



АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ ВОЛНОВОДОВ 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 систематизированный подход к выбору пластинчатых волноводов-инструментов для ультразвуковой сварки полимеров и композитов на их основе. Рассмотрены известные и предложены новые типы длинноконтурных инструментов.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, полимеры и композиты на их основе, пластинчатые волноводы-инструменты, форма колебаний, классификация

Ультразвуковые колебания, широко используемые в технике, медицине и других областях, характеризуются низкой частотой и высокой мощностью [1, 2]. Схема возбуждения механических колебаний в типичных технологических установках для ультразвуковой сварки (УЗС) приведена на рис. 1. Генератор 1 преобразует электрические колебания стандартной частоты в высокочастотные (20... 40 кГц). Преобразователь 2, содержащий пьезоактивные компоненты, трансформирует эти электрические колебания в механические. Бустер 3 и волновод-инструмент (сонотрод) 4 являются пассивными резонансными элементами системы и служат для передачи волновой энергии от преобразователя к объекту технологии — свариваемым деталям 5. Одновременно они выполняют функции усиления амплитуды колебаний и согласования подсистемы генератор — преобразователь с нагрузкой [1].

В установках для 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 сонотродов определяемые формой сварных швов в конкретных деталях, отличаются многообразием, обусловленным обширной номенклатурой свариваемых изделий. Каждое новое изделие, как правило, требует разработки нового сонотрода. К этим элементам предъявляются два основных требования: наличие резонанса на определенной частоте; резонансная мода движения в зависимости от способа ввода колебаний в изделие должна характеризоваться однородным распределением нормальной или касательной составляющей перемещений на рабочей поверхности. К дополнительным требованиям относятся следующие: 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 конфи-

гурацию сонотрода, обеспечивающую выполнение указанных требований. Решение этой задачи существенно облегчается при наличии достаточно представительной и систематизированной базы эталонных конфигураций, обладающих заданными частотно-модальными характеристиками.

Анализ литературных источников [1, 3, 4] показывает, что многообразные пассивные резонансные элементы акустических систем технологического назначения можно сгруппировать в несколько классов. Принадлежность элементов к тому или иному 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 мод колебаний прямоугольника.

Позитивный эффект классификации сонотродов 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. Формированию системы базовых

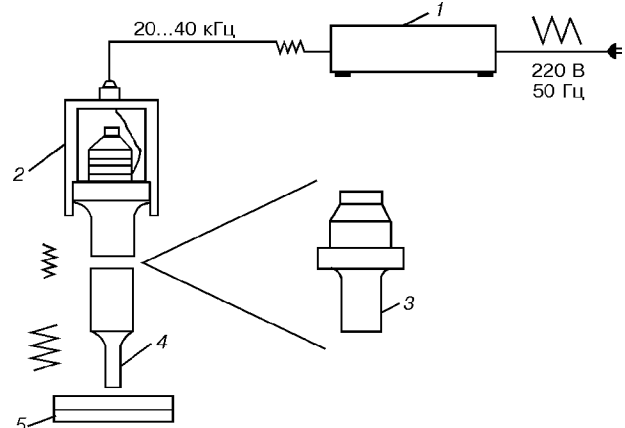


Рис. 1. Схема акустической системы для УЗС полимеров и композитов на их основе (обозначения см. в тексте)

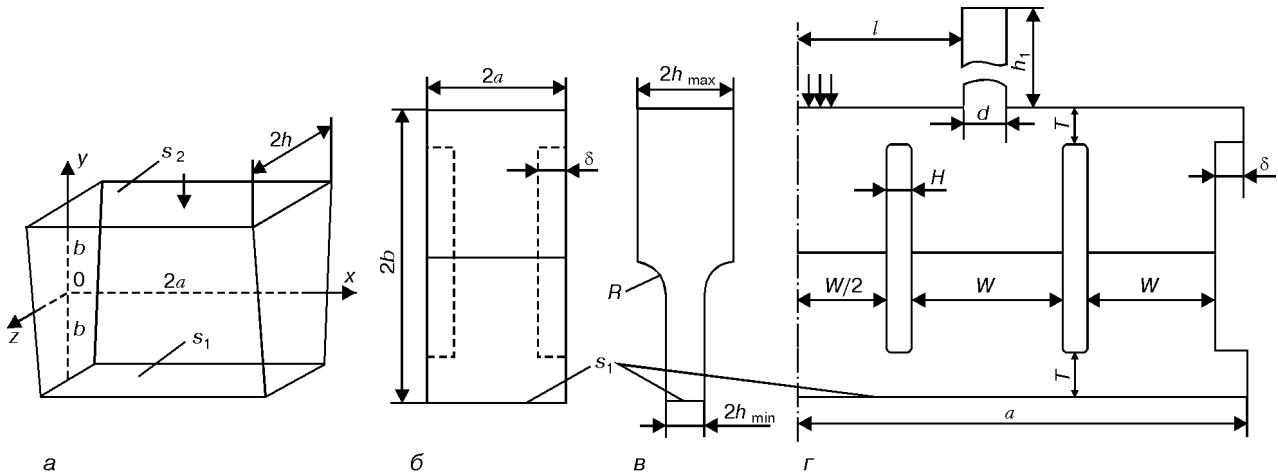


Рис. 2. Формы сплошных (а-в) и щелевых (z) пластинчатых соноотродов

конфигураций пластинчатых соноотродов, а также их классификации и посвящена данная работа.

Для пластинчатых соноотродов (рис. 2) предполагается, что характерный толщинный размер (в направлении оси Oz) существенно меньше размеров в плане и одновременно меньше характерной длины волны λ . Поскольку на ранних этапах развития ультразвуковой техники акустические системы синтезировались из стержневых элементов, то в качестве λ принято использовать длину продольной волны в тонком стержне для некоторой частоты f : $\lambda = (E/\rho)^{1/2}/f$, где E — модуль Юнга; ρ — плотность материала.

Задача проектирования соноотрода конкретизируется следующим образом: по заданным значениям длины излучающей кромки (длина сварного шва), резонансной частоты f_r , коэффициента усиления k_i нормальных перемещений от некоторой точки A на S_2 к точке B на S_1 и коэффициента однородности k_h (для S_1), равных

$$k_i = |u_{yB}/u_{yA}|, \quad k_h = u_{y \min}/u_{y \max}, \quad (1)$$

определить оставшиеся геометрические параметры.

Рассмотрим основные типы пластинчатых соноотродов и методы их модального контроля. Элементы в форме одноосных пластин переменного сечения (рис. 2, б, в) при $2a \leq \lambda/3$ и при $2a \cong \lambda/3$ обеспечивают квазипоршневое с однородностью $k_h \geq 0,8$ и усилением $k_i \cong h_{\max}/h_{\min}$ перемещение рабочей кромки S_1 . Коэффициент k_h быстро уменьшается при $2a \leq \lambda/3$, а при $2a \cong \lambda/2$ появляются две узловые точки распределения u_y на кромке S_1 . Однако боковые выемки, показанные штриховыми линиями на рис. 2, б, позволяют повысить степень однородности до $k_h \cong 0,95$ для $\lambda/3 \leq 2a \leq \lambda/2$ при незначительном (менее 3... 4 %) изменении резонансной частоты. Возможность указанного метода быстро исчерпывается при дальнейшем увеличении ширины. В более протяженных ($2a > \lambda/2$) элементах планарные моды колебаний с квазипоршневым распределением u_y на поверхности S_1 формируются с помощью ряда узких щелей (рис. 2, z), перпендикулярных излучающей кромке [4, 6]. Этим достигается декомпозиция продольных и поперечных планарных движений, а искомая мода формируется из синфазных продольных (обычно полуволновых) мод ансамбля межщелевых сегментов шириной $W \leq$

$\leq \lambda/3$, т. е. по существу является мультипродольной. Такие формы имеют достаточно высокий для технологических приложений уровень однородности распределения перемещений u_y на поверхности S_1 . Влияние параметров W, S, T и δ на модальные характеристики достаточно сложное. Результаты численного и экспериментального исследований позволили установить, что для каждой конфигурации пластины существуют оптимальные значения указанных параметров, которые максимизируют коэффициент k_h . Эти значения изменяются в следующих пределах:

$$W \cong \lambda/5 \dots \lambda/4, \quad H \cong \lambda/24, \quad T \cong \lambda/12 \dots \lambda/9.$$

Для пластин длиной $\lambda/2 < 2a < 3\lambda/2$ однородность распределения перемещений может быть повышена с помощью боковых выемок ($\delta > 0$) или выступов ($\delta < 0$). Описанные выше методы при $2a > 3\lambda/2$ недостаточны. Повысить значение k_h позволяет метод дополнительных малых колебательных систем (ДМКС) [6]. Сущность его заключается в присоединении к верхней (нерабочей) кромке соноотрода малых колебательных систем, например стержней, которые повышают однородность распределения u_y на рабочей кромке S_1 . Обычно длина стержня изменяется в пределах $\lambda/4 < h_1 < \lambda/2$. Параметры и расположение стержней являются предметом задачи оптимизации по критерию максимума k_h [7].

Вместе с тем возможности щелевых волноводов ограничены. Во-первых, при $2a > 2\lambda$ техника ДМКС становится очень сложной как в методологическом, так и вычислительном аспектах. Во-вторых, щели понижают изгибную жесткость элемента, что существенно уплотняет спектр паразитных планарных изгибных мод в окрестности частоты мультипродольной (рабочей) моды. В-третьих, наличие щелей вызывает концентрацию напряжений и является основной причиной усталостного разрушения таких элементов.

Принципиально новый класс протяженных соноотродов предложен в [8]. В этих элементах резонансное движение с квазипоршневым перемещением на их длинных сторонах формируется на основе симметричной моды толщинного резонанса бесконечного слоя. Как и в случае щелевых элементов,

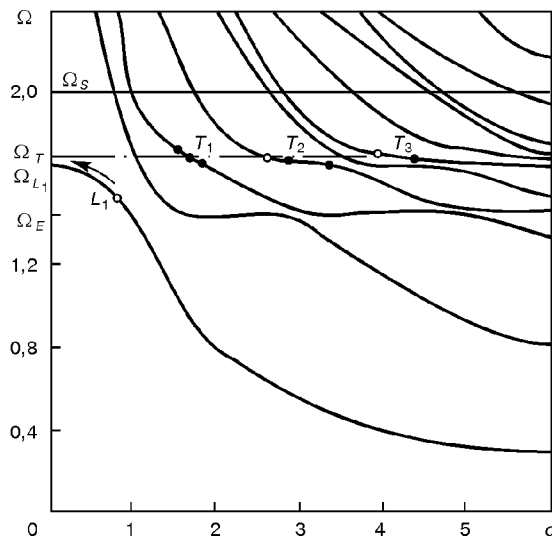


Рис. 3. Характерные участки ветвей частотного спектра симметричных мод

установлена возможность существенного повышения однородности перемещений на длинных кромках методом ДМКС. Конкретизация геометрии сонотрода может рассматриваться как задача оптимального многокритериального проектирования. Развитию этого направления посвящены работы [9, 10].

Типы колебаний в рассмотренных сонотродах могут быть соотнесены с модами колебаний, отвечающими определенным участкам ветвей резонансного спектра симметричных колебаний прямоугольника со сторонами $|x| \leq a$, $|y| \leq b$ в условиях плоского напряженного состояния. Такой спектр для коэффициента Пуассона $\nu = 0,34$ приведен на рис. 3. Здесь Ω — безразмерная частота, равная $2\omega b / (\pi C_2)$; ω — круговая частота колебаний; C_2 — скорость сдвиговой волны, равная $\sqrt{G/\rho}$; G — модуль сдвига; $c = a/b$.

В рассматриваемой частотной области (рис. 3) можно выделить четыре характерные частоты. Для участка L_1 частота $\Omega_{L1} = \sqrt{2(1 + \nu)} \cong 1,63$, что соответствует полуволновому резонансу стержня. Анализ показывает, что распределения резонансных перемещений и напряжений в полуволновых и волновых пластинчатых сонотродах (см. рис. 2, б, в) идентичны модам на участках L_1 и L_2 первых двух ветвей спектра прямоугольника. Эти же участки кривых являются основой формирования мультипродольных мод в пластинчатых и кубообразных щелевых сонотродах. Частота $\Omega_E \cong 1,43$ серии нижних плато отвечает краевой моде, характеризующейся локализацией кинематических и динамических параметров в окрестности угловых точек [5]. Краевые моды в пластинчатых сонотродах пока не нашли применения. Четвертая частота $\Omega_T = \sqrt{2(1 - \nu)(1 - 2\nu)} \cong 1,73$ — это частота второй серии плато T_1, T_2, \dots , вдоль которых реализуется квазитолщинная мода колебаний. Характерные особенности этой моды позволяют создать сонотроды большой протяженности с безугловым распределением нормальных перемещений на рабочей поверхности. Так, центру плато T_1 отвечает значение $c = 1,5$,

Типы пластинчатых сонотродов

Тип колебания	Тип сонотрода	Конфигурация
L	L_k	
	$\rho m L_k^{(\alpha)}$	
	$\rho m L_k^{(\alpha)(\beta)}$	
T	$T_k^{(\alpha)}$	
B	ρB_k	

T_2 — 2,9, а T_3 — 4,0. При этом, например, выражение $2a \geq 2\lambda$ соответствует плато T_3 . Однако с увеличением номера плато спектр сгущается, что усложняет отстройку от лежащих рядом толщинно-сдвиговых и изгибных мод. Наиболее привлекательным с этой точки зрения выглядит второе плато T_2 .

Элементы на изгибных модах используются для тангенциального ввода колебаний в нагрузку в случае неэффективности нормального ввода, например, при УЗС металлов или тонких пленок [11, 12].

Основываясь на модальном критерии и учитывая приведенные выше рассуждения, можно предложить классификацию и маркировку сонотродов, которые представлены в таблице. Тип элемента определяется модой движения — продольной (мультипродольной), толщинной или изгибной и обозначается соответственно буквами L, T и B . Нижний индекс резервируется за номером ветви или плато



частотного спектра. Для продольных мод он показывает количество полуволн, которые укладываются по высоте элемента. Щелевые сонотроды на мультипродольной моде идентифицируются как pmL_k . Буква p указывает на то, что эти элементы ограничены плоскими поверхностями. Количественная информация об их длине, определяющей размер сварного шва, дается верхними индексами.

Пластинчатые элементы толщиной $2h_{max} \leq \lambda/2$ имеют один ряд щелей, и для них используется один индекс α , который определяет количество полуволн, содержащихся в длине элемента $\alpha = 2a/(\lambda/2)$. Кубообразные тела с $2h_{max} \geq \lambda/2$ имеют две серии пересекающихся щелей. Для конкретизации их толщинного размера используется второй верхний индекс $\beta = 2h_{max}/(\lambda/2)$. При этом элемент ориентируется таким образом, чтобы выполнялось неравенство $\alpha \geq \beta$.

Для полноты классификации определим сонотроды типа S с характеристиками толщинно-сдвигового резонансного слоя. Подобные движения реализуются в центральных частях третьей серии плато, которая формируется в окрестности частоты $\Omega_S = 2,0$ при $c \geq 10$. Для S -моды характерно преобладание касательной компоненты движения на длинных гранях прямоугольника. Это качество оказывается полезным при длинноконтурной сварке жестких или тонколистовых изделий. Отметим, что эта часть спектра изучена недостаточно.

Приведенная выше классификация призвана упростить первый этап проектирования сонотрода — определения его типа и базовой конфигурации. Сущность второго этапа заключается в ее модификации с целью удовлетворения комплексу частотно-модальных ограничений. Он содержит значения резонансной частоты f_r , интервалы ее отстройки Δf^+ и Δf^- , коэффициенты k_i , k_h и т. п. Наконец, третий этап включает оценку усталостной прочности и температуры диссипативного разогрева сонотрода. Выполнение последних двух этапов предусматривает использование методов численного моделирования.

Сонотроды функционируют в режиме интенсивных колебаний. Поэтому в общей математической модели процесса необходимо учитывать физическую нелинейность материала, вибрационный разогрев и зависимость свойств материала от температуры. Постановка задачи для пластинчатых (в плоскости xOy) тел переменной толщины $h = h(x, y)$ дана в [13, 14]. Она включает уравнения механики и термодинамики:

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_{ij}^* + \omega^2 \rho^* \tilde{u}_i &= 0, \quad \tilde{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\tilde{u}_{i,j} + \tilde{u}_{j,i}), \\ \tilde{\sigma}_{ij}^* &= 2\tilde{G}^* \left(\tilde{\varepsilon}_{ij} + \frac{\tilde{\nu}_1}{1-2\tilde{\nu}_1} \tilde{\varepsilon}_{kk} \delta_{ij} \right), \quad i, j, k = x, y, \\ \dot{\theta}_c^* &= (k^* \theta_{,i})_{,i} - 2\tilde{\alpha}_1 (\theta - \theta_c) + D^*, \quad D^* = \frac{\omega}{2} (\sigma_{ij}^* \varepsilon_{ij}' - \sigma_{ij}' \varepsilon_{ij}^*), \end{aligned} \quad (2)$$

граничные условия

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_{ij}^* n_j &= \tilde{f}_i^* \text{ на } l \\ -k^* \theta_{,i} n_i &= \alpha_2^* (\theta - \theta_c) \end{aligned} \quad (3)$$

и начальное условие

$$\theta = \theta_0 \text{ при } t = 0. \quad (4)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \tilde{G}^* &= h\tilde{G}, \quad \rho^* = h\rho, \quad k^* = hk, \\ c_v^* &= hc_v, \quad \tilde{f}_i^* = hf_i^*, \quad \tilde{\alpha}_1 = \alpha_1 (1 + h_{,x}^2 + h_{,y}^2)^{1/2}, \\ \tilde{\nu}_1^* &= \frac{\tilde{\nu}_1 (1 - \tilde{\Delta})}{1 + \tilde{\nu}_1 (1 - 2\tilde{\Delta})}; \quad \tilde{\Delta} = \frac{\rho h^2 \tilde{\nu} \omega^2}{24(1 - \tilde{\nu}) \tilde{G}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Причем \tilde{G} и $\tilde{\nu}$ — комплексные модули сдвига и коэффициент Пуассона, равные $\tilde{G} = G' + iG''$; $\tilde{\nu} = \nu' - \nu''$; \tilde{u}_i , $\tilde{\sigma}_{ij}$, $\tilde{\varepsilon}_{ij}$ — амплитуды компонент вектора перемещений, тензоров напряжений и деформаций; k , c_v — коэффициенты теплопроводности и объемной теплоемкости; α_1 , α_2 — коэффициенты теплоотдачи; \tilde{f}_i — амплитуда компонент вектора напряжений на контуре l ; θ_0 — начальная температура; θ_c — температура окружающей среды; $\theta_{,x} = \partial\theta/\partial x$, $\dot{\theta} = \partial\theta/\partial t$.

Физическая нелинейность описывается зависимостью модуля сдвига от интенсивности амплитуд напряжений

$$\begin{aligned} \tilde{G} &= \tilde{G}(\omega, \theta, \sigma_u), \\ \sigma_u &= \frac{1}{2^{-1/2}} (|\tilde{\sigma}_{xx} - \tilde{\sigma}_{yy}|^2 + |\tilde{\sigma}_{xx}|^2 + |\tilde{\sigma}_{yy}|^2 + 6|\tilde{\sigma}_{xy}|^2)^{1/2}. \end{aligned}$$

Задача решается итерационным методом переменных параметров упругости в сочетании с методом конечных элементов [14, 15]. Уравнения колебаний и теплопроводности, дискретизированные с помощью указанного подхода, приводятся к системам линейных алгебраических уравнений

$$(\tilde{C} - \omega^2 M) \tilde{U} = \tilde{F}, \quad \chi \dot{Q} = -\xi Q + D. \quad (6)$$

Здесь \tilde{C} , M — матрицы жесткости и масс; \tilde{U} , Q — векторы узловых перемещений и температуры; χ , ξ — матрицы теплоемкости и теплопроводности; \tilde{F} , D — векторы возбуждающих сил и тепловых поступлений. Уравнение теплопроводности интегриру-

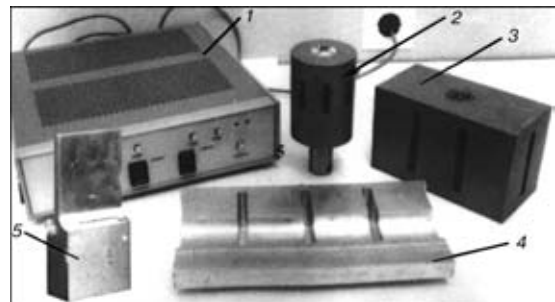


Рис. 4. Общий вид ультразвукового генератора (1), пьезопреобразователя (2), волноводов (3–5)



ется методом конечных разностей по времени. Диссипация энергии учитывается в тепловом источнике D .

В расчетах, связанных с частотно-модальными характеристиками, можно ограничиться линейно-упругим изотермическим приближением уравнений (2)–(4). При исследовании виброразогрева и усталостной прочности необходимо решать задачу в общей постановке.

Для выбора рациональной конфигурации используется метод проб и ошибок. В ряде случаев удается реализовать оптимизационные процедуры [9, 10]. Роль методов оптимального проектирования возрастает при расчете длинноконтурных, многоступенчатых и существенно трехмерных сонотродов [16], обладающих высокой структурной чувствительностью. Однако их практическое применение сдерживается необходимостью мощных компьютеров и нетехнологичностью получаемых конфигураций. Рабочие частоты указанных элементов лежат в плотном спектре, поэтому основная задача, решаемая на этапе конкретизации их геометрии, состоит в отстройке от паразитных частот. Для ее успешного решения необходимо достичь четких представлений о том, как изменение геометрии тела влияет на частоты рабочей и смежных паразитных мод.

В целом же проблема проектирования выходит за рамки расчета сонотрода как изолированного элемента системы. Подобная идеализация приемлема лишь для расчета его собственных характеристик и холостых режимов. Амплитуды и фазы перемещений, деформаций и напряжений в технологическом цикле определяются такими факторами, как взаимодействие с изменяющейся во времени нагрузкой, ширина полосы и тип автоподстройки частоты возбуждающего генератора и др. Эти факторы являются определяющими при оценке усталостной прочности и виброразогрева элементов.

На основе приведенного подхода в Институте электросварки и Институте механики НАН Украины были спроектированы и изготовлены ультразвуковой генератор (рис. 4), пьезопреобразователь и ряд сонотродов для УЗС конкретных изделий из полимеров и композитов на их основе. В соответствии с предложенной схемой сонотроды (в порядке слева направо) относятся соответственно к следующим классам: L_1 , $pmL_1^{(2,3)}$ и $pmL_1^{(1,35), (0,70)}$.

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

Выводы

1. Многообразные сонотроды, которые используются в технологических установках для УЗС полимеров и композитов на их основе, можно классифи-

цировать по модальному принципу. Типы реализуемых в них движений — продольные, толщинные и т. п. — могут быть соотнесены с характерными участками ветвей частотных спектров прямоугольника. По расположению этих участков относительно частоты краевого резонанса типы сонотродов определяются как низко- и высокочастотные.

2. Предложена маркировка пластинчатых сонотродов, отражающая тип движений, волновые размеры, а также типы конвертируемых или распределяемых мод. Выделены основные этапы проектирования сонотродов: определение типа и базовой конфигурации; ее модификация в соответствии с комплексом частотно-модальных ограничений; оценка усталостной прочности и виброразогрева.

1. *Теумин И. И.* Ультразвуковые колебательные системы. — М.: Машгиз, 1959. — 332 с.
2. *Физика и техника мощного ультразвука: В 3 т. 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. — 364 с.
4. *Andoh E., Kagawa Y.* Finite element simulation of a ultrasonic vibrator for plastic welding // Proc. of IEEE Ultrasonic symp. — San-Francisco, 1985. — P. 563.
5. *Гринченко В. Т., Мельшко В. В.* Гармонические колебания и волны в упругих телах. — Киев: Наук. думка, 1981. — 284 с.
6. *Adachi R., Ucha S.* Modal vibration control of large ultrasonic tool with the use of wave-trapped horns // J. Acoust. Soc. Jap. — 1990. — **87**, № 1. — P. 208–214.
7. *Жук Я. А.* Модальный контроль планарных колебаний многосвязных пластин // Тр. XVIII науч. конф. молодых ученых Ин-та механики АН Украины (Киев, 18–21 мая 1993 г.). — Киев, 1993. — Ч. 2. — С. 44–48. — Деп. в ГНТБ Украины 16.08.93, № 1765-Ук93.
8. *Жук Я. А., Козлов В. И., Сенченков И. К.* Новый класс волноводов, применяемых при ультразвуковой сварке пластмасс // Акуст. журн. — 1996. — **42**, № 4. — С. 517–521.
9. *Богомолов С. И., Симпсон Э. А.* Оптимальное проектирование концентраторов ультразвуковых колебаний // Там же. — 1981. — **27**, № 4. — С. 491–499.
10. *Симпсон Э. А.* Многокритериальные задачи оптимизации механической части ультразвуковых установок // Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 222–230.
11. *Силин Л. Л., Баландин Г. Ф., Коган М. Г.* Ультразвуковая сварка. — М.: Машгиз, 1962. — 252 с.
12. *Меркулов Л. Г.* Теория ультразвуковых концентраторов // Акуст. журн. — 1959. — **3**, № 3. — С. 230–238.
13. *О возможностях уточненного метода расчета планарных колебаний пластинчатых тел* / И. К. Сенченков, Е. И. Беспалова, В. И. Козлов, С. Н. Якименко // Прикл. механика. — 1991. — **27**, № 11. — С. 69–77.
14. *К расчету планарных колебаний и виброразогрева пластин переменной толщины* / И. К. Сенченков, В. И. Козлов, С. Н. Якименко, Н. П. Нестеренко // Там же. — 1992. — **28**, № 5. — С. 64–69.
15. *Механика связанных полей в элементах конструкций: В 5 т. Т. 1. Термоупругость* / И. К. Мотовиловец, В. И. Козлов. — Киев: Наук. думка, 1987. — 264 с.
16. *Shuju L., Fucheng Z., Xiaonk G.* Three dimensional coupled vibrations of block like resonators // Acta Acoust. — 1991. — **16**, № 2. — P. 91–97.

A classification and systematized approach to selection of the plate wave-guides used as tools for ultrasonic welding of polymers and composites on their basis have been proposed. The known types of long-contour tools have been considered and new types have been suggested.

Поступила в редакцию 25.07.2000