

УДК 534. 539.376

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛОСКИХ ДЛИННОКОНТУРНЫХ ВОЛНОВОДОВ – ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

И.К.Сенченков, О.П.Червинко, С.М.Дяченко

*Институт механики им. С.П.Тимошенко НАН Украины, Advanced Network Technologies,
Киев*

Представлены основные этапы проектирования и особенности возбуждения пластинчатых волноводов-инструментов большой протяженности для ультразвуковой сварки пластмасс. Поршневые перемещения рабочей поверхности в пластинчатых волноводах переменной толщины достигаются путем прорезания щелей с последующим изменением формы нерабочей кромки пластины. По предложенной схеме был рассчитан и изготовлен волновод длиной около восьми длин стержневых продольных мод для частоты 40КГц. Установлено хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных.

Ультразвуковые колебания широко используются в технике, технологии, медицине и т.п. В технологических установках обычно применяется ультразвук низкой частоты – 20 – 60 кГц и высокой мощности – 1 – 5 кВт.

В технологическом оборудовании, используемом для сварки термопластов, одной из наиболее сложных задач является проектирование волноводов - инструментов (сонотродов), протяженность рабочей поверхности которых a существенно превышает половину продольной волны λ_E в стержне из данного материала ($a \gg \lambda_E / 2$). Проблема проектирования состоит в обеспечении поршневых перемещений на рабочей поверхности сонотрода. Инструменты такого типа являются объектами уникальных компьютерных и экспериментальных исследований [1, 2].

Определяющая информация, лежащая в основе понимания волновых процессов, и, следовательно, методики проектирования таких изделий, может быть получена путем изучения дисперсионного спектра нормальных мод бесконечного слоя с поперечными щелями. Следующий этап должен состоять в исследовании на этой основе частотного спектра планарных мод колебаний щелевых прямоугольных пластин. Однако такие исследования до сих пор не выполнены. Поэтому в настоящее время проектирование длинноконтурных волноводов производится в значительной степени с помощью интуиции и опыта.

В данной работе кратко очерчены методологические основания, этапы проектирования и экспериментального контроля волновода длиной $a \approx 8\lambda$ с рабочей частотой $f = 40$ кГц. Численное исследование проводилось методом конечных элементов [3].

Сущность расчетных этапов проектирования иллюстрируется на рис. 1 – 4. В силу симметрии показана правая половина сонотрода.

Этап 1 состоит в расчете прямоугольной пластины на номинальную частоту 40 кГц для планарной полуволновой в толщинном направлении моды (рис.1). Высота пластины при этом близка к $\lambda/2$. Жирными линиями утрированно показана форма колебаний волновода. Нормальные перемещения u_y на длинных гранях пластины существенно изменяются по длине и коэффициент однородности достигает значения $k_h \approx 017$, где

$k_h = \min \bar{u}_y(x)$, $\bar{u}_y(x) = |u_y(x)|_{S_0} / \max |u_y(x)|_{S_0}$ - нормированное вертикальное смещение на

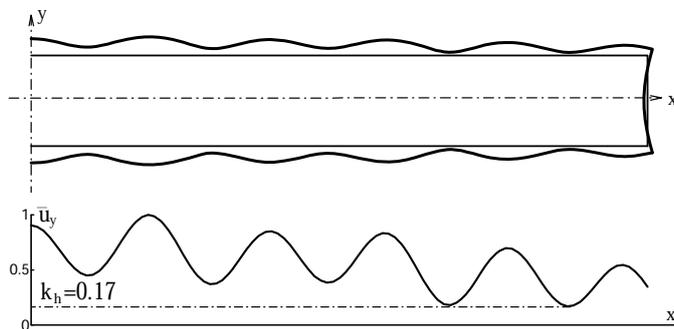


Рис. 1

рабочей поверхности S_0 (нижняя грань). Сонаотрод с такой формой колебаний не пригоден к практическому использованию. При ультразвуковой сварке таким инструментом в областях минимальных и максимальных значений перемещений будут возникать соответственно непровары и пережоги материала изделий.

Этап 2 имеет целью выровнять поле нормальных перемещений на гранях пластины. Это достигается прорезанием поперечных (вертикальных) щелей. Практическим путем установлено приемлемое расстояние между ними - $\lambda/5 - \lambda/4$ [4, 5].

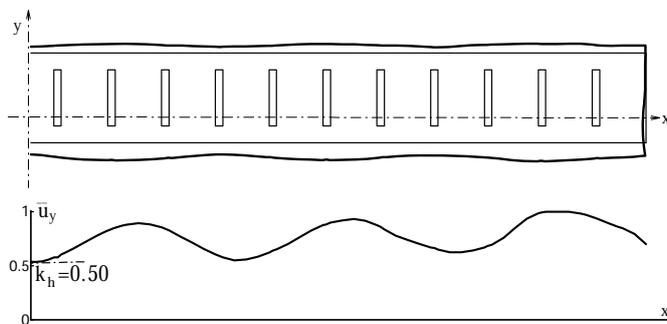


Рис. 2

В результате распределение нормальных перемещений на длинных гранях сглаживается и коэффициент однородности достигает значения $k_h = 0.5$. На этом же этапе осуществляется изменение толщины пластины с целью получения требуемого коэффициента усиления на рабочей (нижней) поверхности пластинчатого инструмента.

Изменение толщины волновода осуществляется на середине высоты волновода. Коэффициент усиления перемещений k_a определяется как отношение среднего перемещения на рабочей поверхности S_0 к среднему перемещению на поверхности возбуждения S_f колебаний (верхняя грань), $k_a = \langle u_y \rangle_{S_0} / \langle u_y \rangle_{S_f}$. Дальнейший расчет планарных колебаний инструмента, как пластины переменной толщины, осуществляется в рамках уточненной модели, развитой в работе [6]. Результаты представлены на рис.2.

Этап 3 состоит в дальнейшем выравнивании распределения перемещений на рабочей поверхности инструмента путем присоединения к его верхней грани набора корректирующих стержневых выступов [2]. Их высота обычно не превышает $\lambda_E/2$. Первоначально они располагаются в точках пучностей перемещений на нижней грани щелевого волновода, представленного на рисунке 2. Эффект введения полуволновых стержней иллюстрируется на рисунке 3. Он состоит в незначительном увеличении коэффициента однородности до $k_a = 0.63$.

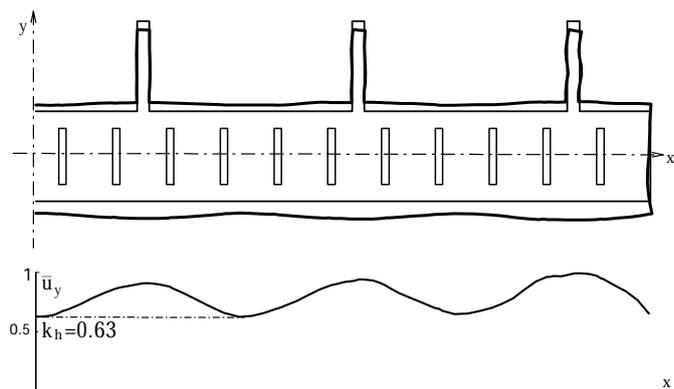


Рис. 3

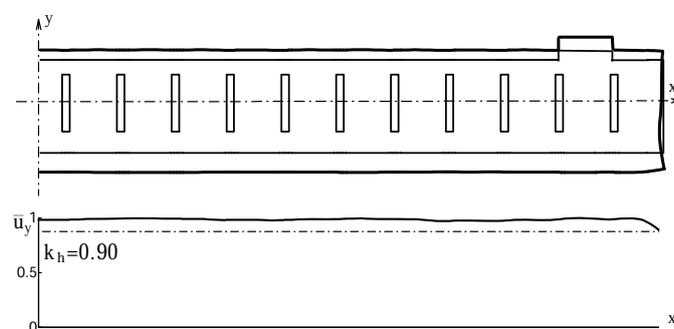


Рис. 4

состоит в подавлении вклада низших (одной или двух, в зависимости от наличия частотного минимума) распространяющихся и активных на концах пластины нераспространяющихся мод в резонансной форме колебаний перфорированной пластины.

Параллельная функция выступов состоит в отстройке рабочей частоты от паразитных продольных и изгибных мод с учетом полосы автоподстройки резонансной частоты УЗ генератора. Сочетание целей отстройки и однородности обеспечивает успех проектирования сонотрода.

На рис.5 представлена фотография сонотрода. Он изготовлен из алюминиевого сплава Д16Т. Выступающие темные стержни - это шпильки, которыми инструмент крепится к акустическим головкам. Таких головок пять. Они служат одновременно для передачи статического прижимного усилия, прикладываемого к свариваемым деталям, и возбуждения колебаний инструмента. Источником колебаний являются либо один мощный электрический генератор, распараллельный на пять головок, либо пять синхронизированных по фазе генераторов меньшей мощности.

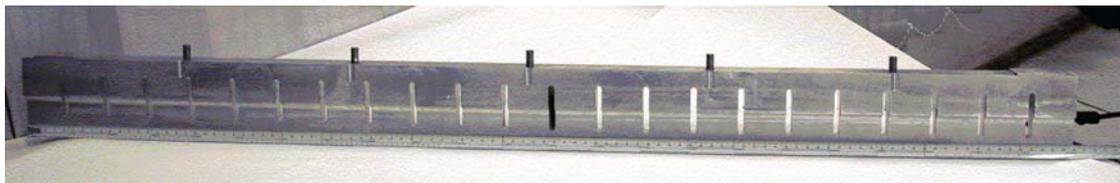


Рис. 5

Вторая стадия этого этапа является наиболее сложной с методологической и вычислительной точек зрения. Сущность ее состоит в варьировании количества, высоты и места расположения указанных выступов (стержней) с целью достижения максимальной однородности перемещений на нижней грани пластины. Итог указанного процесса показан на рис.4.

Полученный результат является неожиданным и примечательным. Прежде всего высокий коэффициент однородности оказался возможным достичь путем незначительной модификацией верхней кромки. Опираясь на методологию работы [8], можно предположить, что результирующая мода колебаний отвечает толщинной для щелевого слоя. Роль выступов на верхней грани

Выбор мест расположения шпилек определяется статическими и динамическими факторами. Первый функционально связан с передачей прижимного усилия. С этой точки зрения предпочтительно равномерное распределение шпилек. Динамический аспект более тонкий. Он связан с проблемой максимальной отстройки рабочей резонансной частоты от паразитных (как правило, планарных изгибных) мод. Для сонотрода, имеющего в окрестности рабочей частоты плотный резонансный спектр, нормальное функционирование технологической системы возможно лишь при условии удаления паразитных мод за пределы интервала автоматической подстройки частоты возбуждающего генератора. Только при таких условиях эти моды не будут захватываться акустической системой.

Проблема отстройки в основном решается варьированием геометрии сонотрода. Однако, даже в случае удовлетворительной отстройки, ослабить влияние паразитных мод можно путем размещения точек возбуждения колебаний в узлах ближайших двух таких мод с частотами выше и ниже рабочей. Выбор положения шпилек сонотрода, показанного на рис.5, был обусловлен именно указанными обстоятельствами.

На рисунке 6 показаны нормированные распределения нормальных перемещений на верхней грани для ближайших к рабочей верхней и нижней паразитных мод (кривые 1 и 2, соответственно). Выбор положения шпилек является компромиссным с точки зрения расположения узлов обеих паразитных мод.

Экспериментальное исследование частотно – модальных характеристик сонотрода производилось в лаборатории “Power Ultrasonic Technologies” фирмы ЭйЭтТи на специально разработанном стенде. Измеренные характеристики находились в хорошем соответствии с расчетными.

Резюмируя полученные результаты, отметим, что длинноконтурные волноводы, работающие в высокочастотной части спектра, демонстрируют исключительно высокую частотно - модальную чувствительность к изменению геометрии и, соответственно, предъявляют высокие требования к точности их расчета и изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сенченков И.К. Модальная классификация и проектирование сонотродов для ультразвуковой сварки пластмасс // Акустичний вісник.- 1998. – 1, №4. – С. 55– 64.
2. Adachi K., Ucha S. Modal vibration control of large ultrasonic tool with the use of wave trapped horns // J. Acoust. Soc. Jap. – 1990.- 87, N1. – P.208 – 214.
3. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т 1. Термоупругость / Мотовиловец И.А., Козлов В.И. – К.: Наук. Думка, 1987. – 264с.
4. Сенченков И.К., Жук Я.А., Козлов В.И. Исследование планарных колебаний многосвязных пластин // Прикл. механика. – 1995. – 31, №2. – С.71 – 80.
5. Нестеренко Н.П., Сенченков И.К. Анализ и классификация пластинчатых волноводов для УЗС полимеров и композитов на их основе //Автомат. Сварка. – 2001. - №6. – С.14 – 18.
6. Сенченков И.К., Козлов В.И., Якименко С.Н., Нестеренко Н.П. К расчету планарных колебаний и виброразогрева пластин переменной толщины // Прикл. механика. – 1992. – 28, №5. – С.64 – 69
7. Жук Я.А., Козлов В.И., Сенченков И.К. Новый класс волноводов, применяемых при ультразвуковой сварке пластмасс // Акуст. ж. – 1996. – 42, №4. – С.517 – 521.