

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ ЕСТЕСТВЕННО ЗАКРУЧЕННОГО ВОЛНОВОДА ПРИ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ

*Бородулин И.Д., Кудряшев С.Б., Магомедов Г.Ш., Науменко В.А.  
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону*

**Ключевые слова:** трансформируемые ультразвуковые колебания, износостойкие покрытия, электроакустическое напыление, естественно закрученный волновод, коэффициент жесткости.

**Аннотация.** Статья посвящена вопросу аналитического определения коэффициентов жесткости естественно закрученных волноводов при электроакустическом напылении. На основе полученных зависимостей стало возможным получение амплитудно-частотных характеристик волноводов, что стало завершающим этапом в теории трансформации ультразвуковых колебаний.

## ANALYTICAL DETERMINATION OF THE STIFFNESS COEFFICIENT OF A TWISTED WAVEGUIDE IN ELECTROACOUSTIC SPUTTER DEPOSITION

*Borodulin I.D., Kudryashev S.B., Magomedov G.Sh., Naumenko V.A.  
Don state technical university, Rostov-on-don*

**Keywords:** transformable ultrasonic vibrations, wear-resistant coating, electro-acoustic sputter deposition, twisted waveguide, the coefficient of stiffness.

**Abstract.** The article is devoted to the problem of analytical determination of stiffness coefficients of twisted waveguides under electroacoustic sputter deposition. Based on the obtained dependences, it became possible to obtain amplitude-frequency characteristics of waveguides, which became the final stage in the theory of the transformation of ultrasonic vibrations.

Решение проблемы повышения устойчивости к износу и долговечности поверхностей деталей машин и режущих инструментов связано с созданием новых технических процессов и совершенствованием существующих на базе эффективного использования различных видов энергии. Одним из эффективных видов энергии для интенсификации процессов является энергия трансформируемых ультразвуковых колебаний.

Ключевой особенностью рассматриваемого метода электроакустического метода заключается в применении двух видов энергии: электрической искры и комплексных ультразвуковых колебаний. Под комплексными колебаниями понимается особый вид ультразвуковых колебаний, соединяющий в себе продольную и крутильную составляющую.

Метод основан на переносе напыляемого материала под действием электрического искрового разряда импульсного тока при минимальном межэлектродном зазоре, формируемом амплитудой комплексных ультразвуковых колебаний и в ударном воздействии электрода инструмента на нанесенный слой и подложку.

Трансформация ультразвуковых колебаний происходит за счет применения волновода в форме естественно закрученного стержня, изображенного на рисунке 1.

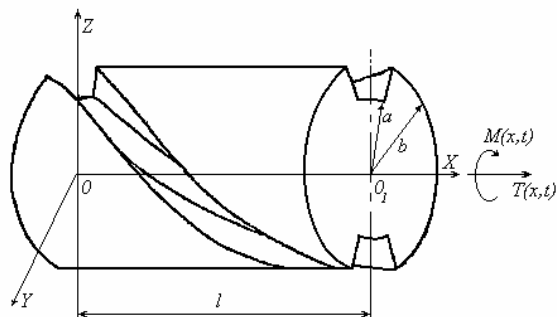


Рис. 1. Волновод со схемой сил

В расчете были приняты допущения, такие как [1]:

- сохранение плоским площади поперечного сечения волновода;
- приложение сил растяжения или сжатия и отсутствии крутящего момента приводит к деформации кручения;
- скручивание волновода под действием внешнего крутящего момента без продольной составляющей силы будет сопровождаться изменением длины волновода;
- величина и направление сопутствующих деформаций волновода определяется материалом волновода и его геометрическими характеристиками.
- для поддержания прежнего состояния к сечению X необходимо приложить силу  $T(x,t)$ , направленную вдоль оси OX и крутящий момент относительно этой оси, равный  $M(x,t)$ .
- для получения дифференциальных уравнений движения волновода рассмотрим момент времени  $t$  участок, ограниченный двумя бесконечно близкими сечениями  $x$  и  $x+\Delta x$ .

Пользуясь стандартными уравнениями о количестве движения и о кинематическом моменте, найдем

$$\rho \cdot \Omega \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \rho \cdot J_{\Omega} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{\partial M}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность материала волновода;  $\Omega$  - площадь поперечного сечения волновода;  $J_{\Omega}$  - момент инерции площади поперечного сечения относительно его центра.

Уравнения (1) преобразуются в более конкретные, учитывая упругий характер деформации волновода.

$$T = \alpha_{11} \cdot \varepsilon + \alpha_{12} \cdot \theta, \quad M = \alpha_{21} \cdot \varepsilon + \alpha_{22} \cdot \theta, \quad (2)$$

$$\alpha_{11} = E \cdot \Omega; \quad \alpha_{12} = \alpha_{21} = \tau_0 \cdot E \cdot (J_{\Omega} - T_0); \quad \alpha_{22} = G \cdot T. \quad (3)$$

где  $E$  - модуль упругости;  $\tau_0 = \text{const}$  - относительный угол закрученности волновода;  $J_{\Omega} = \int_{\Omega} R^2 d\Omega$ ; - момент инерции площади поперечного сечения относительно его центра;  $T_0 = \int_{\Omega} (R^2 + \varphi_{\psi}') d\Omega$ ; - геометрическая жесткость на кручение незакрученного волновода;  $G$  - модуль сдвига;

Рассмотрев динамику колебаний ненагруженного волновода, мы получили:

$$U_0(l) = \frac{\alpha_{21} \cdot A}{Ro} \cdot \frac{a_1 \cdot \cos \frac{k \cdot l}{c_2} - a_2 \cdot \cos \frac{k \cdot l}{c_1}}{\cos \frac{k \cdot l}{c_1} \cdot \cos \frac{k \cdot l}{c_2}},$$

$$\varphi_0(l) = \frac{\alpha_{21} \cdot A}{Ro} \cdot \frac{\cos \frac{k \cdot l}{c_2} - \cos \frac{k \cdot l}{c_1}}{\cos \frac{k \cdot l}{c_1} \cdot \cos \frac{k \cdot l}{c_2}}.$$
(4)

При рассмотрении площади поперечного сечения воспользуемся симметрией, которая позволяет рассмотреть только четвертую часть сечения. Разбиваем сечение на три простейшие секториальные области I, II и III, каждая из которых имеет собственную функцию напряжения  $U_1(r, \varphi)$ ,  $U_2(r, \varphi)$  и  $U_3(r, \varphi)$  как показано на рисунке 2.

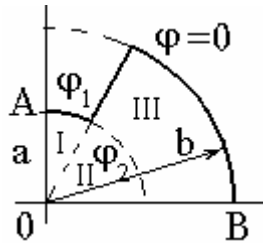


Рис. 2. Четверть поперечного сечения волновода

Произведя аналитический расчет, рассмотренный в автореферате [2]

$$J_r^0 - T_r^0 = 16 \cdot a \cdot \left[ \int_0^\infty dt \int_0^{\varphi_1} \Phi_1^2(-t, \varphi) \cdot e^{-2t} d\varphi + \int_0^\infty dt \int_0^{\varphi_2} \Phi_2^2(-t, -\varphi) \cdot e^{-2t} d\varphi + \int_0^{t_1} dt \int_0^{\varphi_2} \Phi^2(t, -\varphi) \cdot e^{2t} d\varphi \right].$$
(5)

При расчете была использована квадратурная формула Гаусса [2] для 32 узлов и весов [3].

Определив по формуле (5) разность  $J_r^0 - T_r^0$  и подставив результат в формулу (3) можно определить коэффициенты жесткости.

Решив задачу аналитического определения коэффициентов жесткости, появляется возможность построения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) естественно закрученных волноводов, что можно считать завершающим этапом в рассмотрении теории динамики трансформации ультразвуковых колебаний.

Проведя анализ амплитудно-частотные характеристики волноводов из Стали 45 и титанового сплав ВТ 5 длиной 112 мм, изображенных на рисунке 4, на основе отклонений основных резонансных пиков, полученных расчетным и экспериментальным путем, погрешность составила не более 4%, что является вполне допустимо [4].

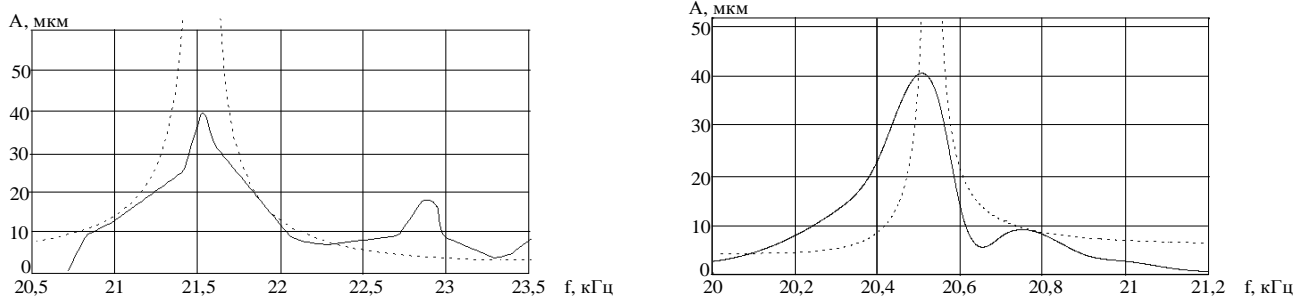


Рис. 4. АЧХ естественно закрученного волновода для VT5 и Сталь 45

### Список литературы

1. Рухадзе А.К. О деформации естественно закрученных стержней // Прикладная математика и механика. – 1947. – т. 11. – Вып. 5. – С. 533-542.
2. Справочник по специальным функциям. Под ред. Абрамовица М. и Стиган И. – М.: Наука, 1979. 684с.
3. Справочник по специальным функциям. Под ред. Абрамовица М. и Стиган И. – М.: Наука, 1979. 711с.
4. Кудряшев С.Б. Разработка динамики продольно-крутильных волноводов применительно к процессу электроакустического напыления при упрочнении акустического инструмента: Автореферат дисс. ... канд. техн. наук / Донской гос. технич. ун-т. Ростов-на-Дону, 1998.

### Сведения об авторах:

*Кудряшев Сергей Борисович* – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», ДГТУ, Ростов-на-Дону;

*Бородулин Илья Дмитриевич* – студент ДГТУ, Ростов-на-Дону;

*Магомедов Гасан Шамильевич* – студент ДГТУ, Ростов-на-Дону;

*Науменко Виктор Александрович* – студент ДГТУ, Ростов-на-Дону.