

Ультразвуковое измерение толщины изделий, выполненных из материалов с неизвестными параметрами

З.В. Назыров

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

nazyrovzvinov@yandex.ru

Статья поступила 29.03.2016, принята 30.04.2015

При измерении толщины изделий ультразвуковым методом информация определяется косвенно, на основе знания скорости распространения ультразвука в материале объекта контроля. При этом повышение точности измерения ультразвуковыми толщиномерами имеет важное значение, в частности на машиностроительных предприятиях. Результат измерения толщины зависит от того, с какой точностью определена скорость ультразвука в материале изделия. Недостаток ультразвукового метода заключается в том, что скорость распространения ультразвука зависит от многих факторов — плотности материала, температуры, модуля упругости. Некоторые параметры, например температуру, измерить легко, другие — весьма сложно. Между тем, скорость распространения ультразвука в призме при той или иной температуре можно считать известной. В статье рассматривается возможность измерения толщины изделий, выполненных из материалов, о свойствах которых мало что известно. Предлагается методика проведения измерений, основанная на определении угла ввода ультразвука, соответствующего максимуму принимаемого сигнала. Данная методика может быть полезной также в случае, если температура материала измеряемого изделия отличается от нормальной.

Ключевые слова: ультразвуковая толщинометрия; раздельно-совмещенный преобразователь; скорость ультразвука; угол ввода.

Ultrasonic thickness measuring for the products made of materials with unknown parameters

Z.V. Nazyrov

Irkutsk State Transport University; 15, Chernishevsky St., Irkutsk, Russia

nazyrovzvinov@yandex.ru

Received 29.03.2016, accepted 30.04.2016

When measuring the thickness of the products ultrasonically, information about the thickness is determined by the indirect method based on the velocity of ultrasonic propagation in the material of the object of control. Improvement of the measuring accuracy are important for ultrasonic thickness equipment at the machine-building enterprises. Accuracy of thickness measurement depends on the accuracy of determination of the ultrasonic velocity in the product material. The disadvantage of ultrasonic method is that the ultrasonic propagation velocity depends on many factors such as the density of material, temperature, the elastic modulus. Some parameters such as temperature can be measured easily, while others are very difficult to find out. The velocity of ultrasonic propagation in a prism at a given temperature can be regarded as known. The article deals with the possibility of measuring the thickness of products made of materials with the properties almost unknown. The measuring technique is proposed, based on the determination of the input ultrasound angle, corresponding to the maximum reception signal. The technique proposed may also be useful in case the measured temperature of the material is different from normal.

Key words: ultrasonic thickness measurements; dual element transducer; ultrasonic velocity; input angle.

Введение

На практике нередки ситуации, когда нужно исследовать толщину объекта (изделия из металла, различных сплавов, пластика, стекла и т. д.), марка материала которого известна лишь приблизительно. Это означает, что показатель скорости ультразвука также будет приблизительно, как и в реальных условиях эксплуатации измерительного прибора, когда появляется дополнительная температурная погрешность. Эти и другие факторы вызывают определенные сложности с обеспечением необходимой точности при измерениях толщины.

Высокие требования к точности измерения требуют поиска путей создания приборов, позволяющих снизить погрешности от указанных факторов [1].

Принцип работы преобразователя. Рассмотрим, как можно выполнить измерения в случае, когда поверхности объекта контроля плоско-параллельные, одновременно определив скорость распространения ультразвука и расстояние между доступной поверхностью материала и «донной» поверхностью, от которой происходит отражения сигнала.

При измерении при помощи раздельно-совмещенных преобразователей (рис. 1) толщина материала определяется по формуле [2–5]:

$$h = (g - h_A \operatorname{tg}(\theta_A)) \cdot \operatorname{ctg} \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_A) \right) \right), \quad (1)$$

где g — половина расстояния между центрами пластин преобразователя; h — толщина измеряемого образца; h_A — толщина призмы; c_A — скорость ультразвука в призме; c_B — скорость ультразвука в измеряемом образце; θ_A — угол падения, соответствующий максимуму принимаемого сигнала.

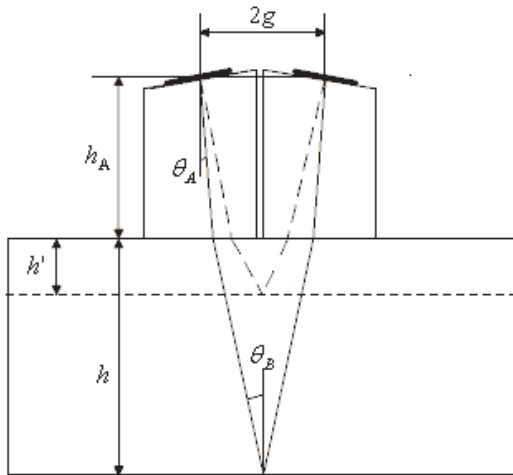


Рис. 1. Схема измерения толщины раздельно-совмещенным преобразователем

Скорость c_A может быть определена с высокой точностью, полагая ее известной.

Скорость c_B — это скорость звука в измеряемом образце, а также расстояние до отражающей поверхности (считаем их неизвестными величинами).

Скорость ультразвука c_B в материале является величиной, зависимой от свойств материала [6–11; 21], в частности от модуля упругости, который, в свою очередь, зависит от температуры материала. В неограниченной среде скорость распространения продольных ультразвуковых волн находится из соотношения [12–14]:

$$c_t = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (2)$$

где E — модуль нормальной упругости, МПа; μ — коэффициент Пуассона; ρ — плотность материала, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Модуль упругости E характеризует силы взаимодействия между соседними атомами в кристаллической решетке и соответственно электронной конфигурации, влияющие на эти силы. Средняя энергия межатомного взаимодействия изменяется с температурой, поэтому модули упругости также зависят от температуры. Изменение модуля упругости при повышении температуры определяется по формуле [15]:

$$E_T = E(1 - eT), \quad (3)$$

где e — термический коэффициент модуля упругости; T — температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$.

Термический коэффициент модуля упругости в диапазоне температур от 0 до $0,5 T_{\text{пл}}$ [15] пропорционален коэффициенту линейного расширения α . Отношение коэффициента линейного расширения к термическому коэффициенту модуля упругости примерно равно $4 \cdot 10^{-2}$. После замены формула примет вид:

$$E_T = E \left(1 - \frac{\alpha}{4 \cdot 10^{-2}} T \right). \quad (4)$$

Коэффициент Пуассона в расчетах принимается постоянным, так как материал нагревается до более низких значений, чем температура структурных превращений. При расчете принималось, что плотность образца при нагреве не изменялась.

Формула, с учетом изменения модуля упругости при нагреве, примет окончательный вид:

$$c_t = \sqrt{\frac{E \left(1 - \frac{\alpha}{4 \cdot 10^{-2}} T \right) (1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}. \quad (5)$$

Зависимость скорости продольных ультразвуковых волн от температуры для сплава Д16 приведена на рис. 2.

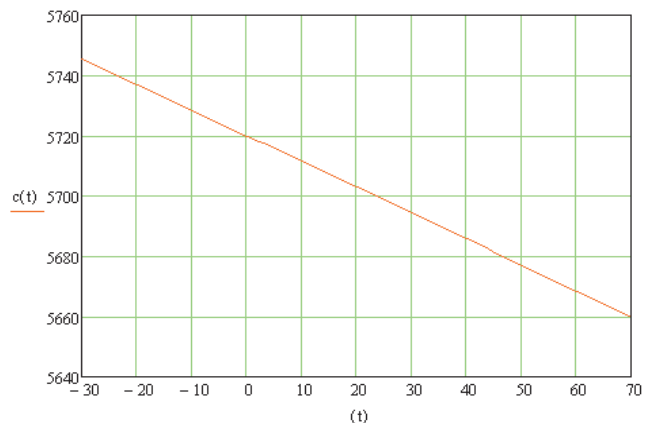


Рис. 2. Зависимость скорости продольных ультразвуковых волн от температуры для сплава Д16

Теоретически, рассчитанная температурная зависимость скорости продольных ультразвуковых волн оказалась равной примерно 8 м/с на 10°C , что соответствует увеличению относительной погрешности примерно на 0,12 %.

В случае, когда измерение выполняют в контактном варианте, по первому донному сигналу, максимальная относительная погрешность измерения толщины определяется выражением [16–20]:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta c}{c} + \frac{\Delta(t - t_3)}{(t - t_3)}. \quad (6)$$

При измеряемой толщине 10 мм и требовании провести измерение толщины с погрешностью не более $\pm 0,01$ мм скорость ультразвука в материале должна быть известна с точностью выше 0,1 %. Для этого, на-

пример у сплава Д16 ($c = 6320 \frac{M}{c}$), разность между предполагаемой и действительной скоростью ультразвука Δc должна быть не более $4 \frac{M}{c}$, а разница температур при калибровке и эксплуатации толщиномера — не более 5 °С, что очень сложно обеспечить в реальных условиях.

При контроле сварных швов ультразвуковыми фазированными решетками необходимо учитывать зависимость скорости ультразвука от температуры. Для этого используют скорректированные значения скорости ультразвука, предварительно измеренные при определенной температуре, затем по закону Снеллиуса вычисляют оптимальный диапазон углов падения и преломления ультразвука [21].

Величину c_B можно вычислить, если выполнить по крайней мере два измерения для разных значений g , то есть меняя расстояние между призмами или размеры призм.

Математическая модель измерения. Допустим, выполнено одно измерение. В результате получено значение угла падения θ_A , соответствующее максимуму принимаемого сигнала.

Выполним повторное измерение толщины материала в том же сечении, проходящем через плоскость симметрии преобразователей. Раздвинем их так, чтобы середина расстояния между центрами пьезопреобразователей осталась в той же точке.

Повторим измерение, получим новое значение угла падения, но неизвестная толщина h остается прежней.

$$h = (g - h_A \operatorname{tg}(\theta_A)) \cdot \operatorname{ctg} \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_A) \right) \right), \quad (7)$$

$$h = (g_1 - h_A \operatorname{tg}(\theta_{A1})) \cdot \operatorname{ctg} \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_{A1}) \right) \right). \quad (8)$$

Составим уравнение:

$$\begin{aligned} (g - h_A \operatorname{tg}(\theta_A)) \cdot \operatorname{ctg} \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_A) \right) \right) = \\ (g_1 - h_A \operatorname{tg}(\theta_{A1})) \cdot \operatorname{ctg} \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_{A1}) \right) \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Очевидные преобразования:

$$\frac{\operatorname{ctg} \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin \theta_A \right) \right)}{\operatorname{ctg} \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin \theta_{A1} \right) \right)} = \frac{(g_1 - h_A \operatorname{tg} \theta_{A1})}{(g - h_A \operatorname{tg} \theta_A)}, \quad (10)$$

$$\frac{\cos \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_A) \right) \right) \cdot \sin \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_{A1}) \right) \right)}{\cos \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_{A1}) \right) \right) \cdot \sin \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_A) \right) \right)} = \frac{(g_1 - h_A \operatorname{tg}(\theta_{A1}))}{(g - h_A \operatorname{tg}(\theta_A))}, \quad (11)$$

$$\sin \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_{A1}) \right) \right) = \frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_{A1}), \quad (12)$$

$$\sin \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_A) \right) \right) = \frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_A), \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \cos \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_A) \right) \right) &= \sqrt{1 - \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_A) \right)^2} = \\ &= \frac{\sqrt{c_A^2 - c_B^2 \sin^2(\theta_A)}}{c_A} \quad (14) \\ \cos \left(\arcsin \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_{A1}) \right) \right) &= \sqrt{1 - \left(\frac{c_B}{c_A} \sin(\theta_{A1}) \right)^2} = \\ &= \frac{\sqrt{c_A^2 - c_B^2 \sin^2(\theta_{A1})}}{c_A} \end{aligned}$$

Запишем уравнение в следующем виде:

$$\frac{\sin(\theta_{A1}) \cdot \sqrt{c_A^2 - c_B^2 \sin^2(\theta_A)}}{\sin(\theta_A) \cdot \sqrt{c_A^2 - c_B^2 \sin^2(\theta_{A1})}} = \frac{(g_1 - h_A \operatorname{tg}(\theta_{A1}))}{(g - h_A \operatorname{tg}(\theta_A))}. \quad (15)$$

Возведем обе части в квадрат, выполним преобразования:

$$\frac{\sin^2(\theta_{A1}) \cdot (c_A^2 - c_B^2 \sin^2(\theta_A)) \cdot (g - h_A \operatorname{tg}(\theta_A))^2}{\sin^2(\theta_A) \cdot (c_A^2 - c_B^2 \sin^2(\theta_{A1})) \cdot (g_1 - h_A \operatorname{tg}(\theta_{A1}))^2} = \quad (16)$$

Скорость ультразвука в материале изделия:

$$c_B = \frac{c_A \sqrt{\sin^2 \theta_A (g_1 - h_A \operatorname{tg} \theta_{A1})^2 - \sin^2 \theta_{A1} (g - h_A \operatorname{tg} \theta_A)^2}}{\sin \theta_A \sin \theta_{A1} \sqrt{(g_1 - h_A \operatorname{tg} \theta_{A1})^2 - (g - h_A \operatorname{tg} \theta_A)^2}}. \quad (17)$$

Таким образом, скорость ультразвука можно определить для конкретных условий, даже не имея точных значений параметров материала.

При известном значении c_B определяется толщина материала по (1).

Если использовать две пары преобразователей, расположенных симметрично по отношению к общей оси, то измерения можно производить непосредственно друг за другом.

Данные могут обрабатываться микроконтроллером или передаваться на компьютер; кроме того, можно предложить таблицу значений, где каждой паре углов

θ_A , θ_{A1} соответствуют значению скорости ультразвука в исследуемом образце и расстояние до отражающей поверхности. Таблица имеет практическое значение, если расстояния g , g_1 имеют фиксированное значение, и материал призм не меняется.

Методика измерений. Методика измерений описанного метода сводится к следующим действиям:

1) Измерение скорости распространения ультразвука в материале призмы преобразователя.

2) Излучение ультразвука и прием отраженного сигнала парой преобразователей, определение угла, под которым выходит отраженный луч (он же угол падения, оптимальный для данных параметров).

3) Излучение ультразвука и прием отраженного сигнала второй парой преобразователей, имеющих ось симметрии, совпадающую с первой парой.

4) Вычисление, в соответствии с алгоритмом, скорости ультразвука в материале исследуемого объекта.

5) Вычисление толщины объекта с использованием измеренных и вычисленных скоростей ультразвука в призме и материале.

Проанализировав эти шаги, видим, что последовательность действий может быть изменена, при этом упростятся измерения и повысится их точность.

Формулы, по которым вычисляется толщина образца, содержат отношение скоростей ультразвука в призме и материале образца. Для того чтобы определить толщину образца, не требуется знание конкретных значений скоростей ультразвука. По значениям двух углов падения, соответствующих двум парам преобразователей, можно определить коэффициент преломления (т. е. отношение скоростей) и толщину образца. Таким образом, последовательность действий может быть следующей:

1) Излучение ультразвука и прием отраженного сигнала парой преобразователей. Определение угла, под которым выходит отраженный луч (он же угол падения, оптимальный для данных параметров).

2) Излучение ультразвука и прием отраженного сигнала второй парой преобразователей, имеющих ось симметрии, совпадающую с первой парой.

3) Решение системы уравнений. Находим значения коэффициента преломления и толщины образца.

Второй метод имеет важное преимущество: исключено промежуточное измерение скорости в призме, а значит, уменьшена погрешность определения толщины объекта.

Поскольку скорость распространения ультразвука в материале представляет интерес, нужно определить скорость распространения ультразвука в призме: по известной скорости в призме и вычисленному коэффициенту преломления определяется скорость в материале.

Почему требуется измерение скорости ультразвука в призме? Оно может быть известно, но следует иметь в виду температурный дрейф этого параметра. При серии

измерений, выполняющихся при стабильной температуре, в том числе при измерении образцов из разных материалов, скорость ультразвука в призме может быть определена один раз, и в дальнейшем это значение будет использоваться в расчетах.

Формула для второго метода:

$$\frac{c_B}{c_A} = \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_A \cdot (g_1 - h_A \operatorname{tg} \theta_{A1})^2 - \sin^2 \theta_{A1} \cdot (g - h_A \operatorname{tg} \theta_A)^2}}{\sin \theta_A \cdot \sin \theta_{A1} \sqrt{(g_1 - h_A \operatorname{tg} \theta_{A1})^2 - (g - h_A \operatorname{tg} \theta_A)^2}} \quad (18)$$

Предложенный метод позволяет исследовать объекты из материалов, точные параметры которых неизвестны. Не требуются точные знания марки стали, поиск значения модуля упругости, определение температурных поправок. Коэффициент преломления и скорость ультразвука определяются для текущего состояния материала и параметров окружающей среды.

Заключение

Таким образом, скорость ультразвука можно определить для конкретных условий, даже не имея точных значений параметров материала и его температуры.

Если использовать две пары преобразователей, расположенных симметрично по отношению к общей оси, то измерения можно производить непосредственно друг за другом.

Литература

1. Королев М.В. Безэталонные ультразвуковые толщиномеры. М.: Машиностроение, 1985. 80 с.
2. Ермолов И.Н., Алёшин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль: практ. пособие. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля. М.: Высш. школа, 1991. 283 с.
3. Ермолов И.Н., Ермолов Е.А. К вопросу градуировки толщиномера с раздельно-совмещенным преобразователем // Дефектоскопия. 1995. № 11. С. 15-18.
4. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И.Н.Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
5. Ультразвуковые преобразователи: пер. с англ. / под ред. Е. Кикучи. Мир, 1972.
6. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: пер с нем. М.: Металлургия, 1991. 752 с.
7. Королев М. В. Эхо-импульсные толщиномеры. М.: Машиностроение, 1980. 111 с.
8. Калинин В.А., Тарасенко В.Л., Цеслер Л.Б. Погрешности измерений ультразвуковыми толщиномерами, обусловленные варьированием скорости распространения ультразвука в конструкционных сталях и металлических сплавах // Дефектоскопия. 1988. № 1. С. 18-25.
9. Калинин В.А., Тарасенко В.Л. Составляющие погрешности измерения ультразвуковыми толщиномерами с двухэлементными раздельно-совмещенными пьезоэлектрическими преобразователями // Дефектоскопия. 1988. № 10. С. 22-32.
10. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 184 с.

11. Домаркас В.Й., Пилецкас Э.Л. Ультразвуковая эхоскопия. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. 276 с.
12. Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Metallurgiya, 1974. 240 с.
13. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. СПб.: Свен, 2014. 312 с.
14. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И.П. Голяминой. М.: Советская энциклопедия, 1979.
15. Лившиц Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов. М.: Metallurgiya, 1980. 320 с.
16. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: справочник: В 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
17. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
18. Балдев Р., Раджендран В., Паланичами П. Мир физики и техники. Применения ультразвука. М.: Техносфера, 2006. 576 с.
19. Ермолов И.Н., Вopilкин А.Х., Бадалян В.Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии: справочник. М., 2004. 211 с.
20. Алешин Н.П., Белый В.Е., Вopilкин А.Х. Методы акустического контроля металлов. М.: Машиностроение, 1989. 456 с.
21. Olympus NDT. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. 2004.

References

1. Korolev M.V. Standardless ultrasonic thickness gauges. M.: Mashinostroenie, 1985. 80 p.
2. Ermolov I.N., Aleshin N.P., Potapov A.I. Non-destructive testing. The 5 Bk. Bk. 2. Acoustic methods of control: prakt. posobie. V 5 kn. Kn. 2. Akusticheskie metody kontrolya. M.: Vyssh. shkola, 1991. 283 p.
3. Ermolov I.N., Ermolov E.A. On the issue of calibration gauge with duals converter // Defektoskopiya. 1995. № 11. P. 15-18.
4. Ultrasonic transducers for NDT / pod obshch. red. I.N.Ermolova. M.: Mashinostroenie, 1986. 280 p.
5. The ultrasonic transducers: per. s angl. / pod red. E. Kikuchi. Mir, 1972.
6. Krautkremer I., Krautkremer G. Ultrasonic testing of materials: per s nem. M.: Metallurgiya, 1991. 752 p.
7. Korolev M. V. Echo-pulse thickness gauges. M.: Mashinostroenie, 1980. 111 p.
8. Kalinin V.A., Tarasenko V.L., Tsesler L.B. Errors in measurement ultrasonic thickness caused by varying the speed of propagation of ultrasound in structural steels and steel alloys // Russian Journal of Nondestructive Testing. 1988. № 1. P. 18-25.
9. Kalinin V.A., Tarasenko V.L. The components of the measurement error of ultrasonic thickness gauge with two-element dual element piezoelectric transducers // Russian Journal of Non-destructive Testing. 1988. № 10. P. 22-32.
10. Murav'ev V.V., Zuev L.B., Komarov K.L. The speed of sound and structure of steels and alloys. Novosibirsk: Nauka, 1996. 184 p.
11. Domarkas V.I., Pileckas E.L. Ultrasonic echoscopy. L.: Engineering.Leningrad 1988. 276 с.
12. Vybornov B.I. Ultrasonic defektoskopiya. M.: Metallurgiya, 1974. 240 p.
13. Kretov E.F. Ultrasonic testing in power mechanical engineering. SPb.: Sven, 2014. 312 p.
14. Ultrasound. Little encyclopedia / pod red. I.P. Golyami noi. M.: Sovetskaya entsiklopediya, 1979.
15. Livshits B.G. The physical properties of metals and alloys. M.: Metallurgiya, 1980. 320 p.
16. Ermolov I.N., Lange Yu.V. Non-destructive testing: Reference: V 7 t. V. 3. M.: Mashinostroenie, 2004. 864 p.
17. Ermolov I.N. Theory and practice of ultrasonic testing. M.: Mashinostroenie, 1981. 240 p.
18. Baldev R., V Rajendran V., Palanichamy P. Science and technology of ultrasonics. M.: Technosphere, 2006. 576 p.
19. Ermolov I.N., Vopilkin A.Kh., Badalyan V.G. Calculations in the ultrasonic flaw detection: spravochnik. M., 2004. 211 p.
20. Aleshin N.P., Belyi V.E., Vopilkin A.Kh. Methods of acoustic control of metals. M.: Mashinostroenie, 1989. 456 p.
21. Olympus NDT. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. 2004.