

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ АКУСТИЧЕСКИХ И УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 12Х18Н10Т, ОБЛУЧЕННОЙ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

© 2025 г. А.В. Васильев^{1,*}, Д.Ю. Бирюков¹, В.Н. Костин², А.Ф. Зацепин¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия 620002
Екатеринбург, ул. Мира, 19

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург,
ул. С. Ковалевской, 18

*E-mail: vasilev.a.v98@list.ru

Поступила в редакцию 05.02.2025; после доработки 25.02.2025

Принята к публикации 26.02.2025

Стали специальных марок, таких как ЧС-68 и 12Х18Н10Т, применяются в атомной энергетике, космической отрасли, медицине и других важных областях технической сферы и при эксплуатации подвергаются различным видам разрушающего воздействия, в том числе радиационной нагрузке. В данной работе представлены результаты исследования влияния высокоэнергетического электронного излучения на акустические свойства аустенитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Экспериментально установлено, что после воздействия электронов с энергией 10 МэВ происходит изменение таких параметров, как коэффициент затухания ультразвука и скорость распространения поперечных волн и волн Рэлея. Эти изменения обусловлены дефектообразованием и структурными модификациями материала, вызванными радиационным воздействием. Полученные данные позволяют сделать вывод о необходимости учета изменений акустических свойств сталей при оценке их работоспособности в условиях радиационного воздействия.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, сталь 12Х18Н10Т, волны Рэлея, коэффициент затухания, скорость ультразвука.

ULTRASONIC TESTING OF ACOUSTIC AND ELASTIC PROPERTIES OF 12Cr18Ni10Ti STEEL IRRADIATED WITH FAST ELECTRONS

© 2025 A.V. Vasiliev^{1,*}, D.Yu. Biryukov¹, V.N. Kostin², A.F. Zatsepin¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Russia 620002
Yekaterinburg, Mira str., 19

² M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia 620108 Yekaterinburg, S. Kovalevskoy St., 18

*E-mail: vasilev.a.v98@list.ru

Special steel grades such as ChS-68 and 12Cr18Ni10Ti are used in nuclear power engineering, the space industry, medicine and other important areas of the technical sphere, and during operation are exposed to various types of destructive effects, including radiation load. This paper presents the results of a study of the effect of high-energy electron radiation on the acoustic properties of austenitic stainless-steel grade 12X18H10T. It was experimentally established that after exposure to electrons with an energy of 10 MeV, such parameters as the attenuation coefficient of ultrasound and the propagation velocity of transverse waves and Rayleigh waves change. These changes are due to defect formation and structural modifications of the material caused by radiation exposure. The obtained data allow us to conclude that it is necessary to take into account changes in the acoustic properties of steels when assessing their performance under radiation exposure.

Keywords: ultrasonic testing, steel 12X18H10T, Rayleigh waves, attenuation coefficient, ultrasound velocity.

DOI: 10.31857/S0130308225030018

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации ответственного оборудования атомных электростанций (АЭС) основным критерием для обеспечения безопасности является своевременное выявление дефектов [1—3]. Поэтому в настоящее время исследование влияния высокоэнергетического излучения на материалы приобретает все большую актуальность. Помимо ядерной энергетики, высокая радиационная стойкость материалов требуется в таких сферах, как исследования космоса [4], медицина [5], военные разработки [6] и другие области науки и техники [7—9]. Одним из перспективных направлений является изучение изменения физико-механических характеристик конструкционных сталей под воздействием потоков электронов высокой энергии.

Аустенитная коррозионно-стойкая сталь марки 12Х18Н10Т [10—12] широко используется в различных отраслях промышленности благодаря своим уникальным физико-механическим

свойствам, таким как высокая прочность, устойчивость к коррозии и хорошая свариваемость. Детали, изготовленные из данной стали, можно эксплуатировать в различных агрессивных средах, а также при высоких температурах (до +600 °С).

Достаточно часто из таких сплавов производятся сварные аппараты и сосуды, а также различные типы нержавеющей труб для трубопроводов. Однако под воздействием внешних факторов, таких как радиационное облучение [13], свойства материала могут изменяться, что требует детального изучения для обеспечения безопасности и надежности конструкций.

Одним из методов исследования изменений структуры и свойств материалов является использование ультразвуковых волн, в частности объемных волн и волн Рэлея [14—16]. В работах [17—19] показано, что акустические параметры являются чувствительными к изменениям в микроструктуре, вызванным радиационным воздействием. При этом продольные и поперечные волны позволяют исследовать структурные свойства среды в объеме объекта контроля, а волны Рэлея, распространяясь вблизи поверхности твердого тела, обеспечивают возможность оценки состояния поверхности и приповерхностных слоев облученных материалов [20].

Целью данной работы является отработка методики ультразвукового контроля (УЗК) радиационных повреждений стали 12Х18Н10Т и их влияния на акустические и упругие свойства материала, которые связаны с прочностными характеристиками, в объеме и на поверхности образца. Исследование изменений акустических и упругих свойств материала под действием радиационной нагрузки, в частности коэффициента затухания ультразвука, скоростей объемных и поверхностных волн, модулей Юнга, сдвига и коэффициента Пуассона, позволит выявить информативные возможности ультразвукового контроля для оценки дальнейшего применения данного сплава в условиях воздействия радиационных полей. Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Построить профиль проникновения электронов в объект контроля для определения глубины облученного слоя.
2. Провести контрольное измерение характеристик объемных и поверхностных волн образцов до и после облучения.
3. Определить радиационно-индуцированные изменения коэффициентов затухания ультразвука на разных частотах и отработать способ косвенной оценки коэффициентов поглощения и рассеяния в исследуемой среде.

Результаты настоящего исследования представляют интерес для реализации конкретных методик УЗК различных изделий и конструкций из подобных материалов на основе изменения свойств, происходящих под воздействием электронного облучения, и, в конечном счете, позволят прогнозировать их работоспособность в условиях соответствующих радиационных нагрузок.

МЕТОДИКА И ОБРАЗЦЫ

Характеристика образцов. В настоящей работе для определения акустических параметров были использованы образцы из стали марки 12Х18Н10Т. Изделия представляют собой два геометрически-идентичных бруска: 47 мм×41 мм×29,5 мм. Один из которых был облучен быстрыми электронами на ускорителе УЭЛР-10-10С Физико-технологического института Уральского Федерального университета (Флюенс: $5 \cdot 10^{15}$ см⁻²; Энергия: 10 МэВ). Облучение производилось в циклическом режиме, минимизирующем нагрев образцов. Время одного цикла облучения — 10 с, период следования циклов — 30 мин, количество циклов — 500. Общее время облучения образцов составляло 5000 с.

Методика измерения акустических параметров. Измерения проводили с помощью ультразвукового дефектоскопа Olympus EPOCH 1000 с использованием совмещенных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) эхометодом [21]. Для измерения акустических сигналов продольных волн использовали ПЭП: П111-2,5-12, П111-5,0-6 (рис. 1).

Для измерения поперечных волн и волн Рэлея применяли ПЭП с переменным углом призмы и частотой 5 МГц. Для возбуждения поперечных волн выставляли угол призмы 40°. Угол призмы для возбуждения волны Рэлея в образце из стали выбирался равным 2-му критическому углу в соответствии с законом Снеллиуса:

$$\sin \beta_{\text{кр}2} = \frac{C_t}{C_l}. \quad (1)$$

С учетом того, что угол $\beta_{\text{кр}2} \approx 57,5^\circ$, для возбуждения волн Рэлея был выставлен угол призмы наклонного преобразователя 58° . Точки выхода наклонного ПЭП для объемной поперечной и поверхностной рэлеевской волны были определены на образце СО-3.

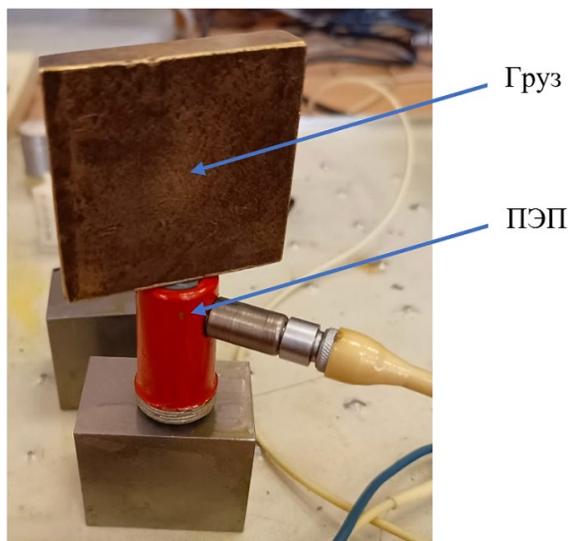


Рис. 1. Измерение скоростей и коэффициентов затухания продольных волн.

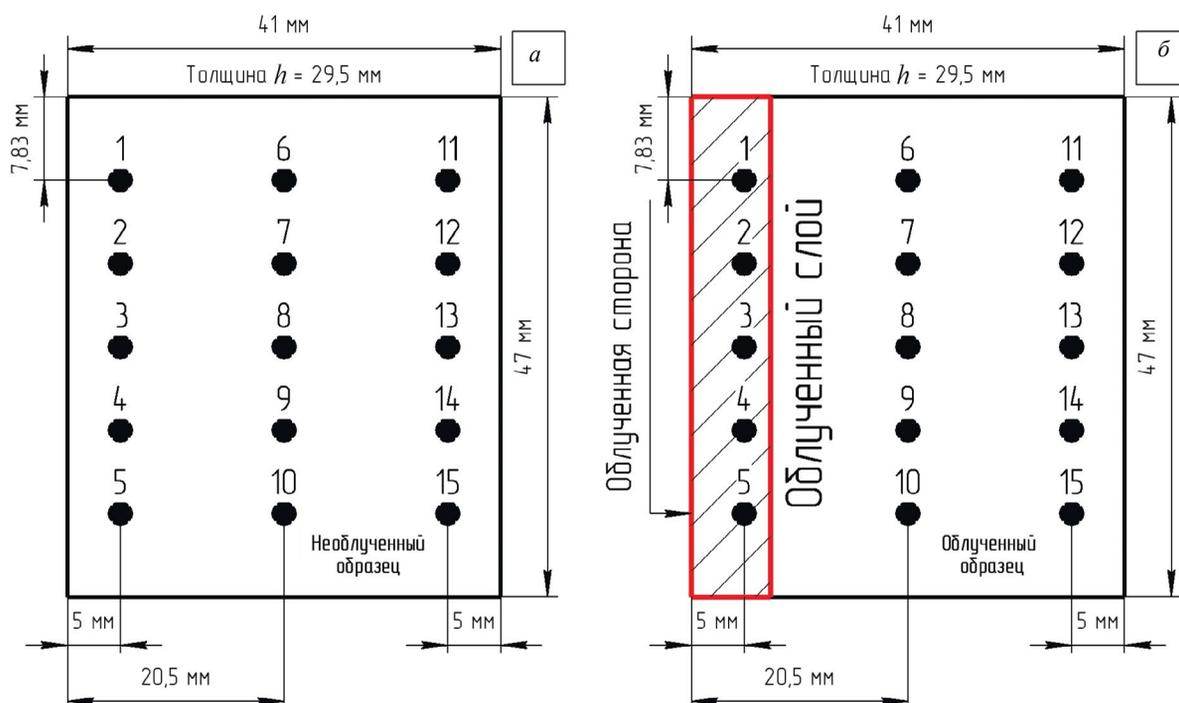


Рис. 2. Точки измерения параметров продольных волн для исходного (а) и облученного (б) образцов.

Измерение акустических сигналов продольных волн исходного и облученного образцов проводили в нескольких точках, как показано на рис. 2. Для определения случайной погрешности измерений скорости ультразвука и коэффициента затухания в каждой точке выполняли по пять последовательных измерений времени пробега и амплитуды импульса продольной ультразвуковой волны для 1-го и 2-го донных сигналов.

При исследовании с использованием поперечных волн и волн Рэлея для определения случайной погрешности значений скоростей ультразвука в каждой позиции было выполнено пять измерений (рис. 3). При контроле поперечными волнами выбирали крайнее положение в области облученного слоя. Для исходного образца измерения проводили аналогичным образом.

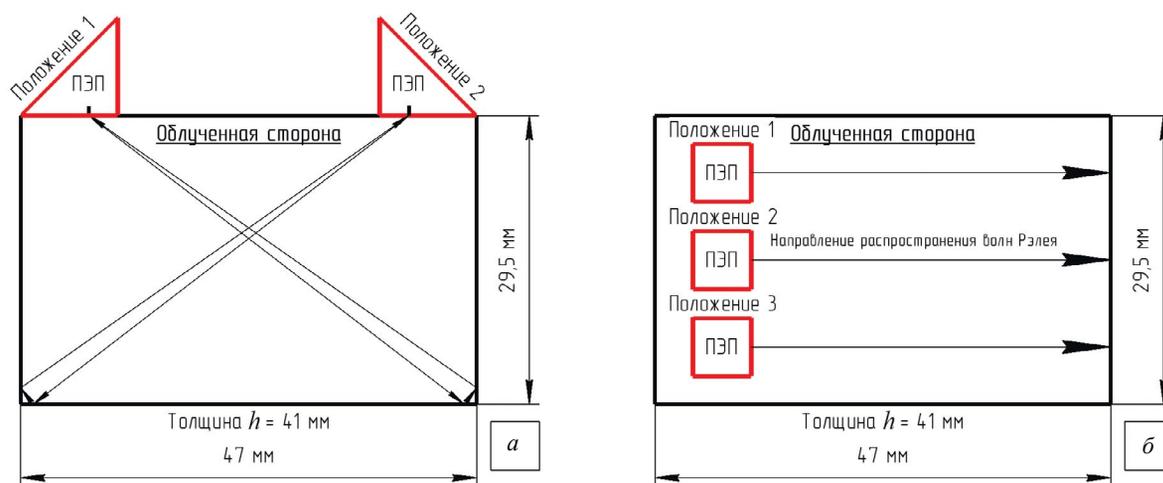


Рис. 3. Схемы прозвучивания образцов поперечными волнами (а) и волнами Рэлея (б).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование проникновения электронов в сталь. Для оценки области радиационных изменений в стали была использована модель проникновения электронов в образец при помощи программы Casino (Monte Carlo Simulation of Electron Trajectory in Solids) [22]. Моделировалось 50000 траекторий электронов с энергией 10 МэВ.

Рис. 4а иллюстрирует траектории рассеяния электронов для отдельной точки поверхности. Можно видеть, что с увеличением глубины проникновения электронов плотность потока уменьшается. Этот процесс обусловлен взаимодействием инжектируемых электронов с кристаллической решеткой металла и последующим их рассеянием. Таким образом, можно полагать, что концентрация радиационных повреждений материала снижается с глубиной проникновения первичных электронов. Красными линиями отмечены траектории электронов, отраженных решеткой образца и покинувших его объем.

Распределение электронов по глубине показано на рис. 4б. Наибольшая плотность проникновения, согласно расчетам, соответствует глубине 6,1 мм. Вместе с тем максимальная глубина

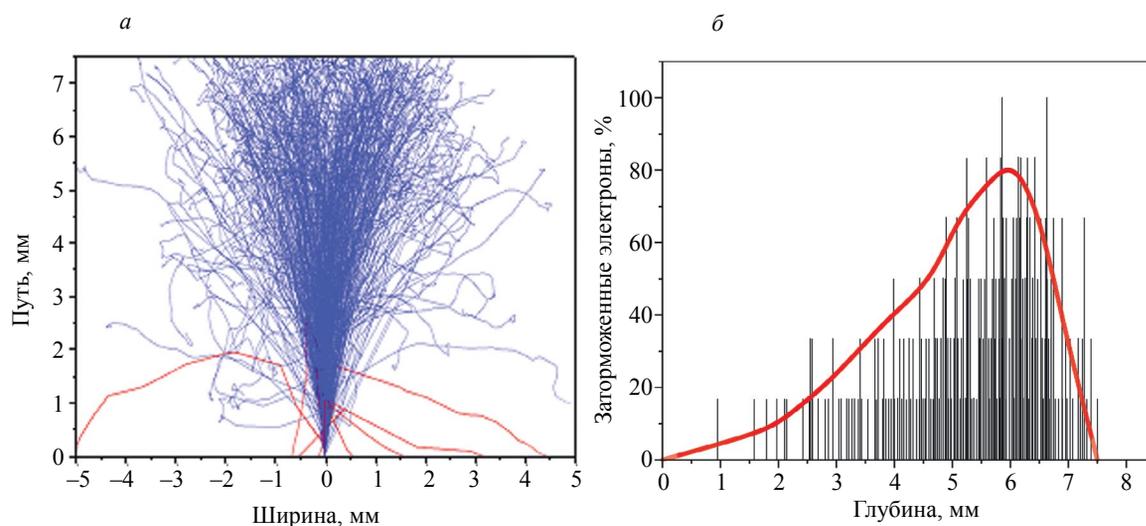


Рис. 4. Результаты моделирования методом Монте-Карло взаимодействия быстрых электронов (10 МэВ) с исследуемым материалом (сталь 12Х18Н10Т): траектории движения электронов (траектории обратно отраженных электронов, покинувших образец, обозначены красными линиями) (а); профиль пробега электронов (% доля заторможенных электронов на соответствующей глубине) (б).

проникновения электронов составляет порядка 7,5 мм. При этом следует отметить, что реальная плотность радиационных повреждений за счет эффектов отдачи превышает максимальную глубину проникновения электронов и постепенно уменьшается по мере удаления от облучаемой поверхности. Другими словами, в более глубоких слоях образца степень радиационного повреждения будет гораздо менее значительной.

Определение коэффициентов затухания ультразвуковых волн. При проведении измерений продольными волнами было отмечено снижение амплитуды ультразвуковых сигналов после облучения, что указывало на изменение коэффициентов затухания ультразвука в образцах. Для корректного измерения затухания ультразвука был определен размер ближней зоны акустического поля прямых преобразователей, который для частоты 2,5 МГц составил 15,2 мм, а для частоты 5 МГц — 7,6 мм. Поскольку глубина прозвучивания облученного слоя составляет 29,5 мм (см. рис. 2б), то все производимые измерения соответствуют измерениям в дальней зоне.

Закон затухания акустических колебаний в дальней зоне описывается формулой [23]:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{S}{\lambda r} e^{-\delta r}, \quad (2)$$

где U — амплитуда смещения; r — акустический путь; U_0 — амплитуда смещения на выходе излучателя; λ — длина волны; S — площадь излучателя; δ — коэффициент затухания.

Из выражения (2) можно получить формулу для расчета коэффициента затухания в дальней зоне:

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right) - \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{r_2 - r_1}, \quad (3)$$

здесь U_1 — амплитуда ультразвуковой волны на расстоянии r_1 от излучателя; U_2 — амплитуда ультразвуковой волны на расстоянии r_2 . Значения амплитуд U_1 и U_2 были определены с учетом коэффициента прозрачности границы образца.

Рассчитанные по формуле (3) коэффициенты затухания в точках измерения, показанных на рис. 2, приведены на рис. 5.

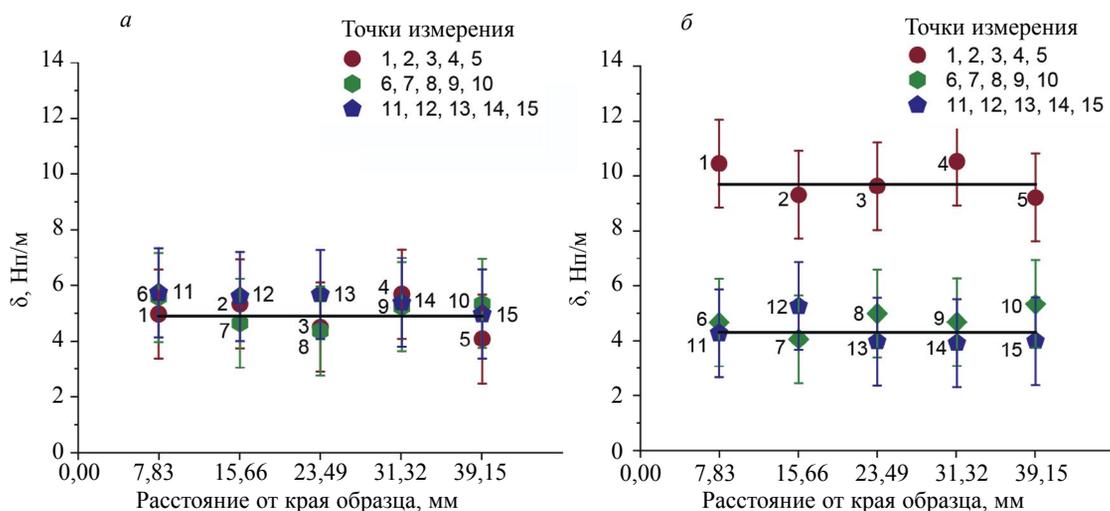


Рис. 5. Коэффициент затухания в исходном (а) и облученном (б) образцах при прозвучивании ПЭП с частотой 2,5 МГц.

Исходя из данных, полученных на рис. 5, видно, что коэффициент затухания после облучения быстрыми электронами существенно возрастает (рис. 5б). Точки 1—5 характеризуют область, измененную радиационным воздействием. Коэффициент затухания в более глубоких слоях облученного образца (точки 6—10 и 11—15) не отличается от значений в исходном образце.

це в пределах погрешности измерений (см. рис. 5). Это согласуется с результатами моделирования профиля проникновения электронов (глубина проникновения электронов в облученный образец составляет порядка $\sim 7,5$ мм) в сталь марки 12X18H10T (см. рис. 4). Эффект возрастания коэффициента затухания после электронного облучения отражает наличие радиационных изменений, происходящих в материале.

Для определения коэффициентов поглощения и рассеяния были измерены коэффициенты затухания продольных волн на частоте 5 МГц. Оценка величины коэффициентов рассеяния ($\delta_p \sim f^4$) и поглощения ($\delta_n \sim f$), для частот $f_1 = 2,5$ МГц и $f_2 = 5$ МГц осуществлялась в области рэлеевского рассеяния по формулам:

$$\delta_{p1} = \frac{\delta_2 - n\delta_1}{n^4 - n}; \quad (4)$$

$$\delta_{n1} = \delta_1 - \delta_{p1}; \quad (5)$$

$$\delta_{n2} = n\delta_{n1}; \quad (6)$$

$$\delta_{p2} = \delta_2 - \delta_{n2}, \quad (7)$$

где δ_1 и δ_2 — коэффициенты затухания на частотах f_1 и f_2 соответственно; $n = \frac{f_2}{f_1}$.

Коэффициенты затухания, рассеяния и поглощения в исходном и облученном образцах были рассчитаны на основе акустических измерений с использованием специализированной компьютерной программы [24] (рис. 6).

Расчёт коэффициента затухания продольной волны для первой частоты **Расчёт коэффициента затухания продольной волны для второй частоты**

Данные ПЭП	Результаты измерений	Данные ПЭП	Результаты измерений
Диаметр (D, мм): <input type="text" value="6"/>	Длина волны (λ, мм) 1,18	Диаметр (D, мм): <input type="text" value="12"/>	Длина волны (λ, мм) 2,36
Частота (f, МГц): <input type="text" value="5"/>	Протяженность ближней зоны (L, мм) 7,627119	Частота (f, МГц): <input type="text" value="2,5"/>	Протяженность ближней зоны (L, мм) 15,25424
Данные образца	Путь расхождения 1 сигнала (r1, мм) 52,37288	Данные образца	Путь расхождения 1 сигнала (r1, мм) 44,74576
Толщина (h, мм): <input type="text" value="30"/>	Путь расхождения 2 сигнала (r2, мм) 112,3729	Толщина (h, мм): <input type="text" value="30"/>	Путь расхождения 2 сигнала (r2, мм) 104,7458
Скорость (Сл, м/с): <input type="text" value="5900"/>	Коэффициент затухания (g, Нп/м) 27,67142	Скорость (Сл, м/с): <input type="text" value="5900"/>	Коэффициент затухания (g, Нп/м) 5,628606
Данные измерений	<input type="button" value="Рассчитать"/>	Данные измерений	<input type="button" value="Рассчитать"/>
Амплитуда 1 (A1, дБ): <input type="text" value="24,49"/>		Амплитуда 1 (A1, дБ): <input type="text" value="22,1"/>	
Амплитуда 2 (A2, дБ): <input type="text" value="3,44"/>		Амплитуда 2 (A2, дБ): <input type="text" value="11,78"/>	

Расчёт коэффициентов

Данные ПЭП	Результаты измерений
Частота 1 (f1, МГц): <input type="text" value="5"/>	Коэффициент рассеяния для f1 (gp1, Нп/м) 1,172443
Частота 2 (f2, МГц): <input type="text" value="2,5"/>	Коэффициент поглощения для f1 (gn1, Нп/м) 4,456162
Данные материала	Коэффициент расхождения для f1 (Kp1) 0,2286408
Длина волны 1 (λ1, мм): <input type="text" value="1,18"/>	Коэффициент рассеяния для f2 (gp2, Нп/м) 18,75909
Длина волны 2 (λ2, мм): <input type="text" value="2,36"/>	Коэффициент поглощения для f2 (gn2, Нп/м) 8,912325
Затухание 1 (g1, Нп/м): <input type="text" value="27,67142"/>	Коэффициент расхождения для f2 (Kp2) 0,5352273
Затухание 2 (g2, Нп/м): <input type="text" value="5,628606"/>	Средний размер зерна (d, мм) 0,1917347
ΛE/E: <input type="text" value="0,5"/>	<input type="button" value="Рассчитать"/>

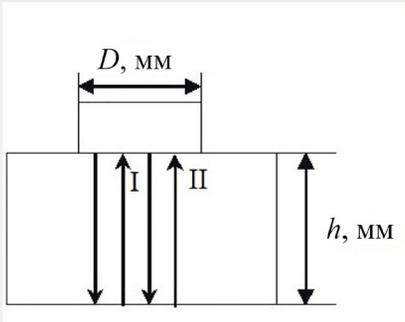


Рис. 6. Интерфейс программы для расчета акустических параметров в дальней зоне.

Таблица 1

Коэффициенты затухания, рассеяния и поглощения ультразвука для исходного и облученного образцов

Характеристика	Исходный		Облученный	
	2,5 МГц	5,0 МГц	2,5 МГц	5,0 МГц
Коэффициент затухания, Нп/м	4,9 ± 1,0	17,3 ± 1,3	9,7 ± 0,9	25,5 ± 2,8
Коэффициент рассеяния, Нп/м	0,45 ± 0,15	7,85 ± 2,5	0,47 ± 0,15	7,87 ± 2,6
Коэффициент поглощения, Нп/м	4,45 ± 0,9	9,45 ± 2,1	9,23 ± 0,8	17,63 ± 1,0

Данные косвенных измерений, приведенные в табл. 1, показывают, что под действием облучения коэффициент затухания увеличился в 2—2,5 раза. При этом коэффициент рассеяния, с точностью до погрешности, не изменился. Таким образом, основной вклад в изменение коэффициента затухания под действием электронного облучения происходит за счет увеличения коэффициента поглощения, что можно интерпретировать как усиление диссипации энергии упругих колебаний в локальных структурно нарушенных участках облученного материала.

Увеличение коэффициента поглощения при отсутствии изменения коэффициента рассеяния может быть связано с образованием микроскопических радиационных дефектов, размер которых значительно меньше длины продольной волны. На таких дефектах ультразвуковая волна не рассеивается, однако при этом могут изменяться характеристики материала, влияющие на эффективность трансформации упругой энергии волны в другие формы энергии. В частности, возрастание коэффициента внутреннего трения может приводить к увеличению выхода тепловой энергии в процессе поглощения ультразвука средой [25].

Определение упругих свойств в объекте контроля. Увеличение затухания ультразвука может быть также связано с изменением скорости акустических волн [26, 27]. В частности, микродефекты среды, влияющие на трансформацию ультразвуковых волн в другие виды энергии, способны повлиять на упругие свойства вещества. Нами был использован эхометод для измерения скоростей объемных и поверхностных ультразвуковых волн.

Измерения скоростей продольных волн осуществлялись в точках, показанных на рис. 2. Средние значения скоростей объемных и поверхностных волн в исходном и облученном образцах представлены в табл. 2. Значение скоростей продольных волн в исходном образце при частоте 2,5 МГц составило (5733 ± 14) м/с, при частоте 5 МГц — (5730 ± 14) м/с. В облученном образце при частоте 2,5 МГц — (5728 ± 14) м/с, при частоте 5 МГц — (5723 ± 14) м/с. Таким образом, можно сделать вывод, что с точностью до погрешности измерений не наблюдается изменений скорости объемных продольных волн под действием облучения быстрыми электронами.

Таблица 2

Акустические параметры объемных волн и волн Рэлея, полученные для исходного и облученного образцов на частоте 5 МГц

Акустический параметр	Исходный	Облученный
Скорость продольных волн (C_l), м/с	5730 ± 14	5723 ± 14
Скорость поперечных волн (C_t), м/с	3184 ± 15	3054 ± 15
Скорость волн Рэлея (C_r), м/с	2965 ± 18	2845 ± 10
Коэффициент Пуассона (ν)	0,277 ± 0,016	0,301 ± 0,016
Модуль Юнга (E), ГПа	203,2 ± 1,0	190,5 ± 1,0
Модуль сдвига (G), ГПа	79,6 ± 0,8	73,2 ± 0,7

Скорости упругих поперечных волн измерялись наклонным преобразователем на частоте 5 МГц по схеме, представленной на рис. 3а. Усредненные результаты для исходного и облученного образцов представлены в табл. 2. Значения, полученные в двух точках одного образца, не отличаются с точностью до погрешности, что свидетельствует об отсутствии анизотропии упругих свойств и высокой однородности материала. Вместе с тем обнаружено уменьшение скорости поперечных волн на 4,3 % после облучения быстрыми электронами (см. табл. 2).

Из таблицы видно, что скорость поперечной волны оказалась более чувствительной к облучению, чем скорость продольной волны, что можно объяснить следующими причинами. Во-первых, радиационные повреждения материала, вероятно, в большей степени влияют на сдвиговые упругие свойства, чем на упругость растяжения—сжатия. Во-вторых, длина волны поперечных колебаний значительно меньше, чем длина волны продольных, что также должно повышать чувствительность указанных колебаний к структуре радиационно-поврежденных участков. Возможно также, что изменение скоростей продольных волн материала под действием облучения имеет место, однако его величина не превышает погрешности измерений.

Скорость волн Рэлея определялась, как описано в методике измерения акустических параметров, при частоте наклонного преобразователя 5 МГц (см. рис. 3б). Средние значения скоростей рэлеевских волн приведены в табл. 2. После облучения электронами скорость волн Рэлея уменьшается на 4,2 %. Исходя из полученных данных, видно, что радиационные изменения в приповерхностном слое (толщина слоя распространения волн Рэлея — 0,6 мм) влияют на скорость волн Рэлея.

Изменение скоростей поперечных волн и волн Рэлея после воздействия на исследуемую сталь быстрых электронов связано прежде всего с изменением упругих модулей и коэффициента Пуассона [28]. Исходя из рассчитанных значений, представленных в табл. 2, видно, что облучение приводит к уменьшению модулей Юнга и сдвига на 6,7 и 8,7 % соответственно. Величина коэффициента Пуассона возрастает на 8,6 %, что свидетельствует о небольшом увеличении пластичности вещества. Такие результаты характерны для случая возникновения в материале микроскопических радиационных дефектов, снижающих способность вещества сопротивляться деформации растяжения/сжатия и сдвиговой деформации и, как следствие, отрицательно влияющих на прочностные характеристики изделия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в настоящей работе исследования показали, что коэффициент затухания продольных волн, а также скорости распространения объемных поперечных и поверхностных волн Рэлея демонстрируют заметную чувствительность к фактору радиационного воздействия на сталь 12X18H10T и, следовательно, могут выступать в качестве информативных параметров метода контроля радиационных повреждений материала.

На основе данных, полученных с использованием программы Casino v2.51, построен профиль проникновения быстрых (10 МэВ) электронов в образец, который позволяет оценить эффективную глубину радиационно-поврежденного слоя, составившую порядка 7,5 мм. При этом максимум радиационного воздействия быстрых электронов соответствует глубине 6,1 мм.

Обнаружено, что в результате воздействия быстрых электронов на образец возрастает величина коэффициента поглощения ультразвука в материале, в то время как коэффициент рассеяния не изменяется. Эта закономерность может быть связана с возникновением микроскопических радиационных дефектов, размер которых меньше длины ультразвуковой волны. Однако их концентрация недостаточна, чтобы повлиять на трансформацию энергии ультразвуковой волны в другие формы энергии.

Под действием облучения быстрыми электронами не наблюдается изменения скорости продольных волн. Вместе с тем скорости поперечных волн и волн Рэлея заметно уменьшаются после облучения, что связано с уменьшением модулей Юнга и сдвига материала. Данные результаты указывают на образование в материале радиационных повреждений, снижающих величину модулей упругости, что может сказываться на макроскопических свойствах и прочности изделий.

Таким образом, данное исследование показало, что изменения характеристик стали 12X18H10T в условиях радиационной нагрузки являются существенными и их необходимо контролировать. Полученные результаты могут быть использованы для разработки и реализации методов контроля качества и прогнозирования долговечности конструкций, работающих в условиях электронного облучения.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России для УрФУ (проект FEUZ-2023-0014) и госзадания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пичков С.Н., Захаров Д.А., Хлыбов А.А. Физические аспекты использования волноводных линий для акустико-эмиссионного контроля целостности металла корпусных конструкций ядерных энергетических установок // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2020. № 4 (131). С. 63—70.

2. Митенков Ф.М., Кайдалов В.Б., Коротких Ю.Г., Панов В. А., Пичков С.Н. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок. М.: Машиностроение, 2007. 445 с.
3. Хлыбов А.А. Обеспечение эксплуатации крупногабаритных конструкций по техническому состоянию / Монография. Н. Новгород: НГПУ, 2008. 136 с.
4. Vuolo M., Baiocco G., Barbieri S., Bocchini L., Giraudo M., Gheysens T., Ottolenghi A. Exploring innovative radiation shielding approaches in space: A material and design study for a wearable radiation protection spacesuit // Life Sciences in Space Research. 2017. No. 15. P. 69—78.
5. Anders J., Braccini S., Carzaniga T.S., Casolaro P., Chatterjee M. A facility for radiation hardness studies based on a medical cyclotron // Journal of Instrumentation. 2022. V. 17. No. 04. P. P04021.
6. De Azevedo A.M., Cardoso D.D.O., De Medeiros M.P.C., Gavazza S., Morales R.K. Determination of steel and lead bi-laminated shielding for military vehicles // Brazilian Journal of Radiation Sciences. 2023. V. 11. No. 1A (Suppl.). P. 01—31.
7. Adupa C., Prakash T. Chandhra, Ramchandar P., Tarun J. Radiation hardened circuits in multiple harsh environments // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering // IOP Publishing. 2020. V. 981. No. 3. P. 032044.
8. Pavan Kumar M., Lorenzo R. A review on radiation-hardened memory cells for space and terrestrial applications // International journal of circuit theory and applications. 2023. V. 51. No. 1. P. 475—499.
9. Rockett L., Patel D., Danziger S., Wang J.J., Cronquist B. Radiation hardened FPGA technology for space applications / 2007 IEEE Aerospace Conference. IEEE. 2007. P. 1—7.
10. Ключников В.А., Мишакин В.В. Исследование влияния пластического деформирования на акустические и магнитные характеристики аустенитной и аустенитно-ферритной сталей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 2 (119).
11. Латыпова Д.Р., Бузай Д. Е., Латыпов О. Р., Рябухина В. Н. Исследование коррозии контактной пары сталей 09Г2С/12Х18Н10Т в технологических средах колонного оборудования // Нефтегазовое дело. 2020. Т. 18. № 6. С. 122—129.
12. Jerin A., Karunakaran K. Minimizing maximum height of the profile on stainless steel of 12X18H10T for ECM // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing. 2022. V. 2473. No. 1.
13. Ткачева А.А., Макаревич В.О., Корнеева Е.К. Особенности радиационной стойкости сталей и сплавов: сборник научных работ VI Международной научно-практической интернет конференции студентов и магистрантов, 23—24 ноября 2023 года / сост.: А. П. Бежок, И. А. Иванов. Минск: БНТУ, 2023. С. 160—163.
14. Муравьев В.В., Будрин А.Ю., Синцов М.А. Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и Рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 4. С. 4—10.
15. Хлыбов А.А., Углов А.Л., Рябов Д.А., Аносов М.С. Оценка поврежденности конструкционных металлических материалов акустическими методами // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. Т. 25. № 4. С. 18—26.
16. Хлыбов А.А., Кабалдин Ю.Г., Рябов Д.А., Аносов М.С., Шагалдин Д.А. Исследование поврежденности образцов из стали 12X18H10T при малоцикловой усталости методами неразрушающего контроля // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 5. С. 61—67.
17. Matlack K.H., Kim Jin-Yeon, Wall J., Qu J. Radiation damage characterization in reactor pressure vessel steels with nonlinear ultrasound // AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics. 2014. V. 1581. No. 1. С. 1007—1013.
18. Koskinen T.S. Artificial Flaw Detection with Ultrasound in Austenitic Stainless Steel / дис. 2016.
19. Okita T., Etoh J., Sagisaka M., Matsunaga T., Isobe Y., Freyer P.D., Huang Y., Wieszorek J.M.K., Garner F.A. Validation of ultrasonic velocity measurements for detecting void swelling in first-wall structural materials // Fusion Science and Technology. 2014. V. 66. No. 1. P. 77—82.
20. Бабев А.Р., Асадчая М.В., Сергеева О.С., Коновалов Г.Е. Распространение волны Рэлея в твердых телах с технологическим выступом // Приборы и методы измерений. 2011. № 2 (3).
21. Зацепин А.Ф. Акустические измерения. Москва: Изд-во Юрайт, 2024. 209 с.
22. Drouin D., Couture A.R., Joly D., Tastet X., Aimez V., Gauvin R. CASINO V2.42: a fast and easy-to-use modeling tool for scanning electron microscopy and microanalysis users // Scanning. 2007. May—Jun. V. 29. No. 3. P. 92—101.
23. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. СПб.: Радиоавионика, 1995. 327 с.
24. Васильев А.В., Бирюков Д.Ю., Зацепин А.Ф. Программа для контроля коэффициента затухания ультразвука и анализа микроструктуры материалов / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024669749 от 21 августа 2024 г.
25. Бражников Н.И. Ультразвуковые методы / Под общ. ред. акад. Н. Н. Шумиловского. Физ. и физ.-хим. методы контроля состава и свойств вещества. Москва—Ленинград: Энергия, 1965. 248 с.
26. Далин М.А., Чертищев В.Ю., Краснов И.С., Раевских А.Н. Исследование случаев «аномального» затухания ультразвуковых колебаний в заготовках из никелевых жаропрочных сплавов // Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 37—47.
27. Подымова Н.Б., Ермолинский А.Б., Чернов М.С. Неразрушающий контроль локальной микротрещиноватости лабораторных образцов минералов акустическим методом с лазерным источником

ультразвука и его верификация методом рентгеновской компьютерной томографии // Дефектоскопия. 2023. № 10. С. 18—27.

28. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Владыкин А.Л.* Акустические и электромагнитные свойства мартенситно-старяющего железохромоникелевого сплава с добавлением меди при механическом растяжении // Дефектоскопия. 2023. № 5. С. 12—20.

REFERENCES

1. *Pichkov S.N., Zakharov D.A., Khlybov A.A.* Physical aspects of using waveguide lines for acoustic emission control of metal integrity of hull structures of nuclear power plants // Proceedings of the R. E. Alekseev NSTU. 2020. No. 4 (131). P. 63—70.

2. *Mitenkov F.M., Kaidalov V.B., Korotkov Yu.G., Panov V.A., Pichkov S.N.* Methods of substantiating the resource of nuclear power plants. M.: Mashinostroenie, 2007. 445 p.

3. *Khlybov A.A.* Ensuring the Operation of Large-Scale Structures Based on Technical Condition: Monograph. Nizhny Novgorod: NGPU Publishing House, 2008. 135 p. ISBN 978-5-85219-145-8.

4. *Vuolo M., Baiocco G., Barbieri S., Bocchini L., Giraud M., Gheysens T., Ottolenghi A.* Exploring innovative radiation shielding approaches in space: A material and design study for a wearable radiation protection spacesuit // Life Sciences in Space Research. 2017. No. 15. P. 69—78.

5. *Anders J., Braccini S., Carzaniga T.S., Casolaro P., Chatterjee M.* A facility for radiation hardness studies based on a medical cyclotron // Journal of Instrumentation. 2022. V. 17. No. 04. P. P04021.

6. *De Azevedo A.M., Cardoso D.D.O., De Medeiros M.P.C., Gavazza S., Morales R.K.* Determination of steel and lead bi-laminated shielding for military vehicles // Brazilian Journal of Radiation Sciences. 2023. V. 11. No. 1A (Suppl.). P. 01—31.

7. *Adupa C., Prakash T., Chandhra, Ramchandar P., Tarun J.* Radiation hardened circuits in multiple harsh environments // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering // IOP Publishing. 2020. V. 981. No. 3. P. 032044.

8. *Pavan Kumar M., Lorenzo R.* A review on radiation-hardened memory cells for space and terrestrial applications // International journal of circuit theory and applications. 2023. V. 51. No. 1. P. 475—499.

9. *Rockett L., Patel D., Danziger S., Wang J.J., Cronquist B.* Radiation hardened FPGA technology for space applications / 2007 IEEE Aerospace Conference. IEEE. 2007. P. 1—7.

10. *Klyushnikov V.A., Mishakin V.V.* Investigation of the effect of plastic deformation on acoustic and magnetic characteristics of austenitic and austenitic-ferritic steels // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering. 2018. No. 2 (119).

11. *Latypova D.R., Bugai D.E., Latypov O.R., Ryabukhina V.N.* Investigation of corrosion of a contact pair of 09G2C/12H18N10T steels in technological environments of column equipment // Oil and gas business. 2020. V. 18. No. 6. P. 122—129.

12. *Jerin A., Karunakaran K.* Minimizing maximum height of the profile on stainless steel of 12X18H10T for ECM // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing. 2022. V. 2473. No. 1.

13. *Tkacheva A.A., Makarevich V.O., Korneeva E.K.* Features of radiation resistance of steels and alloys: collection of scientific papers of the VI International Scientific and Practical Internet Conference of Students and Undergraduates, November 23-24, 2023 / comp.: A. P. Bezhok, I. A. Ivanov. Minsk : BNTU, 2023. P. 160—163.

14. *Muravyov V.V., Budrin A.Yu., Sintsov M.A.* The effect of cyclically varying loads on shear and Rayleigh wave velocities in steel bars of various heat treatments // Intelligent systems in production. 2020. V. 18. No. 4. P. 4—10.

15. *Khlybov A.A., Uglov A.L., Ryabov D.A., Anosov M.S.* Assessment of damage to structural metal materials by acoustic methods // Bulletin of IzHSTU named after M.T. Kalashnikov. 2022. V. 25. No. 4. P. 18—26.

16. *Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Ryabov D.A., Anosov M.S., Shagatin D.A.* Investigation of damage to 12X18H10T steel samples with low-cycle fatigue by non-destructive testing methods // Factory Laboratory. Diagnostics of materials. 2021. V. 87. No. 5. P. 61—67.

17. *Matlack K.H., Kim Jin-Yeon, Wall J., Qu J.* Radiation damage characterization in reactor pressure vessel steels with nonlinear ultrasound // AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics. 2014. V. 1581. No. 1. C. 1007—1013.

18. *Koskinen T.S., Leskelä E., Vippola M.* Artificial Flaw Detection with Ultrasound in Austenitic Stainless Steel: дис. 2016.

19. *Okita T., Etoh J., Sagisaka M., Matsunaga T., Isobe Y., Freyer P.D., Huang Y., Wieszorek J.M.K., Garner F.A.* Validation of ultrasonic velocity measurements for detecting void swelling in first-wall structural materials // Fusion Science and Technology. 2014. V. 66. No. 1. P. 77—82.

20. *Baev A.R., Asadchaya M.V., Sergeeva O.S., Konovalov G.E.* Rayleigh wave propagation in solids with a technological protrusion // Instruments and measurement methods. 2011. № 2 (3).

21. *Zatsepin A.F.* Acoustic measurements. Moscow: Yurait Publishing House, 2024. 209 p.

22. *Drouin D., Couture A.R., Joly D., Tastet X., Aimez V., Gauvin R.* CASINO V2.42: a fast and easy-to-use modeling tool for scanning electron microscopy and microanalysis users // Scanning. 2007. May-Jun. V. 29. No. 3. P. 92—101.

23. *Kretov E.F.* Ultrasonic flaw detection in power engineering. St. Petersburg: Radioavionika, 1995. 327 p.

24. *Vasiliev A.V., Biryukov D.Yu., Zatsepin A.F.* A program for monitoring the attenuation coefficient of ultrasound and analyzing the microstructure of materials / Certificate of state registration of the computer program No. 2024669749 dated August 21. 2024.

25. *Brazhnikov N.I.* Ultrasonic methods / Under the general editorship. Academician N. N. Shumilovsky; Phys. and phys.-chemical. methods for controlling the composition and properties of a substance. Moscow — Leningrad: Energiya, 1965. 248 p.

26. *Dalin M.A., Chertischev V.Yu., Krasnov I.S., Raevskikh A.N.* Investigation of cases of «abnormal» attenuation of ultrasonic vibrations in blanks made of nickel heat-resistant alloys // Flaw detection. 2020. No. 12. P. 37—47.

27. *Podymova N.B., Ermolinsky A.B., Chernov M.S.* Non-destructive testing of local microcracking of laboratory mineral samples using the acoustic method with a laser ultrasound source and its verification by X-ray computed tomography // Flaw detection. 2023. No. 10. P. 18—27.

28. *Muravyov V.V., Muravyova O.V., Vladykin A.L.* Acoustic and electromagnetic properties of a martensitic-aging iron-chromium-nickel alloy with the addition of copper under mechanical tension // Flaw detection. 2023. No. 5. P. 12—20.