

## СИНТЕЗ И АНАЛИЗ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОЛОЧИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В.Ю. Новиков, В.В. Рубаник

УДК 621.778: 621.372.8

### РЕФЕРАТ

*УЛЬТРАЗВУК; КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА; ANSYS; ВОЛОЧЕНИЕ; БИМЕТАЛЛ*

*Объектом исследования являются волноводные акустические системы, применяемые в процессе волочения биметаллической медно-серебряной проволоки.*

*Цель работы – синтез и анализ волноводных систем позволяющий исключить операции их подгонки в процессе изготовления и используемых для волочения проволоки.*

*Получены новые данные посредством модального анализа в CAE-системе ANSYS резонансных характеристик акустических систем, используемых для волочения биметаллической проволоки медицинского назначения. Предложен новый способ получения представления о форме и характере колебаний на этапе разработки колебательных систем. Предложена методика разработки волноводных систем, исключающая операцию подгонки в процессе их изготовления. Результаты исследований расширяют представления о методике проектирования ультразвуковых колебательных систем волочильных установок.*

### ABSTRACT

*ULTRASOUND, OSCILLATING SYSTEM, ANSYS, DRAWING, BI-METAL*

*Object of study is an acoustic waveguide systems used in the process of drawing the bimetallic copper silver wire.*

*Purpose – is the synthesis and analysis of waveguide systems which eliminates the operation of their fit and used for drawing wire.*

*New data were obtained by modal analysis in ANSYS CAE-system resonance of acoustic systems used for drawing bimetallic wire for medical purposes. A new way to get an idea about the shape and nature of the fluctuations in the design phase of oscillatory systems. The technique of developing waveguide systems, eliminating the operation fit during their manufacture. Research results extend the idea of the modeling for the preparation of drawing ultrasonic systems installations.*

Ультразвуковые установки, используемые для волочения проволоки, состоят из ультразвукового генератора электрических колебаний, преобразователя электрических колебаний в механические, колебательной системы, подводящей колебания в очаг деформации и волочильной машины, осуществляющей процесс деформирования и соединенной с акустической системой. Колебательная система, используемая для интенсификации процесса волочения должна обеспечивать максимальный отбор акустической энергии от преобразователя и передачу ее деформируемому материалу. В зависимости от закона изменения сечения волновода колебательные системы бывают цилиндрические, ступенчатые, конические, экспоненциальные и

различные их комбинации [1]. Для усиления колебаний используют также сложение колебаний от нескольких преобразователей через один или несколько концентраторов. В основном применяют продольные колебания, однако известно большое количество концентраторов, использующих колебания других типов: изгибные, крутильные, радиальные или их комбинации [2 - 6].

В настоящее время существует достаточное количество численно-аналитических методов расчета ультразвуковых колебательных систем (УЗКС), построенных на основе дифференциальных уравнений, решение которых представляет сложную задачу [7]. Есть методы, которые изложены в удобной для инженерного расчета форме, но не дающие полного представления о

форме и характере колебаний, которые за счет ряда допущений требуют в процессе изготовления колебательной системы производить ее подгонку под резонансные размеры. Имеются также компьютерные пакеты программ, позволяющие произвести анализ УЗКС при помощи приближенных численных методов, дать представление о форме и характере колебаний и позволить исключить операции подгонки УЗКС. Одной из таких является САЕ-система ANSYS (Computer Aided Engineering)[8].

#### ЦЕЛЬ И ЗАДАЧА СТАТЬИ

Целью работы является синтез и анализ волноводных систем, используемых для волочения биметаллической проволоки медицинского назначения, позволяющий исключить операции их подгонки.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- отработана методика синтеза численно-ана-

литическими методами и анализа методом Блока-Ланкроста волноводных систем;

- получено представление о форме и характере колебаний УЗКС на этапе их анализа в ANSYS;

- изготовлены и апробированы волноводные системы на промышленном ультразвуковом оборудовании.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследований рассмотрены наиболее распространенные виды исполнения УЗКС, применяемые при волочении различных материалов (рисунок 1): *a* – ступенчатый концентратор с резьбовой фиксацией волокна; *б* – ступенчатый концентратор с запрессованной волокой; *в* – ступенчатый концентратор со свободной волокой; *г* – конический концентратор с отверстиями в виде волочильных каналов. Исходные параметры концентраторов: резонансная частота  $f = 18$  кГц, материал нержавеющей

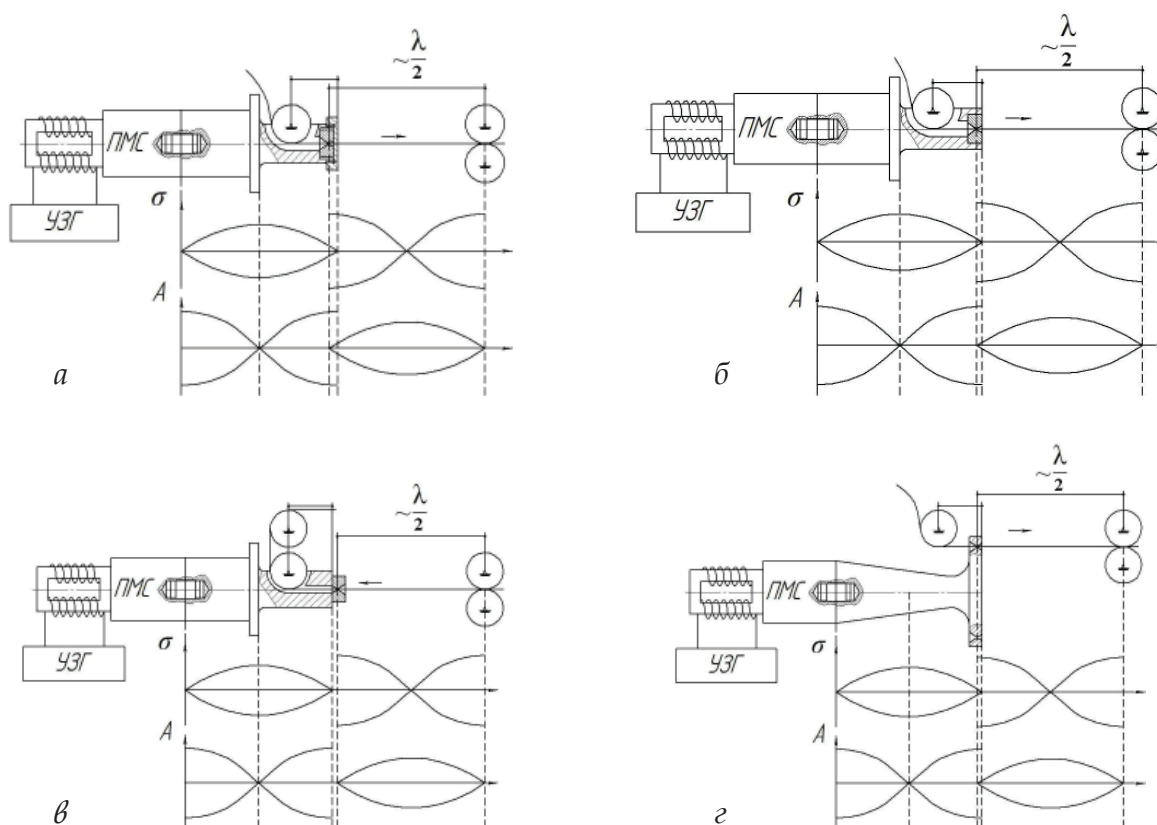


Рисунок 1 – Схемы ввода ультразвуковых колебаний в очаг деформации и графики распределения знакопеременных напряжений и смещений

щая сталь: плотность – 7800 кг/м<sup>3</sup>; модуль Юнга – 2,1х10<sup>11</sup> Па; коэффициент Пуассона – 0,30. Резонансные характеристики рассматриваемых волноводных систем, полученные численно-аналитическим методом, предложенным И.И. Теуминым [6], применялись для построения волноводов в САЕ-системе ANSYS. Трехмерным моделям исследуемых волноводов задавалась плотность сетки конечных элементов, от которой зависит точность измерений. После всех построений производили анализ волноводных систем методом Блока-Ланкроса. В зависимости от режима отображения результата получали резонансные характеристики волноводных систем и графическое отображение формы и характера колебаний волновода.

#### ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД СИНТЕЗА ВОЛНОВОДНЫХ СИСТЕМ

Продольные колебания концентраторов описывали волновым уравнением [7]:

$$\frac{d^2 \xi_m}{dx^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{dS}{dx} \cdot \frac{d\xi_m}{dx} + \frac{w^2}{v^2} \xi_m = 0, \quad (1)$$

где  $\xi_m$  – амплитуда продольных смещений, м;  $S$  – площадь поперечного сечения концентратора, м<sup>2</sup>;  $v$  – скорость распространения упругой волны в материале, м/с;  $w$  – волновое сопротивление колебательной системы, кг/м<sup>2</sup>·с.

Расчет колебательной системы проводили для установившегося процесса, который можно описать в виде общих выражений, для распределения сил и скоростей в различных точках этой системы [7]:

$$\begin{cases} F_m = F_{ml} ch\gamma x + \dot{\xi}_{ml} w sh\gamma x \\ \dot{\xi}_m = \dot{\xi}_{ml} ch\gamma x + \frac{F_{ml}}{w_0} sh\gamma x \end{cases}, \quad (2)$$

где  $F$  сила и  $\dot{\xi}$  скорость (с индексом  $m$  – на расстоянии  $x$  от конца системы, с индексом  $ml$  – на конце системы);  $\gamma$  – постоянная распространения, м<sup>-1</sup>.

Выражение, связывающее собственную частоту колебательной системы с ее длиной, можно написать из условия обращения в нуль относи-

тельной деформации на концах колебательной системы (граничное состояние) [7]:

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\xi_{ml}}{dS_l} \right|_{l=0} &= 0; \\ \left. \frac{d\xi_{ml}}{dS_l} \right|_{l=1} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

В соответствии с этим выражения можно представить в удобной для инженерного расчета форме, которые приведены ниже.

Волновое сопротивление среды определяли с помощью следующего выражения:

$$w = \rho \cdot c, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность материала волновода, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – скорость звука в среде, м/с.

Скорость распространения упругой волны в стержне:

$$v_{ml} = v \cdot \left( 1 - \frac{\gamma^2 \cdot \alpha \cdot S^2}{\pi} \right), \quad (5)$$

где  $\alpha = w / v$  – волновое число, кг/м<sup>3</sup>.

Длина для однородной стержневой колебательной системы:

$$l = \frac{v_{ml}}{2f}, \quad (6)$$

Для конической стержневой колебательной системы:

$$l = \frac{v}{2f} \sqrt{\frac{(\eta\pi)^2 + 4 \left( \frac{d_0 - d_1}{d_0 + d_1} \right)^2}{\pi^2}}, \quad (7)$$

где  $\eta$  – количество полуволн;  $d_0$  и  $d_1$  – диаметры широкого и узкого концов системы, м.

Амплитуду механических колебаний выходного торца волновода определяли посредством выражения

$$\xi_{ml} = k \cdot \xi_{m0} \quad (8)$$

где  $k$  – коэффициент усиления волновода;  $\xi_{m0}$  – амплитуда механических колебаний на входном торце волновода, м.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По трехмерным моделям рассматриваемых волноводных систем проанализированных в САЕ-системе ANSYS, представленных на рисунке 2, отчетливо видна форма и характер суммарных колебаний УЗКС. Из этого, а также резонансных характеристик рассматриваемых волноводных систем, полученных численно-аналитическим методом, посредством модального анализа в САЕ-системе ANSYS и изготовленным УЗКС можно утверждать, что форма и характер колебаний на этапе анализа акустических систем практически соответствует изготовленной УЗКС и отличие составляет 1 – 5,3 % от реальных значений, которые приведены в таблице 1.

По результатам анализа расчетные значения

резонансных частот ступенчатых концентраторов отличаются от реальных значений на 0,6 – 2,5 %, значения коэффициентов усиления на 0,7 – 4 %. А значение резонансных частот ступенчатых концентраторов, полученные численно-аналитическим методом, отличаются от реальных значений на 1,1 – 8,6 %, значения коэффициентов усиления на 7,4 – 10 %. В случае с коническим концентратором отличие резонансных характеристик, полученных численно-аналитическим методом и посредством анализа, составляет 0,6 % от реальных значений, значение коэффициента усиления на этапе синтеза 14,9 % и 0,8 % на этапе анализа от значений изготовленного. Можно сделать вывод о том, что модальный анализ в САЕ-системе ANSYS позволяет получить достоверные значения резонансных характеристик, коэффициентов усиления и представление о форме и характере колебаний УЗКС на этапе разработки.

#### ВЫВОДЫ

На основании полученных данных можно утверждать, что синтез численно-аналитиче-

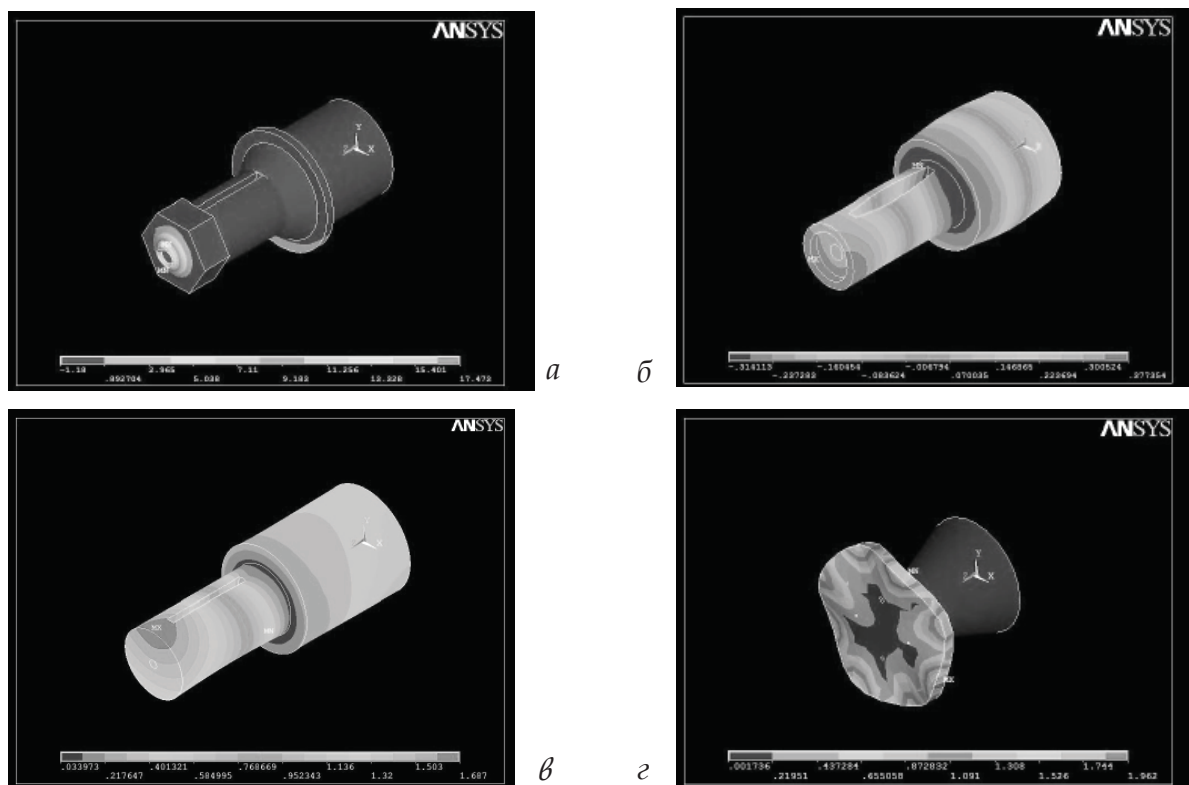


Рисунок 2 – Трехмерные модели волноводных систем, форма и характер колебаний

ским методом, предложенным И.И. Теуминым, и анализ в CAE-системе ANSYS волноводных систем позволяет исключить операцию подгонки в процессе их изготовления, за счет точности результатов анализа с откликом в 0,56 – 2,53 %. Также не мало важным является то, что посредством модального анализа в CAE-системе ANSYS возможно получить представление о форме и характере колебаний с откликом в 1 ÷ 5 % от реальных значений.

Оптимальной для волочения биметаллической проволоки колебательной системой является ступенчатый концентратор со свободной волокой, позволяющий производить смену волок без каких-либо дополнительных операций [9], а также конический концентратор с отверстиями в виде волочильных каналов обеспечивающий максимальный отбор акустической энергии от излучателя.

Таблица 1 – Значения резонансных характеристик исследуемых УЗКС

Тип УЗКС	Наименование параметра	Значение параметра		
		Расчет численно-аналитическим методом	Расчет с помощью ANSYS	Измеренные
Ступенчатый концентратор с резьбовой фиксацией волоки	Длина концентратора, мм	141,6	141,6	141,6
	Коэффициент усиления	1,50	1,75	1,62
	Резонансная частота, кГц	18,0	19,2	19,7
	Форма и характер колебаний	-	преимущественно продольные 97 %, присутствуют поперечные 3 %	преимущественно продольные 98 %, присутствуют поперечные 2 %
Ступенчатый концентратор с запрессованной волокой	Длина концентратора, мм	141,6	141,6	141,6
	Коэффициент усиления	1,50	1,36	1,35
	Резонансная частота, кГц	18,0	17,7	17,8
	Форма и характер колебаний	-	преимущественно продольные 88 %, присутствуют поперечные 12 %	преимущественно продольные 93 %, присутствуют поперечные 7 %
Ступенчатый концентратор со свободной волокой	Длина концентратора, мм	141,6	141,6	141,6
	Коэффициент усиления	1,50	1,69	1,63
	Резонансная частота, кГц	18,0	17,1	17,3
	Форма и характер колебаний	-	преимущественно продольные 99 %, присутствуют поперечные 1 %	преимущественно продольные 100%
Конический концентратор с отверстиями в виде волочильных каналов	Длина концентратора, мм	148	148	148
	Коэффициент усиления	2,82	2,38	2,40
	Резонансная частота, кГц	18,0	17,8	17,9
	Форма и характер колебаний	-	преимущественно продольные 94 %, присутствуют поперечные 6 %	преимущественно продольные 91 %, присутствуют поперечные 9 %

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко, А.В. *Прокатка и волочение с ультразвуком*. Минск: Наука и техника, 1970. 410 с.
2. Розенберг, Л.Д. Источники мощного ультразвука. Москва: Машиностроение, 1967. С. 149 – 206.
3. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко, А.В. *Обработка металлов давлением с ультразвуком*. Минск: Наука и техника, 1973. 288 с.
4. Пат. RU 2271889 Российская Федерация, МПК (2009) В 21 С1 / 04. *Устройство для волочения труб с применением радиальных ультразвуковых колебаний*. Сучков А.Г.; заявитель и патентообладатель Сучков А.Г.
5. Пат. SU 1731334 СССР, МПК В 21 С3 / 00. *Устройство для волочения изделий с использованием ультразвуковых колебаний*. Асташев В.К., Семенова Е.Б.; заявитель и патентообладатель Институт машиноведения им. А.А. Благонравова.
6. Рубаник В.В. Волочение металла через незакрепленную волоку с наложением ультразвука. *Прочность и пластичность материалов в ультразвуковом поле*. Алма-Ата, 1980, С. 16 – 17.
7. Теумин И.И. *Ультразвуковые колебательные системы*. Москва: Машгиз, 1959. 331 с.
8. Абрамова А.В. *Анализ методов расчета и конструирования волноводных систем для ультразвуковых установок технологического назначения*. Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2012, Т.17, № 3. С. 90 – 96.
9. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. *Ультразвук в технологии производства композиционных кабелей*. Минск: Белорусская наука, 2012. 294 с.

## REFERENCES

1. Severdenko V.P., Klubovich V.V., Stepanenko, A.V. *Rolling and drawing with ultrasound*. Minsk: Science and Technology, 1970. 410 p.
2. Rosenberg L.D. *Sources of high-intensity ultrasound*. Moscow: Mechanical Engineering, 1967. pp. 149 - 206.
3. Severdenko V.P., Klubovich V.V., Stepanenko, A.V. *Metal Forming with ultrasound*. Minsk: Science and Technology, 1973. 288 p.
4. Pat. RU 2271889 Russian Federation, IPC (2009) B 21 C1 / 04. *Device for tube drawing using radial ultrasonic vibration*. Suchkov, A.G.; applicant and patentee Suchkov, A.G.
5. Pat. SU 1731334 USSR, IPC B 21 C3 /00. *Device for drawing products using ultrasonic vibrations*. Astashev, V.K. Semenov, E.B.; applicant and patentee Institute of Mechanical Engineering. A.A. Blagonravova.
6. Rubanik, V.V. Drawing the metal through a die with a loose overlay ultrasound. *Strength and ductility of materials in an ultrasonic field*. Alma-Ata, 1980, pp. 16 - 17.
7. Teumin, I.I. UOS. Moscow: Mashgiz, 1959. 331 p.
8. Abramova, A.V. *Analysis of methods for analysis and design of waveguide systems for ultrasonic devices for technological purposes*. Gornyi: MPRI NASB, 2012. V.17, № 3, pp. 90-96.
9. Klubovich, V.V., Rubanik, V.V., Carenko, Y. V. *Ultrasound technology in production of composite cables*. Minsk: Belarusian Science, 2012. 294 p.

Статья поступила в редакцию 12.05.2014 г.