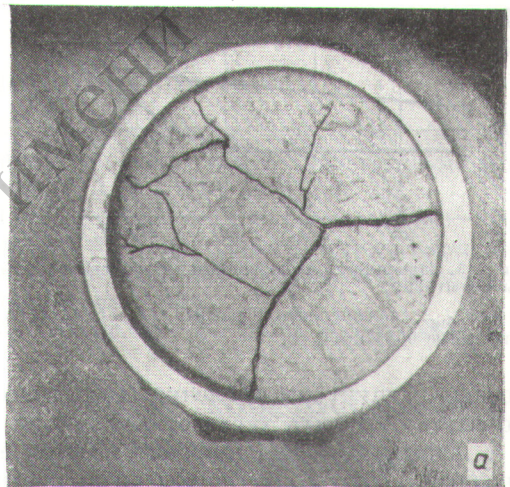
В структуре оболочки наблюдаются гидридные включения, имеющие благоприятную кольцевую ориентацию, причем в области максимального энерговыделения гидридов значительно больше. Расположение гидридов в оболочке твэлов внутренних рядов носит тот же характер, но содержание их несколько меньше. Микротвердость материала оболочки в области максимального энерговыделения как для внешних, так и для внутренних твэлов имеет одну и ту же величину и составляет  $\sim 287$  кг/мм<sup>2</sup>.

Сварные швы узлов герметизации твэлов находятся в удовлетворительном состоянии и дефектов не имеют.

Существенных изменений в структуре топлива не обнаружено. На фотографии микроструктуры (рис. 3) видно обычное растрескивание таблеток двуокиси урана.

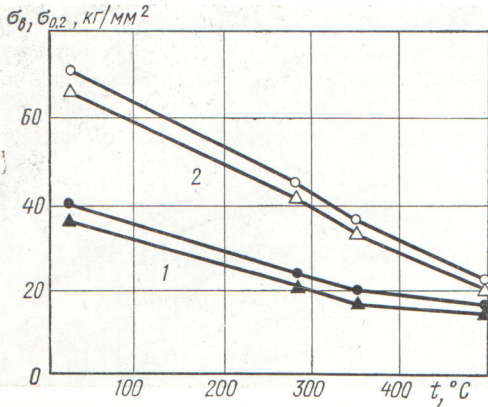
Механические испытания проводились на кольцевых образцах  $\varnothing 10,2 \times 0,65 \times 3$  мм на дистанционной машине ММ-150Д. Температура испытаний 20, 280, 350 и 500°С. Одновременно были испытаны контрольные образцы, вырезанные из оболочки необлученного твэла. Результаты испытаний представлены графически на рис. 4 и 5. Пределы прочности и текучести увеличились соответственно на 80 и 90%, а пластичность при температурах испытания 280 и 350°С, соответствующих рабочим температурам, уменьшилась на 60—70%.

Как уже отмечалось, при первичных исследованиях обнаружен один дефектный твэл. Иссле-



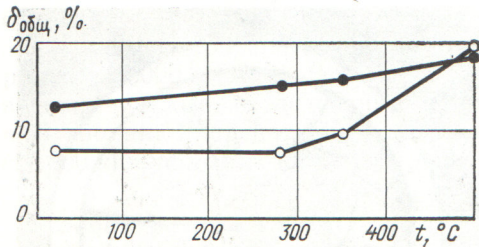
Р и с. 3. Структура топлива:

а — макрошлиф оболочки и топлива; б — микроструктура топлива.



Р и с. 4. Зависимость прочностных свойств от температуры испытания:

1 — контрольные образцы; 2 — облученные образцы; ●○ —  $\sigma_{\theta}$ ; ▲△ —  $\sigma_{0,2}$ .



Р и с. 5. Зависимость пластичности от температуры испытания:

● —  $\delta_{\text{общ}}$  контрольные образцы; ○ —  $\delta_{\text{общ}}$  облученные образцы.

дование структуры оболочки дефектного твэла позволило выявить характерные детали:

1. Окисная пленка просматривается как на внешней, так и на внутренней поверхности (толщина ее составляет 0,4 мм).

2. Наблюдается заметное утонение и наводороживание оболочки со стороны внутренней поверхности (рис. 6).

3. Оболочка имеет «застарелые» трещины с окисной пленкой на поверхности (рис. 7).

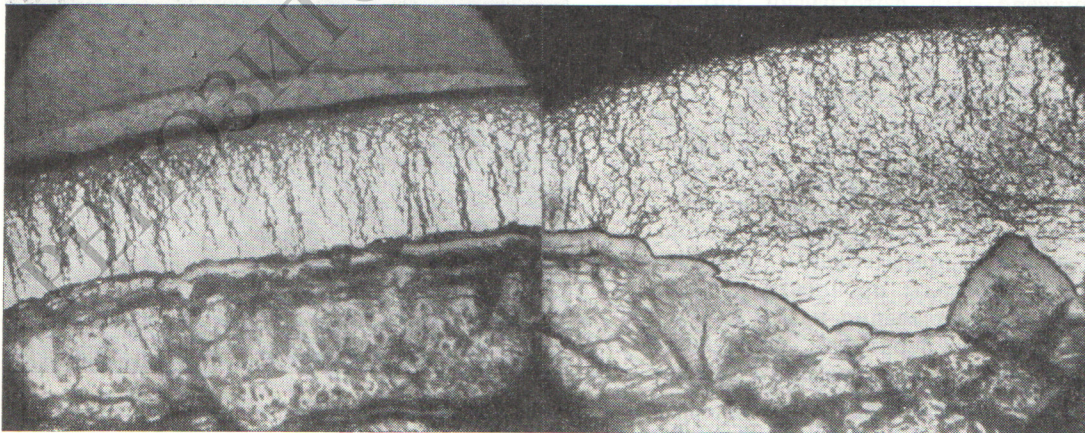
4. Большое количество гидридов с преимущественной радиальной ориентацией (см. рис. 6) в области максимального энерговыделения и отсутствие радиальной ориентации в области минимального энерговыделения.

Проведенные механические испытания образцов, вырезанных из зоны разрушения, показали резкое понижение пластичности по сравнению с пластичностью оболочки необлученного твэла. Часть образцов во время испытания разрушалась хрупко. Пластичность оболочки верхнего конца твэла изменилась не так резко и аналогична пластичности облученных недефектных твэлов.

### Обсуждение результатов

Ранее отмечалось [1], что после работы твэлов в активной зоне реактора ВК-50 в течение 5000 ч происходит значительное упрочнение циркониевого сплава ( $Zr + 1\% Nb$ ) на 70—80% и уменьшение пластичности на 60—70% для температур испытания 280—350° С. Результаты механических испытаний кольцевых образцов из оболочек твэлов, проработавших 17 000 ч в активной зоне реактора ВК-50, свидетельствуют об упрочнении сплава  $Zr + 1\% Nb$  на величину того же порядка. Пластичность при этом сохраняется на достаточно высоком уровне (6—7%).

На основе этих данных делается вывод о том, что уже после 5000 ч работы сплава значения



Р и с. 6. Микроструктура участка оболочки твэла в районе дефекта.



Р и с. 7. Микроструктура оболочки дефектного твэла в районе трещины.

его механических свойств приближаются к установившимся и при более длительной его работе (17 000 ч) резких изменений в механических свойствах не происходит.

Сопоставление результатов по стойкости оболочек и топлива твэлов, проработавших 5000 и 17 000 ч, позволяет отметить хорошую работоспособность твэлов стержневого типа

## Механизм радиационного повреждения и ресурс конструкционных графитов при высоких температурах и нейтронных потоках

В. И. КЛИМЕНКОВ, В. Р. ЗОЛУХИН (СССР)

УДК 621.039.532.2:539.2:539.12.04

Радиационное повреждение графита исследуется в течение почти двух десятков лет (первые публикации относятся к 1955—1956 гг. [1—4]). Решались как практические вопросы, важные для технологии реакторов, так и вопросы, существенные для понимания явления в целом с позиций физики твердого тела.

В настоящее время накоплен значительный экспериментальный и теоретический материал. Однако многие вопросы радиационного повреждения графита остаются невыясненными, что затрудняет прогнозирование данных. Кроме частных вопросов об изменении тех или иных свойств графита под влиянием облучения нерешенным остается вопрос о дефектах в графите, которые определяют различный характер его повреждения в разных диапазонах температурной шкалы.

из сплава  $Zr + 1\% Nb$  при длительной эксплуатации в условиях кипящего реактора ВК-50.

Полученные при исследовании оболочки дефектного твэла металлографические данные говорят о том, что разрушение одного из 126 твэлов произошло в начале работы в результате разгерметизации и проникновения теплоносителя под оболочку через какой-то первичный дефект, а не вследствие окисления сплава теплоносителем.

Проведенные исследования материала оболочек и топлива твэлов аппарата ВК-50 показывают, что после длительной эксплуатации в активной зоне кипящего реактора ВК-50 стержневые твэлы сохраняют работоспособность, а оболочки твэлов, изготовленные из сплава  $Zr + 1\% Nb$ , находятся в удовлетворительном состоянии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Б. Андреева и др. В сб. «Состояние и перспективы развития АЭС с водо-водяными реакторами». Т. 2, М., ИАЭ, 1968, стр. 357.
2. И. Н. Соколов и др. Доклад № 306, представленный СССР на Третью Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
3. И. Н. Соколов. См. [1]. Т. I, стр. 367.

Такое положение вызвано общими затруднениями в теории твердого тела, а также конкретной трудностью описания структуры искусственного поликристаллического графита, которую, несмотря на ясность строения идеального кристалла, приходится рассматривать как сложную многофазную систему.

Именно с позиций, учитывающих равновесие фаз, следовало бы оценить явления, происходящие в графитовых структурах под действием облучения при различных температурах. При этом можно сделать как теоретические выводы о своеобразных типах дефектов и их взаимосвязи, так и практические технологические выводы о ресурсе работы графита в реакторах и путях получения графита с нужными свойствами. Сделаем некоторую попытку такого рассмотрения.