

PACS numbers: 06.60.Mr, 28.41.Qb, 43.58.+z, 62.20.D-, 81.40.Ef, 81.40.Jj, 81.70.Cv

Акустические и упругие свойства составляющих стенки корпуса реактора ВВЭР-440

О. И. Запорожец, Н. А. Дордиенко, В. А. Михайловский

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадского, 36,
03680, ГСП, Киев, Украина*

С помощью автоматизированной импульсной установки собственной разработки на частотах 10–30 МГц измерены объёмные скорости (v_{ij}) ультразвука (УЗ) в различных геометрических направлениях и на различных участках образцов из составляющих архивного фрагмента стенки корпуса реактора ВВЭР-440 (стали 15X2МФА и 08X18Н10Т) и корпусной стали 15X2НМФА реактора ВВЭР-1000, а также плотность образцов (ρ). По значениям v_{ij} и ρ изучена акустическая и упругая анизотропия сплавов, их однородность, а также осуществлён текстурный УЗ-анализ двух слоёв наплавленного покрытия стенки корпуса реактора ВВЭР-440. В отличие от образцов из корпусных сталей обоих реакторов, в наплавке из стали 08X18Н10Т зафиксированы акустическая и упругая неоднородности, анизотропия скоростей УЗ (до 26%) и соответствующих упругих модулей (до 52%), обусловленные наличием в материале чётко выраженной неоднородной текстуры, близкой к аксиальной. По температурным зависимостям продольной скорости УЗ $v_l(T)$ в образцах из составляющих стенки корпуса реактора ВВЭР-440 построены зависимости от T упругих модулей E , G и B в общем температурном интервале 0–300°C для направления, нормального к поверхности стенки. Зависимости $v_l(T)$ и $E(T)$ использованы в предыдущих работах авторов в качестве калибровочных. Отмечается, что основная часть результатов публикуется впервые и их необходимо учитывать при анализе механических свойств корпусов реакторов ВВЭР и

Corresponding author: Oleg Ivanovich Zaporozhets
E-mail: zapus@imp.kiev.ua

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03680 Kyiv, Ukraine*

Please cite this article as: O. I. Zaporozhets, N. A. Dordienko, and V. A. Mykhailovsky, Acoustic and Elastic Properties of Components of a Wall of the VVER-440 Vessel, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 6: 795–813 (2016) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.38.06.0795.

при использовании методов их неразрушающего УЗ-контроля.

Ключевые слова: стали 08X18N10T, 15X2MФА, 15X2НМФА, объёмные скорости ультразвука, упругие свойства, упругая анизотропия, текстура, неоднородность.

За допомогою автоматизованого імпульсного пристрою власної розробки на частотах 10–30 МГц виміряно об'ємні швидкості (v_{ij}) ультразвуку (УЗ) в різних геометричних напрямках і на різних ділянках зразків зі складових архівного фрагменту стінки корпусу реактора ВВЕР-440 (сталі 15X2MФА і 08X18N10T) та корпусної сталі 15X2НМФА реактора ВВЕР-1000, а також густину зразків (ρ). За значеннями v_{ij} та ρ вивчено акустичну та пружню анизотропію стопів, їхню однорідність, а також здійснено текстурну УЗ-аналізу двох шарів нагрітого покриття стінки корпусу реактора ВВЕР-440. На відміну від зразків з корпусних сталей обох реакторів, у нагріті зі сталі 08X18N10T зафіксовано акустичну та пружню неоднорідності, анизотропію швидкостей УЗ (до 26%) та відповідних пружних модулів (до 52%), що зумовлено наявністю в матеріалі чітко вираженої неоднорідної текстури, близької до аксіальної. За температурними залежностями поздовжньої швидкості УЗ $v_l(T)$ в зразках зі складових стінки корпусу реактора ВВЕР-440 побудовано залежності від T пружних модулів E , G і B в загальному температурному інтервалі 0–300°C для напрямку, нормального до поверхні стінки. Залежності $v_l(T)$ і $E(T)$ було використано в попередніх роботах авторів в якості калібрувальних. Відзначається, що основна частина результатів публікується вперше і їх необхідно враховувати при аналізі механічних властивостей корпусів реакторів ВВЕР та при використанні методів їх неруйнівного УЗ-контролю.

Ключові слова: сталі 08X18N10T, 15X2MФА, 15X2НМФА, об'ємні швидкості ультразвуку, пружні властивості, пружня анизотропія, текстура, неоднорідність.

Using own-design automated pulse equipment at frequencies of 10–30 MHz, the bulk-wave velocities of ultrasonic (US) in the different geometric directions and on various sections of specimens made of archival fragment of the VVER-440 vessel wall (15CrMFA and 08Cr18N10T steels) and 15Cr2NMFA RPV (Reactor Power Vessel) steel of the VVER-1000 vessel as well as density (ρ) of the specimens are measured. Using the values of v_{ij} and ρ , the acoustic and elastic anisotropy of the alloys and their homogeneity are studied, and the texture US analysis of the two layers of the wall cladding of the VVER-440 vessel is executed. In contrast to the specimens of RPV steels of both reactors, in the cladding of 08Cr18N10T steel, the acoustic and elastic inhomogeneity, anisotropy of US velocities (up to 26%), and corresponding elastic moduli (up to 52%) caused by the presence of clearly determined inhomogeneous texture close to axial one are ascertained. By the temperature dependence of US longitudinal velocity $v_l(T)$ in the specimens of the wall components of the VVER-440 vessel, dependences of elastic modules E , G and B on T are determined in overall temperature range of 0–300°C for a direction normal to the wall surface. The $v_l(T)$ and $E(T)$ dependences were used in previous studies as calibration data. As noted, most of the results are published for the

first time, and they must be taken into account in the analysis of the mechanical properties of the VVER vessels and for using in methods of non-destructive ultrasonic testing.

Key words: 15CrMFA, 08Cr18N10T, 15Cr2NMFA steels, bulk-wave ultrasonic velocities, elastic properties, elastic anisotropy, texture, inhomogeneity.

(Получено 18 мая 2016 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Корпуса ядерных реакторов являются одними из наиболее важных элементов конструкций атомных станций, во многом определяющими надёжность и безопасность работы последних. Поэтому к материалам, используемым в корпусах реакторов, предъявляются особые требования; им также уделяется повышенное внимание специалистов (см., например, [1] и приведённые там ссылки). К одним из наиболее важных физико-механических свойств таких материалов относятся их упругие свойства (УС), являющиеся фундаментальной характеристикой любого твёрдого тела. Однако сведения об УС этих материалов, подвергнутых набору штатных технологических обработок, достаточно ограничены. Сказанное относится, в частности, к упругой анизотропии защитных наплавленных слоёв стенок корпусов реакторов ВВЭР, а также неоднородности упругих характеристик по толщине наплавленного слоя и основного материала стенки.

В предыдущих работах [2–4] для обоснования метода ультразвукового неразрушающего контроля (УЗНК) температурных полей и термических напряжений в корпусах ядерных реакторах типа ВВЭР при импульсном тепловом нагружении (ИТН) были использованы в качестве калибровочных данные о некоторых акустических и упругих свойствах составляющих стенки корпуса реактора ВВЭР-440. Ниже приведены более подробные результаты этих исследований. Результаты получены на основании прецизионных измерений продольной (v_l) и поперечной (v_t) скоростей ультразвука (УЗ), а также плотности (ρ) в образцах из сталей 15Х2МФА и 08Х18Н10Т из фрагмента стенки корпуса реактора ВВЭР-440. По значениям v_l , v_t , ρ и температурным зависимостям $v_l(T)$ получены количественные данные о модулях Юнга (E), сдвига (G) и всестороннего сжатия (B) в общем температурном интервале 0–300°C, а также рассчитан коэффициент Пуассона (η) в образцах в направлении, перпендикулярном к поверхности стенки. В настоящей работе более подробно также исследованы обнаруженные ранее акустическая и упругая неоднородность в защитном наплавленном слое, анизотропия скоростей УЗ, обусловленная наличием в нем чётко выраженной текстуры. По значениям скоростей УЗ в ортогональных направлениях при $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$ рассчитаны текстурные коэф-

фициенты W_{4i0} ($i = 0, 2, 4$) для двух слоёв наплавки и построены полюсные фигуры для основных кристаллографических направлений, по которым определены соответствующие значения максимального размаха относительной интенсивности дифракционных линий $\Delta I_{[ijk]} = I_{[ijk]_{\max}} - I_{[ijk]_{\min}}$. Наряду с данными об усреднённых по направлениям упругих параметрах защитного наплавленного слоя и корпусной стали стенки реактора ВВЭР-440 в работе приведены аналогичные результаты УЗ исследований корпусной стали 15Х2НМФА.

2. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В экспериментах использовались образцы, вырезанные из архивного фрагмента стенки корпуса реактора ВВЭР-440 (рис. 1), а также из стенки корпуса реактора ВВЭР-1000 (сталь 15Х2НМФА), т.е. образцы, прошедшие все этапы штатной технологической обработки. Образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда с размерами $8 \times 8 \times 15$ мм³. Из наплавленного слоя было изготовлено 7 образцов, а из сталей 15Х2МФА и 15Х2НМФА по 3 образца. Учитывая значительную пространственную неоднородность защитного наплавленного слоя, УЗ измерения проводились на различных участках образцов этой группы с последующим усреднением полученных данных. Химический состав исследованных образцов приведён в табл. 1.

УЗ измерения проводились на частотах 10–30 МГц с помощью импульсной УЗ установки собственной разработки той же, что и в работах [2–5]. Волновой вектор обоих типов волн был поочерёдно ориентирован в трёх ортогональных направлениях, одно из кото-

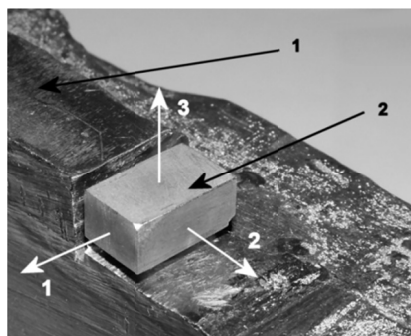


Рис. 1. Внешний вид фрагмента стенки корпуса реактора ВВЭР-440: 1 — фрагмент стенки, 2 — образец из наплавленного слоя.

Fig. 1. Appearance of wall fragment of the VVER-440 vessel: 1—a fragment of wall, 2—a sample from the cladding layer.

ТАБЛИЦА 1. Химический состав сталей 15Х2МФА и 08Х18Н10Т из архивного фрагмента стенки корпуса реактора ВВЭР-440.

TABLE 1. Chemical composition of 15CrMFA and 08Cr18N10T steels of archival fragment of the VVER-440 vessel wall.

Сталь	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu	Mo	V
15Х2МФА	0,15	0,33	0,51	2,58	0,16	0,013	0,01	0,12	0,62	0,28
08Х18Н10Т (ЭИ914)	до 0,08	до 1,00	до 2,00	17,0–19,0	9,0–11,0	0,035	до 0,02	до 0,30	–	–

рых было перпендикулярно к поверхности стенки реактора. Скорости УЗ измерялись по времени однократного прохождения через образец УЗ сигнала (теневой метод) или временному интервалу между заданными эхо-импульсами (эхо-метод) путём автоматической фиксации прохождения через нулевое значение идентичных периодов высокочастотного заполнения УЗ радиоимпульсов с образца [6]. Инструментальная точность измерений абсолютных значений v_l и v_t на временной базе 10 мкс составляла 0,01%, а относительных — на порядок выше. Температура образцов при записи $v_l(T)$ контролировалась хромель-алюмелевой дифференциальной термопарой с точностью $\pm 0,15^\circ\text{C}$. Плотность образцов (ρ) измерялась при $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$ дифференциальным методом гидростатического взвешивания с использованием кварцевого или германиевого эталонов с точностью 0,01% при их массе 10 г.

Упругие модули и коэффициент Пуассона образцов из обоих сплавов для направления, нормального к поверхности стенки (направление 3 на рис. 1), рассчитывались по формулам для изотропных поликристаллов:

$$G = \rho v_t^2, \tag{1}$$

$$E = GA, \tag{2}$$

$$B = GA/[3(3 - A)], \tag{3}$$

$$\eta = E/(2G) - 1 = (a^2 - 2)/[2(a^2 - 1)], \tag{4}$$

где

$$A = (3a^2 - 4)/(a^2 - 1), \tag{5}$$

$$a = v_l / v_t. \tag{6}$$

Эти же формулы применялись для оценки средних значений упругих параметров наплавленных слоёв. Однако при этом использова-

лись усреднённые по всем направлениям и прозвучиваемым участкам скорости УЗ $\langle v_l \rangle$ и $\langle v_t \rangle$.

Для текстурного анализа образцов из наплавленного слоя использовался ультразвуковой метод [6–8], уступающий по точности рентгеновскому [10] и нейтронографическому [11], но являющийся экспрессным и позволяющий прозвучивать различные участки образца (изделия, конструкции) без разрушения. УЗ метод базируется на аналитической связи между эффективными упругими коэффициентами анизотропного поликристаллического агрегата (C'_{ij}), соответствующими объёмными скоростями УЗ в ортогональных направлениях (v_{ij}) и текстурными коэффициентами (W_{ij0}), определяющими функцию распределения ориентаций кристаллитов (ФРОК). Элементы теории, использованной в настоящей работе, приведены ниже.

3. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ УЗ ТЕКСТУРНОГО АНАЛИЗА АНИЗОТРОПНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ

Теоретическая база по данному вопросу подробно освещена в литературе [7–14], а сам УЗ метод широко используется в современных научных и заводских лабораториях. В основу метода положено представление о текстурированном агрегате как о псевдо-монокристалле с более низкой кристаллографической симметрией, чем у кристаллитов.

На рисунке 2 для пояснения использованной модели приведён схематический вид прокатанного образца в форме прямоугольного параллелепипеда в ортогональной системе координат с возможными для измерений шестью поперечными скоростями УЗ v_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$). Ось 1 указывает направление прокатки (НП — RD), 2 — поперёк прокатки (ПП — TD) и 3 — направление деформации (НД — ND). Первый индекс при v_{ij} указывает направление распространения, а второй — вектора поляризации УЗ волны в образце. Кроме показанных на рис. 2 поперечных скоростей УЗ, в ортогональных направлениях возможно измерять также три продольные скорости ($i = j = 1, 2, 3$).

Связь между коэффициентами C'_{ij} , соответствующими скоростями звука v_{ij} и коэффициентами W_{ij0} для кубических поликристаллов может быть представлена следующими выражениями:

$$C'_{11} = \rho v_{11}^2 = B + \frac{4}{3}G + C^a \frac{12}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_{400} - \frac{2}{3} \sqrt{10} W_{420} + \frac{1}{3} \sqrt{70} W_{440} \right), \quad (7)$$

$$C'_{22} = \rho v_{22}^2 = B + \frac{4}{3}G + C^a \frac{12}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_{400} + \frac{2}{3} \sqrt{10} W_{420} + \frac{1}{3} \sqrt{70} W_{440} \right), \quad (8)$$

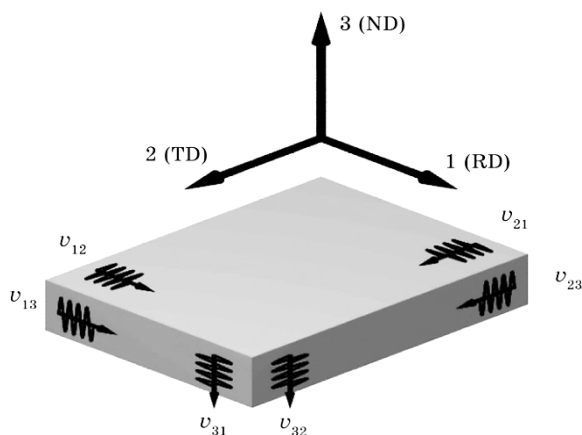


Рис. 2. Схематический вид прокатанного образца в форме прямоугольного параллелепипеда для измерений объёмных скоростей УЗ и текстурного анализа анизотропных поликристаллов.

Fig. 2. Schematic view of the rolled sample with shape of rectangular parallelepiped for measurement of bulk-wave US velocities and texture analysis of anisotropic polycrystals.

$$C'_{33} = \rho v_{33}^2 = B + \frac{4}{3}G + C^a \frac{32}{35} \sqrt{2} \pi^2 W_{400}, \quad (9)$$

$$C'_{44} = \rho v_{23,32}^2 = G - C^a \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_{400} + \sqrt{\frac{5}{2}} W_{420} \right), \quad (10)$$

$$C'_{55} = \rho v_{13,31}^2 = G - C^a \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_{400} - \sqrt{\frac{5}{2}} W_{420} \right), \quad (11)$$

$$C'_{66} = \rho v_{12,21}^2 = G + C^a \frac{4}{35} \sqrt{2} \pi^2 (W_{400} - \sqrt{70} W_{440}), \quad (12)$$

$$C'_{23} = B - \frac{2}{3}G - C^a \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_{400} + \sqrt{\frac{5}{2}} W_{420} \right) = B - \frac{5}{3}G + C'_{44}, \quad (13)$$

$$C'_{12} = B - \frac{2}{3}G - C^a \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_{400} - \sqrt{\frac{5}{2}} W_{420} \right) = B - \frac{5}{3}G + C'_{55}, \quad (14)$$

$$C'_{12} = B - \frac{2}{3}G + C^a \frac{4}{35} \sqrt{2} \pi^2 (W_{400} - \sqrt{70} W_{440}) = B - \frac{5}{3}G + C'_{66}, \quad (15)$$

где B и G — соответственно модули всестороннего сжатия и сдвига изотропного поликристалла, ρ — массовая плотность и C^a — фактор

анизотропии, который рассчитывается по упругим коэффициентам кристаллитов (C_{ij}). Индекс «а» указывает на способ усреднения: (а = V) — по Фохту, (а = R) — по Ройсу и (а = H) — по Фохту–Ройсу–Хиллу (ФРХ). При этом

$$C^V = C_{11} - C_{12} - 2C_{44}, \quad (16)$$

$$C^R = \frac{50(C_{11} - C_{12} - 2C_{44})(C_{11} - C_{12})C_{44}}{[3(C_{11} - C_{12}) + 4C_{44}]^2}, \quad (17)$$

$$C^H = \frac{C^V + C^R}{2}. \quad (18)$$

В выражениях (10)–(12) $v_{ij,ji} = (v_{ij} + v_{ji})/2$ ($i, j = 1, 2, 3$) — усреднённые по симметричным индексам поперечные скорости УЗ. Неравенство $v_{ij} \neq v_{ji}$ указывает на наличие в материале действующих или остаточных макронапряжений. Из приведённых 9-ти уравнений (7)–(15) 6 являются независимыми. Используя различные комбинации из системы этих уравнений, по измеренным значениям v_{ij} и плотности ρ определяют коэффициенты W_{400} , W_{420} и W_{440} .

Построение полюсных фигур (ПФ) по коэффициентам W_{ij0} осуществляется с помощью выражений [13]:

$$q(\zeta, \eta) = \frac{1}{4} + S_4[P_4^0(\zeta)W_{400} + P_4^2(\zeta)W_{420} \cos 2\eta + P_4^4(\zeta)W_{440} \cos 4\eta] + \\ + S_6[P_6^0(\zeta)W_{600} + P_6^2(\zeta)W_{620} \cos 2\eta + P_6^4(\zeta)W_{640} \cos 4\eta + P_6^6(\zeta)W_{660} \cos 6\eta], \quad (19)$$

$$S_4 = S_6 = 2\pi \text{ для полюсной фигуры (100),}$$

$$S_4 = -\pi/2 \text{ и } S_6 = -13\pi/4 \text{ для полюсной фигуры (110),} \quad (20)$$

$$S_4 = -4\pi/3 \text{ и } S_6 = -32\pi/9 \text{ для полюсной фигуры (111).}$$

При этом членами, содержащими коэффициенты W_{6i0} , в рамках использованной для УЗ текстурного анализа теоретической модели пренебрегают. Программное обеспечение при построении нормированных ПФ позволяло оценить максимальный размах относительной интенсивности дифракционных линий $\Delta I_{[ijk]} = I_{[ijk]\max} - I_{[ijk]\min}$ для основных кристаллографических направлений.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 2 приведены значения продольной ($i = j$) и поперечной ($i \neq j$) скоростей УЗ в двух слоях образцов из наплавки стенки корпуса реактора ВВЭР-440 и корпусных сталей 15Х2МФА и 15Х2НМФА (нижние строки в таблице), измеренных в ортогональ-

ных направлениях, их анизотропия (Ан. v_{ii} , Ан. v_{ij}), средние значения этих величин для суммарного слоя ($\langle X \rangle_{1,2}$) и их относительные изменения по слоям ($\Delta X / \langle X \rangle_{1,2}$). Ортогональная система координат соответствует фото на рис. 1 и рисунку под таблицей. Слой № 1 выходит на поверхность внутренней двухслойной стенки корпуса реактора, а № 2 прилегает к корпусной стали.

Следует отметить, что приведённые данные являются результатом усреднения не менее чем по 5–9 участкам обоих слоёв образца и для каждого из трёх взаимно перпендикулярных направлений. Звёздочкой (*) в табл. 2 отмечены значения скоростей УЗ, полученные на отдельных участках образцов, которые при усреднении не

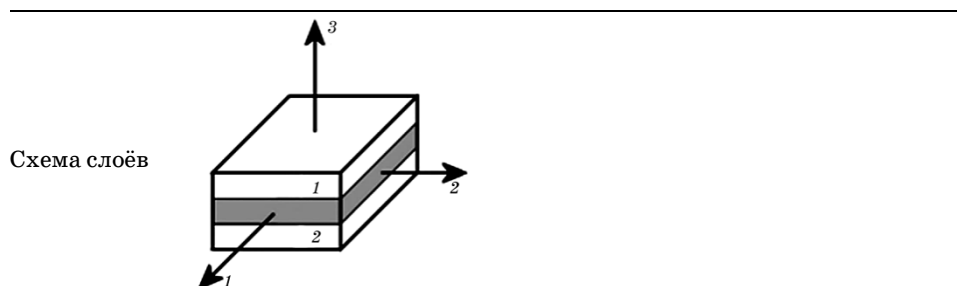
ТАБЛИЦА 2. Значения продольной ($i = j$) и поперечной ($i \neq j$) скоростей УЗ в двух слоях образцов из наплавки стенки корпуса реактора ВВЭР-440 и корпусных сталей 15Х2МФА и 15Х2НМФА, измеренные в ортогональных направлениях, их анизотропия (Ан. v_{ii} , Ан. v_{ij}), средние значения этих величин ($\langle X \rangle_{1,2}$) для суммарного слоя и их относительные изменения по слоям ($\Delta X / \langle X \rangle_{1,2}$).

TABLE 2. The values of the longitudinal ($i = j$) and transverse ($i \neq j$) US velocities in two layers of the specimens from the cladding of the VVER-440 vessel wall and 15CrMFA and 15Cr2NMFA RPV steels measured in orthogonal directions, their anisotropy (Ан. v_{ii} , Ан. v_{ij}), mean values of these quantities ($\langle X \rangle_{1,2}$) for total layer and their relative changes in layers ($\Delta X / \langle X \rangle_{1,2}$).

№ слоя	v_{ij} , м/с											
	11	22	33 _{1,2}	$\langle 11,22 \rangle$	Ан. v_{ii} 33– $\langle 11,22 \rangle$, %	12	13	Ан. v_{ij} 12–13, %	21	23	Ан. v_{ij} 21–23, %	
Наплавка. Сталь 08Х18Н10Т (ВВЭР-440)												
1	5847,5 5925,1*	5846,4 5925,3*	5761,5 5396,7*	5847,0	-4,69	2689,3	3265,7 3097,8*	-19,4	2683,0	3244,5 3096,2*	-18,9	
2	5806,3	5802,0	5396,7*	5804,1	-3,95	2755,4	3461,7 3168,0*	-22,7	2674,8	3472,8 3204,3*	-26,0	
$\langle X \rangle_{1,2}$	5826,9	5824,2	5579,1	5851,1	-4,32	2722,35	3363,7	-21,05	2700,65	3358,65	-22,45	
$\Delta X / \langle X \rangle_{1,2}$ %	0,71	0,76	6,54	<0,05	17,1	-2,43	-5,83	-15,68	3,03	-6,80	-31,6	
Корпус. Сталь 15Х2МФА (ВВЭР-440)												
Слоёв нет	5969,7	5965,8	5967,5	5967,8	$\cong 0$	3264,3	3265,2	-0,028	3262,9	3263,45	-0,017	
Корпус. Сталь 15Х2НМФА (ВВЭР-1000)												
Слоёв нет	5917,9	5927,2	5914,9	5922,6	-0,209	3232,5	3232,5	$\cong 0$	3232,6	3233,4	-0,0241	

Продолжение таблицы 2.

Table 2 (continued).



Примечание 1. Во второй строке табл. 2 первая цифра двузначного числа соответствует первому индексу (i) у скорости УЗ (v_{ij}) и означает геометрическое направление распространения УЗ волны, а вторая — второму индексу (j), соответствующему направлению вектора поляризации.

Примечание 2. Скобки $\langle \rangle$ означают среднеарифметическое от величин, приведённых в таблице.

Примечание 3. Звёздочкой (*) отмечены значения v_{ij} , измеренные на отдельных участках слоёв.

Comment 1. In the second row of Table 2, the first digit of two-digit number corresponds to the first index (i) near velocity of US (v_{ij}) and means geometric direction of propagation of the US wave, and the second digit—to the second index (j) corresponding to the direction of the polarization vector.

Comment 2. The brackets $\langle \rangle$ denote the arithmetical mean of the values given in the Table.

Comment 3. By an asterisk (*) marked values v_{ij} measured for certain sections of the layers.

учитывались.

Видно, что в корпусных сталях обоих реакторов анизотропия скоростей продольной и поперечной УЗ волн не превышает 0,21%. Это же касается их пространственной неоднородности, что свидетельствует об отсутствии влияния штатных технологических обработок на эти характеристики обеих корпусных сталей. В наплавленном защитном покрытии при переходе от поверхностного слоя 1 к слою 2 продольная скорость понижается, а поперечная, независимо от направления вектора поляризации, возрастает. При этом анизотропия продольной скорости в нормальном и параллельном к поверхности стенки направлениях по мере приближения зоны прозвучивания к корпусу реактора также понижается, а изменения поперечных скоростей УЗ и их анизотропия по глубине наплавки проявляют обратную тенденцию. Наибольшая зафиксированная неоднородность между слоями 1 и 2 ($\Delta X / \langle X \rangle_{1,2}$) для продольной

скорости составила 6,54%, а для поперечной 6,80%. При этом разброс в значениях анизотропии для v_{ii} и v_{ij} составил 17,1% и 31,6% соответственно. Обращает на себя внимание значительная величина (до 26%) анизотропии поперечной скорости УЗ в наплавленном слое. В таблице 3 приведены экстремальные значения продольной (v_l) и поперечной (v_t) скоростей УЗ и их анизотропии (Ан. v_l и Ан. v_t) для аналога сплава 08X18H10T монокристалла стали AISI 304, рассчитанные по упругим константам C_{ij} ($C_{11} = 205$ ГПа, $C_{12} = 133$ ГПа и $C_{44} = 125$ ГПа) и плотности $\rho = 8,01$ г/см³ [7].

Из данных таблицы 3 видно, что предельные значения анизотропии скоростей звука обоих типов волн в стали AISI 304 намного превышают аналогичные величины, наблюдаемые в данной работе для наплавки реактора ВВЭР-440. Поэтому анизотропия объёмных скоростей УЗ в слое из стали 08X18H10T в зависимости от условий наплавления на корпусную сталь может быть и существенно более высокой. Между слоями 1 и 2 УЗ методом обнаружен переходный слой толщиной около 1 мм, который проявляет себя путём искажения формы УЗ сигнала, что свидетельствует о его значительной пространственной акустической и упругой неоднородности. Вышеотмеченные особенности скоростей УЗ и, следовательно, упругих параметров наплавленного слоя необходимо учитывать при расчётах механических характеристик внутренней стенки корпуса реактора и при использовании методов УЗ диагностики.

В таблице 4 приведены значения плотности (ρ), усреднённых по направлению продольной ($\langle ii \rangle$) и поперечной ($\langle ij \rangle$) скоростей УЗ, их изотропных величин ($\langle v_l \rangle$ и $\langle v_t \rangle$) и рассчитанных по скоростям v_{11} , v_{22} и $v_{12,21}$ текстурных коэффициентов (W_{4jk}) для наплавленных слоёв стенки корпуса реактора ВВЭР-440, а также средние значения величин для суммарного слоя ($\langle X \rangle_{1,2}$) и изотропные скорости УЗ в корпусных сталях 15X2МФА и 15X2НМФА по данным табл. 2.

ТАБЛИЦА 3. Экстремальные значения продольной (v_l) и поперечной (v_t) скоростей УЗ и их анизотропия (Ан. v_l и Ан. v_t) для монокристалла стали AISI 304, рассчитанные по упругим константам C_{ij} и плотности ρ .

TABLE 3. The extremal values of the longitudinal (v_l) and transverse (v_t) US velocities and their anisotropy (Ан. v_l and Ан. v_t) for single crystal of AISI 304 steel calculated from the elastic constants C_{ij} and density ρ .

Тип УЗ-волны	$v_{l \max}$, М/с	$v_{l \min}$, М/с	$v_{t \max}$, М/с	$v_{t \min}$, М/с	Ан. v_l , %	Ан. v_t , %
Направление/поляризация	[111]	[100]	$[100]^-$, $[110]/[00\bar{1}]$	$[110]/[1\bar{1}0]$	–	–
Продольная	6356,71	5058,95	–	–	22,74	–
Поперечная	–	–	3950,39	2120,00	–	60,3

ТАБЛИЦА 4. Плотность (ρ), усреднённые по направлению значения продольной ($\langle ii \rangle$) и поперечной ($\langle ij \rangle$) скоростей УЗ, их изотропные величины ($\langle v_l \rangle$ и $\langle v_t \rangle$), текстурные коэффициенты (W_{4jk}) для наплавленных слоёв стенки корпуса реактора ВВЭР-440 и средние значения этих величин ($\langle X \rangle_{1,2}$) для суммарного слоя, а также изотропные скорости УЗ в корпусных сталях 15Х2МФА и 15Х2НМФА по данным табл. 2.

TABLE 4. Density (ρ), averaged over direction values of the longitudinal ($\langle ii \rangle$) and transverse ($\langle ij \rangle$) US velocities, their isotropic values ($\langle v_l \rangle$ and $\langle v_t \rangle$), texture coefficients (W_{4jk}) for cladding layers of the VVER-440 vessel wall and their mean values ($\langle X \rangle_{1,2}$) for the total layer, as well as isotropic US velocities of 15CrMFA and 15Cr2NMFA RPV steels according to data in Table 2.

№ слоя	ρ , г/см ³	$\langle v_{ij} \rangle$, м/с								Текстурные коэффициенты W_{4j0}		
		11	22	33	12,21	23	13	$\langle v_l \rangle$	$\langle v_t \rangle$	W_{400}	W_{420}	W_{440}
Наплавка. Сталь 08Х18Н10Т (ВВЭР-440)												
1	7,7885847,55846,4	5579,1 5483,0**	2686,2	3244,5 3368,3**	3265,7 3366,3**	5757,7	3065,5	0,01142	0,00003	-0,00757		
2	7,7885806,35802,0	5579,1 5420,2**	2715,1	3472,8 3421,4**	3461,7 3414,1**	5729,1	3216,5	0,01393	0,00012	-0,00673		
$\langle X \rangle_{1,2}$	7,7885826,95824,2	5579,1 5451,6**	2700,65	3358,7 3396,4**	3363,7 3390,2**	5743,4	3141,0	0,012675	0,000075	-0,00715		
Корпус. Сталь 15Х2МФА (ВВЭР-440)												
-	7,901	-	-	-	-	-	-	5920,83254,9	-	-	-	-
Корпус. Сталь 15Х2НМФА (ВВЭР-1000)												
-	7,828	-	-	-	-	-	-	5934,33250,3	-	-	-	-

Примечание: (**) скорости УЗ, рассчитанные по W_{4i0} .
 Comment: (**) ultrasonic velocities calculated with use of W_{4i0} .

Двумя звёздочками (**) обозначены скорости УЗ, рассчитанные по W_{4i0} . Видно, что отмеченные тенденции по слоям 1 и 2 для усреднённых скоростей УЗ сохраняются.

По значениям W_{4j0} построены нормированные полюсные фигуры для направлений [100], [110] и [111], представленные на рис. 3. Из таблицы 4 и рисунка 3 видно, что текстура в обоих слоях наплавки является близкой к аксиальной и отличается в основном величиной коэффициента W_{400} , то есть степенью текстурированности материала. Последняя, как показали оценки по размаха интенсивности дифракционных линий, для внешнего слоя № 1 меньше, чем для слоя № 2 у корпусной стали на 9–11%. Более наглядно эти различия видны на рис. 4, где представлены значения $\Delta I_{[ijk]}$ для двух слоёв наплавки для главных кристаллографических направлений.

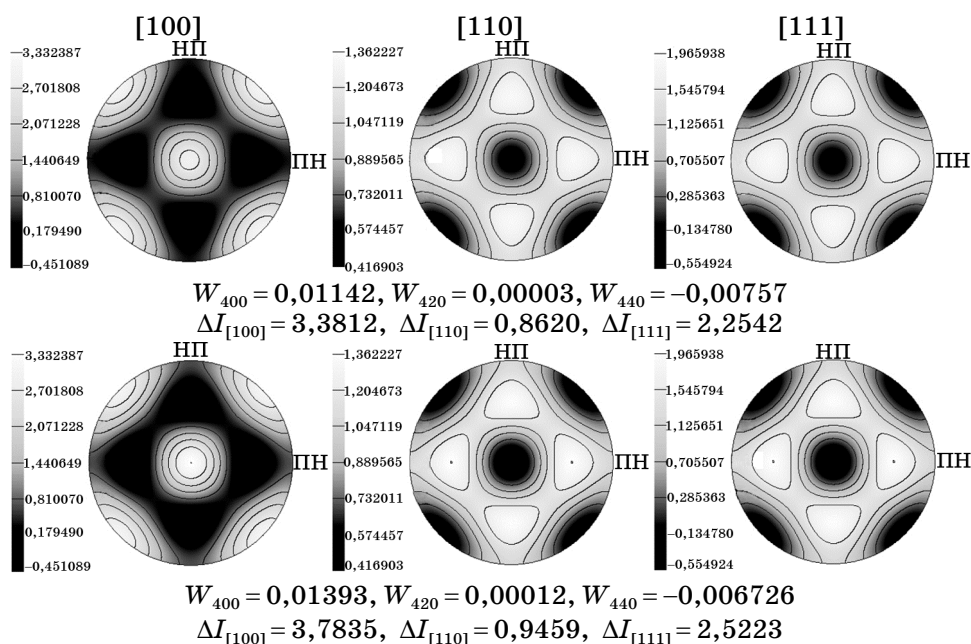


Рис. 3. Нормированные полюсные фигуры для двух слоёв наплавки стенки корпуса реактора ВВЭР-440 для главных кристаллографических направлений. В подстрочных надписях приведены соответствующие слоям значения W_{4j0} и $\Delta I_{[ijk]}$.

Fig. 3. The normalized pole figures for the two layers of cladding of the VVER-440 vessel wall for the main crystallographic directions. In captions (interlinear inscriptions), the values of W_{4j0} and $\Delta I_{[ijk]}$ are given for corresponding layer.

Причина более высокой степени текстурированности прилегающего к корпусной стали наплавленного слоя может быть связана со спецификой технологии наплавления защитного покрытия и с различиями у составляющих сплавов в значениях теплопроводности и коэффициента теплового расширения. При этом в процессе наплавления стали 08X18H10T на сталь 15X2MФА и на ту же сталь 08X18H10T термические напряжения и вызванная ими пластическая деформация слоёв для первого случая должны быть больше, чем для второго. Следовательно, и степень текстурированности у слоя № 2, прилегающего к корпусной стали, может быть выше, чем у более удалённого от неё слоя № 1.

В таблице 5 приведены значения плотности (ρ), усреднённых по всем направлениям продольной ($\langle v_l \rangle$) и поперечной ($\langle v_t \rangle$) скоростей УЗ, модулей Юнга (\bar{E}), сдвига (\bar{G}), всестороннего сжатия (\bar{B}) и коэффициента Пуассона ($\bar{\eta}$) для составляющих стенки корпуса

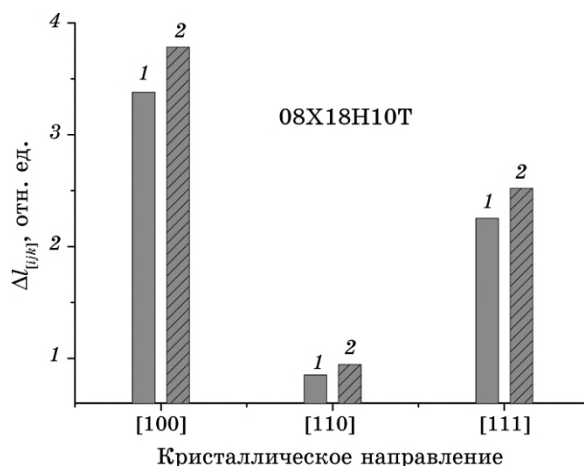


Рис. 4. Размах относительной интенсивности дифракционных линий для направлений [100], [110] и [111] для двух слоёв наплавки стенки корпуса реактора ВВЭР-440: 1 — 1-ый слой, 2 — 2-ой слой у корпусной стали.

Fig. 4. Relative intensity range of the diffraction lines for the [100], [110], and [111] for two layers of cladding of the VVER-440 vessel wall: 1 — 1st layer, 2 — 2nd layer near the RPV steel.

реактора ВВЭР-440, а также для корпусной стали реактора ВВЭР-1000 и аналога сплава 08X18H10T аустенитной стали AISI 304. Изотропные скорости УЗ и упругие параметры для последней получены путём усреднения по ФРХ из данных об упругих константах монокристалла [7]. Видно, что разница между упругими параметрами для двух слоёв наплавки колеблется в пределах 7–11% и наиболее сильно проявляется в модуле всестороннего сжатия (\bar{B}) и коэффициенте Пуассона ($\bar{\eta}$).

Сравнение усреднённых по слоям значений \bar{E} , \bar{G} , \bar{B} и $\bar{\eta}$ для стали 08X18H10T и результатов усреднения по ФРХ для стали AISI 304 показывает хорошее согласие. Полученные данные об упругих модулях корпусных сталей 15X2МФА и 15X2НМФА также находятся в достаточно удовлетворительном согласии с результатами УЗ измерений авторов работ [15–17].

На рисунках 5 и 6 приведены типичные температурные зависимости продольной скорости УЗ $v_l(T)$ (а) и упругих модулей E (б), G (в) и B (г) для образцов из сталей 08X18H10T (рис. 5) и 15X2МФА (рис. 6) в направлении, перпендикулярном к поверхности стенки реактора (направление 3 на рис. 1). Зависимости $E(T)$, $G(T)$ и $B(T)$ хорошо описываются полиномами 2-й степени и получены из измерений $v_l(T)$ с учётом постоянства соотношения v_l/v_t в исследованном температурном интервале в заданном направлении. Указанное соотношение для сплавов из наплавки и стали 15X2МФА равнялось

ТАБЛИЦА 5. Плотность (ρ), усреднённые изотропные продольная ($\langle v_l \rangle$) и поперечная ($\langle v_t \rangle$) скорости УЗ, модули Юнга (\bar{E}), сдвига (\bar{G}), всестороннего сжатия (\bar{B}) и коэффициент Пуассона ($\bar{\eta}$) для составляющих стенки корпуса реактора ВВЭР-440, а также для корпусной стали реактора ВВЭР-1000 и аустенитной стали AISI 304 [7].

TABLE 5. Density (ρ), averaged isotropic longitudinal ($\langle v_l \rangle$) and transverse ($\langle v_t \rangle$) ultrasonic velocity, Young's modulus (\bar{E}), shear modulus (\bar{G}), bulk modulus (\bar{B}) and Poisson's ratio ($\bar{\eta}$) for the wall components of the VVER-440 pressure vessel as well as for the VVER-1000 vessel and austenitic steel AISI 304 [7].

Материал	№ слоя	ρ , г/см ³	$\langle v_l \rangle$, м/с	$\langle v_t \rangle$, м/с	\bar{E} , ГПа	\bar{G} , ГПа	\bar{B} , ГПа	$\bar{\eta}$, отн. ед.	Приме- чание
08X18H10T	1		5757,7	3065,5	190,6	73,19	160,6	0,302	
	2		5729,1	3216,5	204,6	80,57	148,2	0,270	ВВЭР- 440
	$\langle X \rangle_{1,2}$	7,788	5743,4	3141,0	197,7	76,84	154,4	0,287	
	$\Delta X_{1,2} / \langle X \rangle_{1,2}$, %		0,50	-4,81	-7,08	-9,60	8,03	11,15	
AISI 304	-	8,010	5872,1	3340,8	195,9	76,12	157,4	0,291	Расчёт ФРХ
15X2МФА	-	7,901	5920,8	3254,9	214,9	83,71	165,4	0,283	ВВЭР- 440
15X2НМФА	-	7,828	5934,3	3250,3	212,6	82,70	165,4	0,286	ВВЭР- 1000

1,79 и 1,82 соответственно.

Приведённые результаты измерений температурных зависимостей продольной скорости УЗ и модуля Юнга были использованы в качестве калибровочных при экспериментальном обосновании метода УЗНК температурных полей и термических напряжений в корпусах ядерных реакторов типа ВВЭР-440 при импульсном тепловом нагружении [2–4].

6. ВЫВОДЫ

1. По результатам измерений объёмных скоростей УЗ в ортогональных направлениях на различных участках образцов из сталей 08X18H10T, 15X2МФА и 15X2НМФА, вырезанных из архивных фрагментов стенок корпусов реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, получены количественные данные об их акустических и упругих свойствах после штатных технологических обработок (ШТО).

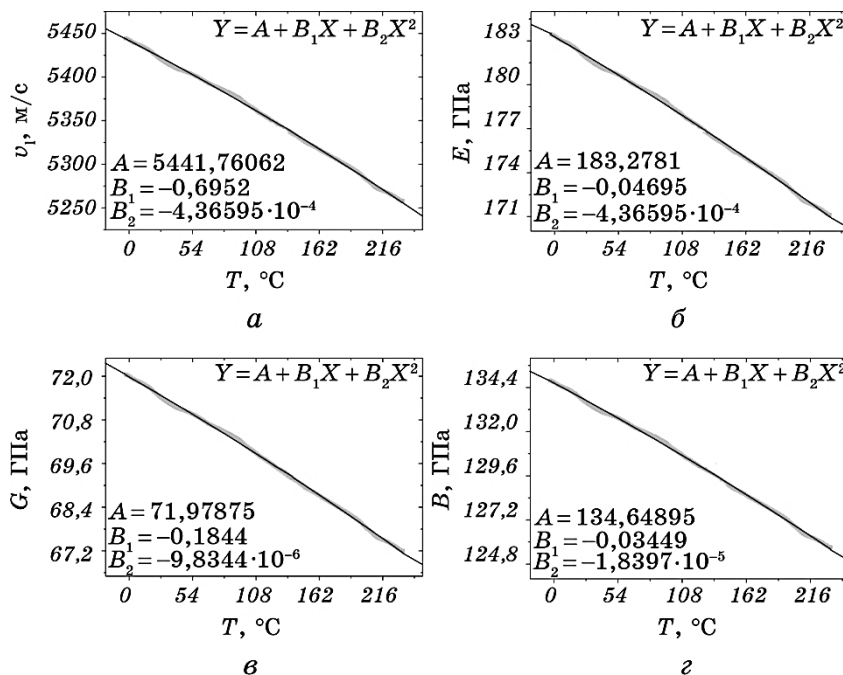


Рис. 5. Температурные зависимости продольной скорости УЗ $v_l(T)$ (а) и упругих модулей E (б), G (в) и B (г) в образце из стали 08X18H10T в направлении, перпендикулярном к поверхности стенки реактора ВВЭР-440.

Fig. 5. Temperature dependences of US longitudinal velocity $v_l(T)$ (a) and elastic modules E (б), G (в), and B (г) in the specimen of 08Cr18N10T steel in a direction perpendicular to the surface of the VVER-440 vessel wall.

2. Установлено, что корпусные стали 15X2МФА и 15X2НМФА обладают высокой акустической и упругой однородностью и являются изотропными, что свидетельствует о незначительном влиянии ПШО корпусов реакторов на эти свойства.

3. В отличие от корпусных сталей, в образцах из стали 08X18H10T (наплавленный слой стенки корпуса реактора ВВЭР-440) зафиксированы обнаруженные ранее акустическая и упругая неоднородности, анизотропия скоростей УЗ (до 26%) и соответствующих упругих модулей (до 52%). Отмеченные особенности связаны с наличием в материале чётко выраженной неоднородной текстуры, близкой к аксиальной.

4. По результатам УЗ текстурного анализа установлено, что степень текстурированности в среднем на 9–11% выше у наплавленного слоя, более близкого к корпусной стали. Между двумя слоями наплавки УЗ методом выявлено промежуточный слой толщиной

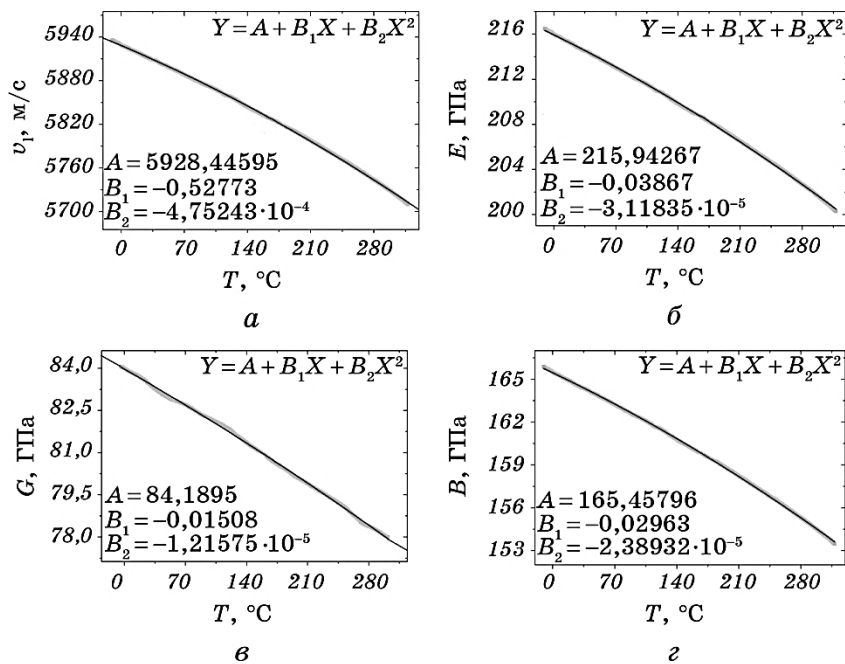


Рис. 6. Температурные зависимости продольной скорости УЗ $v_l(T)$ (а) и упругих модулей E (б), G (в) и B (г) в образце из стали 15Х2МФА в направлении, перпендикулярном к поверхности стенки реактора ВВЭР-440.

Fig. 6. Temperature dependences of US longitudinal velocity $v_l(T)$ (a) and elastic modules E (б), G (в) и B (г) in the specimen of 15CrMFA steel in a direction perpendicular to the surface of the VVER-440 vessel wall.

около 1 мм с максимальной акустической и упругой неоднородностью.

5. Для двух слоёв наплавки, а также корпусных сталей обоих реакторов, рассчитаны изотропные скорости УЗ ($\langle v_l \rangle$ и $\langle v_t \rangle$), модули Юнга (\bar{E}), сдвига (\bar{G}), всестороннего сжатия (\bar{B}) и коэффициент Пуассона ($\bar{\nu}$). Значения упругих параметров для наплавки хорошо согласуются с результатами усреднения по ФРХ упругих констант C_{ij} монокристаллического сплава AISI 304, аналога стали 08X18H10T.

6. По температурным зависимостям продольной скорости УЗ $v_l(T)$ с учётом постоянства соотношения v_l/v_t в образцах из составляющих стенки корпуса реактора ВВЭР-440 построены зависимости от T упругих модулей E , G и B в общем температурном интервале 0–300°C для направления, нормального к поверхности стенки. Показано, что эти зависимости наряду с линейной аппроксимацией, использованной в предыдущих работах, хорошо описываются полиномами второй степени.

7. Основная часть результатов публикуется впервые и их необходимо учитывать при анализе механических свойств корпусов реакторов ВВЭР и при использовании методов их УЗ неразрушающего контроля.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Р. К. Мелехов, В. І. Похмурський, *Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. Властивості, деградація* (Київ: Наукова думка: 2003).
2. O. I. Zaporozhets, A. V. Lichko, V. V. Nemoshkalenko, and A. I. Nosar, *Met. Phys. Adv. Tech.*, **17**: 961 (1999).
3. О. І. Запорожець, М. О. Дордієнко, В. А. Михайловський, В. Б. Молодкін, А. І. Носар, Ю. О. Фролов, А. П. Шпак, *Збірник наукових статей за результатами 2004–2006 рр. програми НАН України «Ресурс»* (Київ: Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України: 2006), с. 212.
4. Н. А. Дордиенко, О. И. Запорожец, В. А. Михайловский, В. Б. Молодкин, *Металлофиз. новейшие технол.*, **34**, № 7: 949 (2012).
5. O. I. Zaporozhets, S. A. Kotrechko, N. A. Dordienko, V. A. Mukhailovsky, and A. V. Zatsarnaya, *Problems of Atomic Science and Technology*, **96**, No. 2: 197 (2015).
6. М. О. Дордієнко, О. І. Запорожець, Р. О. Мазманян, В. А. Михайловський, Ю. О. Фролов, А. П. Шпак, *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Збірник наукових статей за результатами, отриманими у 2007–2009 рр.* (Київ: Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України: 2009), с. 299.
7. D. S. Kuperman and K. J. Reimann, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, **SU-27**, No. 1: 7 (1980).
8. C. M. Sayers, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **15**, No. 11: 2157 (1982).
9. A. J. Allen, M. T. Hutchings, C. M. Sayers, D. R. Allen, and R. L. Smith, *J. Appl. Phys.*, **54**, No. 2: 555 (1983).
10. R. B. Thompson, J. F. Smith, S. S. Lee, and G. C. Johnson, *Metall. Trans. A*, **20**: 2431 (1989).
11. M. Hirao and N. Hara, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, No. 20: 1411 (1987).
12. E. Holms and D. Beasley, *J. Iron Steel Inst.*, **200**: 283 (1962).
13. J. Lewandowski, *Ultrasonics*, **24**, No. 2: 73 (1986).
14. M. Hirao, H. J. Fukuoaka, K. Fujisawa, and R. Murayama, *Metall. Trans. A*, **20**: 2385 (1989).
15. А. А. Хлыбов, В. Г. Васильев, А. Л. Углов, *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, **73**, № 12: 46 (2007).
16. А. А. Хлыбов, В. Г. Васильев, А. Л. Углов, *Атомная энергия*, **106**, № 1: 31 (2009).
17. А. А. Хлыбов, А. Л. Углов, *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева*, № 1: 220 (2013).

REFERENCES

1. R. K. Melekhov and V. I. Pokhmurs'kyu, *Konstruktsiyni Materialy*

- Energetychnogo Obladnannya. Vlastyivosti, Degradatsiya* [Constructional Materials of Power Equipment. Properties, Degradation] (Kyiv: Naukova Dumka: 2003) (in Ukrainian).
2. O. I. Zaporozhets, A. V. Lichko, V. V. Nemoshkalenko, and A. I. Nosar, *Met. Phys. Adv. Tech.*, **17**: 961 (1999).
 3. O. I. Zaporozhets, M. O. Dordiyenko, V. A. Mykhailovsky, V. B. Molodkin, A. I. Nosar, Yu. O. Frolov, and A. P. Shpak, *Zbirnyk Naukovykh Statey za Rezul'tatamy 2004–2006 Rokiv Programy N.A.S. of Ukraine 'Resurs'* [Collection of Articles with Results Obtained in 2004–2006 within the Program of the N.A.S. of Ukraine 'Resource'] (Kyiv: E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine: 2006), p. 212 (in Ukrainian).
 4. M. O. Dordiyenko, O. I. Zaporozhets, V. A. Mykhailovskyy, and V. B. Molodkin, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **34**, No. 7: 949 (2012) (in Russian).
 5. O. I. Zaporozhets, S. A. Kotrechko, N. A. Dordiyenko, V. A. Mykhailovsky, and A. V. Zatsarnaya, *Problems of Atomic Science and Technology*, **96**, No. 2: 197 (2015).
 6. M. O. Dordiyenko, O. I. Zaporozhets, R. O. Mazmanyanyan, V. A. Mykhailovsky, Yu. O. Frolov, and A. P. Shpak, *Problemy Resursu i Bezpeky Eksploatatsiyi Konstruktsiy, Sporud ta Mashyn: Zbirnyk Naukovykh Statey za Rezul'tatamy, Otrymanymy u 2007–2009 Rokakh* [Problem of Life Time and Safety of Structures, Buildings and Machinery: Collection of Articles with Results Obtained in 2007–2009] (Kyiv: E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine: 2009), p. 299 (in Ukrainian).
 7. D. S. Kuperman and K. J. Reimann, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, **SU-27**, No. 1: 7 (1980).
 8. C. M. Sayers, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **15**, No. 11: 2157 (1982).
 9. A. J. Allen, M. T. Hutchings, C. M. Sayers, D. R. Allen, and R. L. Smith, *J. Appl. Phys.*, **54**, No. 2: 555 (1983).
 10. R. B. Thompson, J. F. Smith, S. S. Lee, and G. C. Johnson, *Metall. Trans. A*, **20**: 2431 (1989).
 11. M. Hirao and N. Hara, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, No. 20: 1411 (1987).
 12. E. Holms and D. Beasley, *J. Iron Steel Inst.*, **200**: 283 (1962).
 13. J. Lewandowski, *Ultrasonics*, **24**, No. 2: 73 (1986).
 14. M. Hirao, H. J. Fukuoka, K. Fujisawa, and R. Murayama, *Metall. Trans. A*, **20**: 2385 (1989).
 15. A. A. Khlybov, V. G. Vasil'ev, and A. L. Uglov, *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, **73**, No. 12: 46 (2007) (in Russian).
 16. A. A. Khlybov, V. G. Vasil'ev, and A. L. Uglov, *Atomnaya Energiya*, **106**, No. 1: 31 (2009) (in Russian).
 17. A. A. Khlybov and A. L. Uglov, *Trudy Nizhegorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. R. E. Alekseeva*, No. 1: 220 (2013) (in Russian).