

# КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЛНОВОДОВ, ИМЕЮЩИХ ФОРМУ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ, ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ПОЛИМЕРОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

**Н. П. НЕСТЕРЕНКО**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**И. К. СЕНЧЕНКОВ**, д-р физ.-мат. наук (Ин-т механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины)

Предложены классификация и системный метод выбора конфигурации волноводов-инструментов, имеющих форму тел вращения, для ультразвуковой сварки полимеров и композитов на их основе. Рассмотрены известные и новые базовые конфигурации сонотродов, которые могут быть использованы для получения кольцевого сварного шва большого диаметра.

*Ключевые слова:* ультразвуковая сварка, полимеры и композиты на их основе, волновод-инструмент (сонотрод), форма колебаний, классификация

В статье [1] приведены классификация и основные принципы проектирования пластинчатых волноводов-инструментов (сонотродов) для ультразвуковой сварки (УЗС) полимеров. Другим важным классом сонотродов, используемых как для точечной, так и для контурной сварки являются сонотроды, имеющие форму тел вращения [2–11]. Задача проектирования последних состоит в том, чтобы по заданной форме сварного шва определить геометрическую форму сонотрода. Решение существенно облегчается наличием систематизированной базы эталонных конфигураций, отличающихся требуемыми резонансными частотами и формами колебаний.

Анализ литературы показывает, что многообразие осесимметричных сонотродов можно сгруппировать в несколько классов по типам колебаний, характерным для определенных участков ветвей резонансного спектра сплошного кругового цилиндра [12]. Как и в случае пластинчатых сонотродов, классификация осесимметричных элементов акустических систем УЗС позволяет определиться с выбором их конфигурации, наметить пути контроля формы и частоты колебаний, а также разработать новые типы сонотродов.

Данная статья посвящена изучению формирования системы базовых конфигураций сонотродов, имеющих форму тел вращения, а также их классификации.

Охарактеризуем эти элементы по типу резонансных движений. Сонотроды в виде стержней переменного сечения — ступенчатые конические, экспоненциальные и др. —

были исторически первыми из применявшихся в ультразвуковых акустических системах. И в настоящее время они широко используются, например, для точечной УЗС. Задача усложняется при необходимости сварки по круговой площадке или по кольцевому контуру диаметром  $d_m \geq \lambda/3$ . В этом случае «стержнеподобные» сонотроды в результате деформации сечений оказываются неэффективными с точки зрения возбуждения и усиления колебаний, а также однородности перемещений на рабочем торце.

Как и в случае пластинчатых элементов, для формирования поршневых движений широко используются щелевые структуры. Радиальные перемещения наружных и внутренних цилиндрических поверхностей дисков применяются, в частности, при шовной УЗС вращающимся сонотродом и для активизации волочения проволоки путем наложения ультразвука [4, 5]. 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 [6]. Отход от традиционных способов формирования однородного распределения нормальных перемещений  $u_z$  в кольцевой области большого диаметра намечен в

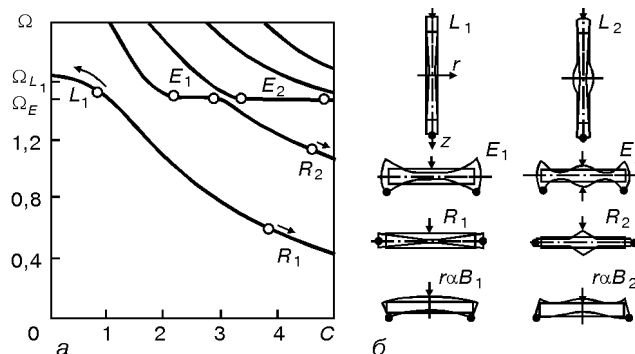
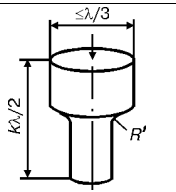
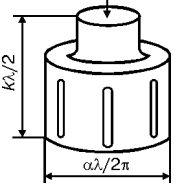
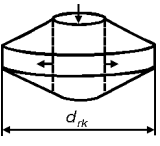
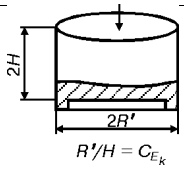
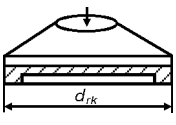


Рис. 1. Типы осесимметричных движений в сонотродах, имеющих форму тел вращения: а — характерные участки ветвей частотного спектра сплошного цилиндра; б — кинематика первых двух продольных, краевых, радиальных и изгибных осесимметричных мод

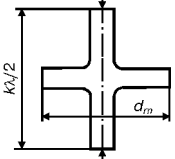
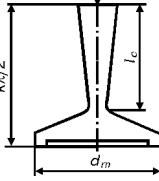
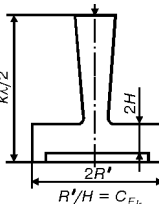
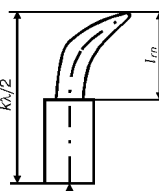
Таблица 1. Типы соноотродов, имеющих форму тел вращения

Тип колебания	Тип волновода	Конфигурация соноотрода
L	$L_k$	
	$rmL_k^{(\alpha)}$	
R	$R_k$	
E	$E_k$	
B	$r\alpha B_k$	

работе [7], посвященной анализу возможности использования для контурной сварки краевой моды колебаний.

Модальные характеристики колебаний в рассмотренных резонаторах имеют общие признаки с модами, соответствующими определенным участкам ветвей частотного спектра осесимметричных колебаний конечного цилиндра, высота  $H$  и радиус  $R'$  которого удовлетворяют условиям  $|z| \leq H$ ;  $0 < r < R'$ . Часть такого спектра для  $\nu = 0,34$ , отвечающая симметричным относительно плоскости  $z = 0$  колебаниям, показана на рис. 1, а. Здесь  $\Omega = 2\omega H / \pi C_2$ ,  $C = R'/H$ . Буквы  $L$ ,  $E$  и  $R$  обозначают тип моды — продольная, краевая и радиальная; нижний индекс — номер ветви или плато. Для элементов на осесимметричных изгибных модах принимается обозначение  $r\alpha B_k$ . Стоящие спереди строчные буквы уточняют, что тело вращения  $r$  подвергается изгибу по осесимметричной  $\alpha$  моде. Рис. 1, б иллюстрирует кинематику первых двух мод каждого из рассматриваемых типов. Здесь некоторые размеры соноотродов указаны в долях длины продольной волны  $\lambda$ ,  $\lambda = f^{-1}(\epsilon/\rho)^{1/2}$ , где  $\epsilon$  — модуль Юнга;  $\rho$  — плотность материала;  $f$  — частота колебаний. Стрелка показывает область возбуждения, а точка — область контакта с нагрузкой. Такая информация чрезвычайно полезна для определения пучностей

Таблица 2. Типы соноотродов-конверторов

Тип конвертора	Конфигурация конвертора
$L_k CR_n$	
$L_k C r \alpha B_n$	
$L_k CE_n$	
$L_k C p B_n$	

колебаний, являющихся зонами наиболее эффективного возбуждения конкретных мод.

Для дальнейшего анализа воспользуемся табл. 1. Выступы в нижней части соноотродов  $E_k$  и  $r\alpha B_k$  фиксируют их рабочие поверхности и показывают, что они используются для контурной сварки с кольцевым швом. Формально в этот перечень можно ввести осесимметричные резонаторы типа  $(r)T$  на квазитолщинной моде колебаний [1]. Однако практическая реализация таких элементов усложняется рядом обстоятельств. В работе [12] показано, что поршневое движение торца диска искажается взаимодействием «чистой»  $T$ -моды с  $R$ - и  $A$ -модами. Оно усиливается с возрастанием коэффициента Пуассона и для значений  $0,28 \leq \nu \leq 0,35$ , типичных для материалов соноотродов, приводит к резкому снижению положительных качеств  $T$ -моды. По сравнению с планарной  $T$ -модой, ситуация усугубляется близостью при  $\nu = 1/3$  частот толщинного и толщинно-сдвигового резонансов  $\Omega_T$  и  $\Omega_S$ . Это уплотняет спектр и усложняет отстройку от «паразитных» мод.

Высокочастотные части спектров симметричных мод прямоугольника и цилиндра определяются заданием в качестве нижней границы частоты краевого резонанса  $\nu = 1/3$  [12]. В соответствии с этим элементы типа  $E$ ,  $T$  и  $S$  могут быть отнесены к высокочастотным, а элементы типа  $L$ ,  $R$  и  $B$  — к низкочастотным.

Одномодовые резонаторы не всегда удовлетворяют функциональным требованиям. Это, как правило, связано с проблемой эффективного возбуждения некоторых мод колебаний. В этих случаях

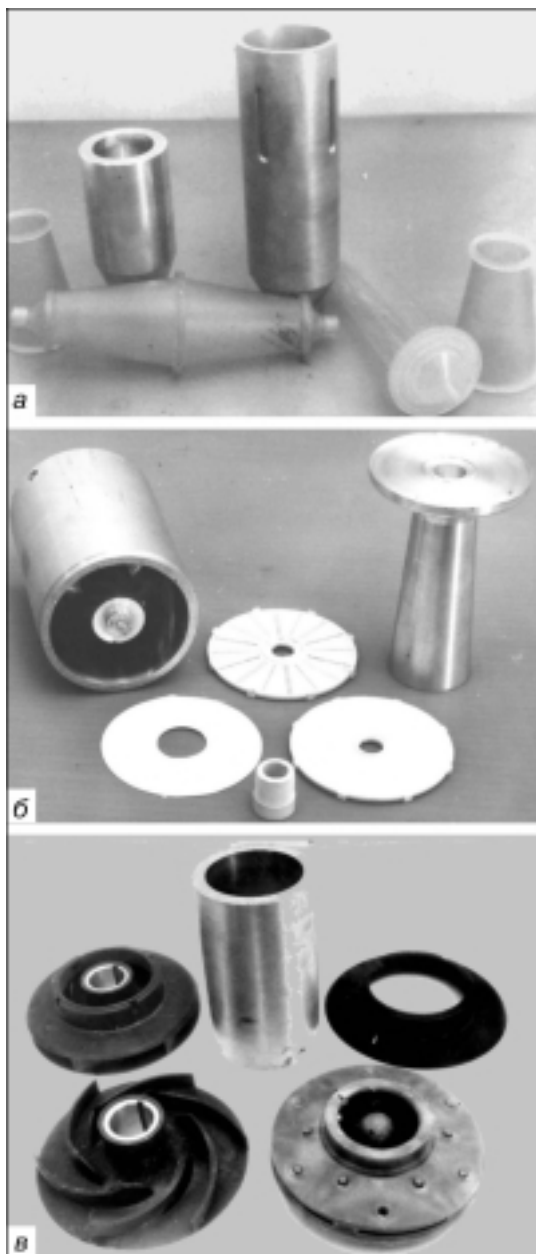


Рис. 2. Волноводы для УЗС гемосорбционных колонок (а), полимерных фильтров (б), колес водяного насоса (в)

используют сонотроды-конверторы, в которых происходит преобразование хорошо возбуждаемой (например  $L_1$ ) моды в слабо возбуждаемый тип движения — радиальный, краевой и пр. [7, 12, 13]. Классификация и маркировка некоторых типов конверторов приведены в табл. 2.

В принятой маркировке указывается элемент, который возбуждается преобразователем и энергия которого конвертируется (буква С) в колебания связанного с ним резонатора другого типа. Наиболее сильное взаимодействие и конвертация мод имеет место, когда частоты парциальных систем близки между собой и равны частоте возбуждения.

Приведенная классификация позволяет выбрать тип сонотрода по заданной форме сварного соединения. На втором этапе определяются точные размеры элемента для заданной рабочей частоты колебаний. При этом необходимо отстроить его от «паразитных» частот и тем самым обеспечить требуемые

значения амплитуды колебаний и однородность ее распределения по рабочей поверхности сонотрода.

Третий этап включает оценку усталостной прочности и температуры виброразогрева элемента. Реализация последних двух этапов предусматривает использование методов математического моделирования.

Постановка задачи в цилиндрической системе координат  $r\theta z$  включает [14] кинематические уравнения, уравнения осесимметричных колебаний, определяющие уравнения, уравнения теплопроводности и выражения для диссипативной функции:

$$\frac{\partial \tilde{\sigma}_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} (\tilde{\sigma}_r - \tilde{\sigma}_0) + \frac{\partial \tilde{\sigma}_{rz}}{\partial z} + \rho \omega^2 \tilde{U}_r = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{\sigma}_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \tilde{\sigma}_{rz} + \frac{\partial \tilde{\sigma}_{zz}}{\partial z} + \rho \omega^2 \tilde{U}_r = 0,$$

$$\tilde{\sigma}_{ij} = 2\tilde{G} (\tilde{\epsilon}_{ij} + \frac{\tilde{\nu}}{1-2\tilde{\nu}} \tilde{\epsilon}_{kk} \delta_{ij}), \quad i, j = r, \theta, z, \quad (2)$$

$$\dot{c\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial \theta}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial \theta}{\partial z}) + D', \quad (3)$$

$$D' = \frac{\omega}{2} (\sigma''_{ij} \epsilon'_{ij} - \sigma'_{ij} \epsilon''_{ij}), \quad (4)$$

граничные и начальные (для температуры) условия [1]. Здесь  $\tilde{G}$  и  $\tilde{\nu}$  — комплексные модуль сдвига и коэффициент Пуассона;  $\tilde{G} = G' + iG''$ ;  $\tilde{\nu} = \nu' - i\nu''$ ;  $\tilde{U}_i$ ;  $\tilde{\epsilon}_{ij}$  и  $\tilde{\sigma}_{ij}$  — комплексные амплитуды компонент вектора перемещений, тензоров деформаций и напряжений;  $c$  и  $k$  — коэффициенты объемной теплоемкости и теплопроводности;  $\theta$  — температура;  $\omega$  — круговая частота;  $\omega = 2\pi f$ .

При больших амплитудах колебаний необходимо учитывать зависимость модуля сдвига от интенсивности амплитуд напряжений

$$\tilde{G} = \tilde{G}(\omega, \theta, \sigma_{ij});$$

$$\sigma_{ii} = \frac{1}{\sqrt{6}} (|\tilde{\sigma}_{rr} - \tilde{\sigma}_{\theta\theta}|^2 + |\tilde{\sigma}_{zz} - \tilde{\sigma}_{rr}|^2 + |\tilde{\sigma}_{\theta\theta} - \tilde{\sigma}_{rr}|^2 + 6|\tilde{\sigma}_{rz}|^2)^{1/2};$$

$$|\tilde{\sigma}_{rz}|^2 = \sigma''_{rz}{}^2 + \sigma''_{rz}{}^2, \dots$$

Для обеспечения усталостной прочности сонотрода необходимо, чтобы максимальное по объему  $V$  значение интенсивности напряжений удовлетворяло условию  $\max_V \sigma_{ii} \leq \chi \sigma_1$ , где  $\sigma_1$  — предел циклической выносливости материала при симметричном цикле нагружения;  $\chi$  — коэффициент запаса прочности.

Учитывая сложность геометрии сонотродов и в общем случае нелинейность задачи (1)–(4), для ее решения целесообразно использовать численные методы. Наиболее удобным из них для данного класса задач является метод конечных элементов [15].

Основные этапы проектирования осесимметричных сонотродов те же, что и для пластинчатых элементов [1]. С использованием развитого подхода был спроектирован и изготовлен ряд сонотро-

дов для УЗС пластмассовых изделий. Они показаны на рис. 2.

## Выводы

1. Многообразие сонотродов, имеющих форму тел вращения и используемых для УЗС полимеров и композитов на их основе, допускает классификацию по типу резонансной формы колебаний. Типы реализуемых в них движений — продольных, радиальных, изгибных и др. — могут быть соотнесены с характерными участками ветвей частотного спектра сплошного кругового цилиндра.

2. Предложена маркировка осесимметричных сонотродов. Намечены основные этапы их проектирования.

3. Развитая классификация позволяет обоснованно подойти к выбору базовой конфигурации сонотрода, исходя из формы сварного шва. Дальнейшее уточнение его формы осуществляется при помощи численного моделирования.

4. В настоящее время надежно рассчитываются двумерные объекты, тогда как колебания в сонотродах типа  $rmL_k^{(\alpha)}$  являются трехмерными. Разработка компьютерных программ для трехмерного анализа определяет направление работ в данной области на ближайшее время. Ее реализация позволит резко расширить возможности наиболее производительной контурной УЗС.

1. Нестеренко Н. П., Сенченко И. К. Классификация и проектирование пластинчатых волноводов-инструментов для ультразвуковой сварки полимеров и композитов на их основе // Автомат. сварка. — 2001. — № 4. — С. 51–53.
2. Силин Л. Л., Баладин Г. Ф., Козан М. Г. Ультразвуковая сварка. — М.: Машиностроение, 1962. — 252 с.

Classification and system method of selection of configuration of wave guides-tools, having a shape of bodies of rotation, for the ultrasonic welding of polymers and composites on their base are suggested. Known and new basic configurations of sonotrodes which can be used for producing of a large-diameter circumferential weld are considered.

3. Мачеттер Б. Х. Концентраторы — инструменты для ультразвуковой обработки, способы их крепления // Обзор НИИМАШ. — М., 1965. — С. 53.
4. Васильев П. Е., Савицкая Т. А. Расчет кольцевых концентраторов радиальных колебаний // Акуст. журн. — 1979. — 25, № 2. — С. 208–212.
5. Васильев П. Е. Составной пьезоэлектрический преобразователь радиальных колебаний // Там же. — 1980. — 26, № 4. — С. 517–521.
6. Волков С. С. Ультразвуковая контурная сварка цилиндрических изделий из полимерных материалов // Свароч. пр-во. — 1969. — № 5. — С. 39–45.
7. Сенченко И. К., Василенко О. Н., Козлов В. И. Осесимметричные сонотроды на краевой моде колебаний // Доп. НАН України. — 1995. — № 3. — С. 44–45.
8. Сенченко И. К., Нестеренко Н. П. Проектирование инструмента с осесимметричной продольно-изгибной модой колебаний для контурной ультразвуковой сварки пластмасс // Автомат. сварка. — 1995. — № 6. — С. 39–42.
9. Конечный-элементный расчет контурных волноводов для ультразвуковой сварки пластмасс / И. К. Сенченко, Н. П. Нестеренко, О. В. Тарасенко и др. // Новые разработки по сварке и склеиванию пластмасс. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1989. — С. 34–38.
10. К расчету резонансных характеристик осесимметричных волноводов методом конечных элементов / И. К. Сенченко, В. И. Козлов, О. П. Червинко, Б. Я. Черняк // Прикл. механика. — 1990. — 26, № 11. — С. 35–39.
11. Волков С. С., Черняк Б. Я. Сварка пластмасс ультразвуком. — М.: Химия, 1986. — 256 с.
12. Грищенко В. Т., Мелешко В. В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. — Киев: Наук. думка, 1981. — 284 с.
13. Iton K., Mori E. Studies on resonator with directional converter ( $R-L$ -type converter disk of various thickness) // J. Acoust. Soc. Jap. — 1974. — 30, № 11. — P. 587–591.
14. Карнаухов В. Г., Сенченко И. К., Гуменик Б. П. Термомеханическое поведение вязкоупругих тел при гармоническом нагружении. — Киев: Наук. думка, 1985. — 288 с.
15. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т. 1: Термоупругость / И. А. Моговиловец, В. И. Козлов. — Киев: Наук. думка, 1987. — 264 с.

Поступила в редакцию 31.10.2000,  
в окончательном варианте 03.01.2001