

УДК 620.179.16

А.А. Хлыбов<sup>1</sup>, А.Л. Углов<sup>2</sup>**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ОБРАЗЦОВ, ПОДВЕРГАЕМЫХ РАДИАЦИОННОМУ ОБЛУЧЕНИЮ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>.  
Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем. г. Н. Новгород<sup>2</sup>

Представлены результаты исследования акустическими методами контроля сталей 15Х2МФА, 15Х2МНФА, подвергаемых радиационному облучению. По результатам испытаний установлены корреляционные связи механических характеристик материала с акустическими. Показано, что упругие волны могут быть использованы в задачах оценки текущего состояния материала корпуса реактора.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, упругие волны, диагностический параметр.

**Введение**

Корпус реактора является одним из наиболее важных узлов ядерной энергетической установки, разрушение или частичное повреждение которого несовместимо с эксплуатацией всей ядерной установки. Ресурс корпуса фактически определяет предельный срок эксплуатации АЭС. В настоящее время стоит вопрос о продлении срока эксплуатации до 60 лет. Корпус реактора (ВВЭР-440) изготовлен из низколегированной конструкционной стали (сталь 15Х2МФА). Для ВВЭР-1000 в качестве конструкционного материала используется сталь 15Х2МНФА).

На корпус ВВЭР в процессе эксплуатации воздействуют температура и поток нейтронов. Наибольшую опасность для материала корпуса оказывает поток нейтронов. При эксплуатационной температуре 350°C и интенсивности потока нейтронов  $\Phi > 10^{17}$  нейтрон/см<sup>2</sup> с энергией больше 0.5 МэВ наблюдается низкотемпературное радиационное охрупчивание [1, 2]: повышаются прочностные характеристики, предел прочности, текучести. Но при этом существенно ухудшаются их пластические свойства, в частности, снижается относительное удлинение, поперечное сужение, ударная вязкость. Ухудшаются характеристики сопротивления хрупкому разрушению: критическая температура хрупкости, вязкость разрушения. Температура хрупко-вязкого перехода смещается в область положительных температур. Радиационная хрупкость ограничивает эксплуатационный ресурс большинства конструкционных сплавов, используемых в ядерной энергетике. Значительную опасность при этом представляет сильно возрастающая с ростом дозы облучения чувствительность сплавов к ударным нагрузкам и наличию концентраторов напряжений.

Для оценки состояния, определения механических характеристик материала корпуса реактора, находящегося в эксплуатации, используют образцы-свидетели, установленные в активной зоне реактора. Также вырезают образцы-темплеты непосредственно из материала корпуса без ухудшения прочностных характеристик (для первых реакторов система образцов-свидетелей не была предусмотрена). Такой подход требует значительных затрат, полученные данные не всегда достоверно отражают реальное состояние материала корпуса, так как информация ограничена.

В настоящее время надежного и оперативного средства контроля не существует, поэтому получение достоверной информации, применение ее для оценки текущего состояния материала и возможность прогнозирования поведения конструкции на ближайший период эксплуатации является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является: исследование влияния радиационного облучения

на физико-механические характеристики корпусной стали, обоснование применения средств диагностики для определения стадий и количественной оценки поврежденности конструктивных материалов.

### Теоретическая часть

В проблеме мониторинга технического состояния объекта зачастую возникает вопрос выбора физического метода контроля. В силу близости природы и взаимосвязи упругих характеристик металла и упругих волн акустические методы контроля весьма эффективны, и в большинстве случаев следует отдавать предпочтение именно им. Акустические методы позволяют получить информацию как о макродефектах, так и процессах, протекающих на микроуровне. С их помощью можно решать задачи, связанные с оценкой физико-механических характеристик ответственных технических объектов [3]. Упругие волны характеризуются такими параметрами, как скорость распространения, затухание. Скорость ультразвуковой волны  $C$  (м/с) при прохождении через исследуемый образец определяется по формуле

$$C = L/T,$$

где  $L$  – толщина образца, м;  $T$  – время распространения упругих волн в контролируемом образце, с.

Используя известные из теории упругости соотношения, запишем выражения для упругих модулей:

$$G = C_t^2 \rho,$$

$$E = C_l^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu) / (1 - \nu);$$

$$\nu = (0.5 * C_l^2 - C_t^2) / (C_l^2 - C_t^2),$$

где  $G$  – модуль сдвига, МПа;  $E$  – модуль Юнга, МПа;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $C_l$ ,  $C_t$  – скорости продольной и сдвиговых волн, соответственно, м/с.

### Объекты исследования и методика измерений

В работе исследовались образцы из сталей 15Х2МФА и 15Х2МФНА.

Химический состав стали 15Х2МФА: С 0,11-0,21, Si 0,17-0,37, Mn 0,30-0,60, S ≤ 0,020, P ≤ 0,020, Cr 2,0-3,0, Ni ≤ 0,40, Mo 0,60-0,80, V 0,25-0,35, Cu ≤ 0,30.

Химический состав стали 15Х2МФНА: С 0,13 - 0,16, Si 0,17 - 0,37, Mn 0,30 - 0,60, Cr 1,8 - 2,3, Ni 1,0 - 1,5, Mo 0,5 - 0,7, Cu ≤ 0,08, S ≤ 0,012, P ≤ 0,010, V 0,10 - 0,12.

В практике отечественного реакторостроения сталь типа 15Х2МФА используется в улучшенном состоянии, т. е. после закалки при 990–1000°С и высокого отпуска при 690-710°С (10 ч воздух). Микроструктура стали 15Х2МФА сорбит (рис. 1). Оценка величины зерна осуществлялась с помощью программы Spectr MET, использующей ГОСТ 5639-82. Метод основан на замере линейных размеров отрезков—хорд, отсекаемых в зернах прямыми линиями, и применяется для определения величины зерна в разнотернистой структуре. Результаты измерения размера зерна после закалки и высокого отпуска представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Результаты измерения балла зерна

Балл	Размеры, мм	Количество, %
14	0.0017 - 0.0025	10,63
13	0.0025 - 0.0036	8,39
12	0.0036 - 0.0052	19,84
11	0.0052 - 0.0076	17,02
10	0.0076 - 0.0110	13,74
9	0.0110 - 0.0160	9,41



**Рис. 1. Микроструктура стали 15X2МФА, закалка 1000°C, высокий отпуск 700°C, воздух (10 ч), x500**

В качестве измеряемых акустических характеристик использовались время распространения импульсов (задержка) объемных: продольные и сдвиговые (поляризация вдоль и поперек образца) волны [4, 5, 6] и волны Рэлея (поверхностные волны, толщина контролируемого поверхностного слоя порядка 1 мм). Измерения проводились с помощью измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН». Измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН» реализует акустический метод отраженного излучения (эхо-метод) и предназначен для генерации зондирующих сигналов, регистрации и обработки параметров отраженных упругих волн. Вся обработка информации, поступающей с датчиков, проводится автоматически в процессорном блоке. Система позволяет хранить всю исходную информацию, необходимую для использования в практических задачах контроля.

Погрешность измерения времени распространения отраженных импульсов при работе с преобразователем на резонансной частоте не более  $1 \times 10^{-9}$  с и погрешность измерения коэффициента затухания не более  $\pm 4\%$ . ИВК позволяет провести любое количество измерений, после чего определяется среднее значение в точке измерения. Частотный диапазон – до 30 МГц. Время проведения замера и получения необходимой информации фактически определяется результатами подготовки поверхности образца (конструкции) к контролю. Можно работать как с одним датчиком, работающим на излучение и прием, так и с двумя – излучение и прием осуществляется разными датчиками.

В работе использовались пьезокерамические преобразователи, контактирующие непосредственно с контролируемым образцом. Акустический контакт между датчиком продольной волны и контролируемой средой осуществляется через слой вязкой жидкости. Для ввода и приема сдвиговых волн использовался вязкий материал, свойства которого близки к эпоксидной смоле. В одной точке проводилось не менее пяти измерений. Эти данные усреднялись, и определялось среднее значение задержки для каждого из типов используемых упругих волн.

### **Исследование радиационного охрупчивания**

Акустические измерения проводились на образцах-свидетелях типа Шарпи (размеры  $10 \times 10 \times 55$  мм), образцах темплетов мини Шарпи (размеры  $5 \times 5 \times 27,5$  мм) из стали основного металла и металла сварного шва. Механические испытания проводили согласно требованиям соответствующих ГОСТов. Акустические измерения проводили на образцах, используемых для механических испытаний. Повреждающие дозы облучения и механические свойства испытанных образцов приведены в табл. 2 и 3.

В работе были исследованы темплеты (мини Шарпи, размеры  $5 \times 5 \times 27,5$  мм), вырезанные из металла сварного шва корпусов следующих реакторов:

- Кольская АЭС: 1, 2-й блоки;
- Нововоронежская АЭС: 3, 4-й блоки;

- Хмельницкая АЭС: 1-й блок (разный уровень облучения).

Химический состав материала сварного шва показан на примере материала Кольской АЭС и образцов – свидетелей (табл. 2). В табл. 3 представлены результаты испытаний образцов из темплетов сварного шва № 4 корпусов реакторов блоков 1 и 2 Кольской АЭС на статическое растяжение при комнатной температуре ( $+23\pm 5^\circ\text{C}$ ) после дооблучения в каналах для образцов-свидетелей блока 1 Ровенской АЭС в течение трех топливных циклов.

Таблица 2

## Химический состав металла сварных швов активной зоны корпусов

АЭС	Содержание, % (вес)									
	P	Cu	C	Si	Mn	S	Cr	Mo	Ni	V
Кольская, блок 1	0.034	0.14	0.05	0.42	1.04	0.015	1.39	0.48	0.15	0.15
Кольская, блок 2	0.039	0.18	0.06	0.36	0.97	0.023	1.53	0.50	0.22	0.15
Хмельницкая, блок 1	0.008	0.07	0.155	0.23	0.42	0.009	1.82	0.51	1.00	0.11

Таблица 3

## Механические характеристики темплетов, вырезанных из металла сварного шва

Кольская АЭС	Индекс образца	Флюенс нейтронов, см <sup>-2</sup>	Механические свойства	
			Rp0.2, МПа	Rm, МПа
Блок 1	159	2,73x10 <sup>19</sup>	636	754
	178	2,41x10 <sup>19</sup>	716	786
Блок 2	278	2,28x10 <sup>19</sup>	663	760
	279	2,25x10 <sup>19</sup>	671	755

Опасным последствием реакторного облучения применительно к материалам корпусов является радиационное охрупчивание, которое приводит к смещению критической температуры хрупкости в области более высоких температур, ограничивает безопасную область температур эксплуатации корпуса реактора и уменьшает работу разрушения в вязкой зоне температурной зависимости ударной вязкости. Температура хрупкости является одним из основных показателей безопасной эксплуатации реактора.

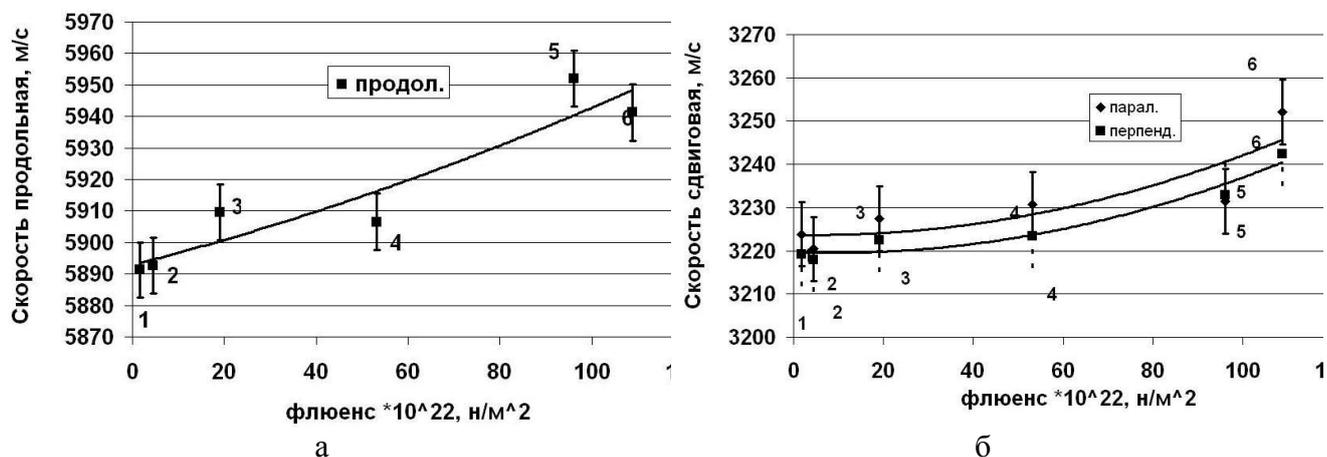
Результаты испытаний малоразмерных (5×5×27.5 мм) образцов из сварного шва корпусов реакторов Кольской АЭС (блоки 1, 2), Нововоронежской АЭС (блоки 3, 4) и Хмельницкой АЭС (блок 1, разный уровень облучения) по определению критической температуры перехода от вязкого разрушения к хрупкому приведены в табл. 4.

Таблица 4

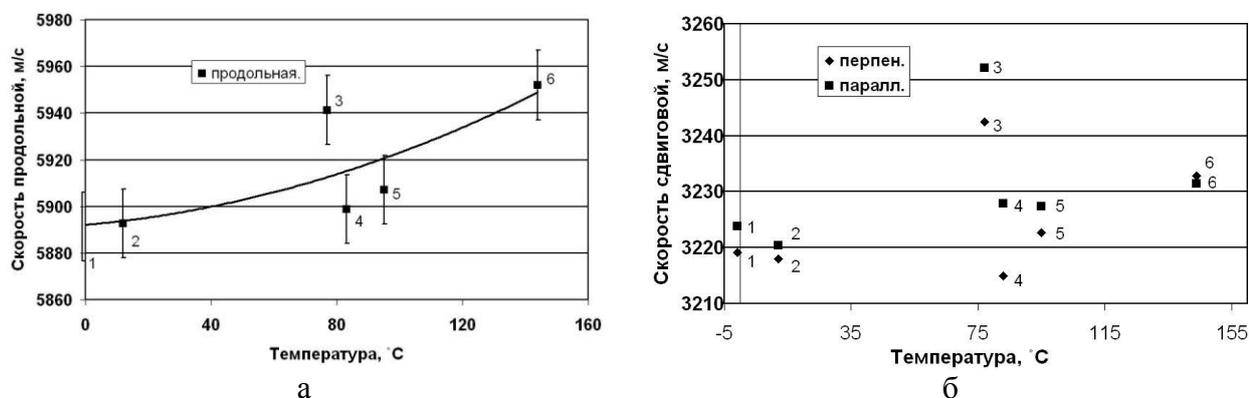
Значения критической температуры ( $TR_{5\times 5}$ ) хрупкости для малоразмерных (5×5×27.5 мм) образцов

АЭС	Суммарный флюенс, *10 <sup>22</sup> м <sup>-2</sup>	Tk <sub>5×5</sub> , °C (российский стандарт)
Хмельницкая, блок 1	1,694	-1
Хмельницкая, блок 1	4,4775	12
Кольская, блок 1	38.1	83
Кольская, блок 2	30.8	95
Нововоронежская, блок 3	96.1	144
Нововоронежская, блок 4	108.8	77

Параллельно с проведением механических характеристик исследовалось поведение скорости упругих волн. Зависимость средних значений скоростей продольных и сдвиговых волн от величины флюенса представлена на рис. 2. Зависимость средних значений скоростей продольных и сдвиговых волн от критической температуры хрупкости для исследуемых энергоблоков представлена на рис. 3. Усреднение проводилось по всем исследуемым образцам для каждого блока.



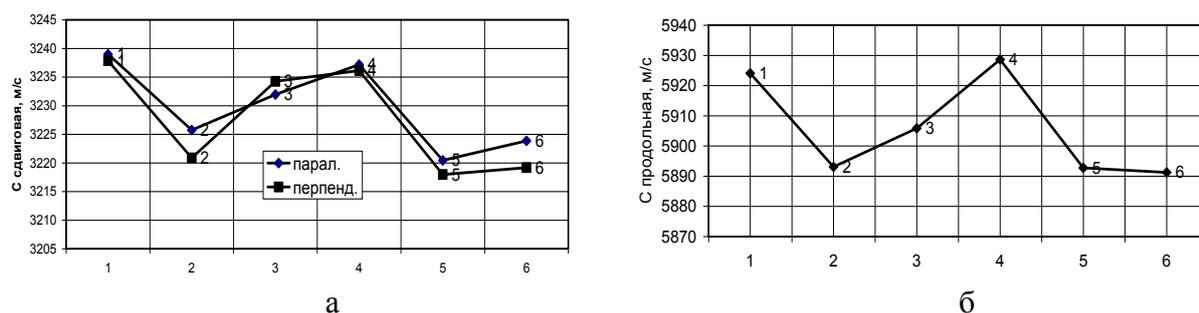
**Рис. 2. Зависимость скорости продольной (а), сдвиговой (б) волн от флюенса:**  
1, 2 – Хмельницкая АЭС (блок 1, выгрузка 3); 3, 4 – Кольская АЭС (блоки 1 и 2);  
5, 6 – Нововоронежская АЭС (блоки 3 и 4)



**Рис. 3. Зависимость скорости продольной (а), сдвиговой (б) волн от критической температуры хрупкости:**  
1, 2 – Хмельницкая АЭС (блок 1, выгрузка 3); 3, 4 – Кольская АЭС (блоки 1 и 2);  
5, 6 – Нововоронежская АЭС (блоки 3 и 4)

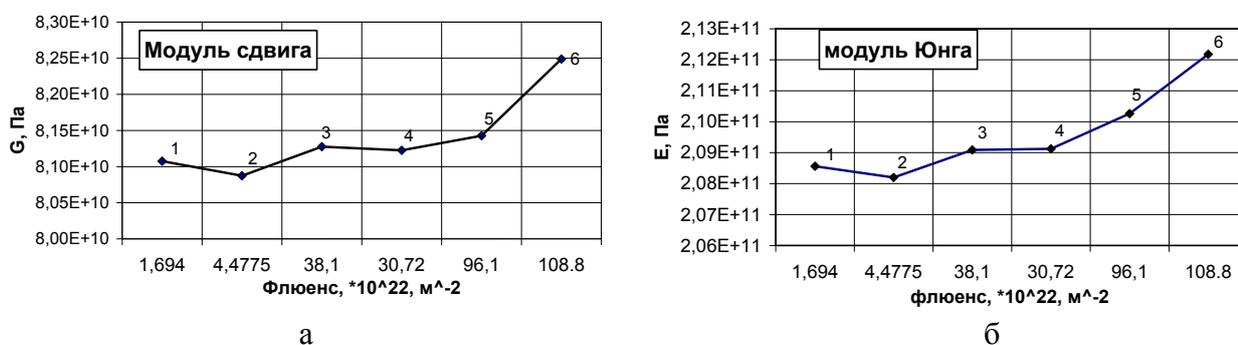
На рис. 3 представлены результаты акустических измерений (скорость продольных и скорость сдвиговых волн) на образцах-свидетелях (образцы типа Шарпи 10x10x55 мм) корпуса реактора Хмельницкой АЭС, блок 1. Точки № 1–4 получены на образцах в состоянии поставки (облучение отсутствует), 5, 6 получены на образцах-свидетелях после облучения (по четырем образцам для каждой точки). Для образцов в состоянии поставки измерения проводились по десяти образцам, затем данные усреднялись. Полученные данные показывают, что материал сварного шва (точка 2) и основного металла (точки 1, 4) отличаются по акустическим характеристикам: скорость упругих волн для основного металла выше, чем для шва. Образцы под номером 1 – это образцы в состоянии поставки, находятся на длительном хранении. Образцы под номером 4 были испытаны для определения механических характери-

стик, после чего были проведены акустические измерения. Различия скоростей для сварного шва и основного металла необходимо учитывать при создании алгоритма и методики контроля материала реактора. Материал из зоны термического влияния занимает промежуточное положение. Следует также отметить, что скорости упругих волн как продольных, так и сдвиговых для металла сварного шва в состоянии поставки (точка 2), и облучения (точки 5, 6) практически совпадают при изменении химического состава в указанных выше пределах. Небольшие изменения скорости упругих волн от флюенса нейтронов можно объяснить низким уровнем облучения. При радиационном облучении меняются упругие характеристики материала (рис. 5). Акустический метод позволяет определить упругие характеристики материала в реальном времени, без использования специальных образцов и нагружающих устройств.



**Рис. 4. Зависимость скорости сдвиговой (а), продольной (б) волн от материала образцов для Хмельницкой АЭС, блок 1:**

1 – поставка (ОМ), 2 – поставка (СШ), 3 – поставка (ЗТВ), 4 – поставка (ОМ),  
5 – облучение  $1,69 \cdot 10^{22}$  (СШ), 6 – облучение  $4,48 \cdot 10^{22}$  (СШ)

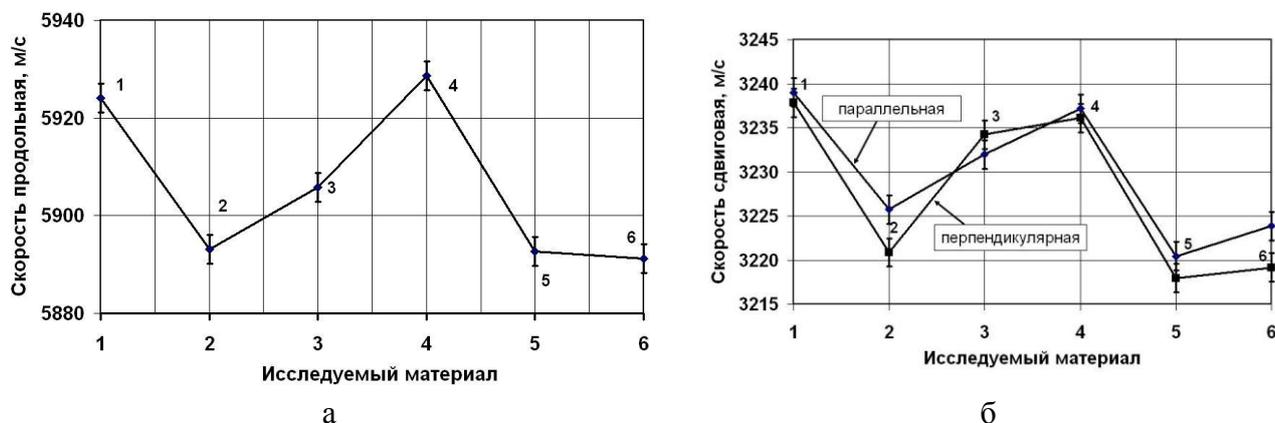


**Рис. 5. Влияние флюенса нейтронов на упругие характеристики:**

а – модуль сдвига; б – модуль Юнга; 1, 2 – Хмельницкая (блок 1, выгрузка 3);  
3, 4 – Кольская АЭС (блоки 1 и 2); 5, 6 – Новovorонежская АЭС (блоки 3 и 4)

Были проведены исследования влияния места вырезки образцов: основной металл, зона термического влияния, сварной шов на параметры упругих волн. Полученные данные показывают, что материал сварного шва и основного металла отличаются по акустическим характеристикам: скорость упругих волн для основного металла выше, чем для шва (рис. 6). Эти различия необходимо учитывать при создании алгоритма и методики контроля материала реактора. Материал из зоны термического влияния занимает промежуточное положение. Следует также отметить, что скорости упругих волн как продольных, так и сдвиговых для металла сварного шва в состоянии поставки (точка 2) и облучения (точки 5, 6) практически

совпадают при изменении химического состава в указанных пределах. Небольшие изменения скорости упругих волн от флюенса нейтронов можно объяснить низким уровнем облучения.



**Рис. 6. Зависимость скорости продольной (а), сдвиговой (б) волн от материала образцов для Хмельницкой АЭС, блок 1:**

1 – поставка (ОМ); 2 – поставка (СШ); 3 – поставка (ЗТВ); 4 – поставка (ОМ);  
5 – облучение  $1,69 \cdot 10^{22}$  (СШ); 6 – облучение  $4,48 \cdot 10^{22}$  (СШ)

### Оценка трещиностойкости металла элементов ядерного реактора

Исследования проводились на двух темплетях, вырезанных из обечайки активной зоны корпуса реактора ВВЭР -1000, изготовленной из основной дуговой стали на Краматорском заводе «Энергомашспецсталь». Термообработка обечайки, из которой были вырезаны исследованные темплеты, была проведена по штатной технологии. Для решения методических вопросов, связанных с испытанием облученных образцов, предлагается использовать образцы, изготовленные из искусственно охрупченного металла. В качестве способа искусственного охрупчивания стали марки 15Х2НМФА-А применена специальная термическая обработка. Режим охрупчивающей термообработки определялся следующим образом:

- закалка: нагрев со скоростью не более  $100^\circ\text{C}/\text{ч}$  до температуры  $920 \pm 10^\circ\text{C}$ ; выдержка 6 ч; охлаждение в воде до температуры на поверхности темплета не выше  $100^\circ\text{C}$  (температура воды не выше  $60^\circ\text{C}$ );
- отпуск: нагрев со скоростью не более  $100^\circ\text{C}$  до температуры  $600 \pm 10^\circ\text{C}$ ; выдержка 10 ч; охлаждение на воздухе.

Из темплетов были изготовлены образцы для испытания на растяжение, образцы для испытания на ударный изгиб и образцы для исследования трещиностойкости.

Определение статической трещиностойкости проводилось с использованием компактных образцов внецентренного растяжения (образцы типа 3 по ГОСТ 25.506) толщиной 25 мм. Предварительно на образцах были выращены усталостные трещины. Выращивание проводилось на сервогидравлической машине PSB - 100 производства фирмы ШЕНК АГ (ФРГ). Нагружение проводилось пульсирующей нагрузкой с коэффициентом асимметрии цикла  $R = 0.1$ . Максимальная нагрузка цикла на первом этапе выращивания трещины  $P_{\text{max1}} = 16$  кН. Суммарное число циклов нагружения для каждого образца составляло  $N > 100000$  циклов. Испытания на вязкость разрушения проводились на испытательной машине RMC-100 производства фирмы ШЕНК. В процессе нагружения регистрировались нагрузка и раскрытие берегов надреза образца. Начальная длина трещины (механический надрез + усталостная трещина) измерялась в пяти точках по фронту трещины.

Для оценки возможности контроля характеристик трещиностойкости металла элементов ВВР с помощью разработанной системы проводился эксперимент на образцах из корпус-

ной стали 15Х2НМФАА в двух состояниях: исходном (образцы 4 и 6) и в охрупченном (образцы 3 и 5). Исходному состоянию соответствует величина  $K_{IC} = 250 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ; охрупченному -  $K_{IC} = 100 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

Для выявления акустических характеристик, чувствительных к величине вязкости разрушения, использовались все основные типы упругих волн: объемные продольные волны, объемные сдвиговые волны, релеевские волны. В табл. 5 приведены результаты измерения скоростей объемных волн, распространяющихся перпендикулярно поверхности образцов. Для поверхностных волн измерялось изменение времени распространения на фиксированной (постоянной) базе.

Таблица 5

## Влияние параметров трещиностойкости на параметры упругих волн

№ обр.	4	6	3	5
$K_{IC}$ , МПа $\sqrt{\text{м}}$	250	250	100	100
$C_t$ , м/с	3238	3248	3231	3232
$C_s$ , м/с	3242	3243	3233	3233
$C_L$ , м/с	5923	5924	5903	5904
$T_R$ , нс	1027	1011	1048	1044

Погрешность определения скорости звука, обеспечиваемая системой АСТРОН, не превышает 1 м/с, из чего следует, что различие в акустических параметрах образцов в двух состояниях является весьма значительным.

При разнице в характеристиках  $K_{IC}$ , составляющем 100 МПа $\sqrt{\text{м}}$ , разница в значениях продольных скоростей звука составляет порядка 20 м/с.

Погрешность определения задержки релеевского импульса составляла 3 нс, откуда следует возможность оценки величины  $K_{IC}$  с помощью данного вида измерений с погрешностью порядка 15 МПа $\sqrt{\text{м}}$ .

## Выводы

Приведенные результаты исследований показали, что упругие волны чувствительны к процессам, протекающим в материалах, подвергаемых радиационному облучению. Акустический метод может быть использован в качестве экспресс-метода для оценки необратимых изменений, протекающих в материале конструкции корпуса.

Исследования проведены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № П 1097).

## Библиографический список

1. Штромбах, Я.И. Радиационный ресурс металла корпусов действующих ВВЭР / Я.И. Штромбах, Ю.А. Николаев, П.А. Платонов // Атомная энергия. 2005. Т. 98. Вып. 6. С. 460–472.
2. Николаев, А.В. Радиационное охрупчивание материалов корпусов ВВЭР-1000 / А.В. Николаев, Ю.А. Николаев, Ю.Р. Кеворкян // Атомная энергия. 2001. Т. 90. Вып. 5. С. 271–276.
3. Неразрушающий контроль: справочник; под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. Т. 3. – 864 с.
4. Васильев, В.Г. Акустический метод контроля состояния корпусов ВВЭР / В.Г. Васильев, А.Л. Углов, А.А. Хлыбов // Атомная энергия. 2009. Т. 106. Вып. 1. С. 31–35.
5. Хлыбов, А.А. Определение физико-механических характеристик образцов, подвергаемых радиационному облучению / А.А. Хлыбов, В.Г. Васильев, А.Л. Углов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 12. С. 46–49.

6. О новом методе контроля повреждаемости материала оборудования ЯЭУ и аппаратно-программных средствах для ее реализации / Ф.М. Митенков [и др.] // Проблемы машиноведения и надежности машин. 1998. №3. С. 3–9.

*Дата поступления*

*в редакцию 31.01.2013*

**A.A. Khlybov<sup>1</sup>, A.L. Uglov<sup>2</sup>**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
JSC Research centre control and diagnostic systems<sup>2</sup>

**DETERMINATION OF PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTIC  
OF THE SAMPLE MATERIAL EXPOSED TO RADIATION**

The results of investigation by the acoustic inspection method of 15H2MFA, 15H2MNFA steel exposed to radiation. According to results of the investigation, the correlation between mechanical and acoustic properties of material has been established. It is shown elastic waves can be used in estimation problem of current state of vessel material of reactor.

*Key words:* nondestructive testing, elastic waves, diagnostic parameter.