

ПОЛУВОЛНОВАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ПРОТЯЖЁННОЙ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ

*В.Н. Хмелёв, С.В. Левин, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, М.В. Хмелёв, А.Н. Лебедев
Бийский технологический институт АлтГТУ*

Введение

В последние годы широкое распространение получают различные технологии, основанные на использовании ультразвуковых колебаний высокой интенсивности [2]. При этом новые технологии выходят из лабораторий и требуют решения проблемы излучения ультразвуковых колебаний высокой интенсивности через большие по площади излучающие поверхности.

Особенно остро проблема равномерного излучения проявляется при формировании протяжённых и широких герметичных швов методом ультразвуковой сварки.

Ультразвуковая сварка в ряде случаев, например при упаковке пищевых сыпучих и жидких продуктах в мешки из полимерной плёнки не имеет альтернативы.

Используемые в настоящее время ультразвуковые аппараты для формирования протяжённых швов имеют ограниченные функциональные возможности, что не позволяет обеспечить формирование швов длиной более 200 мм (при требуемой длине 360 мм) и шириной более 5мм (при требуемой 12–15 мм). При этом имеющаяся неравномерность распределения амплитуды вдоль излучающей поверхности не позволяет обеспечить герметичность вдоль всего шва.

В связи с этим возникает необходимость в выявлении причин, ограничивающих возможности ультразвуковой сварки путём формирования протяжённых швов, поиск путей их устранения и создания ультразвуковых аппаратов, способных обеспечить надёжный герметичный шов длиной до 360 мм при ширине до 15 мм, решив тем самым имеющиеся проблемы современных производств.

1. Постановка задач исследования

Основу ультразвуковых аппаратов составляют ультразвуковые колебательные системы [1], обеспечивающие преобразование, усиление и ввод ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в обрабатываемый материал через излучающую поверхность.

Известные ультразвуковые колебательные системы, состоящие из пьезоэлектрических преобразователей и концентратора, объединенных в двухполуволновой конструкции, являются резонансными системами. При совпадении резонансных частот преобразователей и концентратора обеспечивается максимальная амплитуда ультразвуковых колебаний рабочего инструмента и соответственно, максимальный ввод энергии в обрабатываемые среды. При реализации технологических процессов рабочий инструмент и часть концентратора погружаются в различные технологические среды или подвергаются статическому давлению на излучающую поверхность. Влияние различных технологических сред или внешнего давления эквивалентно появлению дополнительной присоединенной массы к излучающей поверхности концентратора и приводит к изменению собственной резонансной частоты концентратора и всей колебательной системы в целом. При этом нарушается оптимальное частотное согласование преобразователя и концентратора. Рассогласование ультразвукового преобразователя и концентратора приводит к уменьшению амплитуды колебаний излучающей поверхности (рабочего инструмента) и уменьшению вводимой в среды энергии.

Для устранения этого недостатка при проектировании и изготовлении колебательных систем осуществляют предварительное рассогласование преобразователя и концентратора по резонансной частоте, так, что бы при появлении нагрузки и понижении собственной частоты концентратора, она соответствовала собственной частоте преобразователя и обеспечивался максимальный ввод энергии. Это существенно ограничивает области применения такой ультразвуковой колебательной системы и является недостаточным, поскольку в большинстве реализуемых технологических процессов происходит изменение величины присоединенной массы (например, переход от водной или масляной сред к их эмульсии, возникновение и развитие кавитационного процесса, приводящего к образованию облака парогазовых пузырьков и снижающих присоединенную массу в любой жидкой среде) в ходе реализации самого процесса, что приводит к снижению эффективности ввода ультразвуковых колебаний.

Проблема оптимального согласования преобразователя и концентратора по частоте усугубляется необходимостью согласования волновых сопротивлений жидких и жидко – дисперсных сред с твердыми

пьезокерамическими материалами преобразователей. Для оптимального согласования коэффициент усиления концентратора должен составлять 10–15 [2]. Столь высокие коэффициенты усиления можно получить только ступенчатыми концентраторами, но они, при таких коэффициентах усиления усугубляют зависимость собственной резонансной частоты от нагрузки, требуют малого по размеру выходного сечения при значительной длине (соответствующей четверти длины волны ультразвуковых колебаний в материале концентратора), что приводит к уменьшению излучающей поверхности, потере динамической устойчивости и появлению изгибных колебаний. По этой причине, используемые на практике колебательные системы имеют коэффициент усиления не более 3...5, что делает их непригодными для обеспечения высокоинтенсивных ультразвуковых воздействий на различные технологические среды.

Кроме основных недостатков, обусловленных применяемой конструктивной схемой построения колебательных систем, существующие колебательные системы имеют несколько недостатков, обусловленных технологическими и эксплуатационными особенностями их изготовления и применения:

1. Ультразвуковая колебательная система с двумя и более пьезоэлектрическими преобразователями (диаметром до 40...50 мм) может иметь длину излучающей поверхности более 200...250 мм при ширине более 5 мм. При этом собственные резонансные частоты пьезоэлектрических преобразователей отличаются, что обусловлено допустимыми по нормативной и конструкторской документации различиями в электрических и геометрических параметрах пьезоэлектрических элементов, частотопонижающих накладок, различиях в усилиях сжатия при сборке преобразователя и т.п. При этом возбуждение механических колебаний резонансного концентратора осуществляется преобразователями с различными рабочими частотами, некоторые из которых не совпадают с резонансной частотой концентратора. Особенно трудно осуществить согласование в колебательной системе с несколькими разными по частоте преобразователями и ступенчатым концентратором, имеющим максимальный коэффициент усиления. При этом снижается эффективность ультразвукового воздействия даже по сравнению с колебательной системой такого размера, но с одним преобразователем.

2. Невозможность выполнения сложнопрофильной излучающей поверхности (например, для одновременного формирования двух сварных швов и разрезки материала между ними), так как в этом случае каждый продольный размер обуславливает собственную резонансную частоту концентратора, которая не соответствует резонансной частоте преобразователей (эффективно осуществляется только одна из операций – или формирование шва или резка материала).

3. Невозможность создания ультразвуковых колебательных систем с расширенной полосой пропускания по сравнению с резонансными системами.

4. Двухполуволновая колебательная система с рабочей частотой 22 кГц имеет продольный размер не менее 250 мм и при длине излучающей поверхности в 350 мм весит не менее 10 кг. При этом, крепление колебательной системы осуществляется на участке минимальных колебаний (либо в центре преобразователя, либо в центре концентратора). Такое крепление приводит к низкой механической устойчивости и невозможности обеспечения точности воздействия. Оптимальное крепление в центре масс обеспечивать невозможно из-за больших амплитуд механических колебаний и неизбежного демпфирования колебательной системы.

Показанные выше недостатки применяемых в настоящее время двухполуволновых колебательных систем обуславливают их недостаточную эффективность, ограничивают функциональные возможности, что делают их не пригодным для использования в высокопроизводительных, автоматизированных производствах.

В следствии с этим, возникла необходимость устранения недостатков существующих колебательных систем и создание новой колебательной системы, способной удовлетворить требованиям высокопроизводительных, автоматизированных производств.

2. Практическая реализация

Проведенный анализ возможных конструктивных схем построения колебательных систем позволил установить, что большая часть принципиальных ограничений, присущих двухполуволновой конструктивной схеме колебательной системы может быть устранена применением колебательных систем, объединяющих в полуволновой конструктивной схеме пьезоэлектрический преобразователь и концентратор с высоким коэффициентом усиления и любым по размерам рабочим инструментом [4].

Выполненная по полуволновой конструктивной схеме колебательная система представляет собой единую резонансную колебательную систему и все изменения ее параметров приводят

только к рассогласованию с электронным генератором. Отсутствие практических конструкций таких колебательных систем обусловлено невозможностью их реализации на основе использовавшихся до последнего времени магнитоотрицательных преобразователей и сложности практической реализации на основе современных пьезокерамических элементов из-за необходимости их размещения в максимуме механических напряжений, а также из-за отсутствия электронных генераторов, способных обеспечить оптимальные режимы питания такой колебательной системы при всех возможных изменениях ее резонансной частоты (до 3...5 кГц).

Ультразвуковая колебательная система, содержащая пьезоэлектрические элементы и концентратор выполнена из параллельно расположенных на формирующей ультразвуковые колебания поверхности концентратора, и акустически связанных с ней пакетов из чётного количества последовательно установленных пьезоэлектрических элементов. На пакетах пьезоэлементов расположены акустически связанные с пьезоэлектрическими элементами отражающие

накладки, противоположная контактирующей с пьезоэлементами, поверхность которых выполнена плоской или ступенчато переменной по диаметру, а размеры и количество ступенек выбраны из условия получения заданной полосы пропускания. Концентратор имеет узел крепления и оканчивается излучающей ультразвуковые колебания поверхностью с рабочим инструментом. Формирующая и излучающая поверхности концентратора имеют в сечении прямоугольную форму одинаковой длины, а отношение их поперечных размеров выбирается из условия обеспечения заданного коэффициента усиления концентратора. Суммарная длина отражающей накладки, пакета пьезоэлементов и участка концентратора до узла крепления равна шестой части длины волны ультразвуковых колебаний в материале концентратора. Размеры участка концентратора, на котором осуществляется плавный перехода и участка с поперечным размером, соответствующим излучающей поверхности, соответствуют шестой части длины волны ультразвуковых колебаний в материале концентратора.

Разработанная колебательная система поясняется на рис. 1, на котором схематично представлена ультразвуковая колебательная система, содержащая пьезоэлектрические элементы 1, отражающие резонансные накладки 2 и концентратор 3. Конструктивно колебательная система выполнена из параллельно расположенных на формирующей ультразвуковые колебания поверхности 4 концентратора 3, и акустически связанных с ней пакетов из чётного количества последовательно установленных пьезоэлектрических элементов 1 (на рис. 1 показана колебательная система с двумя пакетами пьезоэлементов). На каждом из пакетов, состоящих из четного числа пьезоэлементов (обычно двух или четырех), расположены акустически связанные с ними отражающие накладки 2, противоположная контактирующей с пьезоэлементами поверхность которых выполнена плоской 5 или ступенчато переменной по длине 6, а размеры и количество ступенек 7 выбраны из условия получения заданной полосы пропускания. Концентратор 3 имеет узел крепления 8 и оканчивается излучающей ультразвуковые колебания поверхностью 9 с рабочим инструментом 10. Формирующая 4 и излучающая 9 поверхности концентратора имеют прямоугольную форму одинаковой длины L , а отношение их поперечных размеров D_1 , D_2 выбирается из условия обеспечения заданного коэффициента усиления концентратора. Суммарная длина отражающей накладки 2, пакета пьезоэлементов 1 и участка концентратора до узла крепления равна шестой части длины волны ультразвуковых колебаний в материале концентратора. Размеры участка концентратора, на котором осуществляется плавный перехода и участка с поперечным размером, соответствующим излучающей поверхности, соответствуют шестой части длины волны ультразвуковых колебаний в материале концентратора, причём плавный переход выполнен радиальным.

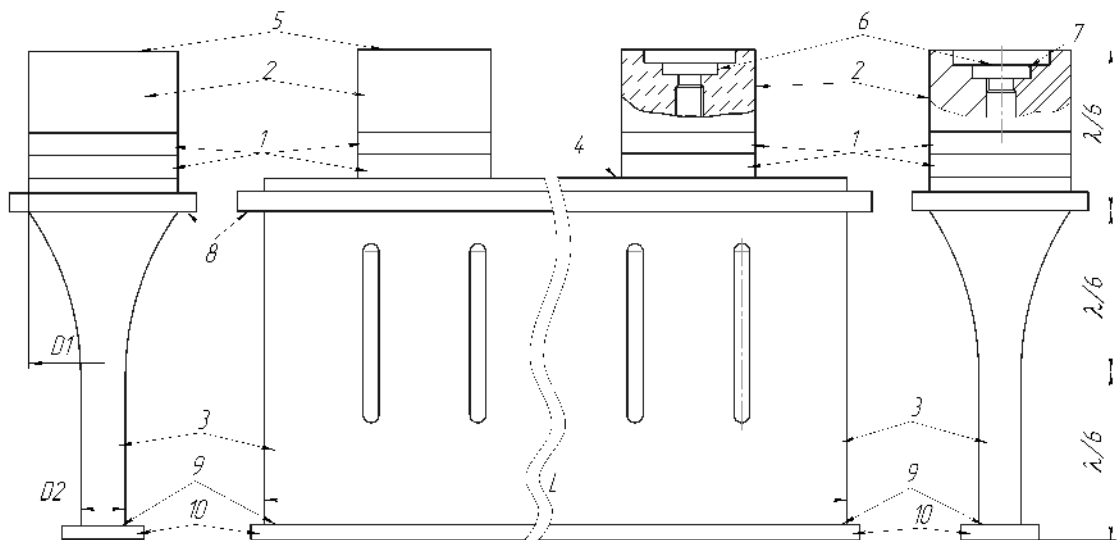


Рисунок 1 – Полуволновая ультразвуковая колебательная система

Ультразвуковая колебательная система работает следующим образом.

При подаче электрического питающего напряжения от генератора электрических колебаний ультразвуковой частоты (на фиг. 1 не показан), соответствующей собственной частоте колебательной системы на электроды пьезоэлектрических элементов 1, происходит преобразование энергии электрических колебаний в ультразвуковые механические колебания за счет пьезоэлектрического эффекта. Эти колебания распространяются в противоположные стороны и отражаются от граничных поверхностей отражающей накладки и концентратора (рабочего инструмента). Поскольку вся длина колебательной системы соответствует резонансному размеру (половине длины волны ультразвуковых колебаний) происходит выделение механических колебаний на собственной резонансной частоте колебательной системы. Наличие ступенчато – радиального концентратора позволяет увеличить амплитуду колебаний излучающей поверхности по сравнению с амплитудой колебаний на противоположной контактирующей с пьезоэлементами поверхности отражающей накладки. Величина амплитуды колебаний на излучающей поверхности зависит от коэффициента усиления концентратора, определяемого как квадрат отношения площадей формирующей и излучающей поверхностей концентратора, имеющих в сечении прямоугольную форму одинаковой длины.

Узел крепления 8 концентратора 3 (см. рис. 1) расположен на участке, близком к узлу минимальных механических ультразвуковых колебаний, что обеспечивает минимальное демпфирование ультразвуковой колебательной системы, т.е. максимальную амплитуду колебаний излучающей поверхности и отсутствие колебаний на узлах крепления колебательной системы в технологические линии.

В связи с тем, что получение аналитических соотношений геометрических размеров для практических расчетов при конструировании колебательных систем затруднено из-за отсутствия ряда точных данных о распространении ультразвуковых колебаний в телах переменного сечения из чередующихся различных материалов, при выборе параметров колебательной системы использованы результаты численного моделирования, совместно с графическими зависимостями практического исследования колебательных систем с различными соотношениями поперечных размеров формирующей и излучающей поверхности концентратора D_1 , D_2 , и различными по длине участками колебательной системы [4]. Экспериментальные исследования позволили установить, что максимальный коэффициент электромеханического преобразования обеспечивается при условии смещения пьезоэлектрических элементов от участка минимальных колебаний (максимальных механических напряжений), таким образом, что суммарная длина отражающей накладки, пакета пьезоэлементов и участка концентратора до узла крепления равна шестой части длины волны ультразвуковых колебаний в материале концентратора. Выбор размера участка концентратора, на котором осуществляется плавный переход равным шестой части длины волны ультразвуковых колебаний в материале концентратора и его формы по приведенной

формуле обеспечивает необходимый коэффициент усиления и минимальные механические напряжения на границе перехода между участком плавного перехода и участком с поперечным размером, соответствующим излучающей поверхности. Результаты экспериментальных исследований колебательных систем с различными соотношениями поперечных размеров формирующей и излучающей поверхности концентратора D_1 , D_2 представлены на рис. 2 а, б, в., где показаны графики зависимости основных параметров колебательной системы: изменение собственной резонансной частоты f (а), коэффициента усиления M_p (б), и максимальных механических напряжений σ_{max} (в) от радиуса плавного перехода. Из полученных зависимостей установлено, что при любых соотношениях поперечных размеров формирующей и излучающей поверхности концентратора D_1 , D_2 минимальное влияние на собственную резонансную частоту

$$\text{происходит при } R = 1,2 \dots 1,3 \frac{4L_z^2 + (D_1 - D_2)^2}{4(D_1 - D_2)}.$$

При этом коэффициент усиления, приближается к максимально возможному, и обеспечивается значительное снижение механических напряжений в зоне размещения пьезоэлементов.

Проведенные экспериментальные исследования позволили подтвердить правильность полученных результатов и разработать практические конструкции колебательных систем при различных соотношениях поперечных размеров формирующей и излучающей поверхности концентратора D_1 , D_2 .

Так, в колебательной системе при поперечном размере излучающей поверхности, равном $D_2 = 10$ мм и при поперечном размере формирующей колебания поверхности D_1 , равном 38 мм (т.е. при использовании наиболее широко применяемых кольцевых пьезоэлементов внешним диаметром 38 мм), разработанная колебательная система обеспечит усиление ультразвуковых колебаний, выработанных пьезоэлементами, не менее чем в 11 раз (см. фиг. 2).

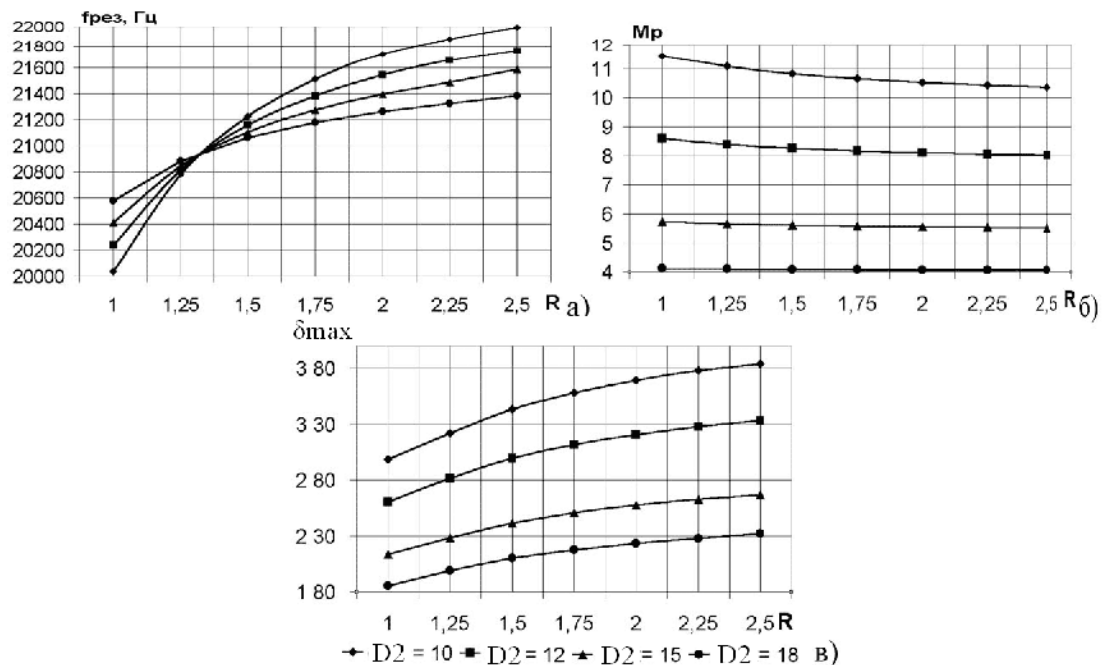


Рисунок 2 – Графики зависимости основных параметров колебательной системы

Аналогичные результаты получены и для других значений D_2 .

Так при использовании кольцевых пьезоэлементов с внешним диаметром 50 мм в предложенной колебательной системе и обеспечении коэффициента усиления 10...15, поперечный размер излучающей поверхности концентратора D_2 может быть равен 16 мм.

Для получения коэффициента усиления, равного 10...15 в созданной колебательной системе при размере $D_2 = 20$ мм, D_1 будет равен всего 70 мм, что также легко реализуемо на практике (пьезоэлементы диаметром 70 мм производятся серийно).

Таким образом, при обеспечении амплитуды колебаний пакета из двух пьезоэлектрических элементов, равной 5 мкм (напряжение питания не более 500...700 В), амплитуда колебаний излучающей поверхности колебательной системы составит 50...75 мкм, что является достаточным для реализации максимально эффективного режима развитой кавитации при обработке жидких и жидко-дисперсных сред, осуществления сварки полимерных материалов и размерной обработки твердых материалов.

При этом разработанная ультразвуковая колебательная система обеспечивала коэффициент полезного действия (коэффициент электроакустического преобразования) не менее 75% (при излучении в воду).

Выполнение отражающей накладки со ступенчато изменяющимся продольным размером (т.е. выполнение противоположной контактирующей с пьезоэлементами поверхности ступенчато переменной по диаметру) позволяет сформировать несколько различных резонансных размеров по длине колебательной системы. Каждому из этих резонансных размеров соответствует собственная резонансная частота механических колебаний. Выбор количества и размеров ступенек позволяют получить необходимую полосу пропускания (т.е. обеспечить работу колебательной системы в диапазоне частот, определяемых максимальным и минимальным продольными размерами отражающей накладки).

Заключение

1. Выявлены недостатки двухполуволновых колебательных систем, и причины невозможности их использования в высокопроизводительном, автоматизированном производстве.

2. Предложена новая конструктивная схема, объединяющая в полуволновой конструктивной схеме пьезоэлектрический преобразователь и концентратор с высоким коэффициентом усиления и любым по размерам рабочим инструментом.

3. Разработана и практически реализована полуволновая ультразвуковая колебательная система обладающая следующими параметрами:

Частота возбуждаемых механических колебаний, кГц	22±1,35
Коэффициент усиления	10-15
Амплитуда колебаний на торце рабочего инструмента при максимальной мощности, мкм	50-75
Длина излучающей поверхности, мм	360

4. Полученные результаты исследований и разработки позволили решить проблему повышения эффективности ультразвуковой колебательной системы (увеличении амплитуды колебаний, вводимых в различные среды, равномерность распределения амплитуды колебаний на торце рабочего инструмента) за счет обеспечения оптимального согласования со средами и электронным генератором.

Разработанная в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета ультразвуковая колебательная система прошла лабораторные и технические испытания и была использована в составе установки для выполнения продольного шва длиной 360 мм при герметизации пакетов для упаковки сыпучих продуктов.

Литература

1. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната, – М., Металлургия, 1974.
2. Применение ультразвука в промышленности / Под ред. А.И. Маркова. – М.: Машиностроение; София: Техника. – С. 165.
3. Ультразвуковая обработка материалов/А.И. Марков – М.: Машиностроение, 1980, 237 с.
4. Ультразвуковая колебательная система. Патент РФ №2141386/ В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок.