

© 2011 В. Н. Буканов, И. Н. Вишнеvский, Н. И. Власенко<sup>1</sup>, П. Г. Литовченко, Л. И. Чирко

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

<sup>1</sup> *Научно-технический центр (ОП НТЦ) НАЭК «Энергоатом», Киев*

## МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000 В УКРАИНЕ

Описана технология реконструкции образцов-свидетелей металла корпусов реакторов ВВЭР, внедренная на базе "горячих" камер ИЯИ НАН Украины, а также основные положения методик мониторингования радиационной нагрузки корпусов реакторов и дозиметрии образцов-свидетелей. Представлены первые результаты испытаний реконструированных облученных образцов-свидетелей, которые вместе с данными по радиационной нагрузке корпуса реактора обеспечивают получение информации для обоснования срока безопасной эксплуатации корпуса с точки зрения сопротивления хрупкому разрушению.

*Ключевые слова:* образцы-свидетели, корпус реактора.

### Технология реконструкции образцов-свидетелей

В настоящее время в Украине эксплуатируется 13 атомных энергоблоков с реакторами типа ВВЭР-1000. Ресурс каждого энергоблока атомной электростанции фактически определяется ресурсом корпуса реактора (КР), поскольку замена его технически сложна и, как следствие, экономически неоправданна. Под влиянием нейтронного облучения в корпусных сталях марки 15Х2НМФАА имеет место явление радиационного охрупчивания, для которого характерным есть повышение предела текучести и критической температуры хрупкости.

Мониторинг состояния металла КР проводится неразрушающими и разрушающими методами контроля.

Разрушающий метод основан на испытании образцов-свидетелей (ОС), изготовленных на стадии изготовления корпуса из его металла и облучающихся в этом же корпусе. В Украине механические испытания ОС проводятся в "горячих" камерах ИЯИ НАН Украины.

В штатной программе ОС конструкция контейнерных сборок и расположение их в реакторе ВВЭР-1000 на выгородке над активной зоной определяют существенный градиент нейтронного потока. Такая ситуация приводит к значительной неравномерности значений флюенса быстрых ( $E \geq 0,5$  МэВ) нейтронов (более  $\pm 60$  %), накопленных образцами Шарпи, которые используются для определения критической температуры хрупкости [1]. Это противоречит нормативным требованиям, ограничивающим разброс флюенса до  $\pm 10$  %.

Для удовлетворения вышеуказанного нормативного требования применяется технология реконструкции образцов из половинок ОС, испытанных на динамическую или статическую вяз-

кость разрушения [2]. Половинки испытанных ОС данного металла подбираются таким образом, чтобы создать группу образцов (включая целые ОС), для которой флюенсы быстрых нейтронов, накопленные рабочими частями, отличаются от среднего значения не более чем на  $\pm 10$  %.

Применение реконструкции облученных образцов снимает вопросы представительности результатов испытаний ОС для реакторов ВВЭР-1000 за счет:

увеличения количества экспериментальных точек для статистической обработки и получения надежных оценок степени охрупчивания материалов;

достоверности данных испытаний на трещиностойкость образцов типа COD с выращенными согласно стандарту усталостными трещинами.

Реконструкция ОС обеспечивает также:

подтверждение достоверности данных штатных ОС;

возможность оценить степень охрупчивания материалов для большего флюенса по сравнению со штатными образцами из одного и того же комплекта;

использование реконструкции образцов в модернизированных программах ОС для материаловедческого сопровождения КР после продления проектных сроков их эксплуатации.

В 2009 г. на базе "горячих" камер ИЯИ НАН Украины при финансовом обеспечении ГП НАЭК «Энергоатом» внедрена технология реконструкции образцов Шарпи из половинок испытанных на динамическую или статическую вязкость разрушения ОС металла КР ВВЭР-1000.

Данная технология основана на использовании электронно-лучевого метода сварки исследуемого фрагмента ОС с концевыми надставками (хвостовиками) в условиях отсутствия перегрева средней части вставки выше 300 °С (рис. 1).

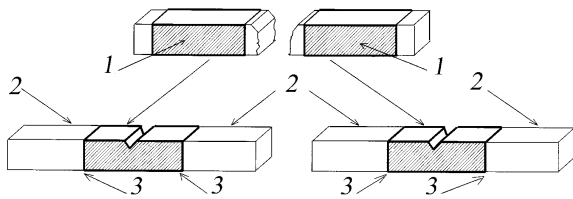


Рис. 1. Схема реконструкции образца типа Шарпи: 1 - вставка из половинки испытанного ОС; 2 - хвостовик из необлученной корпусной стали; 3 - сварной шов.

Для выполнения работ по реконструкции ОС ГП НАЭК «Энергоатом» оснастил «горячие» камеры необходимым оборудованием, к которому относятся:

установка для электронно-лучевой сварки (изготовитель ИЯИ г. Ржеж, Чехия);

серво-гидравлический испытательный комплекс для выращивания усталостных трещин с последующим испытанием на трещиностойкость образцов типа COD и СТ (фирма BISS, Индия);

электроэрозионный станок (фирма ZAP-br, Польша);

видеосистема Projekt X для измерения геометрических размеров ОС (фирма Aberlink, Великобритания);

инструментированный маятниковый копер фирмы INSTRON;  
оптический эмиссионный спектрометр GDS 500A (фирма LECO).

Поставлено также вспомогательное оборудование: шлифовально-полировальный станок SS-1000, автоматический пресс PR-4, ванны для ультразвуковой очистки образцов, ультразвуковой твердомер, система подготовки обессоленной воды, телекамеры для отслеживания работ внутри «горячих» камер.

Все необходимое оборудование установлено внутри «горячих» камер и управляется дистанционно с помощью систем управления, расположенных в операторском зале рядом со смотровым окном (рис. 2, а). Перед размещением установок в каждой защитной камере выполнены подготовительные работы под каждую установку. Так, камера под электронно-лучевую установку (ЭЛУ) (см. рис. 2, б) претерпела капитальную модернизацию, включая облицовку внутренних поверхностей нержавеющей сталью и изготовление дополнительных проходов в стенах для прокладки кабелей.



а



б

Рис. 2. Вакуумная камера ЭЛУ, в которой происходит сварка, установленная внутри «горячей» камеры.

Нагружающая часть серво-гидравлического испытательного комплекса для выращивания усталостных трещин (BISS) представляет собой силовую раму на массивной подставке высотой в общей сложности около 3 м. Для того чтобы опоры для расположения образца находились напротив смотрового окна в области досягаемости манипуляторов (рис. 3), силовая часть установки была опущена в подкамерное помещение и установлена на специально сконструированном и изготовленном пьедестале. Для этого в днище камеры было вырезано отверстие, которое после

размещения установки закрыто специально изготовленными частями днища и герметизировано через резиновые прокладки для поддержания в камере разрежения, препятствующего возможности попадания радиоактивных веществ в окружающую среду. Еще этажом ниже – в технологическом коридоре – размещена гидравлическая система, осуществляющая усилие нагружения при работе установки.

Для обработки торцевых поверхностей облученных вставок и хвостовиков, снятия усиленных швов на сваренных заготовках и нанесения

V-образных концентраторов внутри “горячей” камеры установлен электроэрозионный станок (рис. 4).



Рис. 3. Внутрикамерная часть установки BISS.

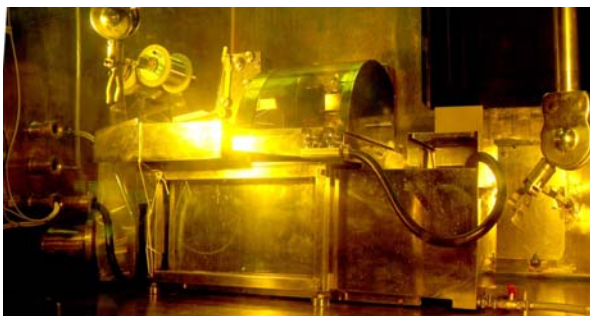


Рис. 4. Внутрикамерный электроэрозионный станок.

Инструментированный маятниковый копер фирмы INSTRON приобретен без температурной камеры, так как фирма не выпускает температурную камеру, удобную для использования внутри защитной камеры. В настоящее время заканчивается испытание изготовленных в Украине по специальному заказу температурной камеры и системы автоматической подачи образца на опоры копра, совмещенных с данным копром. Фирма INSTRON дала разрешение и свои указания для такого совмещения. После окончания метрологических испытаний копер вместе с термокриокамерой и системой подачи образца будет инсталлирован внутрь “горячей” камеры, где вновь будут проведены метрологические испытания с применением эталонных образцов.

Видеосистема Project X предназначена для прецизионных измерений линейных размеров объектов, расстояний между точками, длины дуги и радиуса круга, площадей, углов и др. Система разработана для проведения дистанционных измерений с точностью измерения до 10 мкм.

Эмиссионный спектрометр GDS 500 предназначен для определения количественного состава железосодержащих материалов. Он представляет

собой оптический эмиссионный спектрометр с источником возбуждения, который работает по принципу тлеющего разряда. Спектральный диапазон прибора от 165 до 460 нм.

После проведения работ по подбору оптимального режима сваривания вставок с хвостовиками были проведены аттестационные эксперименты, целью которых являлось обоснование сохранения свойств металла вставки после изготовления реконструированного образца.

Аттестационным материалом послужили металл марки 15X2НМФА КР размонтированной Крымской АЭС, а также переданная нам Российским научным центром «Курчатовский институт» (РНЦ «КИ») в рамках международной программы TAREG 2.01/03 корпусная сталь марки 15X2НМФАА некоего российского энергоблока Д7.

Согласно разработанной и согласованной в Госкомитете ядерного регулирования Украины Программе аттестации были проведены следующие виды исследований:

1. Проверка устойчивости швов к разрушению.
2. Проверка отсутствия перегрева центральной части вставки в процессе сварки.
3. Макро- и микроскопические исследования.
4. Проверка сохранения свойств металла вставки после реконструкции образца.

Проверка устойчивости швов к разрушению проведена путем квазистатического изгиба сваренных заготовок без надреза (со стороны, противоположной нанесению будущего надреза) на испытательном комплексе INSTRON 1362 (цифровой контроллер FastTrack 8500 Plus), установленном внутри “горячей” камеры, при температурах  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  до нагрузки  $P_{\max} = 34\text{ кН}$ ;  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $P_{\max} = 31\text{ кН}$ ;  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $P_{\max} = 34\text{ кН}$  и  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $P_{\max} = 26\text{ кН}$ .

После испытаний все изогнутые заготовки обследованы на наличие надрывов в металле шва и околошовной зоны. Результаты исследований свидетельствуют, что после испытаний отсутствуют повреждения в сварных соединениях, металл демонстрирует вязкое удлинение на растянутых волокнах во всем сварном соединении.

Для проверки отсутствия перегрева вставки в процессе сварки выше температуры эксплуатации КР ( $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) проведены контрольные сварки с хромель-алюмелевыми термопарами, размещенными на глубине 5 мм на расстоянии 2,5 и 5 мм от линии сплавления. Запись изменения температуры проводили непрерывно на протяжении всего цикла с помощью быстродействующего самописца ENDIM 621.01 (Германия). Как видно из графиков (рис. 5), на расстоянии 2,5 мм температура не превышает  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а на

расстоянии 5 мм – 100 °С. Длина вставки составляет 17 мм.

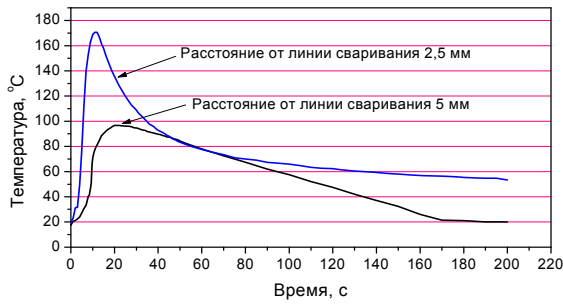


Рис. 5. Изменение температуры вставки в процессе электронно-лучевой сварки.

Металлографические исследования дают возможность по металлографическим сечениям определить толщину, форму и состояние сварных швов. Полученные данные металлографических исследований свидетельствуют, что ширина литых зон при оптимизированном режиме сварки в швах всех исследованных образцов достигает у корня шва (центр образца) 1,22 мм, а в устье шва (область усиления шва) 2,96 мм. Общая ширина V-образного соединения (с двумя зонами термического влияния (ЗТВ)) достигает в районе корня шва 2,25 мм, а в устье шва 4,98 мм.

Металлографические исследования металла шва и зоны термического влияния, полученных при оптимизированных параметрах сварки, выявили структуры, характерные для сварных соединений, получаемых при электронно-лучевой сварке. В центральной части шва превалирует мартенсит как структурная составляющая, а чем ближе к устью шва преимущественно наблюдается структура бейнита.

Для проверки сохранения при сварке свойств металла в рабочей зоне реконструированного образца был использован также метод измерения твердости. С этой целью на глубине 3 мм по боковой поверхности заготовки и по диагональному сечению шва изготовлены микрошлифы. Измерение твердости проводилось по методу Виккерса на твердомере Computest SC HV<sub>5</sub> с нагрузкой 49,03 Н с шагом 3–4 мм вдали от швов и 0,05–0,2 мм в ЗТВ и на поверхности шва (рис. 6). Результаты измерений твердости свидетельствуют о том, что изменение твердости наблюдается только в области швов.

С целью верификации результатов испытаний реконструированных образцов было проведено определение критической ( $T_{ки}$ ) и референсной ( $T_0$ ) температур хрупкости по результатам испытаний на ударный [3] (рис. 7, а) и трехточечный [4] (рис. 7, б) изгиб целых и реконструированных из их половинок образцов типа Шарпи и Шарпи

с трещиной, изготовленных согласно требованиям ГОСТ 9454-78 и ГОСТ 25.506-85.

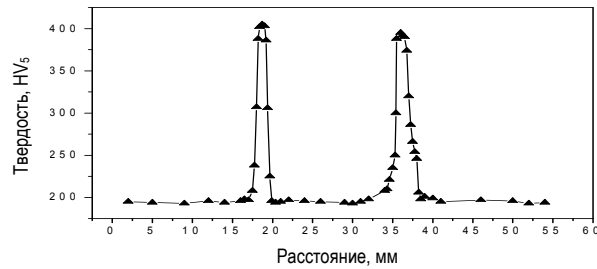


Рис. 6. Изменение твердости вдоль реконструированного образца.

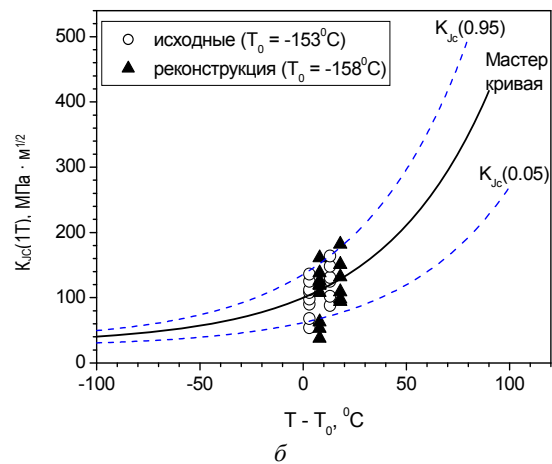
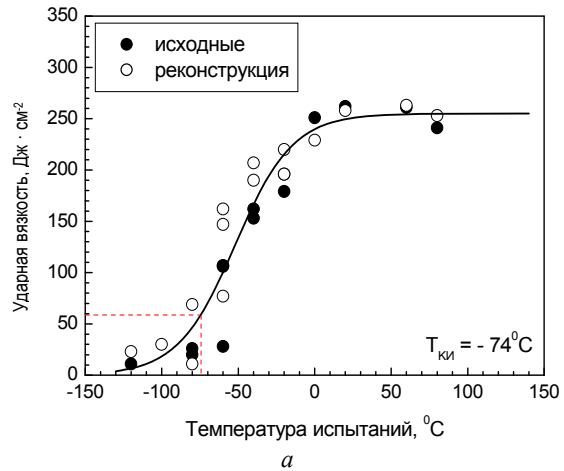


Рис. 7. Обобщенные температурные зависимости вязкости разрушения стали корпуса Д7 при испытаниях на ударный изгиб (а) и трещиностойкость (б).

Статистический анализ по тесту Чоу полученных результатов испытаний на ударный изгиб испытаний образцов в исходном состоянии и после реконструкции показал однородность всех выборок, что подтверждает отсутствие влияния реконструкции на физико-механические свойства стали.

Данные по трещиностойкости также показали удовлетворительное совпадение значений рефе-

ренских температур, полученных при испытании целых и реконструированных образцов Шарпи с предварительно выращенной трещиной (см. рис. 7, б).

Таким образом, на базе оборудования ГП НАЭК «Энергоатом», персоналом ИЯИ НАН Украины с использованием специальных методик в «горячих» камерах внедрена технология реконструкции ОС металла КР. На базе "горячих" камер ИЯИ НАН Украины функционирует аттестованная Укрметртестстандартом лаборатория I класса по измерению физико-механических свойств корпусных металлов. На этот вид деятельности ИЯИ НАН Украины имеет лицензию Государственного комитета по ядерному регулированию Украины. Оборудование для испытаний проходит ежегодную поверку в Укрметртестстандарте, а персонал аттестуется один раз в 3 - 5 лет комиссией ИЯИ НАН Украины. Каждая используемая методика базируется на соответствующих нормативных документах.

### Мониторирование радиационной нагрузки КР и дозиметрия ОС

Для переноса полученных по ОС данных непосредственно на металл КР необходимо знать условия облучения, текущую и накопленную радиационную нагрузку характерных зон корпуса.

К характерным зонам корпуса ВВЭР-1000 относятся зоны сварных соединений верхней обечайки КР с нижней и опорной (швы № 3 и № 4 соответственно) и зона КР, где текущая и/или накопленная радиационная нагрузка имеет максимальное значение. Как правило, эта зона располагается напротив или выше уровня наиболее энергонапряженного слоя активной зоны (АКЗ) реактора.

Под условиями облучения понимается набор значений функционалов нейтронного потока (ФНП) на КР, к которым в первую очередь относятся: флюенс нейтронов с энергией  $E_n > 0,5$  МэВ; приведенная к номинальной мощности реактора и усредненная за кампанию интегральная плотность потока нейтронов (ППН) с  $E_n > 0,5$  МэВ; спектральный индекс SI0.5, который рассчитывается как отношение флюенса нейтронов с  $E_n > 0,5$  МэВ к флюенсу нейтронов с  $E_n > 3,0$  МэВ; число смещений на атом (с.н.а.), вызванных нейтронами с  $E_n > 0,5$  МэВ в материале КР; приведенная к номинальной мощности реактора и усредненная за кампанию скорость накопления с.н.а.

Текущая радиационная нагрузка КР представляет собой максимальный флюенс быстрых нейтронов на внутреннюю поверхность характерных зон корпуса или максимальное число с.н.а., вы-

званных нейтронами с  $E_n > 0,5$  МэВ, за топливную кампанию. Накопленная радиационная нагрузка – это максимальный суммарный флюенс нейтронов на внутреннюю поверхность характерных зон КР или максимальное число с.н.а., вызванных нейтронами с  $E_n > 0,5$  МэВ, за весь период эксплуатации энергоблока.

Определение значений текущей радиационной нагрузки КР позволяет контролировать динамику накопления флюенса нейтронов или числа с.н.а. характерными зонами корпуса. Данные о накопленной за весь период работы энергоблока радиационной нагрузке КР в сравнении с величиной предельно-допустимого флюенса, при котором удовлетворяются критерии сопротивления хрупкому разрушению характерных зон корпуса, дают возможность оценить допустимое время его работы.

В настоящее время мониторинг радиационной нагрузки КР, т. е. определение условий облучения, текущей и накопленной радиационной нагрузки характерных зон корпуса, ведется на всех энергоблоках АЭС Украины с реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-440. Для решения этой задачи используется разработанная специалистами отдела проблем дозиметрии ядерных реакторов ИЯИ НАН Украины специальная методика.

Методика включает расчеты переноса нейтронов в околокорпусном пространстве (ОКП) реактора ВВЭР и дозиметрические измерения нейтронно-активационным методом у внешней поверхности корпуса в течение топливной кампании.

Основные характеристики расчетной части методики заключаются в следующем.

Расчеты выполняются методом Монте-Карло в многогрупповом приближении теории переноса нейтронов.

Моделирование траекторий нейтронов осуществляется в расчетной модели реакторной установки (РМРУ), которая детально и подробно описывает элементы конструкции реактора, оказывающие влияние на формирование поля нейтронов в ОКП.

Базовая РМРУ создана на основе проектной документации и отчетов генеральной конструкции – ОКБ "Гидропресс". Для каждого реактора она корректируется на основании сдаточной документации.

Библиотека микроконстант, которая используется при расчетах переноса нейтронов, разработана в секторе ядерных данных ИЯИ НАН Украины. Она содержит 51 группу в диапазоне энергий нейтронов от 0,1 до 18,2 МэВ и включает нуклиды, необходимые для описания материального состава элементов конструкции реактора ВВЭР-1000.

При моделировании нейтронных историй учитываются следующие взаимодействия: упругое рассеяние; неупругое: реакции  $(n, n')$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, np)$  и т.п.; реакции с поглощением нейтрона (в том числе реакция деления в АКЗ).

Для оптимизации расчетов применяются неаналоговые методы: весовые окна; "расслоение" первоначальных параметров частицы по пространственным координатам и энергии; одно-временный расчет для всех временных моментов топливной кампании с использованием коэффициентов элементарных источников.

При подготовке источников нейтронов используется потвэльное приближение распределения энерговыделения (интенсивности источников) и покассетное приближение учета выгорания (изменения изотопного состава) ядерного топлива для каждого типа топливовыделяющих сборок (ТВС).

Регистрация нейтронных историй производится в объемных расчетных детекторах на основании оценки по пробегу. Детекторы расположены в расчетных областях РМРУ, соответствующих КР и воздушному зазору.

Расчетная часть методики мониторинга радиационной нагрузки корпуса ВВЕР-1000 реализована в виде пакета программ МСРВ [5]. Согласно постановлению Коллегии ГКЯР Украины № 16 от 12 сентября 2005 г. была выполнена процедура верификации пакета. На основании ее результатов ГП НАЭК «Энергоатом» распоряжением № 124-р от 12 февраля 2010 г. дал разрешение на использование пакета программ МСРВ для выполнения работ, связанных с обоснованием безопасности ядерных установок.

Учитывая недостатки дозиметрического обеспечения штатной программы ОС, для определения ФНП на рабочие части облучаемых образцов используется специально разработанная методика. Основные характеристики методики состоят в следующем:

Расчеты методом Монте-Карло в многогрупповом приближении в подробной трехмерной модели реакторной установки.

Учет изменения состояния активной зоны реактора с шагом не более 40 эф. сут.

Учет реальной, как правило, 360-градусной симметрии загрузки реактора при подготовке параметров источников нейтронов в девяти (из 30) слоях активной зоны четырех периферийных рядов ТВС.

Переход на учет изменения объемного энерговыделения по высоте активной зоны для 30 слоев на основании данных по 30 слоям с помо-

щью специальной интерполяционной процедуры.

Учет изменения спектра и выхода нейтронов из источников в результате выгорания топлива на основании расчетов нейтронно-физических характеристик используемых ТВС с помощью программы WIMS-D4.

Использование расчетно-экспериментальной методики для определения ориентации контейнерных сборок с ОС относительно активной зоны.

Привязка параметров расчетной модели к параметрам конкретной реакторной установки на основании сдаточной документации.

Методика реализована в виде пакета программ MCSS [6]. Верификация пакета была выполнена специалистами ИЯИ НАН Украины в рамках международного проекта TAREG 2.01/00.

### Реконструкция облученных ОС

После внедрения технологии реконструкции в ИЯИ НАН Украины первыми были реконструированы ОС металла КР энергоблока № 1 Южно-Украинской АЭС (ЮУАЭС).

Необходимо отметить, что программа ОС для этого КР несколько отличается от штатной количеством контролируемых металлов. В частности, имеются комплекты ОС из металла шва № 3 и нижней обечайки, а также сборки с образцами Шарпи из металла шва № 4 и фланца. Последние предназначены для контроля состояния металла опорной обечайки. Были реконструированы ОС комплекта 3Л и сборки 2Т (металл шва № 4) и 1ЛФ (металл фланца).

В результате реконструкции было испытано на ударный изгиб 3 группы ОС из металла сварного шва № 3; 4 группы из металла шва № 4; 4 группы из основного металла нижней обечайки и 3 группы из металла фланца. В каждой группе было испытано не менее 12 образцов. На рис. 8 приведены зависимости критических температур хрупкости  $T_K$  для исследованных материалов от флюенса быстрых нейтронов. Величины  $T_K$  получены с учетом исходных значений  $T_{K0}$ , полученных на заводе-изготовителе и указанных в паспорте на данный КР.

На рис. 8, а использованы дополнительные данные, полученные РНЦ "КИ" в рамках программы TAREG2/01.03 "Оценка радиационного охрупчивания и обоснование моделей охрупчивания для корпусов реакторов типа ВВЭР" для ОС металла сварного шва № 3 из комплекта 2Л с применением технологии реконструкции, основанной на аргоно-дуговой сварке вставки с хвостовиками.

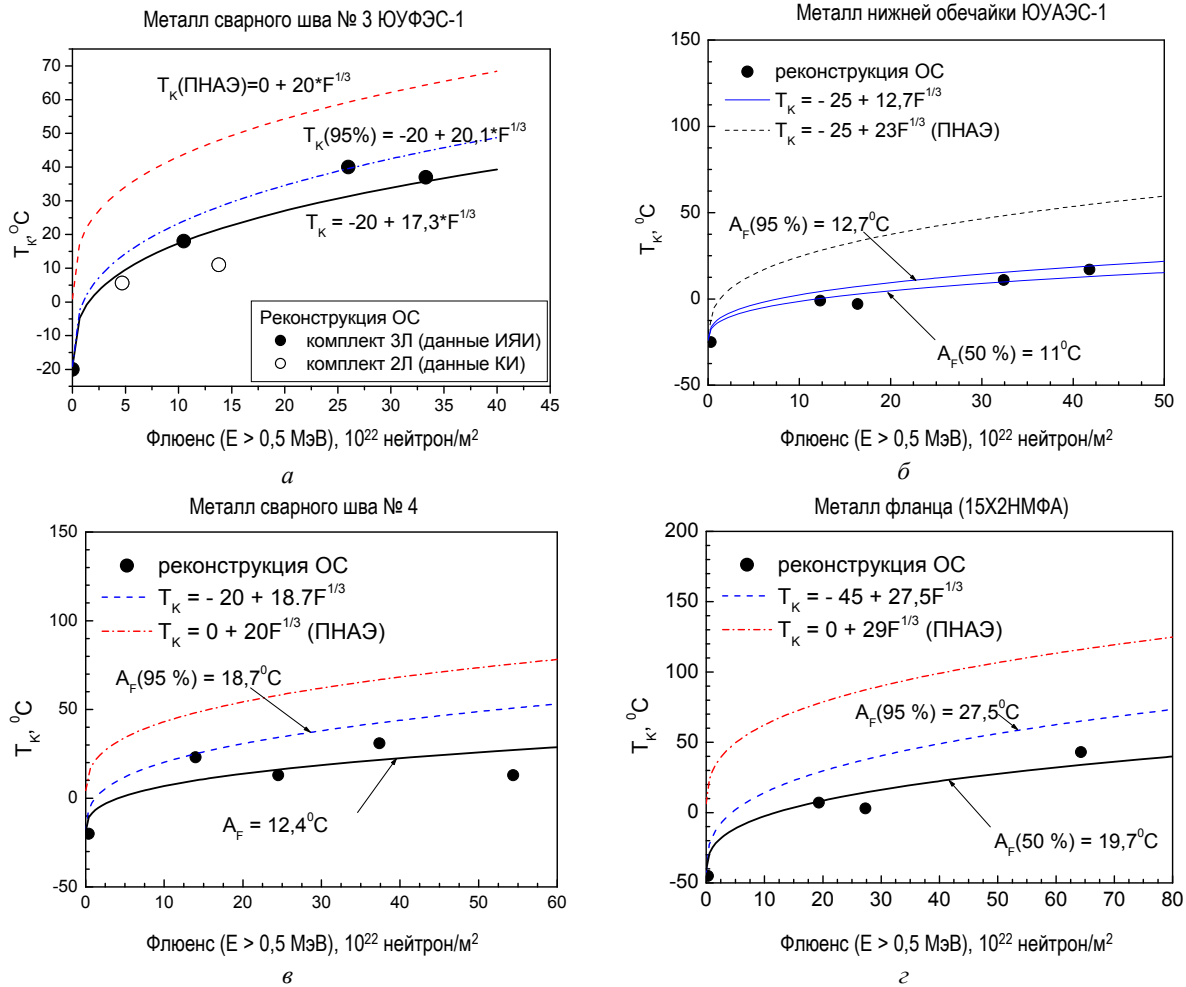


Рис. 8. Результаты реконструкции ОС металла шва № 3 и № 4 (а, в), нижней обечайки (б) и металла фланца (г).

Как следует из рис. 8, а, значения сдвигов  $\Delta T_F$ , полученных по результатам испытаний реконструированных в разных организациях с применением разной технологии сваривания ОС комплектов 2Л и 3Л металла сварного шва № 3 энергоблока № 1 ЮУАЭС, лежат в пределах разброса и дополняют друг друга.

Коэффициент радиационного охрупчивания металла сварного шва № 3 КР энергоблока № 1 ЮУАЭС, полученный по средней линии регрессии, составляет 17,3 °С. Коэффициент  $A_F$ , определенный с доверительной вероятностью 95 %, равен 20,13 °С, что практически совпадает с нормативным значением для металла шва ( $A_F = 20$  °С).

Результаты оценки критической температуры  $T_K$  материалов КР с учетом фактических значений  $T_{K0}$  и  $A_F(95\%)$  приведены в таблице. Для сравнения приведены проектные значения  $T_K^{ПНАЭ}$ , полученные с помощью нормативных значений  $T_{K0}$  и  $A_F$ :

$$T_K^{ПНАЭ}(F) = T_{K0}^{ПНАЭ} + A_F^{ПНАЭ} \cdot (F/F_0)^{1/3},$$

где  $T_{K0}^{ПНАЭ} = -25$  °С для основного металла;  $T_{K0}^{ПНАЭ} = 0$  °С для металла сварных швов;  $A_F^{ПНАЭ} = 29$  °С для основного металла 15X2НМФА;  $A_F^{ПНАЭ} = 23$  °С для основного металла 15X2НМФАА;  $A_F^{ПНАЭ} = 20$  °С для сварного металла 15X2НМФАА при  $T_{обл} = 290$  °С.

Из таблицы, представленной ниже, следует, что ни для одного из изученных материалов температура  $T_K$  не превышает проектную величину для указанных флюенсов. Наименьший температурный запас (19 °С) по  $T_K$  имеет сварной шов № 3, поэтому этот конструктивный элемент будет определять радиационный ресурс КР. На данный момент срок безопасной эксплуатации КР определяется сроком набора швом № 3 флюенса быстрых нейтронов  $\sim 33,3 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup>.

В результате мониторинга радиационной нагрузки КР энергоблока № 1 ЮУАЭС к настоящему времени определены условия облучения, текущая и накопленная радиационная нагрузка КР

для 24 топливных кампаний. Динамика накопления флюенса нейтронов внутренней поверхностью КР на уровне шва № 3 представлена на

рис. 9. Для сравнения на нем приведена динамика накопления флюенса нейтронов КР при проектной величине ППН на корпус.

**Критическая температура хрупкости  $T_K$  для материалов КР блока № 1 ЮУАЭС (применение технологии реконструкции)**

Материал	$T_{K0}^{1)}$ , °C	Флюенс, $10^{22}$ , нейтрон/м <sup>2</sup>	$A_F(95\%)$ , °C	$\Delta T_F$ , °C	$T_K$ , °C	$T_K^{ПНАЭ}$ , °C	Запас по $T_K$ , °C
Нижняя обечайка	- 25 <sup>2)</sup>	41,8	12,7	44	19	55	36
Обечайка фланца	- 45	64,3	27,5	110	65	116	51
Сварной шов № 3	- 20	33,3	20,2	65	45	64	19
Сварной шов № 4	- 20	54,4	18,7	71	51	76	25

1) Значения  $T_{K0}$  определены заводом-изготовителем.

2) Нормативное значение  $T_{K0}$  согласно ПНАЭ Г-7-002-86.

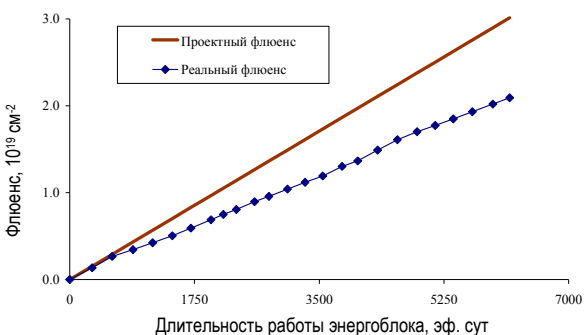


Рис. 9. Динамика накопления флюенса нейтронов с  $E_p > 0,5$  МэВ внутренней поверхностью КР за 24 топливные кампании энергоблока № 1 ЮУАЭС на уровне шва № 3.

Следует отметить, что на всех АЭС Украины в практику эксплуатации энергоблоков внедрен

принцип формирования топливных загрузок с пониженной утечкой нейтронов. Это приводит к существенному снижению радиационной нагрузки характерных зон КР.

Применительно к энергоблоку № 1 ЮУАЭС оценка показывает, что при использовании в дальнейшем топливных загрузок с пониженной утечкой нейтронов сварной шов № 3 КР наберет флюенс  $\sim 33,3 \cdot 10^{22}$  нейтрон/м<sup>2</sup> к концу 41-й топливной кампании (ППР-2025).

Таким образом, на основе результатов испытаний ОС и данных мониторинга радиационной нагрузки КР энергоблока № 1 ЮУАЭС обоснован с точки зрения сопротивления хрупкому разрушению срок безопасной эксплуатации корпуса до конца 41-й топливной кампании.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Буканов В.Н., Васильева Е.Г., Вишневский И.Н. и др. Проблемы дозиметрии образцов-свидетелей, облученных в реакторе ВВЭР-1000 // Ядерная и радиационная безопасность. - 2000. - № 2. - С. 35 - 42.
2. ASTM 1253-99. Standard Guide for Reconstitution of Irradiated Charpy-Sized Specimens // Annual Book of ASTM Standards. - 1999. - P. 651 - 653.
3. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 525 с.
4. ASTM E 1921-97. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range // Annual Book of ASTM Standards. - 1997. - Vol. 03.01.
5. Пакет программ MСРV для расчета функционалов нейтронного потока, воздействующего на корпус ВВЭР-1000 / В.Н. Буканов, А.В. Гриценко, В.Л. Демехин, С.М. Пугач. - Киев, 2005. - 28 с. - (Препр. / НАН Украины. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-05-6).
6. Grytsenko O.V., Bukanov V.N., Dyemokhin V.L. et al. Dosimetry of Surveillance Specimens Irradiated at WWER 1000 Reactor // Proc. of Int. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy", Part II, Kyiv, 29 May - 03 June 2006. - Kyiv, 2007. - P. 686 - 691.



**В. М. Буканов, І. М. Вишневський, М. І. Власенко, П. Г. Литовченко, Л. І. Чирко**

**МОНІТОРИНГ СТАНУ МЕТАЛУ КОРПУСІВ РЕАКТОРІВ ВВЕР-1000 В УКРАЇНІ**

Описано технологію реконструкції зразків-свідків металу корпусів реакторів ВВЕР, яку впроваджено на базі “гарячих” камер ІЯД НАН України, а також основні положення методик моніторингу радіаційного навантаження корпусів реакторів і дозиметрії зразків-свідків. Представлено перші результати випробувань реконструйованих опромінених зразків-свідків, які разом з даними по радіаційному навантаженню корпусу реактора забезпечують отримання інформації для обґрунтування терміну безпечної експлуатації корпусу з точки зору опору крихкому руйнуванню.

*Ключові слова:* зразки-свідки, корпус реактора.

**V. M. Bukanov, I. M. Vyshnevskiy, M. I. Vlasenko, P. G. Lytovchenko, L. I. Chyrko**

**VVER-1000 REACTOR VESSEL METAL STATE MONITORING IN UKRAINE**

On the basis of the “hot” cells of the Institute for Nuclear Research of National Academy of Sciences of Ukraine re-constitution technique of VVER reactor vessel metal surveillance specimens, and the main provisions of the reactor vessel radiation loading monitoring procedures and surveillance specimen dosimetry are described in the paper. The first results of the reconstituted irradiated surveillance specimen tests are presented, which together with the data on the radiation loading of the reactor vessel provide information for substantiation of the reactor safe operation term from the point of view of the brittle fracture resistance.

*Keywords:* surveillance specimens, reactor vessel.

Поступила в редакцію 16.06.11,  
после доработки - 20.07.11.