

РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА 3-го ЭНЕРГОБЛОКА ЧАЭС

*И.Н.Вишневский, Э.У.Гриник, Л.И.Чирко, О.В.Дрогаев, Ю.С.Гульчук
Научный центр «Институт ядерных исследований» НАН Украины, г. Киев*

Представлены результаты исследований физико-механических свойств циркониевого сплава технологических каналов и каналов системы управления защитой 3-го энергоблока ЧАЭС, отработавших в течение 850...3750 эффективных суток.

В настоящее время на Украине эксплуатируется один энергоблок с реактором типа РБМК – Чернобыльская АЭС, блок №3. Он вступил в строй в ноябре 1981 г. Безопасная работа реакторов типа РБМК в значительной степени связана с состоянием металла технологических каналов (ТК). Это сложная сварная конструкция. Она состоит из трубы с наружным диаметром 88 мм, толщиной стенки 4 мм и длиной 8 м, изготовленной из сплава $Zr+2,5\%Nb$. К концам циркониевой трубы приварены переходные соединения с трубопроводами из стали марки 08X18H10T для подачи теплоносителя и отвода пароводяной смеси. В исходном состоянии внутренняя и наружная поверхности ТК покрыты тонким (~ 2 мкм) слоем нестехиометрической окиси циркония. Условия эксплуатации: давление и температура теплоносителя на входе 8,2 МПа и 270 °С, на выходе 7,0 МПа и 284 °С соответственно..

Исследование состояния циркониевого сплава ТК и каналов системы управления защитой (КСУЗ) проводилось в институте ядерных исследований НАН Украины (Киев) трижды: в 1987 г., 1995 г. и 2000 г. Вырезка каналов осуществлялась согласно регламенту контроля: максимальная энерговыработка, замеченные изменения формы или геометрических размеров. Исследования физико-механических свойств циркониевого сплава привели к следующим результатам.

Для циркониевых труб 3-го энергоблока ЧАЭС развитие коррозионных процессов следует общим закономерностям коррозии наружной и внутренней поверхностей циркониевой части ТК других энергоблоков с реакторами типа РБМК [1].

Наружная поверхность циркониевых труб после эксплуатации вплоть до 3750 эффективных суток ($\sim 6,6 \cdot 10^{21}$ нейтр./см²) имеет чередующиеся кольцевые полосы темного (~ 25 мм) и светлого (~ 15 мм) цвета в местах расположения графитовых втулок с зазором и втулок плотного контакта. Следов коррозии на наружной поверхности не обнаружено даже для труб, простоявших в 3-м блоке в течение 16 лет, толщина защитного слоя находится в пределах исходных величин ~ 2 мкм.

Как известно, время появления первых коррозионных очагов на внутренней поверхности циркониевой трубы зависит от чистоты сплава и его структуры. Если в материале наблюдается большая плотность второфазных включений, особенно в приповерхностных слоях, то зарождение нодульной

коррозии происходит в районе активной зоны при флюенсе быстрых ($E > 1$ МэВ) нейтронов $\sim 7 \cdot 10^{20}$ нейтр./см² (~ 400 эф.сут. эксплуатации) [1]. Все исследованные ТК и КСУЗ 3-го блока имеют текстурированную мелкозернистую структуру (рис.1) с небольшим количеством достаточно равномерно распределенных второфазных выделений, преимущественно карбидов циркония размерами 1...5 мкм. В среднем расстояния между ними составляет 60...100 мкм.

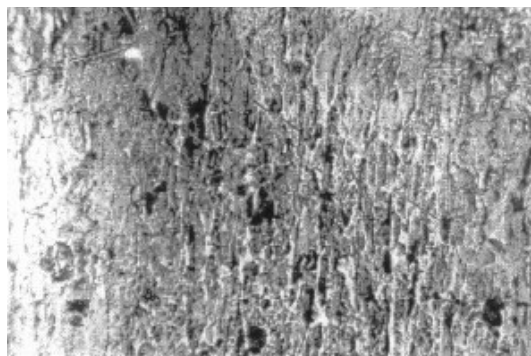


Рис.1. Типичная структура циркониевого сплава ТК 3-го блока ЧАЭС. Шлиф выполнен в осевом направлении. Увеличение $\times 1200$

Необходимо отметить, что материал каналов СУЗ имеет несколько большую плотность распределения второфазных частиц, но из-за более мягких условий эксплуатации (максимальная температура 75 °С и давление 0,3...0,5 МПа) менее подвержен коррозии. Такая структура сплава ТК (см. рис.1) является очень стойкой по отношению к коррозии, поэтому даже при флюенсе $\sim 1,5 \cdot 10^{21}$ нейтр./см² (~ 850 эф.сут.) признаков нодульной коррозии на внутренней поверхности труб не обнаружено – под равномерным слоем отложений красно-коричневого цвета толщиной ~ 1 мкм выявляется неповрежденная защитная окисная пленка толщиной ~ 2 мкм.

После облучения до флюенсов свыше $\sim (5...6,6) \cdot 10^{21}$ нейтр./см² (2900...3750 эфф.сут.) наблюдается разная картина коррозионного повреждения внутренней поверхности в зависимости от "возраста" коррозионных нодулей (особенно в местах расположения дистанционирующих решеток) (рис.2).

Общим для всех каналов является преимущественная коррозия циркониевого сплава в местах

выделения вблизи внутренней поверхности других фаз.

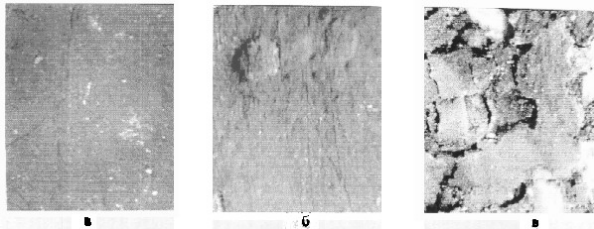


Рис. 2. Коррозионное повреждение внутренней поверхности циркониевой трубы ТК после облучения $> 5 \cdot 10^{21}$ нейтр./см²; а - вблизи переходника; б - активная зона; в - район дистанцирующих решеток. Увеличение $\times 18$

Нодули, достигая толщины ~ 100 мкм, разрушаются послойно вдоль образующей трубы. Между слоем окиси циркония и основным металлом наблюдается гидридная прослойка толщиной $\sim 1 \dots 4$ мкм, очень слабо связанная с матрицей сплава. Отдельные мелкие гидридные включения ($3 \dots 15$ мкм) ориентированы хаотично и встречаются как вблизи внутренней поверхности канала, так и в его толще. Основная часть гидридов высаживается вокруг второфазных частиц (ZrC) в полях напряжений, которые образуются из-за значительной разницы коэффициента радиационного распухания второфазных частиц и матрицы циркониевого сплава (рис.3). Вследствие небольшой плотности распределения других фаз поля напряжений не перекрываются, и возможность хрупкого растрескивания стенки труб даже после длительных времен эксплуатации отсутствует.

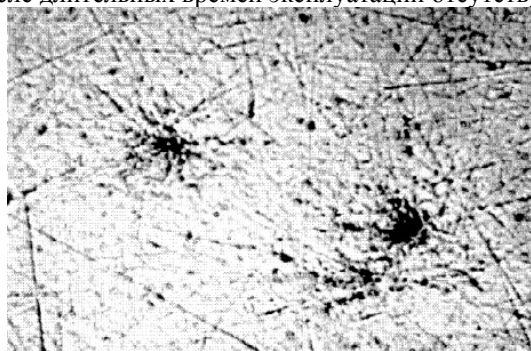


Рис. 3. Гидриды в полях напряжений вокруг второфазных частиц после облучения $6.6 \cdot 10^{21}$ нейтр./см². Увеличение $\times 800$

Содержание водорода в циркониевом сплаве измерялось с помощью водородного анализатора RH-402. Для всех исследованных каналов 3-го энергоблока ЧАЭС значения концентрации водорода не превышает 33 ppm, что гораздо ниже допустимого значения (рис.4,а). Зависимость от плотности потока очень слабая, хотя для отдельных каналов все же заметная (см. рис.4 б). Таким образом, полученные данные о количестве водорода в циркониевом сплаве и морфология выделения гидридов свидетельствуют об отсутствии признаков водородного охрупчивания [2]. Кратковременные механические свойства центральных частей ТК 3-го энергоблока ЧАЭС (рис.5) в основном согласуются со значениями для циркониевого сплава после облучения до $\sim 5 \cdot 10^{21}$ нейтр/см² [3], но предел текучести превышает данные [3]. Упрочнение циркониевого сплава ТК

после облучения флюенсом более $5 \cdot 10^{21}$ нейтр./см² по сравнению с исходными значениями предела прочности [4] составляет 53% при температуре испытаний 20⁰С, а коэффициент деформационного упрочнения составляет 0,945.

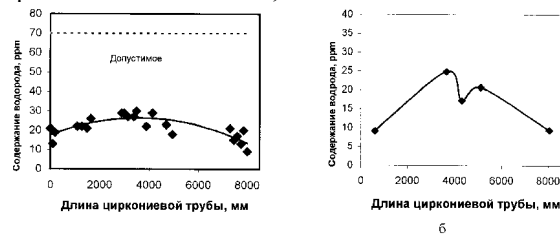


Рис.4. Содержание водорода в циркониевом сплаве труб ТК; а - усредненное по всем исследованным трубам с флюенсом $> 5 \cdot 10^{21}$ нейтр./см²; б - распределение водорода в трубе, центр которой облучен до флюенса $6.6 \cdot 10^{21}$ нейтр./см²

Необходимо отметить, что в районе переходных соединений, находящихся вне активной зоны, упрочнение составляет 16%, а отношение пределов текучести и прочности совпадает с исходным 0,85 [4].

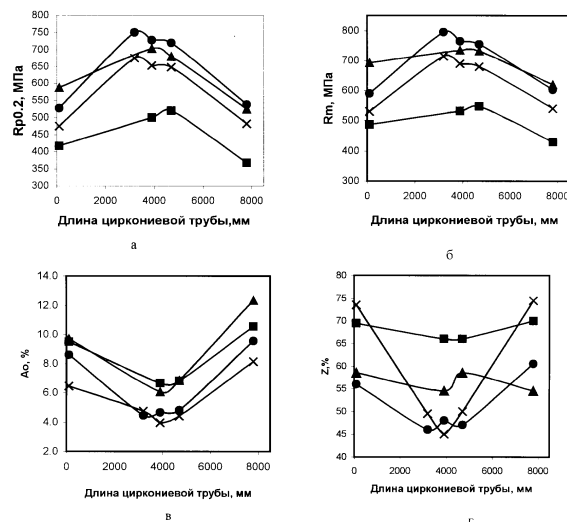


Рис.5. Прочностные характеристики сплава ТК 3-го энергоблока ЧАЭС после облучения $\sim 6 \cdot 10^{21}$ нейтр/см²

а - предел текучести; б - предел прочности, в - общее удлинение; г - сужение; σ , ν , $T_{исп} = 20$ и 300°C для ТК; λ , $X_{исп} = 20$ и 100°C для КСУЗ соответственно.

Оценка сопротивления ползучести материала труб ТК является одним из критических параметров работоспособности системы канал-кладка, поскольку диаметральная деформация трубы ТК ограничена конструктивно-технологическим зазором. Скорость деформации в диаметральном (рассчитанная относительно диаметров труб в активной зоне (АЗ) и вблизи переходных соединений) и осевом направлении (рассчитанная по удлинению ТК относительно длины тепловыделяющей сборки 6 м) составляет $1,02 \cdot 10^{-5} \% \text{ч}^{-1}$ и $2,4 \cdot 10^{-6} \% \text{ч}^{-1}$ соответственно. Полученные данные радиационной ползучести совпадают со значениями, приведенными для отожженного сплава Zr+2,5%Nb в работе [3]. В циркониевом сплаве труб с повышенной плотностью второфазных частиц на-

блюдается более высокая ползучесть:

$4 \cdot 10^{-6} \% \text{ч}^{-1}$. Такие трубы характеризуются заметно меньшими толщинами стенок канала вплоть до нижнего допустимого значения при максимальных флюенсах.

Критическое раскрытие трещин (КРТ) для участков труб ТК из АЗ составляет 0,103...0,285 мм в осевом направлении и 0,024...0,069 мм в радиальном направлении. Полученные данные для осевого направления неплохо соответствуют зависимости КРТ от флюенса нейтронов, приведенной в [3], для радиального направления соответствие несколько хуже. Большой разброс полученных значений связан, по-видимому, с тем, что исследования проводились на образцах без предварительно выращенной трещины по методике моделирования трещины тонким надрезом [5].

Остаточные напряжения в центральной части труб ТК после эксплуатации свыше 3500 эф.сут. не превышает 75 МПа. Это говорит о том, что в циркониевом сплаве ТК протекают релаксационные процессы, которые реализуются по механизму радиационной ползучести. Эти процессы снижают уровень напряжений в несколько раз, а то и на порядок (до эксплуатации остаточные напряжения составляют 250...350 МПа). В трубах КСУЗ наблюдаются относительно высокие растягивающие напряжения (~220 МПа), обусловленные, по-видимому, отсутствием в

циркониевом сплаве заметных релаксационных процессов, что связано с условиями их эксплуатации.

Таким образом, результаты исследований материалов ТК и КСУЗ 3-го энергоблока ЧАЭС показали, что материал каналов после облучения в течение 2900...3750 эф.ч (флюенс $(5...6,6) \cdot 10^{21}$ нейтр./см²) находится в состоянии, характерном для облучения такими высокими флюенсами.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.С.Карасев и др. Нодульная коррозия циркониевых труб канальных реакторов. // *Атомная энергия*, 1992, т.72, вып.2, с.124-130.
2. Е.Ю.Ривкин, Б.С.Родченков, В.М.Филатов. *Прочность сплавов циркония*. М.: Атомиздат, 1974.
3. А.М.Васнин, Е.Ю.Ривкин, Б.С.Родченков, Л.П.-Синельников. Прочность труб технологических каналов. // *Труды Международной конференции по радиационному материаловедению, Алушта, 22-25 мая 1990 г.* Т.8, с.28-34.
4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭГ-7-2002-86. М.: "Энергоатомиздат", 1989.
5. Испытания на трещиностойкость образцов, изготовленных из технологических каналов и каналов системы управления и защиты реакторов РБМК: Отчет НИКИЭТ. Методика 23.4416. М., 1990.