

О.Н.Алексейчук<sup>1</sup>, канд.техн.наук, доц., И.К.Сенченков<sup>2</sup>, д-р физ-мат.наук,  
Н.П.Нестеренко<sup>3</sup>, д-р физ-мат.наук

1-НТУ Украины "Киевский политехнический институт", г.Киев, Украина;

2-Институт механики НАНУ, г.Киев, Украина; 3-Институт сварки им.Е.О.Патона,  
г.Киев, Украина

## МОДАЛЬНАЯ СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СОНОТРОДОВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

*На основі спектру резонансних частот і форм коливань суцільного циліндра скінченних розмірів запропоновано класифікацію хвилеводів для ультразвукового зварювання у формі тіл обертання, які функціонують на вісесиметричних модах коливань. Також рекомендовано вибір типів хвилеводів-інструментів.*

*Using the spectrum of resonant frequencies and modes of vibrations of the solid cylinder of finite dimensions we propose the classification of sonotrodes of ultrasonic welding, which have the form of the bodies of revolution and working at the axially symmetric modes of vibration. The recommendations regarding choosing the types of sonotrodes are given.*

Ультразвуковые колебания широко используются в технике, технологии, медицине и т.п. Ультразвук, применяемый во многих технологиях, характеризуется низкой частотой и высокой мощностью [1, 2]. Схема возбуждения механических колебаний в типичных технологических установках показана на **рис.1**.

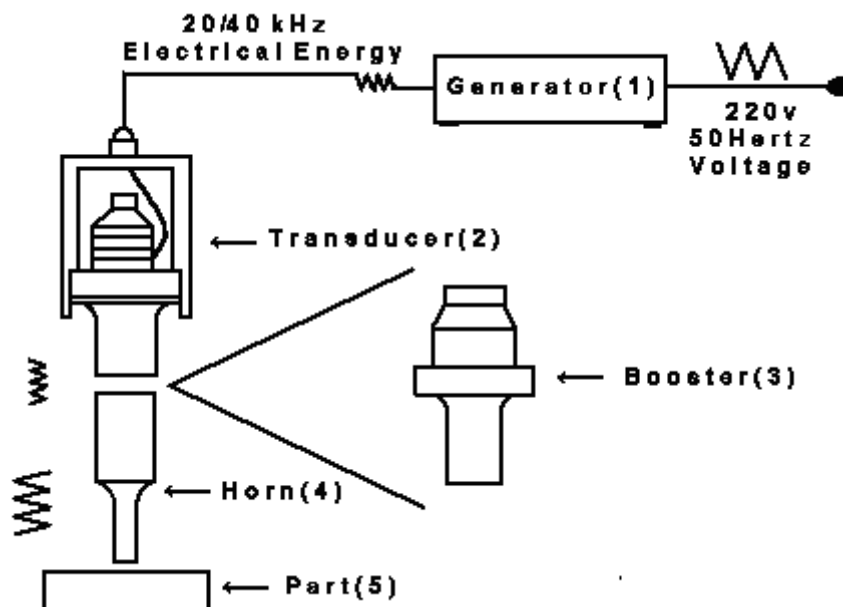


Рис.1 Схема системы для ультразвуковой сварки

Генератор (1) преобразует электрические колебания стандартной частоты в высокочастотные (20 - 60 кГц). Преобразователь (2), содержащий пьезоактивные компоненты, преобразует эти электрические колебания в механические. Бустер (3) и сонотрод (4) являются пассивными резонансными элементами системы и служат для

передачи волновой энергии от преобразователя к объекту технологии (5). Одновременно они выполняют функции усиления амплитуды колебаний и согласования подсистемы генератор - преобразователь с нагрузкой [1].

В оборудовании для ультразвуковой сварки (УЗС) [3] бустеры являются достаточно универсальными элементами. Они имеют форму полуволновых ступенчатых концентраторов. Серийные установки для прессовой УЗС обычно комплектуются набором бустеров с различными коэффициентами трансформации перемещений.

Конфигурации соноотродов, напротив, определяются формой сварных швов в конкретных деталях. Поэтому они отличаются многообразием, обусловленным обширной номенклатурой свариваемых изделий. Каждое новое изделие, как правило, требует разработки нового соноотрода.

К этим элементам предъявляются два основных требования. Во-первых, они должны иметь резонанс на определенной частоте. Во-вторых, в зависимости от способа ввода колебаний в изделие резонансная мода движения должна характеризоваться однородным распределением нормальной или касательной составляющей перемещений на рабочей поверхности. К дополнительным требованиям относятся заданный коэффициент усиления перемещений, циклическая прочность, отстройка от паразитных частот, низкий уровень виброразогрева и т.п.

Задача проектирования состоит в том, чтобы по заданной форме сварного шва определить конфигурацию соноотрода, обеспечивающую выполнение указанных требований.

Решение этой задачи существенно облегчается при наличии достаточно представительной и систематизированной базы эталонных конфигураций, обладающих заданными частотно - модальными характеристиками. Формированию системы базовых конфигураций соноотродов, а также их классификации и посвящена данная статья.

Анализ источников [1, 3, 4] показывает, что многообразие пассивных резонансных элементов акустических систем технологического назначения можно сгруппировать в несколько классов. Принадлежность элементов к каждому классу определяется возможностью интерпретации реализующихся в них движений с помощью определенных участков кривых резонансного спектра некоторого тела конечных размеров [5]. Оказывается, что достаточно полный набор движений можно сформировать на основе спектров симметричных и несимметричных мод колебаний кругового цилиндра.

Позитивный эффект классификации соноотродов обуславливается двумя обстоятельствами. Во-первых, хорошо изученные и систематизированные типы движений в прямоугольнике и цилиндре помогают понять характер движения в элементах и наметить пути их частотно - модального контроля. Во-вторых, содержащаяся в спектрах информация позволяет привлечь к практическому использованию некоторые обладающие полезными свойствами моды колебаний.

Естественно, что классификация соноотродов по модальному признаку не предполагает реализацию в конкретном элементе той или иной моды в чистом виде. Имеется в виду, что такая мода составляет лишь основу движения.

Дадим характеристику этим элементам с акцентом на типы резонансных движений.

Сонотроды в виде стержней переменного сечения - ступенчатые конические, экспоненциальные и др. - были исторически первыми из применявшихся в УЗ акустических системах [6, 7, 8].

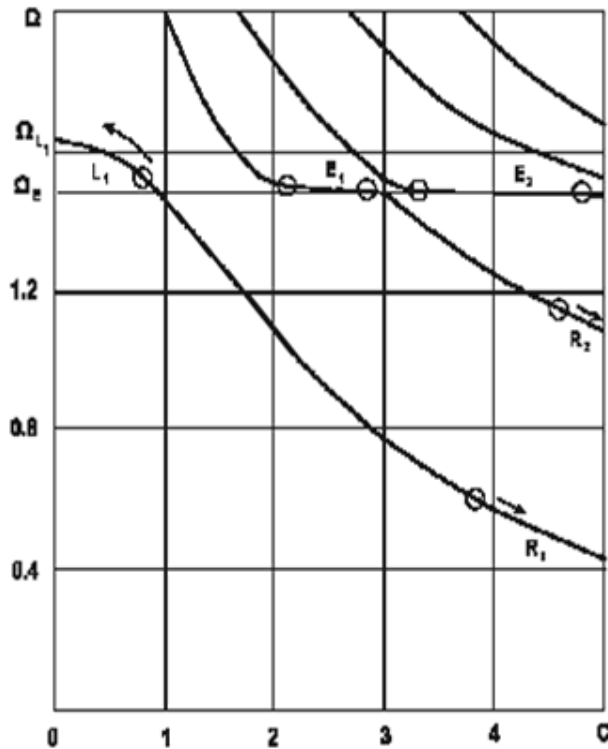


Рис.2 Фрагмент спектра резонансных частот цилиндра

И в настоящее время они широко используются, например, для точечной УЗС. Задача усложняется в случае необходимости сварки по круговой площадке или кольцевому контуру диаметром  $D_{\max} \geq \lambda^* / 3$ , где  $\lambda^*$  - длина волны в стержне на заданной частоте. В этом случае “стержнеподобные” сонотроды в результате депланации сечений оказываются неэффективными с точки зрения возбуждения и усиления колебаний, а также однородности перемещений на рабочем торце.

Радиальные перемещения наружных и внутренних цилиндрических поверхностей дисков применяются, в частности, при шовной УЗС вращающимся сонотродом и для активизации волочения проволоки путем наложения ультразвука [9, 10].

Сонотроды на осесимметричной изгибной моде колебаний могут иметь рабочие поверхности, как на торцах, так и на цилиндрической поверхности. Первая схема используется при контурной, а вторая - при шовной сварке [11].

Отход от традиционных способов формирования однородного распределения нормальных перемещений  $u_z$  в кольцевой области большого диаметра намечен в работе [12], посвященной анализу возможности использования для контурной сварки краевой моды колебаний.

Модальные характеристики колебаний в рассмотренных резонаторах имеют общие признаки с модами, отвечающими определенным участкам ветвей частотного спектра осесимметричных колебаний конечного цилиндра  $|z| \leq H, 0 < r < R$ .

Часть такого спектра для  $\nu = 0.34$ , отвечающая симметричным относительно плоскости  $z=0$  колебаниям, показана на **рис.2**. Здесь  $\Omega = 2\omega H / \pi C_2, c = R / H$ . Буквы  $L, R$  и  $E$  обозначают тип моды - продольная, краевая и радиальная. Нижний индекс - номер ветви или плато. Для элементов на осесимметричных изгибных модах принимается обозначение  $raB_k$ . Стоящие спереди малые буквы уточняют, что тело вращения ( $r$ ) подвергается изгибу по осесимметричной ( $a$ ) моде.

**Рис.3** иллюстрирует кинематику первых двух мод каждого из рассматриваемых типов. Стрелка показывает область возбуждения, а черный кружок - область контакта с нагрузкой. Такая информация чрезвычайно полезна для определения пучностей колебаний, являющихся зонами наиболее эффективного возбуждения конкретных мод.

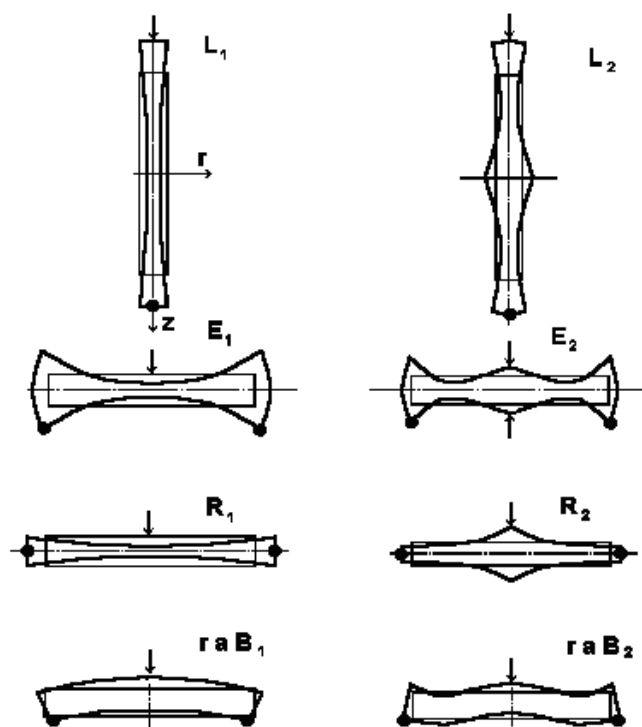


Рис.3 Формы колебаний стержня и диска

В работе [5] высокочастотные части спектров симметричных мод прямоугольника и цилиндра определяются заданием в качестве нижней границы частоты краевого резонанса  $\Omega_E$ . В соответствие с этим элементы типа  $E$  могут быть отнесены к высокочастотным, а элементы типа  $L$ ,  $R$  и  $B$  - к низкочастотным.

### Выводы

В статье показано, что многообразие сонотродов, имеющих форму тел вращения, которые используются в технологических установках

для ультразвуковой обработки материалов, допускают классификацию по модальному принципу. Типы реализуемых в них движений - продольные радиальные, краевые и т.п. - могут быть соотнесены с характерными участками ветвей частотного спектра цилиндра конечной длины. По расположению этих участков относительно частоты краевого резонанса типы сонотродов определяются как низко- и высокочастотные.

Предложена маркировка сонотродов, отражающая тип движений, волновые размеры, а также типы конвертируемых или распределяемых мод.

Выделены основные этапы проектирования сонотродов: (1) определение типа и базовой конфигурации; (2) ее модификация в соответствие с комплексом частотно - модальных ограничений; (3) оценка усталостной прочности и вибрационного разогрева.

Развитая классификация формирует основу для реализации первого этапа работы. В круге вопросов второго этапа отмечается сложная проблема отстройки от паразитных мод в случае многощелевых, высокочастотных и многоступенчатых резонаторов. Корректное решение задач третьего этапа приводит к необходимости анализа их поведения в составе акустической системы в целом с учетом взаимодействия с нагрузкой, а также с преобразователем и генератором.

Круг очерченных выше вопросов изучен еще недостаточно. Их исследование и определит, повидимому, направление работ в данной области на ближайшую перспективу.

## Список литературы

1. Теумин И.И. Ультразвуковые колебательные системы. - М.: Гос. научн.- техн. изд-во машиностр. лит., 1959. - 332 с.
2. Физика и техника мощного ультразвука, т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга. - М.: Наука, 1970. - 668 с.
3. Волков С.С., Орлов Ю.Н., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком. - М.: Химия, 1974. - 364с.
4. Andoh E., Kagawa Y. Finite element simulation of a ultrasonic vibrator for plastic welding//IEEE Ultrasonic Symp. Proc. San-Francisco. Calif. - 1985. - P. 563.
5. Гринченко В.Т., Мелешко В.В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. - Киев: Наук. думка, 1981. - 284 с.
6. Силин Л.Л., Баландин Г.Ф., Коган М.Г. Ультразвуковая сварка. - М.: Гос. научн. - техн. изд - во машиностроит. лит., 19627 - 252 с.
7. Меркулов Л.Г. Теория ультразвуковых концентраторов//Акуст. журн.-1959. 0 3, №3.-С. 230 - 238.
8. Мачетнер Б.Х. Концентраторы - инструменты для ультразвуковой обработки, способы их крепления//Обзор НИИМАШ. М.:, 1965. - 53 с.
9. Васильев П.Е., Савицкая И.А. Расчет кольцевых концентраторов радиальных колебаний// Акуст. журн. - 1979. - 25, №2. - С. 208 - 212.
10. Васильев П.Е. и др. Составной пьезоэлектрический преобразователь радиальных колебаний//Акуст. журн. - 1980. - 26, №4. - С. 517 - 521.
11. Волков С.С. Ультразвуковая контурная сварка цилиндрических изделий из полимерных материалов//Сварочное производство. - 1969. - №5. - С. 39 - 40.
12. Сенченков И.К., Василенко О.Н., Козлов В.И. Осесимметричные соноотроды на краевой моде колебаний//Доповіді НАН України. - 1995, №3. - С. 44 - 45.

**УДК 006.1+006.063**

**М.О. Гущина, канд.техн.наук, К.Ю. Гущин**  
**Севастопольский национальный университет ядерной энергии и**  
**промышленности, г.Севастополь, Украина**

### **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ FMEA-АНАЛИЗА В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ЭКСПЛУАТИРУЮЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

---

*У статті розглядаються питання побудови системи менеджменту якості організації, експлуатуючої дослідницький реактор. Автори використали метод FMEA для дослідження можливих невідповідностей у процесі забезпечення радіаційної безпеки при експлуатації ядерної установки.*

*The questions of quality management system creation for research reactor operator are shown in the article. The authors used FMEA method for investigation of possible discrepancies in the process of radiation safety provision during nuclear installation operation.*

---

#### **Постановка проблемы**

В научно-исследовательских и учебных целях на Украине используется два исследовательских реактора:

- исследовательский реактор ВВР-М тепловой мощностью 10МВт с плотностью потока тепловых нейтронов до  $10^{14}$  н/(см<sup>2</sup>·с), находящийся в институте ядерных исследований Национальной академии наук Украины, г. Киев;