

УДК 621.039.53

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

Дячёк О.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Герасимова А.Г.

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 (критическое раскрытие трещин или вязкость разрушения, критическая температура хрупкости), характеристик локальной и сплошной коррозии (коррозия под напряжением, язвенная коррозия, межкристаллитная).

В реактор загружают шесть наборов облучаемых образцов-свидетелей. Они помещаются у внутренней стенки шахты реактора. Набор содержит из пять цилиндрических контейнерных сборок. В первых трех наборах контейнеры размещаются в два яруса. Для определения текущего состояния металла используются образцы верхнего яруса. Для прогнозных оценок используются образцы нижнего яруса [4].

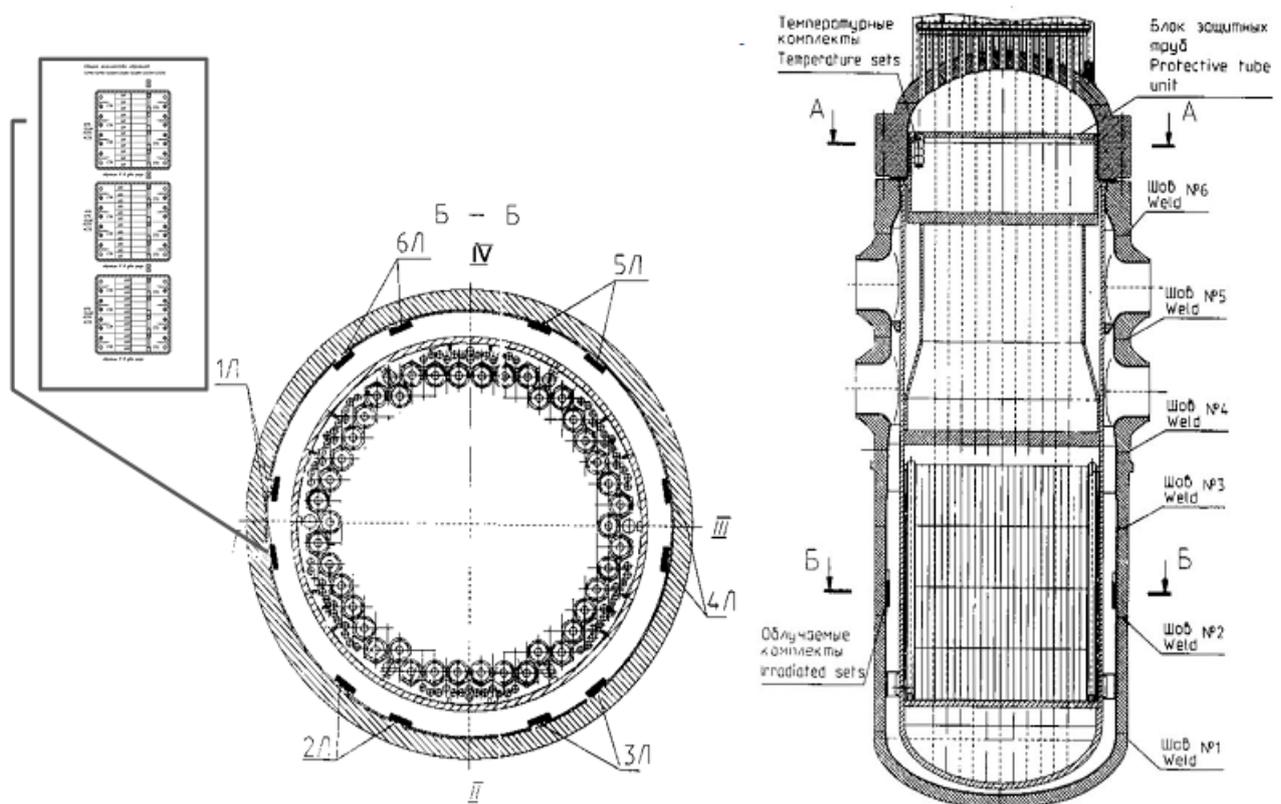


Рисунок 1 – Месторасположение образцов-свидетелей в реакторах типа ВВЭР

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.

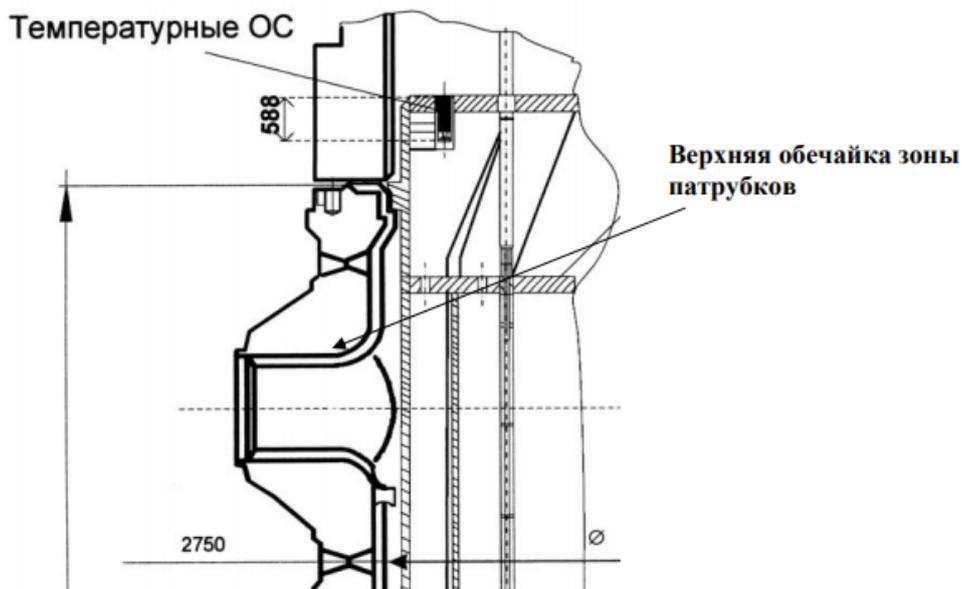


Рисунок 2 – Месторасположение температурных образцов-свидетелей в корпусе ВВЭР

Контейнеры с образцами располагаются на внутренней стенке корпуса реактора в районе активной зоны. Контейнеры фиксируются в специальных держателях, что дает возможность вынимать и вкладывать дополнительно новые образцы [4].

На рисунке 3 приведена фотография контейнерной сборки до установки на корпус реактора.

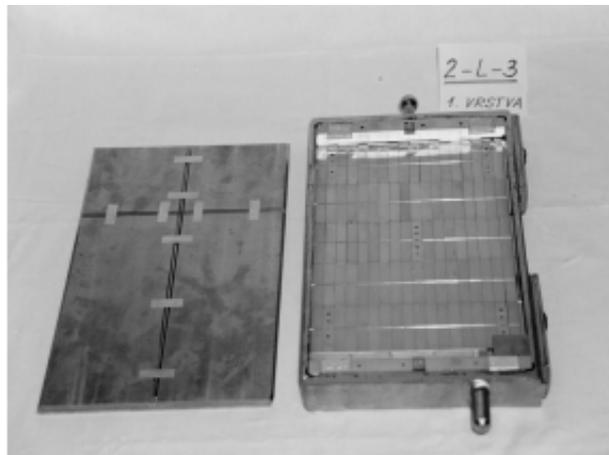
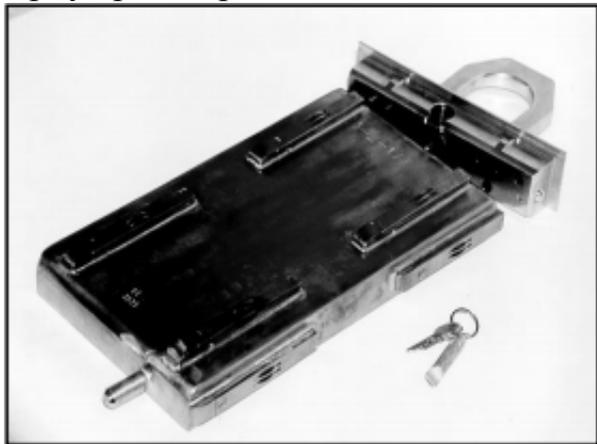


Рисунок 3 – Контейнерная сборка до установки на корпус реактора

На рисунке 4 приведена фотография размещения двух контейнеров на стенке корпуса реактора [2].

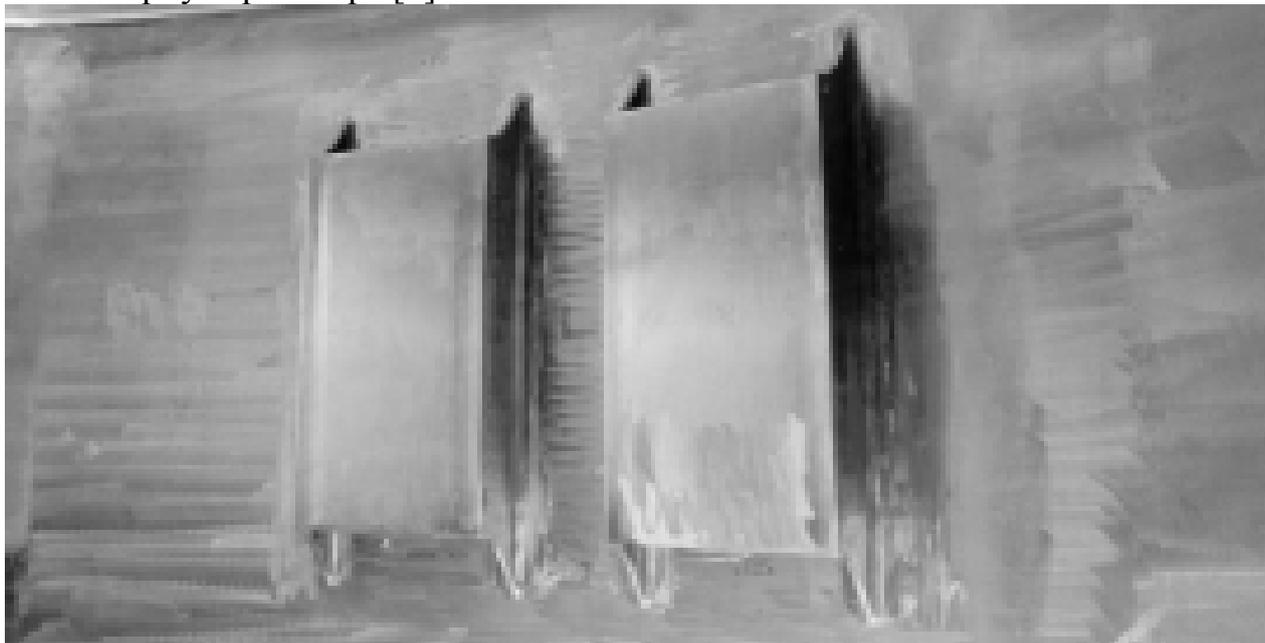


Рисунок 4 –Размещение двух контейнеров на стенке корпуса реактора

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].

Определение критической температуры хрупкости металла

После выгрузки образцов-свидетелей необходимо найти критическую температуру хрупкости металла. Она характеризуется энергией, которую необходимо затратить для разрушения (в качестве меры берется ударная вязкость) и видом излома образцов (мерой является величина поперечного расширения образца в зоне излома или процент вязкой составляющей в изломе).

Если в режиме эксплуатации выполняется условие $K \leq [K]_i$, то сопротивление к хрупкому разрушению считается обеспеченным. K – допустимое значение коэффициента интенсивности напряжений.

Индекс i принимается различным в зависимости от случая, принимаемого в расчетах:

- $i = 1$, если условия эксплуатации нормальные;
- $i = 2$, если нормальные условия эксплуатации нарушены;
- $i = 3$, если ситуация аварийная.

Критическая температура хрупкости T_k материала определяется по следующей формуле:

$$T_k = T_{k0} + \Delta T_T + \Delta T_N + \Delta T_F,$$

где $T_{k0} - T_k$ в начальном состоянии;

ΔT_T – сдвиг T_k из-за температурного старения;

ΔT_N – сдвиг T_k из-за циклической повреждаемости;

ΔT_F – сдвиг T_k из-за влияния потока нейтронов.

Температурный интервал выбирают при проведении испытаний. В температурный интервал должны входить следующие точки: $(T_k \pm 10)$, $(T_k \pm 20)$, $(T_k \pm 30)$ °C. Испытания проводятся в интервале температур $T_k - 10 < T < (T_k + 40)$ °C, если примерное значение T_k предварительно известно. Если примерное значение неизвестно, то рекомендуют определять значение ударной вязкости при 20 °C и анализируя полученный результат определить интервал следующих температурных испытаний. При полностью вязком изломе и низких значениях ударной вязкости – испытания проводят при повышенных температурах; в случае если излом полностью вязкий и значения ударной

вязкости высокие, то последующее испытание необходимо проводить при пониженных температурах. Если излом вязко-хрупкий необходимо увеличить температурную область испытаний и в зоне положительных, и в зоне отрицательных температур [3].

Проведение испытаний при пониженных температурах. С помощью жидкого азота или смеси жидкого азота (или сухого льда) с этиловым спиртом или ацетоном осуществляют охлаждение образцов-свидетелей. Температура кипения жидкого азота $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура замерзания этилового спирта составляет $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для ацетона $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Охлаждение образцов-свидетелей парами жидкого азота осуществляется в температурном интервале от -90 до $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. С помощью термопары, помещенной в криостат с партией испытуемых образцов и зачеканенной в контрольном образце, устанавливается температура образца. С помощью термометра выполняется градуировка термопары контрольного образца. Погрешность термометра не должна превышать $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Образцы необходимо немного переохладить для того, чтобы убедиться в стабилизации температуры. Зависимость значений температуры переохлаждения образцов-свидетелей от температуры испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость температуры переохлаждения образцов-свидетелей от температуры испытания

Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	Переохлаждение, $^{\circ}\text{C}$
< -60	4 – 6
$-60 \dots -40$	3 – 4
$-40 \dots +10$	2 – 3

Через 3–5 с после вынимания из криостата образец-свидетель размещают на опорах копра и испытывают.

Проведение испытаний при повышенных температурах.

В печь помещают партию с контрольным образцом и нагревают до необходимой температуры. Образцы необходимо немного перегреть для того, чтобы убедиться в стабилизации температуры. С помощью термопары, зачеканенной в контрольном образце устанавливается температура образца. Зависимость значений температуры перегрева образцов-свидетелей от температуры испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость температуры перегрева образцов-свидетелей от температуры испытания

Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	Перегрев, $^{\circ}\text{C}$
$+30 \dots +200$	3 – 5
$+200 \dots +400$	5 – 10
$+400 \dots +500$	10 – 15

Через 3–5 с после вынимания из печи образец-свидетель размещают на опорах копра и испытывают [5].

Обработка результатов.

Ударная вязкость определяется по формуле:

$$KCV = \frac{K}{S_0},$$

где K – работа разрушения образца;

S_0 – начальная площадь поперечного сечения в зоне надреза, м².

Вязкая составляющая в изломе определяется по формуле:

$$B = \frac{S_0 - S_x}{S_0} \cdot 100\%,$$

где S_x – площадь хрупкой фазы в изломе, м².

В роли T_k принимается температура, для которой должны быть выполнены условия:

1. при T_k средневзвешенное значение KCV должно быть не менее значений, приведенных в таблице 3. Минимальные значения KCV – не менее 70% значений, приведенных в таблице 4;

2. при $(T_k + 30)$ °C средневзвешенное значение KCV должно быть не менее значений, приведенных в таблице 4. Минимальные значения KCV – не менее 70% значений, приведенных в таблице 4, минимальное значение вязкой составляющей в изломе B – не менее 50%.

Таблица 3 – Зависимость KCV от предела текучести

Предел текучести материала при 20 °C, МПа(кгс/мм)	Ударная вязкость KCV , Дж/см ² (кгс·м/см ²)
До 304 (31) включая	29 (3,0)
304 (31) – 402 (41) включая	39 (4,0)
402 (41) – 549 (56) включая	49 (5,0)
549 (56) – 687 (70) включая	59 (6,0)

Таблица 4 – Зависимость KCV от предела текучести

Предел текучести материала при 20 °C, МПа(кгс/мм)	Ударная вязкость KCV , Дж/см ² (кгс·м/см ²)
До 304 (31) включая	44 (3,0)
304 (31) – 402 (41) включая	59 (4,0)
402 (41) – 549 (56) включая	74 (5,0)
549 (56) – 687 (70) включая	89 (6,0)

Если одно из 2 условий не выполняются на одном из испытываемых образцов, то можно провести испытания еще на трех образцах. Оценивание соответствия результатов вышеприведенным условиям производят по показаниям 5 образцов. Образец-свидетель с неудовлетворительными показателями, полученными при первом испытании исключают.

Если по крайней мере на одном образце-свидетеле при вспомогательных испытаниях получились неудовлетворительные результаты, тогда за

критическую температуру необходимо принять соседнюю температуру (более высокую). Для неё результаты испытания должны соответствовать вышеприведенным условиям [5].

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. ПНАЭ Г-008-89 Правила устройств и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных электрических станций.
4. Чернов А.А., Исследование состояния металла корпуса водо-водяных реакторов на образцах-свидетелях // Актуальные проблемы энергетики. – 2016. – С. 339-347.
5. Гольцев, В.Ю. Методы механических испытаний и механические свойства материалов / В.Ю. Гольцев [Электронный ресурс]: <https://studfile.net/preview/412137/page:16/> (дата доступа 21.10.2020).