

Ультразвуковая Прессовая Шовно-Шаговая Сварка Термопластичных Полимерных Материалов.

Роман В. Барсуков, Алексей Н. Сливин, Владимир Н. Хмелев,
Сергей Н. Цыганок, Андрей В. Шалунов, Игорь И. Савин, Сергей В. Левин
*Бийский технологический институт
Алтайского государственного технического университета, Бийск, Россия*

Аннотация — В статье представлены результаты исследований и разработок по созданию специализированного ультразвукового оборудования для комплектации упаковочных машин, способного обеспечить при герметизации жидких и сыпучих пылящих продуктов формирование двойного поперечного герметизирующего шва протяженностью до 360 мм за время, менее 1 секунды.

I. ВВЕДЕНИЕ.

В последние годы в пищевой промышленности все большее распространение получают различные способы и устройства упаковки сыпучих и жидких продуктов. Их производство осуществляется различными отечественными и зарубежными фирмами: Бестром (Россия), АО «Сигнал» (Россия), Braibanti (Италия), Bullez (Швейцария), ECL (США), Ishida (Япония), Tetra –Pac (Швеция), Wagetech (Германия).

Упаковка в полимерные термопластичные (термосвариваемые) пленки с вертикальной подачей продукта получила наибольшее распространение для сыпучих пищевых продуктов: крупы, орехов, муки, молока, сахара, конфет, чипсов и т.д. Аналогичные упаковочные машины используются для упаковки жидких пищевых продуктов: молока и молочных продуктов, соусов и кетчупов и т.п. Используемые упаковочные машины устроены следующим образом.

В верхней части упаковочной машины установлена загрузочная воронка с устройством для регулирования количества поступающего продукта, который под действием силы тяжести и направляющих устройств распределяется в специальную цилиндрическую емкость (труба, формирующая рукав пленки). Относительно наружной поверхности трубы формируется рукав из полимерной пленки. В состав упаковочной машины входят: лентопротяжный механизм, продольные и поперечные термосварочные устройства. Перед поступлением дозы продукта, включаются приводы механизмов поперечной, продольной сварки и лентопротяжный механизм. При этом формируется продольный (вертикальный) термический шов и нижний поперечный (горизонтальный) термический шов, т.е. формируется пластиковый пакет для упаковки. В заранее сформированный пакет, имеющий вертикальный и

горизонтальный швы, подают порцию продукции, производят сварку верха пакета (формируют верхний поперечный шов), одновременно образуя дно следующего пакета. Нож отделяет порцию упакованного продукта (герметизированный пакет) и цикл повторяется.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

Герметизация пластиковых пакетов при упаковке сыпучих и жидких продуктов заключается в формировании поперечного участка для выполнения шва, сжатии пакета на этом участке до соприкосновения внутренних поверхностей стенок пакета друг с другом, осуществлении энергетического воздействия на материал пакета до повышения температуры, достаточной для формирования термического шва.

В современных упаковочных машинах, в зависимости от вида используемого материала, применяют два различных варианта реализации энергетического воздействия:

- тепловую сварку для легкоплавких материалов;
- импульсную сварку для многослойных материалов.

Основное отличие используемых вариантов в том, что во втором используется небольшая поверхность термосваривающего элемента (например, проволока между двумя кромками ребер) с высоким сопротивлением. При этом из-за незначительной теплопроводности элементов они быстро нагреваются и остывают. Кроме того, на уменьшение продолжительности остывания элементов влияет применение водяного или воздушного охлаждения, а для исключения адгезии упаковочного материала к элементу, на последний наносится антипригарный слой тефлона (политетрафторэтилена).

В первом варианте реализации тепловой сварки термосваривающие элементы имеют большую рабочую поверхность соприкосновения, сварка осуществляется при меньших температурах, при двухстороннем доступе и более продолжительна по времени.

Тепловая сварка обеспечивает получение прочной упаковки из полимерных материалов. Ее надежность и прочность зависит от вида пленки, температурного нагрева, продолжительности контакта элементов и усилия их сжатия.

Обычно полный цикл термосваривания на упаковочных автоматах с высокой производительностью должен длиться менее одной секунды. Поэтому время, необходимое для тепловой сварки пленки, определяет общую скорость работы упаковочного автомата.

Однако, наряду с рассмотренными достоинствами, тепловая герметизация пластиковых пакетов имеет следующие существенные недостатки:

1. не обеспечивает высокого качества герметизации пластиковых пакетов при упаковке мелкодисперсных и пылящих продуктов (перец, молотый кофе, мука, гипс и т.п.). Обусловлено это попаданием частиц пыли упаковываемого материала в зону формирования теплового шва и приводит к тому, что на этих участках тепловой шов не формируется и не осуществляется полная герметизация пакета. Это приводит к потерям части продукта при транспортировке и потере его качества из-за попадания атмосферного воздуха и влаги в упаковку;

2. не обеспечивает герметизации пластиковых пакетов при упаковке жидких вязких продуктов (майонезы, кремы, соусы и кетчупы и т.п.). Обусловлено это попаданием упаковываемого продукта на поверхности стенок пленки в зоне формирования теплового шва. На этих участках тепловой шов не формируется и происходит термическое разложение продукта. Это приводит к снижению качества продукта, потерям при транспортировке и потерям товарного вида из-за загрязнения поверхностей упаковки;

3. при герметизации пластиковых пакетов в случае упаковки жидких продуктов (типа молока или соков) обеспечить надежную герметизацию возможно при условии исключения попадания продукта на стенки пленки в зону формирования термического шва. Однако, при такой упаковке, одновременно с герметизируемым продуктом (молоко или сок) в пакете герметизируется нестерильный атмосферный воздух, который вызывает ускоренную порчу продукта. Очевидный вариант исключения попадания нестерильного воздуха в пакет путем формирования термического шва по жидкому продукту при реализации прототипа невозможен.

Кроме того, при реализации традиционной тепловой сварки невозможно обеспечить контроль параметров в зоне формирования термического шва (например, температуру на границе соединяемых материалов или момент перехода материалов на границе в вязкопластичное состояние). Отсутствие контроля не позволяет оперативно влиять на процесс, оптимизировать время герметизации при отклонениях геометрических и технологических параметров от

нормы, а также при смене материала упаковочной пленки или ее толщины.

Выявленные недостатки применяемой тепловой сварки обуславливают невозможность ее применения при упаковке мелкодисперсных пылящих и жидких продуктов.

В связи с этим возникла необходимость в создании простого и эффективного способа сварки, позволяющего обеспечить герметизацию пластиковых пакетов при упаковке всех видов продуктов, в том числе - сыпучих и жидких и разработать специализированное оборудование для практической реализации нового способа.

III СПОСОБ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРЕССОВОЙ ШОВНО-ШАГОВОЙ СВАРКИ.

Проведенный анализ функциональных возможностей различных способов герметизации, применительно к упаковке в полимерные термопластичные (термосвариваемые) пленки с вертикальной подачей продукта, позволил предложить в качестве энергетического воздействия, способного решить поставленную задачу – ультразвуковое высокоамплитудное воздействие т.е. метод ультразвуковой низкотемпературной сварки[1].

К достоинствам ультразвуковой сварки термопластичных материалов относятся:

1. Достаточность доступа рабочим инструментом, через который осуществляется энергетическое воздействие к поверхности только одной из соединяемых деталей, с возможностью выделения максимальной энергии на границе соединения этой детали с другой[2].

2. Возможность сварки без предварительной подготовки соединяемых поверхностей (удаление жидких и твердых загрязнений) и применения специальных добавок, исполняющих роль присадочного материала.

3. Возможность герметичного соединения при температурах, ниже температуры плавления и разложения материалов упаковочного пакета.

4. Время получения качественного сварного соединения не превышает долей секунды.

Таким образом только ультразвуковая сварка способна устранить недостатки тепловой герметизации пластиковых пакетов из различных термопластичных пленок при упаковке сыпучих и жидких продуктов, повышение производительности процесса при одновременном уменьшении энергозатрат. Кроме того, ультразвуковая сварка позволяет обеспечить непрерывный контроль параметров процесса и оптимизацию энергетического и временного воздействия.

При герметизации пакета ультразвуковой сваркой формирование поперечного участка для выполнения шва осуществляют двумя поверхностями - прижимной планки и рабочего окончания ультразвуковой колебательной системы. Энергетическое воздействие на материал пакета осуществляют ультразвуковыми колебаниями с частотой 22...44 кГц и амплитудой от 20 до 150 мкм, в зависимости от толщины материала пакета, до перевода материала в вязкопластичное состояние. В процессе ультразвукового воздействия регистрируют параметр ультразвукового воздействия, характеризующий степень перехода

материала в вязкопластичное состояние. По величине этого параметра устанавливают время, необходимое и достаточное для формирования герметичного шва. При этом, ультразвуковую колебательную систему перемещают по направлению к прижимной планке до образования зазора, величину которого устанавливают равной толщине пленки пакета, уменьшают ультразвуковое воздействие и выдерживают без снижения усилия в сжатом состоянии соединяемые поверхности до перехода материала из вязкопластичного состояния и стабилизации герметизирующего шва [4]. Процесс формирования герметизирующего шва поясняется рисунком 1.

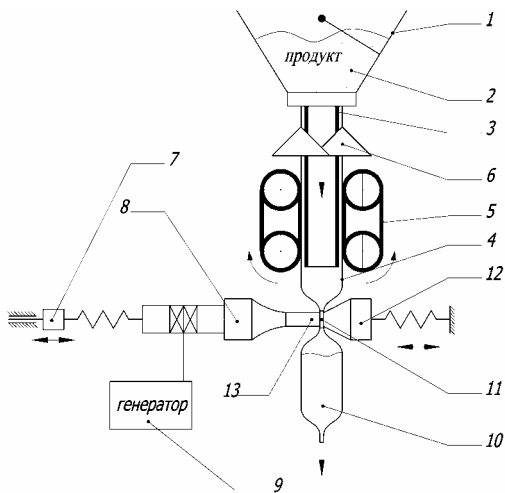


Рис. 1 – Схема формирования поперечного герметизирующего шва ультразвуковой сваркой

В верхней части упаковочной машины установлена загрузочная воронка 1 с устройством для регулирования количества поступающего продукта. Упаковываемый продукт 2 под действием силы тяжести и направляющей воронки 1 распределяется в специальную цилиндрическую емкость 3 (труба, формирующая рукав пленки). Относительно наружной поверхности трубы формируется рукав 4 из полимерной пленки. Формирование рукава осуществляется с помощью лентопротяжного механизма 5 и продольного термосварочного устройства 6. Перед поступлением дозы продукта, включаются приводы механизмов поперечной сварки 7, включающей ультразвуковую колебательную систему 8 и питающий ее электронный генератор 9. Механизм поперечной сварки обеспечивает сжатие пакета 10 на участке формирования шва 11 двумя поверхностями - прижимной планки 12 и рабочего окончания 13 ультразвуковой колебательной системы 8 до соприкосновения внутренних поверхностей стенок пакета друг с другом. После сжатия пакета электрические колебания ультразвуковой частоты от генератора 9 подаются на пьезоэлектрические элементы колебательной системы 8. Происходит преобразование электрических колебаний в механические ультразвуковые, они усиливаются концентрирующим устройством и вводятся в пленку пакета на участке формирования шва. Энергетическое

воздействие на материал пакета осуществляется ультразвуковыми колебаниями с амплитудой от 20 до 150 мкм, в зависимости от толщины пленки формируемого пакета до перевода материала в вязкопластичное состояние. Ультразвуковую колебательную систему при формировании шва перемещают по направлению к прижимной планке до образования зазора, величину которого устанавливают равной толщине стенки пакета в процессе ультразвукового воздействия.

При этом формируется нижний поперечный (горизонтальный) термический шов, т.е. герметизируется пластиковый пакет с упакованным продуктом. Нож отделяет порцию упакованного продукта (пакет с продуктом) и цикл повторяется [5].

Для практической реализации ультразвуковой герметизации пластиковых пакетов необходимо разработать специализированное оборудование.

Основной, не решенной до настоящего времени, технической проблемой, при практической реализации ультразвуковой сварки для герметизации всех типов упаковочных пакетов (шириной до 350мм) является создание колебательной системы с рабочим окончанием длиной 350...360 мм и шириной, достаточной для одновременного формирования двух швов (в герметизируемом и формируемом пакетах) за время, менее 1 секунды.

Кроме того, для практической реализации узла ультразвуковой сварки в составе упаковочных машин необходимо решить несколько технических задач, не реализовавшихся до настоящего времени:

- разработать узел крепления и узел прижима ультразвуковой колебательной системы. Узел крепления должен обеспечивать минимальное демпфирование ультразвуковой колебательной системы и возможность интегрирования в различные упаковочные машины. Узел прижима должен обеспечивать равномерный прижим пленки к поверхности рабочего инструмента с постоянным статическим давлением
- для обеспечения электрического питания колебательной системы необходимо разработать электронный блок- генератор ультразвуковых колебаний и блок автоматического управления, обеспечивающий работу электронного генератора в оптимальном режиме.
- для обеспечения эффективного ультразвукового воздействия определить оптимальные значения амплитуды колебаний и усилия прижима, а также разработать специализированную прижимную планку.

III. РАЗРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕССОВОЙ ШОВНО-ШАГОВОЙ СВАРКИ.

Основные усилия, при создании ультразвукового оборудования, были направлены на разработку специальной ультразвуковой колебательной системы, способной обеспечить формирование сварного шва длиной 360 мм и шириной не менее 12 мм для одновременного формирования двух швов.

Ультразвуковая колебательная система выполнена по двухполуволновой конструктивной схеме и объединяет два полуволновых пьезоэлектрических преобразователя и резонансный полуволновой концентратор

механических колебаний, имеющий рабочее окончание специальной формы [6]. (Рис.2.).



Рис.2. Ультразвуковая колебательная система для обеспечения сварного шва длиной 360мм.

Пьезоэлектрические преобразователи выполнены по конструктивной схеме преобразователя Ланжевена и состоят из последовательно размещенных и акустически связанных между собой резонансной отражающей накладки, пьезоэлектрических элементов и рабочей излучающей накладки. Отличительной особенностью разработанных преобразователей является смещение пьезоэлектрических элементов в сторону отражающей накладки относительно зоны максимальных механических напряжений и минимума механических колебаний. Это позволило повысить электроакустический коэффициент преобразования и выполнить узел крепления преобразователя на рабочей накладке в зоне минимума механических колебаний. Размещение узла крепления преобразователя в зоне минимальных ультразвуковых колебаний обеспечило минимальное демпфирование ультразвуковой колебательной системы при креплении в корпус и максимальную амплитуду колебаний излучающей поверхности рабочей накладки. Кроме того, наличие такого узла крепления позволило предложить специальную конструкцию защитных корпусов, на поверхности которых имеется фланцевое соединение для установки в различные типы упаковочных машин (рис.2) и исключающее передачу ультразвуковых колебаний на элементы упаковочной машины.

Концентратор ультразвуковых колебаний (рис.3,4.) имеет формирующую колебания (поверхность соединения с пьезоэлектрическими преобразователями) и излучающую поверхности прямоугольной формы одинакового продольного размера (длины), а отношение их поперечных размеров определяет коэффициент усиления концентратора. Для обеспечения максимального коэффициента усиления и уменьшения предельных механических напряжений концентратор выполнен по схеме полуволнового ступенчато – радиального концентратора.

Геометрические размеры концентратора выбраны из условия обеспечения максимального коэффициента усиления таким образом, что длины участков концентратора с различными поперечными размерами

и длина радиального перехода между ними соответствуют шестой части длины волны ультразвуковых колебаний в материале концентратора, причем размеры плавного перехода выбраны из условия

$$R = \frac{4L_z^2 + (D_1 - D_2)^2}{4(D_1 - D_2)}$$

где L_z – длина плавного перехода, D_1 и D_2 , поперечные размеры формирующей и излучающей поверхностей концентратора.

Размеры концентратора при проектировании колебательной системы выбраны из условия оптимального согласования с пьезоэлектрическими преобразователями по частоте при создании статического давления на рабочее окончание при осуществлении сварки.

Рабочее окончание концентратора (сварочный наконечник) имеет две плоские поверхности размером 360x5 мм для одновременного формирования двух швов и паз для перемещения ножа, отделяющего загерметизированный пакет при упаковке продуктов.

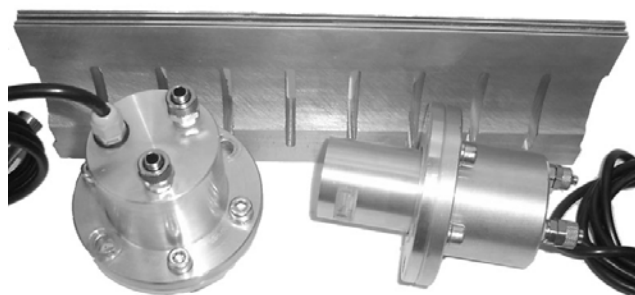


Рис.3. Рабочий сварочный инструмент ультразвуковой колебательной системы.

Для обеспечения необходимой величины и распределения амплитуды ультразвуковых колебаний вдоль излучающей поверхности концентратора было предложено и реализовано несколько новых технических решений, совместная реализация которых обеспечила необходимое и достаточное ультразвуковое воздействие:

- излучающая накладка преобразователя и концентратор выполнены из алюминия, а размеры излучающей поверхности пьезоэлектрических преобразователей и поперечный размер формирующей колебания поверхности концентратора имеют размер, соответствующий шестой части длины волны ультразвуковых колебаний в алюминии.

- для исключения паразитных деформаций излучающей поверхности, обусловленных упругими свойствами материала (коэффициентом Пуассона) в концентраторе выполнены сквозные пазы. Исследования влияния различных по форме и размерам пазов (рис.4) позволили установить, что максимальный эффект устранения паразитных колебаний, обусловленных деформациями всего концентратора, достигается при выполнении сквозных пазов шириной 5-6 мм через расстояния, равные шестой части длины волны ультразвуковых колебаний в материале концентратора.

- для возбуждения колебаний формирующей поверхности использованы два пьезоэлектрических преобразователя. В результате исследований было установлено оптимальное расположение пьезоэлектрических преобразователей на формирующей поверхности концентратора ультразвуковой колебательной системы, как представлено на рис.5.

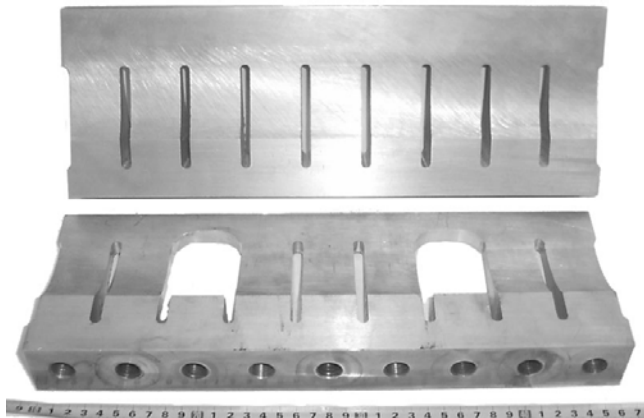


Рис.4. Концентратор ультразвуковой колебательной системы.

В результате проведенных исследований и практической реализации предложенных новых технических решений разработана ультразвуковая колебательная система, обеспечившая распределение амплитуды колебаний по поверхности рабочего инструмента, иллюстрируемое рис.4. Такое распределение амплитуды колебаний было выбрано в связи с необходимостью формирования надежного герметизирующего шва на четырех слоях пленки, расположенных по краям пакета и двух слоях по остальной части пакета. По этой причине краевые зоны рабочего окончания колебательной системы совершают колебания с амплитудой, равной 45 мкм. По всей остальной излучающей поверхности амплитуда колебаний остается практически постоянной и составляет на менее 30 мкм.

Для электрического питания пьезоэлектрической ультразвуковой колебательной системы был разработан и изготовлен электронный блок (рис.5.), включающий кроме генератора электрических колебаний ультразвукового диапазона блок контроля и автоматического управления процессом сварки. Для обеспечения работы электронного генератора в составе упаковочных машин предусмотрено управление генератором посредством интерфейса RS-232 с персонального компьютера.

Электронный генератор выполнен по схеме мостового инвертора и для автоматизации процесса сварки снабжен регулятором амплитуды колебаний излучающей поверхности колебательной системы и системой автоматического поддержания частоты генератора резонансной частоте колебательной системы при всех возможных изменениях температурных параметров ультразвуковой колебательной системы и свойств, свариваемых полимерных материалов в процессе получения сварного шва.

Функциональные возможности созданного электронного блока обеспечивают выбор времени ультразвуковой сварки и времени удержания свариваемых материалов, изменение уровня выходной мощности до 3500 Вт и амплитуды колебаний рабочего окончания колебательной системы до 45 мкм.

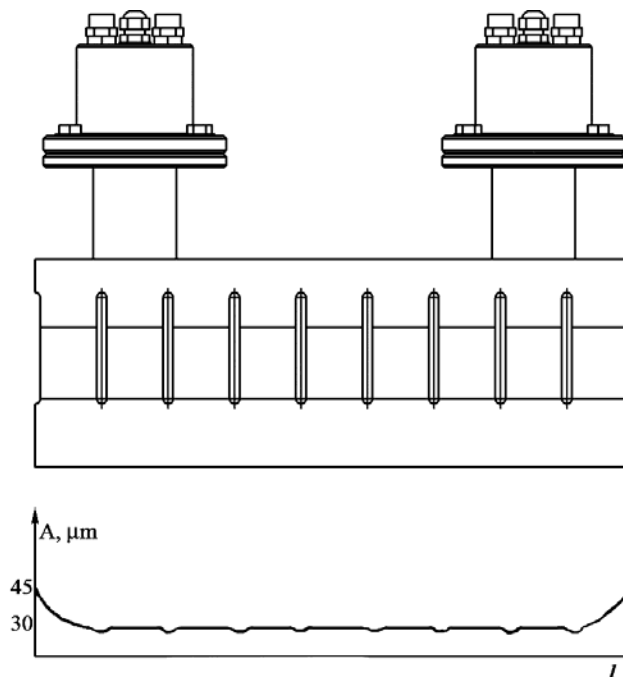


Рис.5. Распределение амплитуды колебаний по поверхности рабочего инструмента.

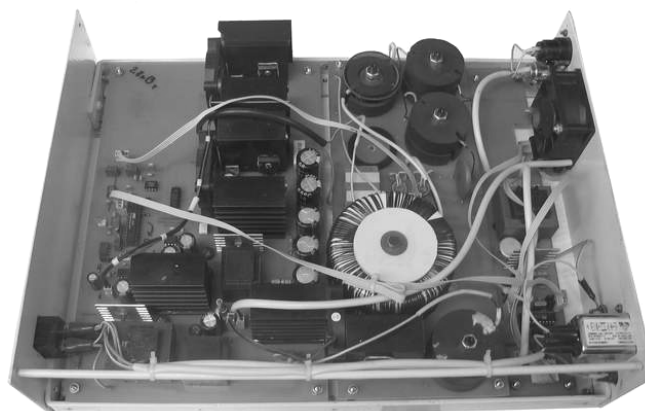


Рис.6. Электронный блок ультразвукового комплекса.

Технологический процесс герметизации упаковочных пакетов представлен на рис. 1 и рис. 6. Весь цикл получения соединения занимает от 0,5 до 1,0 секунды в зависимости от толщины и материала используемой для упаковки пленки.

Возможность создания герметизирующего шва обусловлена тем, что полимерный материал, применяемый для упаковки, характеризуется высоким поглощением энергии ультразвуковых колебаний, что обеспечивает быстрый перевод материала пленки в вязкопластичное состояние. Диффузионные процессы, протекающие под действием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности, обеспечивают взаимное проникновение материалов друг в друга при температурах меньших температуры плавления материала.

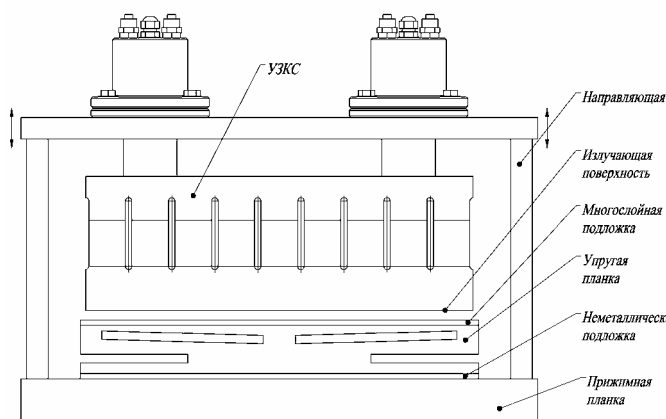


Рис. 7. Узел прижима.

Так как в процессе ультразвуковой сварки температура сварного шва ниже температуры плавления материала, свариваемые материалы не подвергаются термическому разложению с выделением вредных веществ, и обеспечивается качественное герметичное соединение.

Для создания одинаковых условий прижима вдоль всей излучающей поверхности колебательной системы была разработана и изготовлена специальная упругая прижимная планка, форма которой показана на Рис.8.

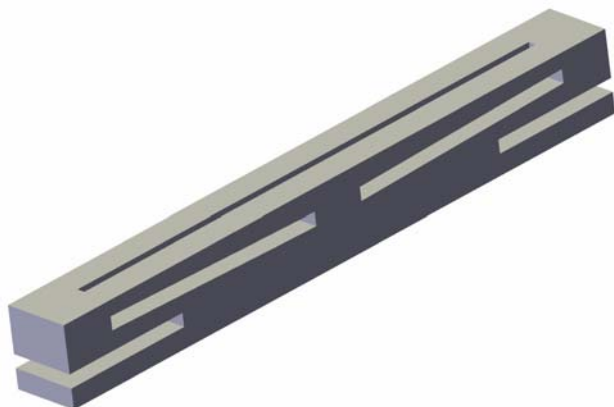


Рис.8. Упругая прижимная планка для компенсации неравномерного прижима.

Для увеличения поглощения энергии ультразвуковых колебаний в термопластичной пленке пакета применено поглощающее покрытие на поверхности прижимной планки, выполненное из нескольких слоев стеклоткани, покрытых слоем фторопласта, исключающего прилипание свариваемого материала к подложке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В результате проведенных исследований и разработок создано специализированное ультразвуковое оборудование для комплектации упаковочных машин, способное обеспечить при герметизации жидких и сыпучих пылящих продуктов формирование двойного поперечного герметизирующего шва протяженностью до 360 мм за время, менее 1 секунды.

При создании оборудования решены следующие технические задачи:

- разработана ультразвуковая колебательная система, состоящая из полуволновых пьезоэлектрического преобразователя и ступенчато – радиального концентратора, обеспечивающая достаточную для формирования герметизирующего шва амплитуду и ее распределение вдоль всей излучающей поверхности длиной 360 мм и шириной 12 мм;

- разработан узел крепления ультразвуковой колебательной системы, обеспечивающий минимальное демпфирование, исключающий передачу колебаний и возможность интегрирования в различные упаковочные машины;

- разработаны технические решения, позволившие создать узел сварки на основе специальной прижимной планки, создать исследовательский стенд (рис. 9) и определить технологические параметры и режимы сварки.

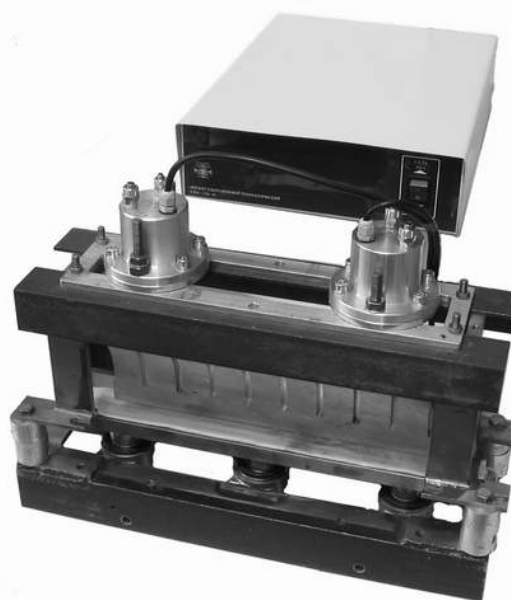


Рис.9. Исследовательский стенд ультразвуковой сварки.

ССЫЛКИ.

1. Холопов Ю. В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. Л., «Машиностроение», 1988.
2. Волков С.С., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком, М., Химия.
3. Патент РФ по заявке № 2004135854 Способ герметизации пластиковых пакетов при упаковке сыпучих и жидких продуктов
4. М.Е. Чернов. Упаковка сыпучих продуктов. М, ДЕЛИ, 2000.
5. Теумин И. И. Коэффициент полезного действия ультразвуковых концентраторов // Акустический журнал.- 1963.- Т.9, №2.-С.205-208.