

## ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕКОНСТРУКЦИИ ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ МЕТАЛЛА КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000 В ИЯИ НАН УКРАИНЫ

*И.Н. Вишневский, Н.И. Власенко\*, Л.И. Чирко, В.Н. Ревка, С.Н. Ковбасенко,  
В.Я. Козлов\*, Ю.В. Чайковский, Г.П. Гринченко\*, Э.Н. Чалый\*,  
В.Д. Оцалюк, Р.В. Франков*

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина;  
\*Научно-технический центр (ОП НТЦ) НАЭК «Энергоатом», Киев, Украина*

Представлен комплекс оборудования, поставленного НАЭК «Энергоатом» в «горячие» камеры ИЯИ НАНУ для внедрения технологии реконструкции облученных образцов-свидетелей металла корпусов реакторов АЭС Украины. Результаты аттестационных исследований, приведенные в работе, подтверждают, что в процессе реконструкции образцов типа Шарпи и COD сохраняются свойства исследуемого металла.

В 2009 году в Институте ядерных исследований НАН Украины на базе «горячих» камер при финансовом обеспечении Государственного предприятия Национальная энергогенерирующая кампания «Энергоатом» внедрена технология реконструкции образцов Шарпи из половинок испытанных на динамическую или статическую вязкость разрушения образцов-свидетелей (ОС) металла корпусов реакторов (КР) ВВЭР-1000.

### ТЕХНОЛОГИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ

Данная технология применяется с целью увеличения количества облучаемых образцов корпусной стали реактора для получения представительных и достоверных данных, используемых для оценки радиационного охрупчивания материалов КР при подтверждении его проектного срока эксплуатации или при его переназначении. Технология основана на использовании электронно-лучевого метода сварки исследуемого фрагмента ОС (так называемой вставки) с концевыми надставками (хвостовиками) в условиях отсутствия перегрева выше 300 °С средней части вставки.

Необходимость реконструкции образцов-свидетелей обусловлена существующим градиентом плотности потока нейтронов, падающих на ОС, что приводит к разбросу значений флюенсов быстрых ( $E \geq 0,5$  МэВ) нейтронов, накопленных группой штатных ОС, достигающему 60 %. Для получения представительных результатов исследований ОС используется градиент потока нейтронов по высоте каждого образца. Это дает возможность подобрать группы половинок испытанных ОС с флюенсами быстрых нейтронов на рабочие части с разбросом не более  $\pm 10$  %. Поэтому первым этапом реконструкции ОС является определение флюенса быстрых нейтронов, накопленных частями ОС на высоте  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  и  $\frac{3}{4}$ .

Далее из половинок испытанных ОС, подобранных в группу, изготавливаются вставки длиной, как правило,  $17^{+0,1}$  мм и к обоим торцам привариваются хвостовики длиной  $19^{+0,1}$  мм. В принципе на этапе аттестации технологии

реконструкции была доказана возможность использования вставки длиной 14 мм.

Заготовки свариваются на электронно-лучевой установке в 2 прохода с переворотом заготовки на 180°. Сваренная заготовка обрабатывается на внутрикамерном электроэрозионном станке до размеров и формы соответствующего стандарта и на образцах, предназначенных для испытаний на трехточечный изгиб, выращивается усталостная трещина.

### ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения работ по реконструкции ГП НАЭК «Энергоатом» оснастило «горячие» камеры необходимым оборудованием, которое инсталлировано внутрь защитных камер:

- установкой для электронно-лучевой сварки (изготовитель: Институт ядерных исследований г. Ржеж, Чешская республика) (рис. 1, а);
- установкой для выращивания в образцах усталостных трещин и последующего испытания образцов на трещиностойкость (изготовитель: фирма BISS, Индия) (см. рис. 1, б);
- электроэрозионным станком для обработки половинок ОС и сваренных заготовок (изготовитель: фирма ZAP-br, Польша);
- видеосистемой Projekt X для измерения геометрических размеров активных образцов (изготовитель: фирма Aberlink, Великобритания);
- инструментированным маятниковым копром фирмы INSTRON;
- автоматическим прессом PR-4 для подготовки к металлографическим и спектрометрическим исследованиям малоразмерных образцов;
- отрезным станком MSX-255, для подготовки хвостовиков;
- шлифовально-полировальным станком SS-1000 для подготовки хвостовиков;
- оптическим эмиссионным спектрометром GDS 500A для определения количественного состава железосодержащих материалов (в частности, корпусных сталей).

Поставлено также вспомогательное оборудование:

- ванна для ультразвуковой очистки образцов;
- ультразвуковой твердомер;
- телекамеры и переговорные устройства для облегчения работ внутри «горячих» камер и т.д.



а

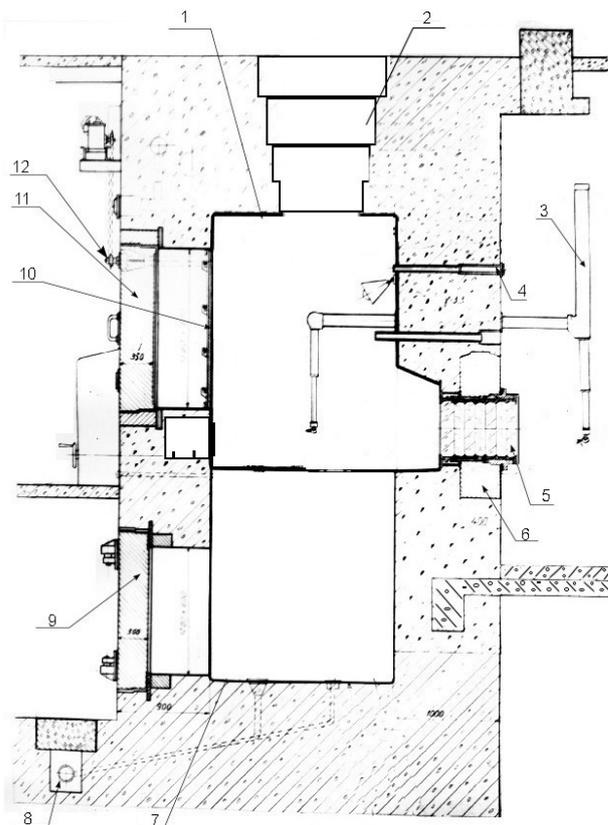


б

*Рис. 1. Высоковакуумная камера для электронно-лучевой сварки (а) и установка для выращивания в образцах усталостных трещин и последующего испытания образцов на трещиностойкость (б), размещенные внутри «горячих» камер*

В настоящее время большая часть оборудования находится внутри камер и управляется дистанционно. Перед размещением установок в каждой защитной камере выполнены подготовительные работы под каждую установку. Так, камера под электронно-лучевую установку претерпела капитальную модернизацию, включая облицовку внутренних поверхностей нержавеющей сталью и изготовление дополнительных проходок в стенах для прокладки кабелей (см. рис. 1,а).

Объект «горячие» камеры представляет собой капитальное сооружение, позволяющее работать с радиоактивными материалами с активностью до 25000 Ки. Схема «горячей» камеры приведена на рис. 2. Она состоит из двух помещений: камеры как таковой и подкамерного помещения, отделенного от камеры нержавеющей сталью толщиной 12 мм. Рабочая часть каждого оборудования должна находиться напротив смотрового окна в зоне досягаемости пинцета манипулятора. Поэтому рабочая часть каждой установки размещается частично внутри камеры, частично в подкамерном помещении.



*Рис. 2. Схема «горячей» камеры: 1 – корпус; 2 – верхний люк с перекрытиями; 3 – манипулятор; 4 – проходка; 5 – окно смотровое ОСП-400, 500x700 мм; 6 – плита защитная; 7 – подкамерное помещение; 8 – спецканализация; 9 – дверь защитная в подкамерное помещение; 10 – дверь герметичная в камеру; 11 – дверь защитная в камеру; 12 – привод шибера*

Для размещения нагружающей системы сервогидравлической установки для выращивания усталостных трещин в днище камеры было вырезано отверстие, через которое установка опускалась на специально сконструированный и изготовленный пьедестал. Затем отверстие закрывалось специально изготовленными частями днища и герметизировано резиновыми прокладками для поддержания в камере разрежения, препятствующего возможности попадания радиоактивных веществ в окружающую среду.

Этажом ниже – в технологическом коридоре – размещена гидравлическая система,

осуществляющая усилие нагружения при работе установки.

Очень важным звеном в технологической цепочке является внутрикамерный электроэрозионный станок, выполняющий несколько операций: изготовление вставок (торцевание), снятие усиления над сварными швами и изготовление V-надрезов на соответствующей поверхности сваренного образца (рис. 3).



Рис. 3. Электроэрозионный станок, установленный внутри «горячей» камеры

Оптический эмиссионный спектрометр с источником возбуждения, работающим на принципе тлеющего разряда, позволяет определить количественный состав железосодержащих материалов с точностью до 0,0001 вес. % (рис. 4).



Рис. 4. Оптический эмиссионный электронный спектрометр GDS 500

Для исследования вязкости металлов динамическим методом ГП НАЭК «Энергоатом» поставило инструментированный маятниковый копер, имеющий цифровой дисплей на базе персонального компьютера.

Для прецизионных линейных измерений размеров объектов, расстояний между точками, длины дуги и радиуса круга, площадей, углов введена в эксплуатацию видеосистема Projekt X с точностью измерения до 10 мкм.

На базе «горячих» камер функционирует аттестованная Укрметртестстандартом лаборатория

1 класса по измерению физико-механических свойств корпусных металлов. На этот вид деятельности ИЯИ НАНУ имеет лицензию госкомитета по ядерному регулированию Украины (ГКЯРУ). Оборудование для испытаний проходит ежегодную поверку в Укрметртестстандарте, а персонал аттестуется один раз в 3...5 лет комиссией ИЯИ.

## АТТЕСТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ РЕКОНСТРУКЦИИ

Целью аттестации технологии реконструкции является обоснование сохранения свойств металла вставки после изготовления реконструированного образца.

Аттестационным материалом послужили металл марки 15X2НМФА корпуса реактора размонтированной Крымской АЭС, а также переданный нам металл в рамках международной программы TAREG 2.01/03 в качестве аттестационного материала корпусной стали марки 15X2НМФАА условного энергоблока Д7.

Согласно разработанной и согласованной в ГКЯРУ Программе аттестации было проведено следующее:

- 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 °С до нагрузки  $P_{max} = 34$  кН; -70 °С до -  $P_{max} = 31$  кН; +150 °С до -  $P_{max} = 34$  кН и +20 °С до -  $P_{max} = 26$  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 корпуса реактора (300 °С) 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 сварки с помощью быстродействующего самописца ENDIM 621.01 (Германия). Как видно из графиков (рис. 5), на расстоянии 2,5 мм температура не превышает 180 °С, а на расстоянии 5 мм – 100 °С. Длина вставки составляет 17 мм.

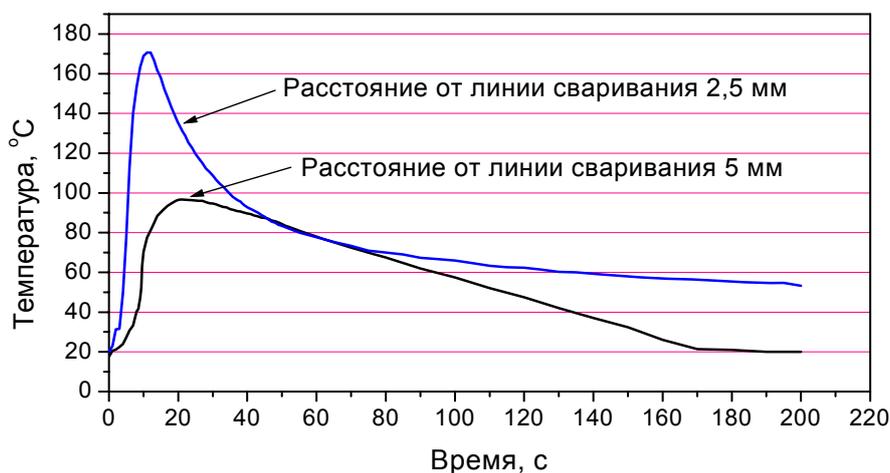


Рис. 5. Изменение температуры вставки в процессе электронно-лучевой сварки

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 зоне термического влияния (ЗТВ) и на поверхности шва (рис. 6). Результаты измерений твердости свидетельствуют о том, что изменение твердости наблюдается только в области швов.

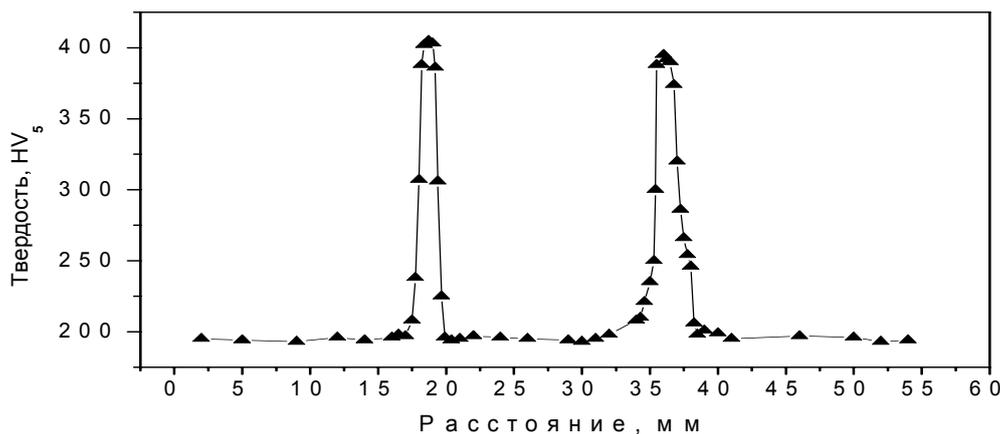


Рис. 6. Изменение твердости вдоль реконструированного образца

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 ЗТВ) достигает в районе корня шва 2,25 мм, а в устье шва – 4,98 мм. Металлографические исследования металла шва и ЗТВ, которые получены 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.

С целью верификации результатов испытаний реконструированных образцов было проведено определение критической ( $T_{KI}$ ) и референсной ( $T_0$ ) температур хрупкости по результатам испытаний на ударный и трехточечный изгибы целых и реконструированных из их половинок образцов типа Шарпи и Шарпи с трещиной, изготовленных согласно требованиям ГОСТ 9454 и ГОСТ 25.506 (рис. 7).

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

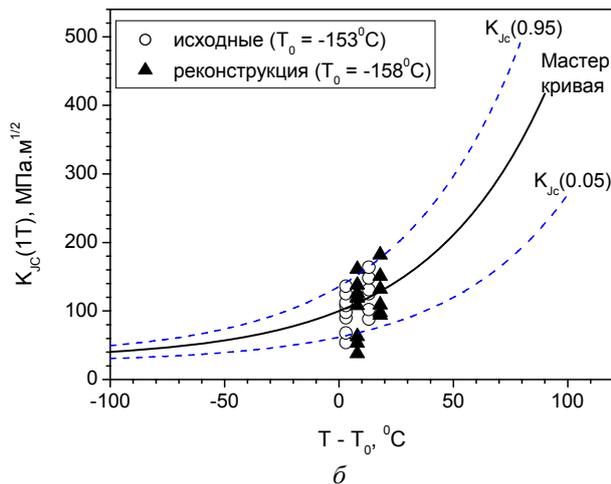
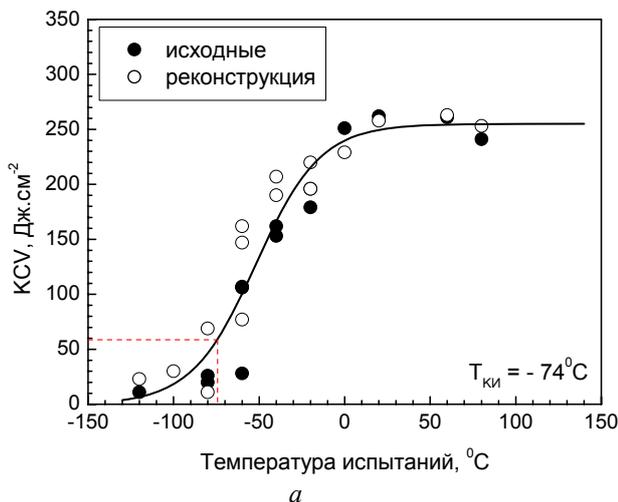


Рис. 7. Обобщенные температурные зависимости вязкости разрушения стали корпуса Д7 при испытаниях на ударный (а) и трехточечный изгибы (б)

## ВЫВОД

Усилиями двух организаций – ГП НАЭК «Энергоатом» и ИЯИ НАН Украины (отдел радиационного материаловедения) – выполнена огромная работа по оснащению необходимым оборудованием, инсталляции его внутрь «горячих» камер и отработке методик каждого этапа технологии реконструкции образцов-свидетелей металла корпусов реакторов без изменения физико-механических свойств исследуемого материала.

Технология реконструкции верифицирована экспертами Евросоюза (в рамках программы TAREG 2.01/03) и согласована Государственным комитетом ядерного регулирования Украины.

Таким образом, на базе оборудования ГП НАЭК «Энергоатом», методик и персонала «горячих» камер ИЯИ НАНУ внедрена технология реконструкции образцов-свидетелей металла корпусов реакторов.

Статья поступила в редакцию 02.09.2010 г.

## ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗРАЗКІВ-СВІДКІВ МЕТАЛУ КОРПУСІВ РЕАКТОРІВ ВВЕР-1000 В ІЯД НАН УКРАЇНИ

*І.М. Вишневський, М.І. Власенко, Л.І. Чирко, В.М. Ревка, С.М. Ковбасенко, В.Я. Козлов, Ю.В. Чайковський, Г.П. Гринченко, Е.М. Чалий, В.Д. Оцалюк, Р.В. Франков*

Представлено комплекс обладнання, поставленого НАЕК «Енергоатом» у «гарячі» камери ІЯД НАНУ з метою впровадження технології реконструкції опромінених зразків-свідків металу корпусів реакторів АЕС України. Результати атестаційних досліджень, наведені в роботі, доводять, що в процесі реконструкції зразків типу Шарпі та COD зберігаються властивості металу, що досліджується.

## INTRODUCTION INTO SERVICE OF WWER-1000 REACTOR VESSEL METAL SURVEILLANCE SPECIMENS RECONSTITUTION TECHNIQUE AT INR NAS OF UKRAINE

*I.M. Vyshnevskiy, M.I. Vlasenko, L.I. Chyrko, V.M. Revka, S.M. Kovbasenko, V.Ya. Kozlov, Yu.V. Chaikovskiy, G.P. Grynchenko, E.M. Chalyi, V.D. Otsalyuk, R.V. Frankov*

The paper presents the complex of equipment supplied by NAEK “Energoatom” to the “hot” cells of INR NAS of Ukraine for introducing the reconstitution technique of irradiated surveillance specimens of the Ukrainian NPP reactor vessels metal. The results of evaluation tests presented in this paper prove Charpy type and COD specimens to preserve the properties of the investigated metal in the process of reconstitution.