

УДК 620.1:678.7]:534.083

**В.М. Тонконогий**, д-р техн. наук, проф.,  
**М.А. Голофеева**, магістр,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКА НА УГОЛ ПРЕЛОМЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЛУЧА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ СИНТЕГРАНА

*В.М. Тонконогий, М.О. Голофеева.* **Визначення допуску на кут заломлення ультразвукового променя при дослідженні параметрів якості виробів із синтеграну.** Розглянуто метод контролю якості синтегранових виробів, заснований на залежності кута заломлення ультразвукового променя від фізико-механічних властивостей та структури матеріалу. Отримано рівняння чутливості, які дозволяють розрахувати відхилення кута заломлення ультразвукового променя.

*Ключові слова:* полімерні композиційні матеріали, синтегран, акустичний метод контролю, заломлення ультразвукового променя.

*В.М. Тонконогий, М.А. Голофеева.* **Определение допуска на угол преломления ультразвукового луча при исследовании параметров качества изделий из синтегрانا.** Рассмотрен метод контроля качества синтеграновых изделий, основанный на зависимости угла преломления ультразвукового луча от физико-механических свойств и структуры материала. Получены уравнения чувствительности, позволяющие рассчитать отклонение угла преломления ультразвукового луча.

*Ключевые слова:* полимерные композиционные материалы, синтегран, акустический метод контроля, преломление ультразвукового луча.

*V.M. Tonkonogy, M.A. Golofeyeva.* **Determination of tolerance for the angle of refraction of an ultrasound beam in researching the quality parameters of products from syntegran.** Considered is the method of quality control of products from syntegran based on the dependence of the refraction angle of an ultrasound beam upon the physical and mechanical properties and structure of the material. The equations of sensitivity allowing to calculate the deviation of the refraction angle of the ultrasound beam are obtained.

*Keywords:* polymer composite materials, sintegran, acoustic monitoring method, the ultrasonic beam refraction.

Для экономического и социального развития в условиях рыночной экономики необходимо повышение эффективности промышленного производства, качества, надежности и долговечности выпускаемой продукции. Решение такой задачи может быть осуществлено путем более полного использования возможностей материалов, в том числе синтетических, композиционных и др., 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.

Одним из наиболее распространенных методов неразрушающего контроля является акустический, имеющий следующие преимущества перед другими методами исследования качества изделий из полимерных композиционных материалов [1]:

— информативным признаком дефекта является изменение параметров упругого импульса, распространяющегося в контролируемом материале, что расширяет область применения этого метода в части определения физико-механических характеристик материала;

— большая возможность механизации и автоматизации, которая обеспечивается высокой технологичностью процесса контроля, а следовательно и повышение производительности;

— несложная и безопасная по сравнению с другими методами аппаратурная реализация;

— сравнительно невысокая стоимость и наличие серийно выпускаемой аппаратуры.

Во время получения информации о свойствах материала по результатам акустических измерений необходимо определить комплекс акустических характеристик материала, описывающих его состояние с необходимой точностью (скорости распространения и коэффициента затухания ультразвуковых колебаний, рассеивание), а также выявить связь этих характеристик с исследуемыми параметрами. В качестве такой акустической характеристики предлагается использовать зависимость угла преломления ультразвукового луча от упругости и особенностей строения синтеграна.

При косом падении волны относительно плоской границы сред отраженная волна распространяется в соответствии с законом геометрической оптики, согласно которому угол отражения  $\alpha_{отр}$  равен углу падения  $\alpha$  (оба угла отсчитываются от перпендикуляра к границе сред). При равенстве скоростей звука в средах ( $C_1=C_2$ ) прошедшая волна не меняет своего направления относительно падающего луча, т.е. углы  $\alpha$  и  $\beta$  равны друг другу. Если скорости звука в средах не равны ( $C_1 \neq C_2$ ), то имеет место преломление волны. Поскольку в качестве первой среды будет использован стандартный образец с заранее известными акустическими характеристиками, то скорость распространения ультразвуковой волны в ней  $C_1$  будет известна.

Предлагается зависимость угла преломления ультразвукового луча от физико-механических характеристик синтеграна

$$\beta = \arcsin \left( \frac{\sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{C_1} \right), \quad (1)$$

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.

Определим допуск на угол преломления УЗ луча  $\Delta\beta$ . Пусть  $\beta$  — некоторое значение угла преломления УЗ луча, а  $\beta_0$  — номинальное его значение. Тогда абсолютное отклонение  $\Delta\beta$  определяется как

$$\Delta\beta = \beta - \beta_0. \quad (2)$$

При известной функциональной зависимости  $\beta=f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  для отклонения угла преломления от номинального значения можно записать

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

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

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

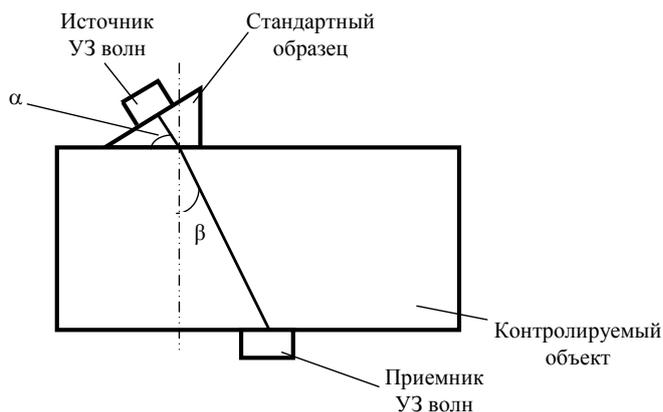


Схема прозвучивания образца из синтеграна

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

где  $R_n$  — остаточный член ряда Тейлора,

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

$m$  — 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

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

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)

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

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

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

$$\frac{\partial \beta}{\partial E} = \frac{\sin \alpha}{4C_1 \rho(1+v) \sqrt{1 - \frac{E \sin^2 \alpha}{2C_1^2 \rho(v+1)}} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+v)}}}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \rho} = - \frac{E \sin \alpha}{4C_1 \rho^2(1+v) \sqrt{1 - \frac{E \sin^2 \alpha}{2C_1^2 \rho(v+1)}} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+v)}}}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial v} = - \frac{E \sin \alpha}{4C_1 \rho(1+v)^2 \sqrt{1 - \frac{E \sin^2 \alpha}{2C_1^2 \rho(v+1)}} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+v)}}}; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial C_1} = - \frac{\sin \alpha \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+v)}}}{C_1^2 \sqrt{1 - \frac{E \sin^2 \alpha}{2C_1^2 \rho(v+1)}}}. \quad (12)$$

Подставив выражения с (8) по (12) в выражение (6), получим зависимость отклонения угла преломления ультразвукового луча при исследовании параметров качества синтеграновых изделий в абсолютных значениях

$$\Delta\beta = \frac{\cos\alpha\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{C_1\sqrt{1-\frac{E\sin^2\alpha}{2C_1^2\rho(\nu+1)}}}\Delta\alpha + \frac{\sin\alpha}{4C_1\rho(1+\nu)\sqrt{1-\frac{E\sin^2\alpha}{2C_1^2\rho(\nu+1)}}\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}\Delta E - \frac{E\sin\alpha}{4C_1\rho^2(1+\nu)\sqrt{1-\frac{E\sin^2\alpha}{2C_1^2\rho(\nu+1)}}\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}\Delta\rho - \frac{E\sin\alpha}{4C_1\rho(1+\nu)^2\sqrt{1-\frac{E\sin^2\alpha}{2C_1^2\rho(\nu+1)}}\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}\Delta\nu - \frac{\sin\alpha\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{C_1^2\sqrt{1-\frac{E\sin^2\alpha}{2C_1^2\rho(\nu+1)}}}\Delta C_1. \quad (13)$$

Выражение для относительной погрешности имеет вид

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \frac{\cos\alpha\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{C_1\sqrt{1-\frac{E\sin^2\alpha}{2C_1^2\rho(\nu+1)}}}\frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\sin\alpha}{4C_1\rho(1+\nu)\sqrt{1-\frac{E\sin^2\alpha}{2C_1^2\rho(\nu+1)}}\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}\frac{\Delta E}{E} - \frac{E\sin\alpha}{4C_1\rho^2(1+\nu)\sqrt{1-\frac{E\sin^2\alpha}{2C_1^2\rho(\nu+1)}}\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}\frac{\Delta\rho}{\rho} - \frac{E\sin\alpha}{4C_1\rho(1+\nu)^2\sqrt{1-\frac{E\sin^2\alpha}{2C_1^2\rho(\nu+1)}}\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}\frac{\Delta\nu}{\nu} - \frac{\sin\alpha\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}}{C_1^2\sqrt{1-\frac{E\sin^2\alpha}{2C_1^2\rho(\nu+1)}}}\frac{\Delta C_1}{C_1}. \quad (14)$$

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

Выводы:

— Описан метод контроля параметров качества синтеграны, основанный на зависимости угла преломления ультразвукового луча от физико-механических характеристик и особенностей строения материала.

— Предложена зависимость угла преломления ультразвукового луча от физико-механических характеристик синтеграны.

— Зависимость угла преломления ультразвукового луча от физико-механических характеристик синтеграны, по которым косвенно можно говорить и об особенностях структуры материала, а, следовательно, судить о параметрах качества изделий из него.

— Получены уравнения чувствительности, которые практически могут быть использованы для расчета отклонений угла преломления ультразвукового луча в абсолютных и относительных значениях.

**Литература**

1. Колганов, В.И. Ультразвуковой бесконтактный метод и программно-аппаратные средства автоматизированного неразрушающего контроля качества изделий из полимерных композиционных материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб, 2001. 24 с.
2. Кофанов, Ю. Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств: Учеб. для вузов / Ю. Н. Кофанов — М.: Радио и связь, 1991. — 360 с.

**References**

1. Kolganov, V.I. Ul'trazvukovoy beskontaktnyy metod i programmno-apparatnye sredstva avtomatizirovannogo nerazrushaiushchego kontrolya kachestva izdeliy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Ultrasonic non-contact method, software and hardware for automated non-destructive quality control of products from polymeric composite materials]: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. Nauk [Author's abstr. dis. ... cand. tech. sci.]. — St. Petersburg, 2001. 24 p.
2. Kofanov, U.N. Teoreticheskie osnovy konstruirovaniya, tekhnologii i nadezhnosti radioelektronnykh sredstv [The theoretical basis of design, technology and reliability of electronic equipment]: Uchebnik dlya vuzov [A manual for higher schools]/ U.N. Kofanov — Moscow, 1991. — 360 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Маслов О.В.

Поступила в редакцию 10 июня 2013 г.