

УДК 620.1:678.7]:534.083

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКА НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПРИЕМНИКА  
УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЛУЧА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СИНТЕГРАНА

**В. М. Тонконогий<sup>1</sup>, М. А. Голофеева<sup>2</sup>**

*В.М. Тонконогий, М.А. Голофеева. В статье рассмотрен метод контроля качества изделий из синтеграна, основанный на зависимости угла преломления ультразвукового луча от физико-механических свойств и структуры материала. Получены уравнения чувствительности, позволяющие рассчитать отклонений перемещения приемника ультразвукового луча в абсолютных и относительных значениях.*

*Ключевые слова: синтегран, акустический метод исследования, преломление УЗ луча, уравнения чувствительности*

*В.М. Тонконогий, М.О. Голофеева. Розглянутий метод контролю якості синтегранових виробів, заснований на залежності кута переломлення ультразвукового променя від фізико-механічних властивостей і структури матеріалу. Отримані рівняння чутливості, які дозволяють розрахувати відхилення переміщення приймача ультразвукового променя в абсолютних та відносних значеннях.*

*Ключові слова: синтегран, акустичний метод дослідження, переломлення УЗ променя, рівняння чутливості*

*V.M. Tonkonogiy, M.A. Golofeeva. The article describes the methods of research quality parameters of products from sintegran. It is noted that for the prediction of their properties and diagnostics of the existing methods are not effective enough. We propose a method of research, based on the angle of refraction the ultrasound beam depends on the structural features of sintegran. The equations of sensitivity, allowing to calculate the deviation of the receiver ultrasonic beam in absolute and relative terms are obtained*

---

<sup>1</sup> ©В.М. Тонконогий, д.т.н. Одесский национальный политехнический университет

<sup>2</sup> ©М.А. Голофеева, ассистент. Одесский национальный политехнический университет

Для развития в условиях рыночной экономики необходимо повышение эффективности промышленного производства, качества, надежности и долговечности выпускаемой продукции. Одним из вариантов решения такой задачи может быть использование новых материалов, в том числе синтетических, композиционных и других, с заранее заданными свойствами. Весьма широкие перспективы использования в машиностроении имеет синтегран – высоконаполненный композиционный материал на основе эпоксидного связующего, наполнителей в виде щебня трех-четырех фракций и мелкодисперсного порошка из высокопрочных гранитов. Благодаря своей развитой структуре такие материалы требуют особого подхода, новых решений при разработке и создании методов и средств их контроля.

Широкое распространение в качестве методов исследования свойств и диагностики состояния полимерных композиционных материалов получили акустические методы исследования. Они отличаются высокими эксплуатационными характеристиками, такими как пороговая чувствительность, разрешающая способность, точность определения контура дефекта, кривизна контролируемой поверхности и пр. [1].

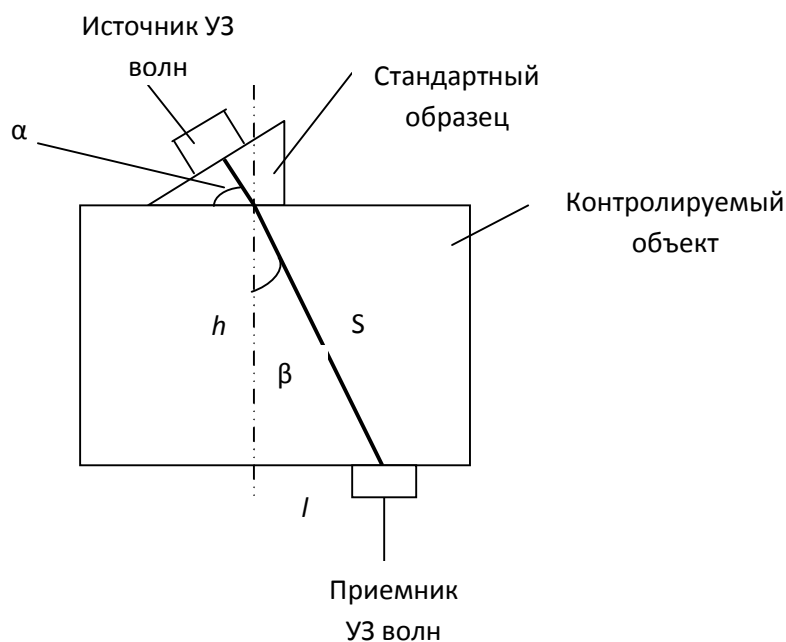


Рисунок – Схема ультразвукового прозвучивания образца из синтеграна

На рисунке приведена схема ультразвукового прозвучивания. Источник ультразвукового сигнала при контроле изделия из синтеграна является неподвижным, а приемник перемещается вдоль объекта. Тогда  $l$  – расстояние от перпендикуляра к границе раздела сред в точке падения ультразвукового луча до точки падения уз луча на нижнюю границу контролируемого объекта (перемещение приемника УЗ волны);  $h$  – толщина изделия;  $S$  – траектория распространения ультразвуковой волны.

Предлагается зависимость перемещения приемника  $l$  от физико-механических свойств синтеграна, по которым косвенно можно говорить и об особенностях структуры материала, а, следовательно, судить о параметрах качества изделий из него.

$$l = \frac{h \cdot \sin \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{\sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}}} \quad (1)$$

где  $C_1$  – скорость распространения УЗ волны в стандартном образце;

$E$  – модуль упругости синтеграна;

$\rho$  – плотность синтеграна;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\alpha$  – угол падения УЗ луча.

$h$  – толщина изделия

Определим допуск на перемещение приемника  $\Delta l$ . Пусть  $l$  – некоторое значение перемещения приемника УЗ луча, а  $l_0$  – номинальное его значение. Тогда абсолютное отклонение  $\Delta l$  определяется как:

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2)$$

При известной функциональной зависимости  $l = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  для отклонения перемещения от номинального значения можно записать:

$$l + \Delta l = f(\alpha_1 + \Delta\alpha_1, \alpha_2 + \Delta\alpha_2, \dots, \alpha_n + \Delta\alpha_n), \quad (3)$$

$$\Delta l = f(\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \dots, \Delta\alpha_n), \quad (4),$$

где  $\alpha_n$  – параметры воздействующих факторов.

Предположим, что функция (3) имеет все непрерывные производные по входным параметрам порядка  $n+1$ . Тогда ее можно разложить в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} & f(\alpha_1 \pm \Delta\alpha_1, \alpha_2 \pm \Delta\alpha_2, \dots, \alpha_n \pm \Delta\alpha_n) = \\ & = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \pm \frac{1}{1!} \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial \alpha_i} \Delta\alpha_i \pm \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} \Delta\alpha_i \Delta\alpha_j \pm R_n, \end{aligned}$$

где  $R_n$  – остаточный член ряда Тейлора,

$$R_n = \frac{1}{(n+1)!} \alpha^{n+1} f(\alpha_1 \pm m\Delta\alpha_1, \alpha_2 \pm m\Delta\alpha_2, \dots, m\alpha_n \pm \Delta\alpha_n), \quad (5)$$

$m$  – некоторое число  $0 < m < 1$ .

Пусть отклонения параметров малы, т. е.  $\Delta\alpha_i \ll \alpha_i$ , тогда в уравнении (5) можно пренебречь членами второго и более высокого порядка и ограничиться двумя членами разложения. В этом случае

$$\begin{aligned} & f(\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \dots, \Delta\alpha_n) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial \alpha_i} \Delta\alpha_i, \\ & \Delta l = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial \alpha_i} \Delta\alpha_i = \frac{\partial f}{\partial \alpha} \Delta\alpha + \frac{\partial f}{\partial E} \Delta E + \frac{\partial f}{\partial \rho} \Delta\rho + \frac{\partial f}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial f}{\partial C_1} \Delta C_1 + \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h. \quad (6) \end{aligned}$$

Это уравнение в общем случае называется уравнением чувствительности и практически может быть использовано для расчета отклонений (погрешностей) в абсолютных значениях. Удобнее всего использовать выражения относительной погрешности (6):

$$\frac{\Delta l}{l} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial \alpha_i} \frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i} = \frac{\partial f}{\partial \alpha} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\partial f}{\partial E} \frac{\Delta E}{E} + \frac{\partial f}{\partial \rho} \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\partial f}{\partial v} \frac{\Delta v}{v} + \frac{\partial f}{\partial C_1} \frac{\Delta C_1}{C_1} + \frac{\partial f}{\partial h} \frac{\Delta h}{h}. \quad (7)$$

Найдем частные производные  $\frac{\partial f}{\partial \alpha_i}$ .

$$\frac{\partial f}{\partial h} = \frac{\sin \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+v)}}}{\sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+v)}}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = \frac{h \cdot \cos \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+v)}}}{\sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+v)}}} - \frac{E \cdot h \cdot \cos \alpha \cdot \sin^2 \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+v)}}}{2\rho(1+v) \left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+v)} \right]^{3/2}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial f}{\partial E} = \frac{h \cdot \sin \alpha}{4 \cdot \rho(1+\nu) \sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}} + \quad (10)$$

$$+ \frac{h \cdot \sin^3 \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{4 \cdot \rho(1+\nu) \left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \rho} = - \frac{E \cdot h \cdot \sin^3 \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{4 \cdot \rho^2(1+\nu) \left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}} - \quad (11)$$

$$- \frac{E \cdot h \cdot \sin \alpha}{4 \cdot \rho^2(1+\nu) \sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \nu} = - \frac{E \cdot h \cdot \sin^3 \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{4 \cdot \rho \cdot (1+\nu)^2 \left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}} - \quad (12)$$

$$- \frac{E \cdot h \cdot \sin \alpha}{4 \cdot \rho \cdot (1+\nu)^2 \sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}$$

$$\frac{\partial f}{\partial C_1} = - \frac{C_1 \cdot h \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{\left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}} \quad (13)$$

Подставив выражения с (8) по (13) в выражение (6) получаем зависимость отклонения перемещения приемника ультразвукового луча при исследовании параметров качества синтеграновых изделий в абсолютных значениях:

$$\Delta l = \left( \frac{h \cdot \cos \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{\sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}}} - \frac{E \cdot h \cdot \cos \alpha \cdot \sin^2 \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{2\rho(1+\nu) \left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}} \right) \Delta \alpha +$$

$$\begin{aligned}
& + \left( \frac{h \cdot \sin \alpha}{4 \cdot \rho(1+\nu) \sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}} + \frac{h \cdot \sin^3 \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{4 \cdot \rho(1+\nu) \left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}} \right) \Delta E - \\
& - \left( \frac{E \cdot h \cdot \sin^3 \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{4 \cdot \rho^2(1+\nu) \left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}} + \frac{E \cdot h \cdot \sin \alpha}{4 \cdot \rho^2(1+\nu) \sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}} \right) \Delta \rho - \\
& - \left( \frac{E \cdot h \cdot \sin^3 \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{4 \cdot \rho \cdot (1+\nu)^2 \left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}} + \frac{E \cdot h \cdot \sin \alpha}{4 \cdot \rho \cdot (1+\nu)^2 \sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}} \right) \Delta \nu - \\
& - \left( \frac{C_1 \cdot h \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{\left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}} \right) \Delta C_1 + \left( \frac{\sin \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{\sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}}} \right) \Delta h. \quad (14)
\end{aligned}$$

Выражение для относительной погрешности имеет вид:

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta l}{l} = & \left( \frac{h \cdot \cos \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{\sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}}} - \frac{E \cdot h \cdot \cos \alpha \cdot \sin^2 \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{2\rho(1+\nu) \left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}} \right) \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \\
& + \left( \frac{h \cdot \sin \alpha}{4 \cdot \rho(1+\nu) \sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}} + \frac{h \cdot \sin^3 \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{4 \cdot \rho(1+\nu) \left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}} \right) \frac{\Delta E}{E} - \\
& - \left( \frac{E \cdot h \cdot \sin^3 \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{4 \cdot \rho^2(1+\nu) \left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}} + \frac{E \cdot h \cdot \sin \alpha}{4 \cdot \rho^2(1+\nu) \sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}} \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \left( \frac{E \cdot h \cdot \sin^3 \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{4 \cdot \rho \cdot (1+\nu)^2 \left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}} + \frac{E \cdot h \cdot \sin \alpha}{4 \cdot \rho \cdot (1+\nu)^2 \sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}} \right) \frac{\Delta \nu}{\nu} - \\
& - \left( \frac{C_1 \cdot h \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{\left[ C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{3/2}} \right) \frac{\Delta C_1}{C_1} + \left( \frac{\sin \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{\sqrt{C_1^2 - \sin^2 \alpha \frac{E}{2\rho(1+\nu)}}} \right) \frac{\Delta h}{h}. \quad (15)
\end{aligned}$$

Таким образом, получены уравнения чувствительности. Они могут быть использованы для расчета отклонений перемещения приемника ультразвукового луча в абсолютных и относительных значениях.

### **Выводы:**

1. Предложена зависимость перемещения приемника ультразвукового луча от физико-механических характеристик синтеграната, по которым косвенно можно говорить и об особенностях структуры материала, а, следовательно, судить о параметрах качества изделий из него.
2. Получены уравнения чувствительности, которые практически могут быть использованы для расчета отклонений перемещения приемника ультразвукового луча в абсолютных и относительных значениях.

### **Список использованных источников**

1. Голофеева М.А. Акустический метод контроля синтеграновых изделий // Проблемы техники: научно-виробничий журнал. – 2013. - №3 – С. 119-124
2. Кофанов, Ю. Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности радиоэлектронных средств: Учебник для вузов./ Ю. Н. Кофанов – М.: Радио и связь, 1991. – 360 с.