

УДК 621.039.53

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА КОРПУСА ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ НА ОБРАЗЦАХ СВИДЕТЕЛЯХ

Чернов А. А.

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

Корпус реактора ВВЭР является одним из основных барьеров для выхода продуктов деления в окружающую среду. В связи с этим сохранение целостности корпуса реактора в любых штатных и аварийных режимах эксплуатации является одной из важнейших задач в обеспечении безопасности АЭС.

Целью работы является анализ программы, используемой для оценки состояния металла корпусов водо-водяных реакторов.

Радиационный ресурс материала корпуса в значительной мере определяет эксплуатационный ресурс всей ядерной установки. Материалы, из которых изготовлен корпус, эксплуатируются в условиях одновременного воздействия интенсивных потоков ионизирующего излучения и высокой температуры. Облучение проявляется в потере пластичности и заметном сдвиге интервала перехода от вязкого разрушения к хрупкому в область более высокой температуры. Этот сдвиг увеличивает вероятность разрушения корпуса при нормальных условиях эксплуатации и, особенно при аварийном расхолаживании и термошоках [1].

В настоящее время существует три пути получения информации об облученных материалах корпуса реактора [2]:

1. Ускоренное облучение в исследовательских реакторах заранее изготовленных различных типов образцов для определения комплекса механических свойств, а также изучение фазово-структурного состояния материалов.
2. Облучение штатных образцов-свидетелей непосредственно в реакторах атомных электростанций.
3. Исследование материалов корпусов реакторов, выведенных из эксплуатации путем вырезки проб-темплетов.

Ввиду того, что достоверно прогнозировать радиационное охрупчивание материалов корпусов реакторов при длительной эксплуатации не представляется возможным, реализуются программы контроля по образцам-свидетелям. Использование данной программы позволяет учитывать различный химический состав металла корпуса реактора: содержание легирующих и примесных материалов. Перечень характеристик, определяемых на образцах-свидетелях, места их установки и способы крепления приводится в конструкторской документации и, частично, в «Правилах устройства и безопасности эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-008-89». Последние также регламентирует количество образцов-свидетелей на каждый вид испытаний, сопровождение их при облучении индикаторами нейтронного потока и температуры, сроки испытаний и отчетность по результатам испытаний. Облучаемые образцы обычно располагают у внутренней стенки шахты в пространстве между выгородкой и блоком защитных труб (рисунок 1) [3].

Обычно в реактор загружается шесть комплектов, каждый из которых состоит из пяти цилиндрических контейнерных сборок. В трех комплектах контейнеры расположены в двух ярусах: один над другим. Образцы верхнего яруса предназначены для определения текущего состояния металла корпуса реактора, а нижнего – для прогнозных оценок. Также, кроме образцов-свидетелей в реактор загружается шесть комплектов «температурных» образцов, которые размещаются в верхней части блока защитных труб под крышкой реактора. Они предназначены для оценки изменений свойств металла, связанных с эффектами старения под влиянием термических и радиационных воздействий.

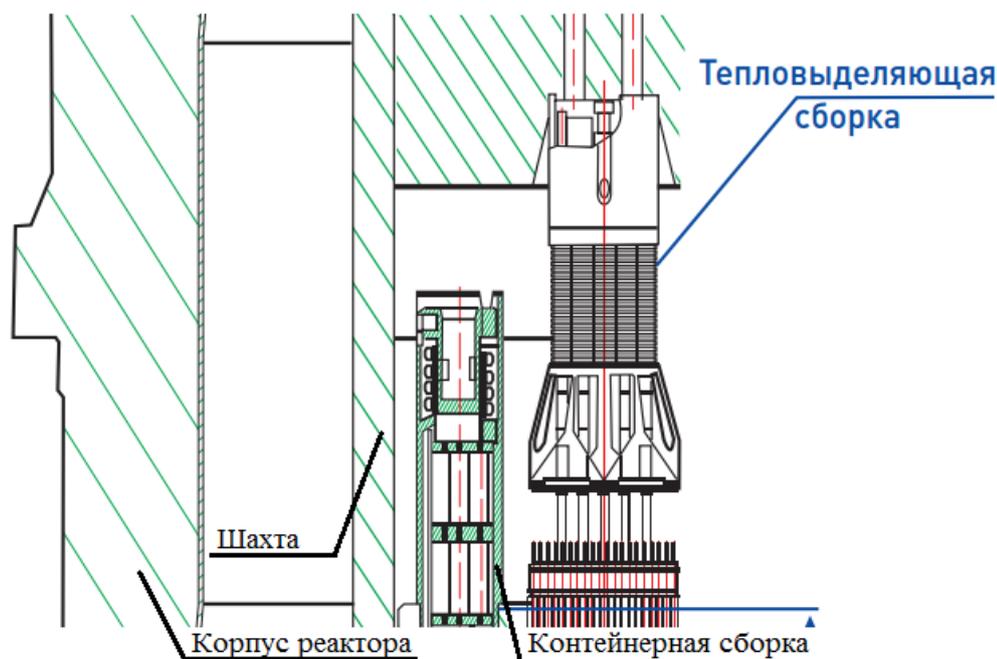


Рисунок 1 – Расположение контейнеров с облученными образцами-свидетелями в реакторе относительно внутрикорпусных устройств

Минимальное количество образцов-свидетелей, извлекаемых при каждой выгрузке топлива, составляет:

- не менее шести образцов для определения механических свойств (не менее трех при комнатной температуре и не менее трех при расчетной температуре);
- не менее пятнадцати образцов для определения критической температуры хрупкости;
- не менее пятнадцати образцов для определения вязкости разрушения или критического раскрытия трещины;
- не менее пятнадцати образцов для изучения характеристик коррозии.

После извлечения образцов определяют критическую температуру хрупкости металла.

Она подразумевает температуру, при которой происходит изменение характера разрушения материала от хрупкого к вязкому. Определяют ее по энергии затрачиваемой на разрушение, в качестве показателя которой принимается ударная вязкость, и по виду излома образцов, в качестве показателя, которого принимается доля вязкой составляющей в изломе или значение поперечного расширения образца в зоне излома.

Сопротивление хрупкому разрушению считается обеспеченным, если для выбранного дефекта в виде трещины в рассматриваемом режиме эксплуатации выполняется условие:

$$K \leq [K]_i$$

где K – допускаемое значение коэффициента интенсивности напряжений.

Индекс i указывает, что допускаемое значение коэффициента интенсивности напряжений выбирают различным в зависимости от расчетного случая:

- $i=1$ – для нормальных условий эксплуатации;
- $i=2$ – для нарушения нормальных условий эксплуатации;
- $i=3$ – для аварийной ситуации.

Исходные температурные зависимости принимают по данным, приведенным в соответствующих аттестационных отчетах по материалам (основной металл, сварные соединения).

Критическую температуру хрупкости материала определяют по формуле:

$$T_k = T_{k0} + \Delta T_T + \Delta T_N + \Delta T_F \quad (1)$$

где T_{k0} – критическая температура хрупкости материала в исходном состоянии;

ΔT_T – сдвиг критической температуры хрупкости вследствие температурного старения;

ΔT_N – сдвиг критической температуры хрупкости вследствие циклической повреждаемости;

ΔT_F – сдвиг критической температуры хрупкости вследствие влияния нейтронного облучения.

Значения слагаемых принимают по данным соответствующих аттестационных отчетов по материалам или на основе технических решений, согласованных с регулирующим органом.

Перед проведением испытания выбирают температурный интервал. Он должен быть таким, что бы в него входили точки $(T_k \pm 10)$, $(T_k \pm 20)$, $(T_k \pm 30)$ °С. Если ориентировочное значение критической температуры хрупкости заранее известно, то допускается проводить испытание в интервале температур $T_k - 10 < T < (T_k + 40)$ °С. В случае если ориентировочное значение неизвестно, рекомендуется определить значение ударной вязкости при 20 °С и в зависимости от полученного при этой температуре результата определить интервал дальнейших температурных испытаний. При полностью вязком изломе и высоких значениях ударной вязкости предварительного образца дальнейшее испытание следует проводить при пониженных температурах; при полностью вязком изломе и низких значениях ударной вязкости – при повышенных температурах; при вязко-хрупком изломе – расширить температурную область испытаний как в области отрицательных, так и положительных температур [5].

Проведение испытаний при пониженных температурах. Охлаждение образцов осуществляется с помощью жидкого азота (температура кипения –196 °С) или смесью жидкого азота или сухого льда с незамерзающей при температуре испытания и нетоксичной жидкостью, например, этиловым спиртом, ацетоном (температура замерзания –100 и –90 °С соответственно). В температурном интервале от –90° до –196 °С охлаждение образцов осуществляется парами жидкого азота. Температура образца устанавливается с помощью термопары, зачеканенной в контрольном образце и помещаемой в криостат с партией образцов, предназначенных для испытания. Градуировка термопары контрольного образца осуществляется с помощью термометра с погрешностью, не превышающей $\pm 0,5$ °С.

Образцы для испытаний при пониженных температурах следует несколько переохладить и убедиться в стабилизации температуры. В таблице 1 приведены значения температуры переохладения образца в зависимости от температуры испытания. После извлечения из криостата в течение 3–5 с образец должен быть помещен на опоры копра и испытан.

Проведение испытаний при повышенных температурах. Партия образцов с контрольным образцом, в котором зачеканена термопара, помещается в печь и нагревается до заданного уровня температуры с перегревом по отношению к температуре испытания. Необходимо убедиться в стабилизации температуры. Температуру образца устанавливают с помощью термопары, зачеканенной в контрольном образце. В таблице 1 указаны температуры перегрева образца в зависимости от температуры его испытания. Образец после извлечения из печи в течение 3–5 с должен быть помещен на опоры копра и испытан.

Обработка результатов. Для каждого из испытанных образцов определяют ударную вязкость, вязкую составляющую в изломе и поперечное расширение образца.

Ударную вязкость KCV определяют, как отношение работы разрушения образца к площади нетто-сечения в зоне надреза:

$$KCV = \frac{K}{S_0}, \quad (2)$$

где K – работа удара;

S_0 – начальная площадь поперечного сечения в месте концентратора, м^2 (см^2).

Таблица 1 – Зависимость температуры образца от температуры испытания

Температура испытания, °С	Переохлаждения, °С	Перегрева, °С
От -60 и ниже	4 – 6	–
–60 до –40	3 – 4	–
–40 до +10	2 – 3	–
+30 до +200	–	3 – 5
+200 до +400	–	5 – 10
+400 до +500	–	10 – 15

Значения вязкой составляющей в изломе B определяют планиметрированием площади хрупкой фазы в изломе:

$$B = \frac{S_0 - S_x}{S_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где S_x – площадь хрупкой фазы в изломе, м^2 (см^2).

В качестве критической температуры хрупкости T_k принимают температуру, для которой выполняются следующие условия:

– при температуре T_k среднее арифметическое значение ударной вязкости должно быть не ниже значений, указанных в таблице 2, а минимальные значения ударной вязкости – не ниже 70 % значений, указанных в таблице 3;

– при температуре $(T_k + 30)$ °С среднеарифметическое значение ударной вязкости должно быть не ниже значений, указанных в таблице 3 минимальные значения ударной вязкости – не ниже 70 %, указанных в таблице 3, минимальное значение вязкой составляющей в изломе – не ниже 50 %.

Таблица 2 – Зависимость ударной вязкости от предела текучести

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

Если на одном из испытанных образцов не будет удовлетворяться какое-либо из условий, указанных в пунктах 1 и 2, допускается проведение испытаний еще трех образцов. При этом при определении соответствия полученных результатов требованиям пунктов 1 и 2 используют показания пяти образцов за исключением образца, для которого при первом испытании были получены неудовлетворительные результаты.

Таблица 3 – Зависимость ударной вязкости от предела текучести

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

Если при дополнительных испытаниях хотя бы на одном образце будут получены неудовлетворительные показатели, то за критическую температуру T_k принимают ближайшую более высокую температуру, при которой результаты испытания удовлетворяют требованиям пунктов 1 и 2 [5].

Достоинства и недостатки программы образцов-свидетелей. Разработка программ образцов-свидетелей, как и других проектных решений – это эволюционный процесс. Каждая следующая программа создавалась с учетом ошибок предыдущих версий и имеет свои достоинства и недостатки. Основным недостатком программ образцов-свидетелей ВВЭР-440 является высокий коэффициент опережения при облучении образцов по отношению к внутренней поверхности стенки корпуса реактора. Это потребовало дополнительного обоснования представительности данных образцов-свидетелей для оценки состояния металла корпуса реактора. Основным достоинством этих программ является относительная равномерность облучения образцов и возможность получения экспериментальных данных с флюенсами, существенно превышающими проектные значения для корпуса реактора. Именно это позволило обосновать возможности продления срока службы корпусов ВВЭР-440/213 в России и за рубежом без компенсирующих мероприятий. В следующем проекте (ВВЭР-1000) был учтен недостаток, связанный с высоким коэффициентом опережения. Для установки образцов-свидетелей в реакторе было выбрано место, в котором плотность потока быстрых нейтронов не более чем в 4 раза превышает этот показатель на стенке корпуса реактора, что является основным преимуществом программы образцов-свидетелей ВВЭР-1000.

Основными недостатками программы являются:

– установка образцов-свидетелей в местах с большим градиентом плотности потока быстрых нейтронов по высоте и азимуту контейнерной сборки. В результате образцы, облученные в одной контейнерной сборке, могут в несколько раз отличаться друг от друга по флюенсу нейтронов, накопленному в процессе облучения. Это не давало возможности собирать однородно облученные группы образцов для механических испытаний;

– неудачное место вырезки образцов-свидетелей основного металла. Из-за этого разброс экспериментальных данных испытаний образцов-свидетелей столь велик, что не позволил выполнить адекватные оценки температурного старения на основании штатных комплектов и привел к сверхконсервативным оценкам радиационного охрупчивания основного металла корпусов ВВЭР-1000.

Использование методики реконструкции, которая была разработана и внедрена в НИЦ «Курчатовский институт», и выполнение огромного (тысячи облученных образцов) объема дополнительных работ по изготовлению и испытанию реконструированных образцов позволило получить представительную базу данных образцов-свидетелей ВВЭР-1000. Именно на основании этих результатов и были разработаны действующие нормативные зависимости. Общей проблемой программ образцов-свидетелей ВВЭР-440/213 и ВВЭР-1000 является нарушение режимов выращивания исходных трещин в образцах на вязкость разрушения. Результаты испытаний этих образцов оказались неконсервативны. Поэтому все корректные данные по вязкости разрушения образцов-свидетелей получены путем испытаний новых образцов, изготовленных методом реконструкции.

Реконструкция образцов свидетелей. Для увеличения количества испытанных образцов на ударный (Шарпи) и трехточечный изгиб для получения представительных результатов при определении критической температуры хрупкости, а также ее сдвига вследствие облучения.

Технология реконструкции основана на использовании электро-лучевого метода сварки исследуемого фрагмента образца-свидетеля с концевыми надставками в условиях отсутствия перегрева выше 300 °С средней части вставки (рисунок 2) [3].

Подбирают группы половинок путем получения предварительных результатов исследования градиента потока нейтронов по высоте каждого образца с разбросом не более $\pm 10\%$.

Исследования проводились на ЮУАЭС-1. Результаты испытаний показывают, что зависимость сдвига критической температуры хрупкости, полученная по результатам испытаний реконструированных образцов-свидетелей, более достоверно описывает закономерность радиационного охрупчивания основного металла [6].

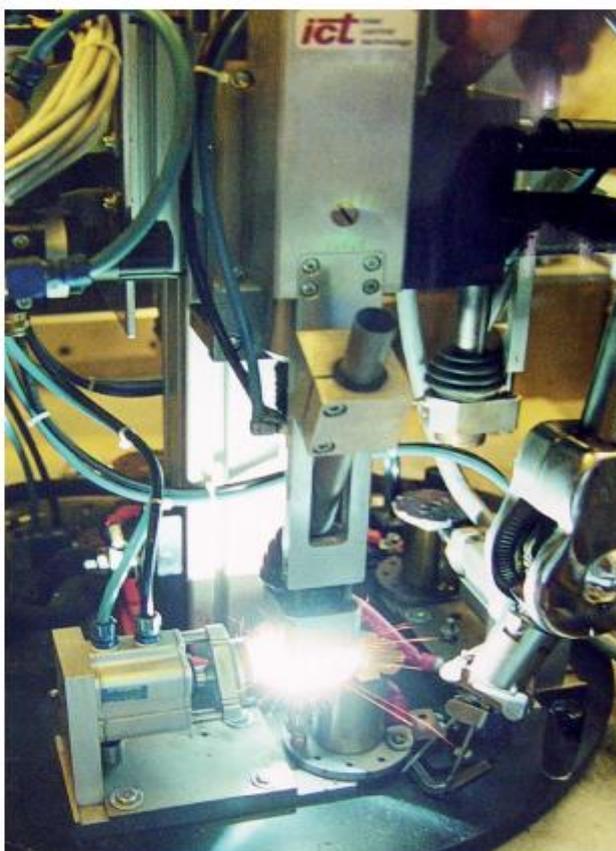
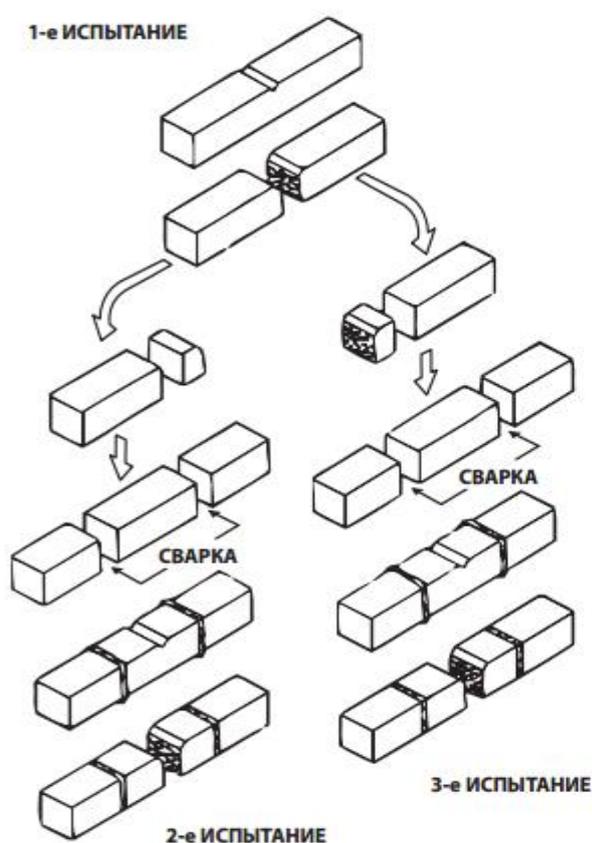


Рисунок 2 – Схема изготовления образцов-свидетелей (слева) и установка для приварки хвостиков к образцам (справа)

Соотношения между данными малоразмерных и стандартных образцов Шарпи. Впервые необходимость разработки такого соотношения возникла при оценке состояния материалов корпусов ВВЭР-440/230 первого поколения. Это связано с тем, что корпуса ВВЭР-440/230 первого поколения не были обеспечены образцами-свидетелями. Для оценки состояния металла возникла необходимость вырезки темплетов непосредственно с внутренней поверхности корпусов реакторов. Допустимый размер этих темплетов не позволял изготовить стандартные образцы Шарпи. В связи с этим из металла темплетов, изготавливались малоразмерные образцы.

Разработка корректного соотношения между критической температурой хрупкости малоразмерных и стандартных образцов возможна на основании представительной базы

данных, содержащей результаты испытаний стандартных и соответствующих мини-Шарпи образцов.

Испытания проводились следующим образом. Сначала испытывались группы стандартных образцов Шарпи. После завершения испытаний из половинок стандартных образцов Шарпи изготавливались группы малоразмерных образцов, испытывались на ударный изгиб с определением критической температуры охрупчивания для каждой группы образцов мини-Шарпи. Изготовление образцов производилось таким образом, что из каждого стандартного образца (из его половинки) изготавливался один малоразмерный. Это позволило при испытаниях малоразмерных образцов охватывать тот же объем металла, что и при испытаниях стандартных (рисунок 3) [4]. Если для обеспечения требований по минимальному числу образцов в группе (12 штук) возникала необходимость изготовить реконструированные образцы, то для каждого образца, подверженного реконструкции, изготавливались два малоразмерных образца Шарпи.

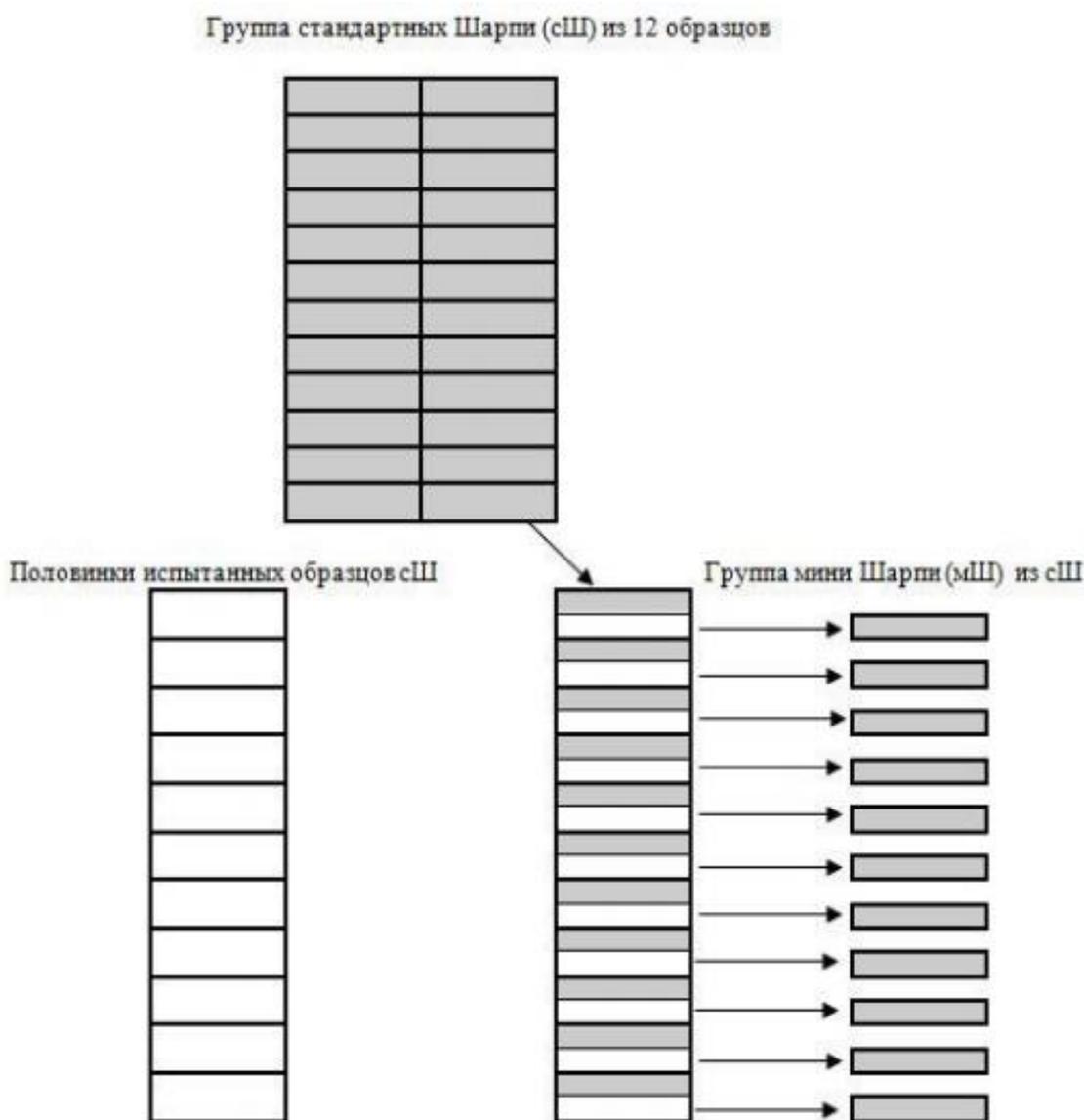


Рисунок 3 – Схема изготовления малоразмерных образцов из стандартных

Испытания на ударный изгиб производятся таким образом, что образец мини-Шарпи, изготовленный из стандартного, который испытан на верхний шельф температурной зависимости энергии разрушения, так же испытывается на верхний шельф соответствующей зависимости для малоразмерных образцов. Малоразмерный образец, изготовленный из

стандартного, который был испытан в области хрупко-вязкого перехода, так же испытывается в области хрупко-вязкого перехода. Этот же принцип соблюдается и для нижнего шельфа (рисунок 4) [3]. Существенным является то, что стандартные и малоразмерные образцы, испытанные в области перехода – это один и тот же объём металла.

Предложенная исследование позволяет снизить рассеяние результатов при испытании стандартных и малоразмерных образцов Шарпи.

В новых проектах все вышеперечисленные нюансы были учтены. Например, в проекте ВВЭР-1000/428 были выбраны более удачные места установки комплектов. Это позволяет получить более высокую степень однородности облучения. В проекте АЭС-2006 произведена корректировка мест вырезки образцов-свидетелей из припуска обечайки для получения адекватных данных по основному металлу.

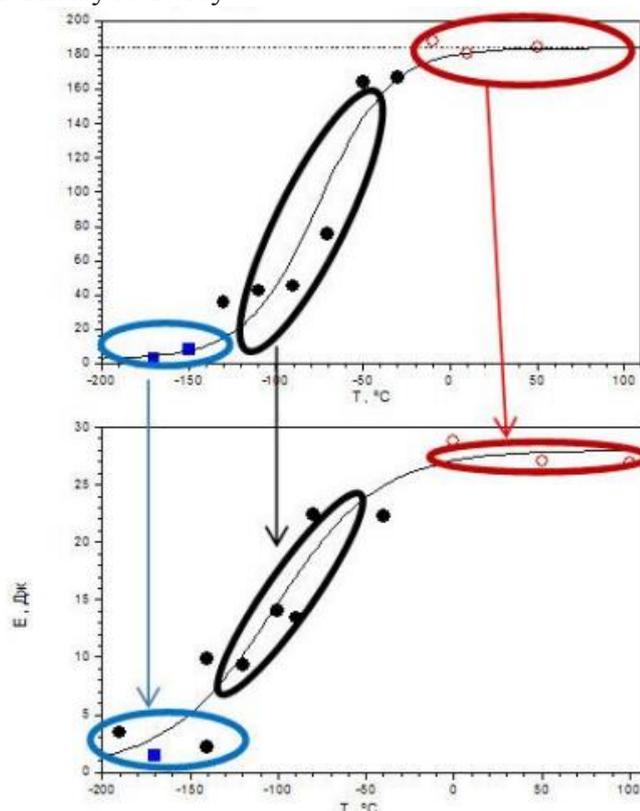


Рисунок 4 – Температурная зависимость работы разрушения для стандартных и малоразмерных образцов

Для систематического наблюдения за изменением свойств под воздействием эксплуатационных факторов максимально исключено влияние неоднородности свойств крупногабаритных элементов корпуса реактора. Только за счет оптимизации объема испытаний и компоновки контейнеров расширено число облучаемых и температурных комплектов без увеличения объема облучаемого металла. Повышено число элементов корпуса реактора, материалы от которых включены в программу образцов-свидетелей. В новых программах использован модульный принцип: одна облучаемая контейнерная сборка является полноценным комплектом.

Также в состав образцов-свидетелей включен расширенный контрольный комплект. В соответствии с РД ЭО 1.1.2.99.0922-2013 «Определение гарантированных значений критической температуры хрупкости и поправки на пространственную неоднородность металла сварного шва и обечайки при определении параметров температурной зависимости вязкости разрушения по результатам испытаний образцов-свидетелей сталей 15X2НМФА, 15X2НМФА-А и 15X2НМФА класс 1» наличие расширенного контрольного комплекта позволит снизить консерватизм оценки исходного состояния элементов корпусов реакторов и поправки на неоднородность свойств.

Вывод:

Выполнение программы образцов свидетелей позволяет на основе комплекса материаловедческого исследования убедительно обосновать возможность продления срока службы корпуса, а также разработать новые модели радиационного охрупчивания, учитывающего фактор времени и реальные механизмы повреждения при облучении.

Литература

1. История атомной энергетики Советского Союза и России. Под ред. Сидоренко В. А. Выпуск 2. Второе издание М.: ИздАТ, 2009. – 432 с.
2. ПНАЭ Г-008-89 Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок
3. Ерак, Д. Контроль металла/ Д.Ерак, А.Чернобаева // Росэнергоатом РЭА. №2. 2016. – С. 10 – 17 с.
4. РД ЭО 0598-2004. Методика определения критической температуры хрупкости материалов корпусов реакторов по результатам испытаний малоразмерных образцов на ударный изгиб.
5. Гольцев, В. Ю., Пирогов Е. Н. Методы механических испытаний и механические свойства материалов. Лабораторный практикум. МИФИ, 2008. – 160 с.
6. Григорьева, В. А. Пути получения представительных результатов исследования образцов-свидетелей для оценки радиационного охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000/ В. А. Григорьева, В. Г. Ковышкин, А. В. Сахно //Scientific Journal «Science Rise» №5/2(4). 2014. – С. 107 – 112 с.