

На правах рукописи

Сливин Алексей Николаевич

**СОЗДАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АППАРАТОВ
С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВАРКИ**

Специальность 05.03.06 – Технологии и машины сварочного производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бийск – 2008

Работа выполнена в Бийском технологическом институте (филиале)
государственного общеобразовательного учреждения высшего
профессионального образования «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Хмелев Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Первухин Леонид Борисович

кандидат технических наук,
Кравченко Сергей Васильевич

Ведущая организация: Федеральное государственное
унитарное предприятие «Федеральный
научно-производственный центр
«Алтай» (г. Бийск, Алтайский край)

Защита состоится 25 декабря 2008 года в 10 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.004.01 при Алтайском государственном
техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, Барнаул, пр.
Ленина, 46; факс: 8-(3852)-367-903

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные
гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя
ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «24» ноября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к. т. н., доцент

Ю.О. Шевцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Технология ультразвуковой сварки полимерных термопластичных материалов находит всё более широкое применение при создании новых видов изделий и упаковке жидких, пастообразных, порошкообразных и сыпучих материалов, производимых химической и смежными отраслями промышленности. Обусловлено это достоинствами ультразвукового (УЗ) способа сварки, основными из которых являются: возможность формирования сварного соединения по покрытой жидкими и твердыми веществами поверхности; возможность соединения различных материалов; возможность упаковки горючих и взрывоопасных материалов; простота реализации и возможность автоматизации процесса УЗ сварки.

Высокое качество (прочность и герметичность) сварного соединения реализуется только при условии точного дозирования (оптимизации) акустической энергии, вводимой в зону сварки. Поэтому при практической реализации ультразвуковой сварки широко используются различные способы дозирования акустической энергии. Эти способы основаны на установлении фиксированного времени УЗ воздействия при заданной амплитуде колебаний, или обеспечении определенного усилия прижима колебательной системы к свариваемому изделию при заданной рабочей частоте генератора, или установлении скорости перемещения сварочного инструмента колебательной системы, или ограничении пути перемещения сварочного инструмента (формировании зазора между опорой и колебательной системой).

Параметры УЗ воздействия, при которых в зону формирования шва вводится необходимое и достаточное количество энергии (т.е. обеспечивается формирование сварного соединения, характеризуемого максимальной прочностью), определяются в результате предварительных экспериментальных исследований при отработке технологии и остаются неизменными при реализации процесса сварки в производственных условиях.

Возможные и допустимые по техническим условиям изменения свойств соединяемых материалов, допустимые отклонения толщин соединяемых изделий от номинальных размеров, возможные изменения условий ввода колебаний, а также изменения электрических параметров УЗ сварочных аппаратов (генераторов и пьезоэлектрических систем) приводят к нарушению оптимальности УЗ воздействия и снижению качества сварных соединений.

Таким образом, применяемые в производственной практике УЗ сварочные аппараты не позволяют оптимизировать УЗ воздействие при формировании каждого шва, поскольку не способны отслеживать и учитывать возможные изменения параметров соединяемых изделий и свойств материалов и осуществлять оперативное изменение параметров УЗ воздействия в процессе формирования шва.

В связи с этим возникает необходимость в создании ультразвуковых сварочных аппаратов, способных на основании непрерывного контроля свойств свариваемых материалов и автоматического регулирования параметров электронных генераторов в процессе формирования каждого сварного шва обеспечивать оптимальное ультразвуковое воздействие для обеспечения

максимальной прочности при допустимых отклонениях свойств материалов и изделий.

Целью исследования является повышение качества сварного соединения полимерных термопластичных материалов путем создания новых ультразвуковых сварочных аппаратов, обеспечивающих в процессе сварки автоматическое установление и поддержание оптимального УЗ воздействия на основании непрерывного контроля изменяющихся свойств материалов в зоне формирования сварного шва.

Задачи исследований:

- определение условий оптимальности УЗ воздействия и выявление критериев установления и поддержания оптимальных энергетических и временных параметров для обеспечения максимальной прочности сварного соединения;
- теоретический анализ энергетических процессов, происходящих при формировании сварного соединения для определения параметров и технологических режимов сварочных аппаратов (электронных генераторов и УЗ пьезоэлектрических колебательных систем) для обеспечения оптимального УЗ воздействия;
- теоретический анализ процессов, происходящих в пьезоэлектрической колебательной системе и электронном генераторе в ходе формирования сварного соединения при УЗ сварке для выявления зависимостей контролируемых электрических параметров сварочного УЗ аппарата от изменения свойств материала формируемого сварного соединения;
- создание системы непрерывного контроля свойств соединяемых материалов при УЗ сварке и управление энергетическими и временными параметрами электронных генераторов для установления оптимального УЗ воздействия;
- разработка и создание сварочных УЗ аппаратов (электронных генераторов, УЗ пьезоэлектрических колебательных систем), обеспечивающих в процессе сварки автоматическое установление и поддержание оптимального УЗ воздействия;
- исследования качества и прочности формируемого сварного соединения для подтверждения эффективности созданных сварочных УЗ аппаратов.

Объектами исследований являются сварочные УЗ аппараты, обеспечивающие автоматическое установление и поддержание оптимального УЗ воздействия в процессе сварки, на основе непрерывного контроля изменяющихся при сварке свойств соединяемых материалов путем измерения электрических параметров пьезоэлектрических колебательных систем.

Научная новизна:

- теоретически установлены параметры оптимального УЗ воздействия и предельные диапазоны регулирования сварочных аппаратов при формировании сварного соединения на основании выявленных зависимостей времени формирования от энергетических параметров электронного генератора, площади акустического контакта сварочного инструмента УЗ колебательной системы, толщины, свойств свариваемых материалов и материалов подложки;
- разработана система контроля свойств соединяемых материалов в процессе УЗ сварки и управления энергетическими и временными параметрами электронных генераторов для установления оптимального УЗ воздействия за счет

непрерывного измерения электрических параметров пьезоэлектрических колебательных систем;

– новые схемные и конструктивные решения сварочных УЗ аппаратов, пьезоэлектрических УЗ колебательных систем, характеризующихся повышенным КПД и чувствительностью к изменению параметров свариваемых сред полимерных термопластичных материалов;

Практическая значимость:

– разработаны отдельные узлы и элементы сварочных УЗ аппаратов, обеспечивающие непрерывный контроль, измерение свойств свариваемых материалов и оптимизацию УЗ воздействия при всех возможных изменениях контролируемых параметров;

– разработаны УЗ сварочные аппараты, обеспечивающие повышение эффективности технологического процесса сварки, качества и прочности сварного соединения полимерных материалов за счет непрерывного контроля параметров пьезоэлектрической УЗКС в результате изменения свойств материалов и установления оптимального УЗ воздействия.

Реализация работы. Результаты работы использованы при разработке, создании конструкторской документации и УЗ технологического оборудования для сварки полимерных термопластичных материалов и нашли промышленное применение на предприятиях РФ, таких как ФГУП НМЗ «Искра» (г. Новосибирск), ФГУП «Производственное объединение Златоустовский машиностроительный завод» (г. Златоуст), ФГУП «Центр Келдыша» (г. Москва), ГУЗ «Алтайская краевая станция переливания крови», «Новосибирская ОСПК», ОГУП «Челябинская ОСПК», ГУЗ «Кемеровская ОСПК», ГУЗ СПК (г. Междуреченск), Бийская станция переливания крови, ОАО «Муромец» Муромский электромеханический завод (г. Муром), ОАО «Биофизическая аппаратура» (г. Москва), ООО «М-Компас» (г. Москва), ООО «ПК Технотрон» (г. Набережные Челны), ООО «Птицефабрика Уссурийская» (г. Уссурийск), ЗАО «Уралпромснаб» (г. Челябинск), ООО «Уралполимериндустрия» (г. Уфа), Торгово-промышленная группа «Альт-А» (г. Новосибирск), ОАО «Бифин» (г. Кемерово), «Птицефабрика Свердловская» (г. Екатеринбург).

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на I Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Материалы и технологии XXI века» в 2001 г. (г. Москва), всероссийских научно-практических конференциях «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП)» в 2002, 2003, 2004 гг. (г. Бийск), Второй международной научно-технической конференции «Технологическая системотехника – 2003» (Тульский государственный университет), Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2002-2008 (Novosibirsk).

Положения, выносимые на защиту:

– новый способ установления и поддержания в процессе формирования сварного соединения условий оптимального УЗ воздействия, обеспечивающего соединение полимерных термопластичных материалов с максимальной прочностью;

- возможность и эффективность измерения электрических параметров УЗ колебательных систем для контроля изменений, происходящих в зоне сварки полимерных материалов в процессе формирования сварного соединения;
- методика определения предельных диапазонов необходимой перестройки электронного генератора для обеспечения оптимального УЗ воздействия в процессе формирования сварного соединения;
- новые способы сварки различных материалов и изделий, такие как способ герметизации и способ управления герметизацией пластиковых контейнеров для хранения и переработки крови, способ герметизации картриджей для очистки воды, устройство ультразвуковой герметизации и сегментации трансфузионных систем, способ герметизации пластиковых пакетов при упаковке сыпучих и жидких продуктов, способ изготовления решетки с ячеистой структурой для укрепления грунтовых поверхностей;
- новые схемные и конструктивные решения построения электронных генераторов, УЗ пьезоэлектрических колебательных систем, рабочих инструментов, позволившие создать серию специализированных УЗ сварочных аппаратов, обеспечивающих формирование с максимальной прочностью сварных швов различных конфигураций, непрерывных, прерывистых, кольцевых, специальной формы.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 38 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах из списка, рекомендованного ВАК, 7 патентов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и результатов, списка использованных источников из 125 наименований; содержит 181 страницу машинописного текста, 74 рисунка, 3 таблицы, 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, научная и практическая значимость, сформулированы цель работы и ее научная новизна, изложены основные, выносимые на защиту положения, приведена краткая характеристика работы.

В первой главе проводится анализ состояния существующих технологий и оборудования для УЗ сварки полимерных термопластичных материалов. В первом подразделе главы рассматривается технологический процесс формирования сварного соединения, реализуемый с помощью УЗ колебаний высокой интенсивности.

Отмечается большой вклад в исследования и развитие способов УЗ сварки отечественных и зарубежных ученых Б.Е. Патона, Г.А. Николаева, Н.А. Ольшанского, А.В. Мордвинцевой, И.В. Мозгового, Ю.В. Холопова, К.И. Зайцева, Л.Н. Мацюка, С.С. Волкова, Б.Я. Черняка, А.Н. Шестопала, Э. Миллера, А. Ноймана. Показывается, что основным источником энергии, необходимой для изменения состояния свойств свариваемых материалов и перехода их в вязкотекучее состояние, является УЗ энергия, выделяемая в зоне формирования сварного соединения. В результате анализа установлено, что на качество и прочность формируемого сварного соединения влияет количество выделяемой в зоне сварки УЗ энергии, зависящее от акустических, отражающих и поглощающих свойств свариваемых материалов, их толщины, амплитуды и

частоты УЗ колебаний, площади акустического контакта и времени УЗ воздействия.

Во второй части первой главы проводится анализ различных способов дозирования УЗ энергии, направленных на оптимизацию УЗ воздействия в процессе сварки термопластичных материалов, и выявляются их недостатки. Существующие способы позволяют дозировать УЗ энергию и прекращать в определенный момент УЗ воздействие по ряду критериев: по времени, по изменению деформации и амплитуды колебаний с использованием внешних датчиков. При этом способы дозирования не позволяют производить непрерывный контроль свойств материалов в процессе сварки и не позволяют на основании контроля автоматически устанавливать оптимальное УЗ воздействие.

В третьей части первой главы проводится сравнительный анализ УЗ сварочного оборудования, используемого на практике и создаваемого в лабораториях отечественных и зарубежных производителей. К отечественным производителям можно отнести ООО «Ультразвуковая техника – ИНЛАБ» (г. Санкт-Петербург), группа компаний «Ультра-фильтр» (г. Москва), фирма «Мэлфиз» (г. Москва), ООО «Путек» (Украина). Ведущими зарубежными производителями УЗ оборудования для сварки полимерных термопластичных материалов являются Ever Green (Тайвань), Baysonic (Турция), Decou (США), Dukane (США), Sonics (Италия), Sonic Italia, Telsonic ultrasonic (Германия), Sonobond Ultrasonics (Германия), Sonotronic (Германия), Hermann Ultrashell Technick (Германия). Установлено, что УЗ сварочное оборудование изготавливается разработчиками в портативном либо в стационарном варианте. Для проведения сварки в портативном оборудовании осуществляется предварительный выбор параметров сварки, таких как время УЗ воздействия и амплитуда колебаний. Встроенные системы автоматической стабилизации амплитуды и частоты колебаний позволяют стабилизировать и вводить в зону формирования сварного соединения постоянное количество УЗ энергии. Однако любое изменение в процессе сварки температуры колебательной системы и сварочного наконечника, возможное изменение давления прижима, изменение акустического контакта, изменение конфигурации, свойств или толщины свариваемых материалов приводит к дестабилизации процесса сварки и к неповторяемости формирования сварного соединения. Происходит образование непроваров, следов деструкции полимеров, снижается прочность сварного соединения, ухудшается эстетичный внешний вид изделия.

Эти недостатки частично устраняются при реализации в полуавтоматическом и автоматическом УЗ оборудовании систем компенсации и стабилизации давления прижима, систем учета температуры, при нагреве сварочных наконечников и колебательных систем. Реализуемые при этом в УЗ полуавтоматическом и автоматическом оборудовании способы дозирования УЗ энергии не обеспечивают необходимого качества и прочности сварного соединения, не позволяют непрерывно контролировать в процессе сварки изменение свойств свариваемых материалов, что не позволяет определять момент образования сварного соединения и устанавливать оптимальные параметры УЗ воздействия на основании контролируемых изменений.

Установлено, что критерием формирования сварного соединения необходимо считать изменение свойств свариваемых материалов в зоне их соединения и сварки, в результате их размягчения, перехода материалов в вязкотекучее состояние и уплотнения, под воздействием ультразвуковых колебаний. Для решения этой задачи необходимо производить непрерывный контроль изменяющихся свойств технологической среды свариваемых материалов в процессе сварки. При помощи внешних датчиков невозможно производить контроль свойств свариваемых материалов, поэтому необходимо использовать свойства чувствительности УЗКС к изменению нагрузки и акустического сопротивления среды свариваемых материалов. Таким образом, на основании найденных недостатков ставится задача в оптимизации УЗ воздействия на свариваемые материалы в процессе сварки на основании непрерывного в процессе сварки контроля изменяющихся свойств свариваемых материалов.

В завершении первой главы сформулирована цель работы и поставлены задачи исследований на основе проведенного анализа.

Вторая глава посвящена теоретическому анализу энергетических процессов, происходящих в зоне сварки под воздействием УЗ колебаний, и установлению технологических режимов сварочных аппаратов, электронных генераторов и УЗ пьезоэлектрических колебательных систем для обеспечения оптимального УЗ воздействия с учетом влияющих факторов и параметров, таких как акустические и термодинамические свойства материалов, их толщина, площадь акустического контакта, свойства материала подложки. На рисунке 1 представлена схема процесса УЗ сварки.

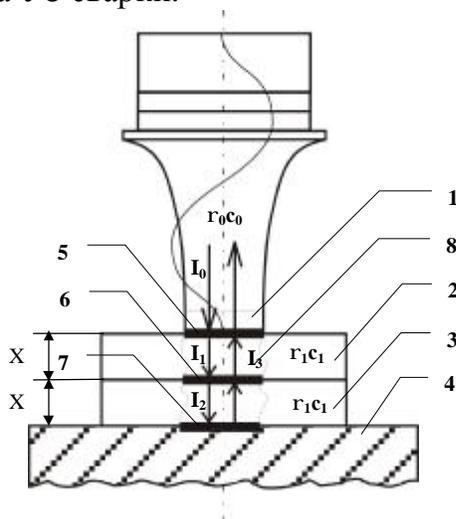


Рисунок 1 – Схема процесса УЗ сварки термопластов:

1 – сварочный инструмент, 2,3 – свариваемые материалы, 4 – опора, 5,6,7 – границы раздела сред, 8 – зона сварки

Свариваемые материалы 2 и 3, характеризующиеся акустическим импедансом $Z_1 = r_1 c_1$ и имеющие толщину X каждый, ограничены с одной стороны рабочим сварочным инструментом 1 УЗКС с акустическим импедансом $Z_0 = r_0 c_0$, с другой стороны опорой 4 с акустическим импедансом $Z_2 = r_2 c_2$, к которой осуществляется прижим свариваемых материалов посредством рабочего сварочного инструмента УЗКС под давлением P . Зоне поглощения УЗ колебаний,

тепловыделения и формирования сварного соединения будет соответствовать область 8 в объеме свариваемых материалов, ограниченном площадью поверхности S и толщиной материалов $2X$. УЗ колебания, формируемые и усиливаемые колебательной системой, вводятся на границу раздела сред сварочного инструмента УЗКС и свариваемых материалов 5. Интенсивность УЗ колебаний формируется на излучающей поверхности УЗКС, которую можно представить, как

$$I_0 = 2p^2 f^2 A_0^2 r_0 c_0 \quad (1)$$

Учитывая, что при УЗ сварке обеспечивается полный акустический контакт сварочного УЗКС и свариваемых материалов, на границе раздела 5 происходит отражение УЗ волны, а часть УЗ колебаний проходит через границу в свариваемый материал 2. При этом можно определить коэффициент отражения h_1 и коэффициент прохождения d волны на границе раздела сред.

$$h_1 = \left(\frac{r_0 c_0 - r_1 c_1}{r_0 c_0 + r_1 c_1} \right)^2 \quad (2)$$

$$d = 1 - h_1 \quad (3)$$

Тогда, в термопластичный материал 2 с акустическим импедансом $r_1 c_1$, будет введена волна, интенсивностью

$$I_1 = 2p^2 f^2 A_0^2 r_0 c_0 \left(1 - \left(\frac{r_0 c_0 - r_1 c_1}{r_0 c_0 + r_1 c_1} \right)^2 \right). \quad (4)$$

Энергию диссипации, то есть энергию, поглощаемую термопластичным материалом 2 с акустическим импедансом $r_1 c_1$, при прохождении УЗ колебаний, можно рассчитать следующим образом:

$$W_I = (I_1 - I_1 e^{-2ax}) S, \quad (5)$$

где a – коэффициент затухания по амплитуде, $I_1 e^{-2ax}$ – интенсивность УЗ колебаний на границе раздела 6, где $2x$ – путь, пройденный отраженной волной. Так как для образования сварного соединения, обеспечения прохождения через границу свариваемых материалов как можно большей энергии УЗ колебаний необходимо обеспечить полный акустический контакт, то границу 6 мы представляем акустически прозрачной и коэффициент прохождения d будет равен 1. Тогда интенсивность УЗ колебаний, поглощаемых в материале 3 можно рассчитать как

$$I_2 = I_1 e^{-2ax} - I_1 e^{-4ax}. \quad (6)$$

Энергию волны, отраженной от границы и опоры 4, также необходимо учесть для определения энергии, поглощаемой материалом 3. Тогда можно найти коэффициент отражения h_2 и рассчитать интенсивность отраженной от границы 7 волны.

$$h_2 = \left(\frac{r_1 c_1 - r_2 c_2}{r_1 c_1 + r_2 c_2} \right)^2, \quad (7)$$

$$I_{21} = h_2 I_1 e^{-4ax}. \quad (8)$$

С учетом энергии отраженной волны можно рассчитать интенсивность отраженной энергии, поглощаемой свариваемыми материалами в зоне сварки.

$$I_{22} = h_2 I_1 e^{-4ax} - h_2 I_1 e^{-8ax}. \quad (9)$$

Тогда интенсивность УЗ колебаний и энергия, поглощаемая в материале 3, с учетом энергии отраженной волны рассчитывается следующим образом

$$I_2 = I_1 e^{-2ax} - I_1 e^{-4ax} + h_2 I_1 e^{-4ax} - h_2 I_1 e^{-8ax}, \quad (10)$$

$$W_2 = I_2 S. \quad (11)$$

На основании (5), (10), (11) можно определить суммарную энергию, поглощаемую средой 8 термопластичных материалов, в процессе УЗ сварки.

$$W = I_1 (1 - e^{-4ax} + h_2 e^{-4ax} - h_2 I_1 e^{-8ax}) S. \quad (12)$$

Подставив интенсивность УЗ колебаний в средах с учетом различных акустических импедансов, коэффициентов отражения, подставим выражение (4) в (12), после чего получим скорость диссипации энергии УЗ колебаний или мгновенную скорость тепловыделения в свариваемых материалах:

$$W = 2p^2 f^2 A_0^2 S r_0 c_0 (1 - h_1) (1 - e^{-4ax} + h_2 e^{-4ax} - h_2 e^{-8ax}) \quad (13)$$

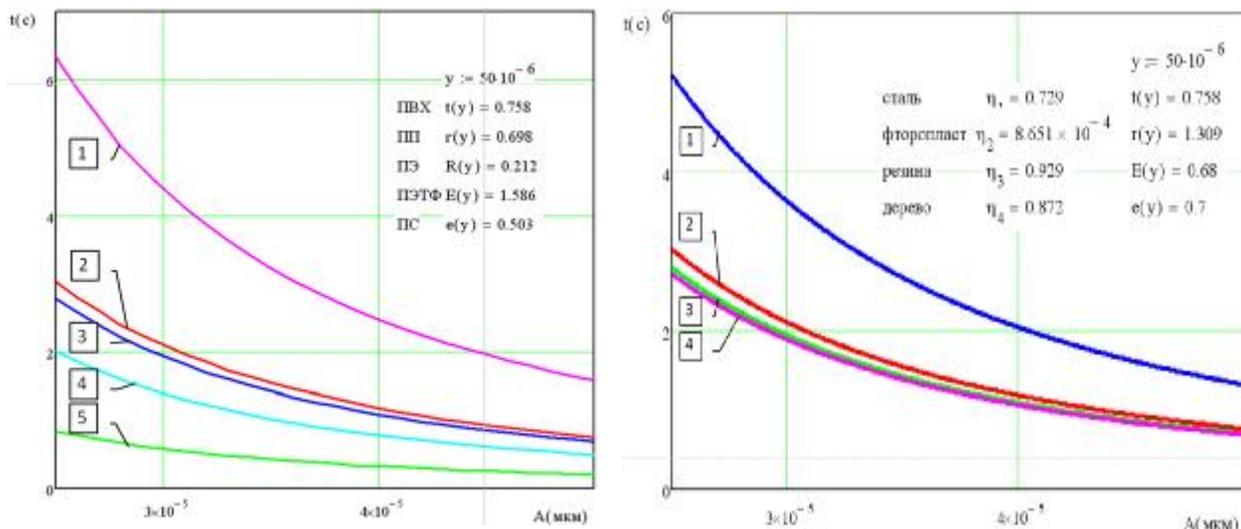
Полученное выражение позволяет установить зависимость времени УЗ воздействия для формирования сварного соединения от энергии УЗ колебаний, рассеиваемой в зоне сварки, и значения энергий, необходимых для нагрева материала до температуры плавления и энергии, которая потребуется на плавление определенного объема материала.

$$t = \frac{r_1 V_1 \int_{T_{nn}}^{T_{nn}} C dT + I r_1 V_2 + Q_3}{2p^2 f^2 A_0^2 S r_0 c_0 (1 - h_1) (1 - e^{-4ax} + h_2 e^{-4ax} - h_2 e^{-8ax})}. \quad (14)$$

Выражение (14) отражает основные закономерности, показывающие зависимость времени УЗ сварки от других параметров (амплитуда и частота УЗ колебаний, геометрические размеры, такие как площадь и толщина формируемого сварного соединения, акустические и термодинамические свойства материалов, плотность, скорость звука с учетом отражения и поглощения УЗ энергии и т.д.). Значение величины Q_3 характеризует некоторые потери тепла из зоны сварки.

На рисунке 2а представлена зависимость времени УЗ воздействия от амплитуды колебаний рабочего сварочного инструмента для различных по свойствам полимерных термопластичных материалов. Полученные зависимости были определены для поливинилхлорида, полипропилена, полиэтилена, полиэтилентерефталата, полистирола с учетом их акустических свойств. Все расчеты были произведены для листовых материалов толщиной 0,8 мм, и площади сварочного инструмента УЗКС 75 мм². На рисунке представлены также оптимальные значения времени УЗ воздействия для материалов при амплитуде колебаний 50 мкм. Из построенного графика видно, что при увеличении амплитуды время УЗ воздействия необходимо уменьшить. Это объясняется тем, что при увеличении амплитуды колебаний значительно возрастает скорость диссипации энергии в материале. На рисунке 2б представлены зависимости времени формирования сварного соединения от амплитуды колебаний рабочего сварочного инструмента для поливинилхлорида при использовании различных

материалов подложки. Как следствие наибольшего выделения в свариваемых материалах УЗ энергии за счет отражения от границы раздела свариваемых материалов и подложки установлены минимальные интервалы времени формирования сварного соединения при использовании подложки из резины, значение коэффициента отражения для которой составило 0,929.



- а) – для разных по свойствам полимерных термопластичных материалов:
 1 – полиэтилентерефталат,
 2 – поливинилхлорид, 3 – полипропилен,
 4 – полистирол, 5 – полиэтилен

- б) – для ПВХ при использовании различных материалов подложки:
 1 – фторопласт, 2 – сталь, 3 – дерево,
 4 – резина

Рисунок 2 – Зависимость времени УЗ воздействия от амплитуды колебаний рабочего сварочного инструмента

На графике рисунка 3 представлены зависимости времени сварки от площади акустического контакта сварочного инструмента и свариваемых материалов. Также представлены значения оптимального времени УЗ воздействия при обеспечении полного акустического контакта и максимальной площади контакта сварочного инструмента УЗКС и материалов, равной $75 \cdot 10^{-6}$ м.

При уменьшении площади акустического контакта в свариваемые материалы вводится меньшее количество УЗ энергии, величина времени УЗ воздействия для формирования соединения увеличивается. На рисунке 4 представлены зависимости времени сварки от толщины различных по свойствам свариваемых материалов.

Из полученных зависимостей следует, что с увеличением толщины материалов амплитуда УЗ колебаний и интенсивность энергии уменьшается тем сильнее, чем больше толщина свариваемых материалов.

Таким образом, все перечисленные выше параметры: амплитуда, площадь акустического контакта, акустические и термодинамические свойства и толщина свариваемых материалов, свойства материалов подложки – влияют на величину энергии УЗ колебаний, выделяющейся в зоне сварки. Полученные теоретические закономерности позволяют определить технологические режимы сварочных аппаратов, электронных генераторов и УЗ пьезоэлектрических колебательных систем для обеспечения оптимального УЗ воздействия при различных условиях.

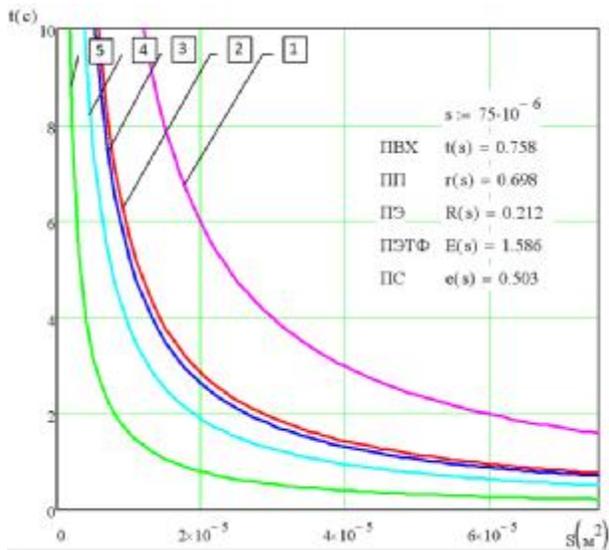


Рисунок 3 – Зависимость времени УЗ воздействия от изменения площади акустического контакта:

- 1 – полиэтилентерефталат,
- 2 – поливинилхлорид, 3 – полипропилен,
- 4 – полистирол, 5 – полиэтилен

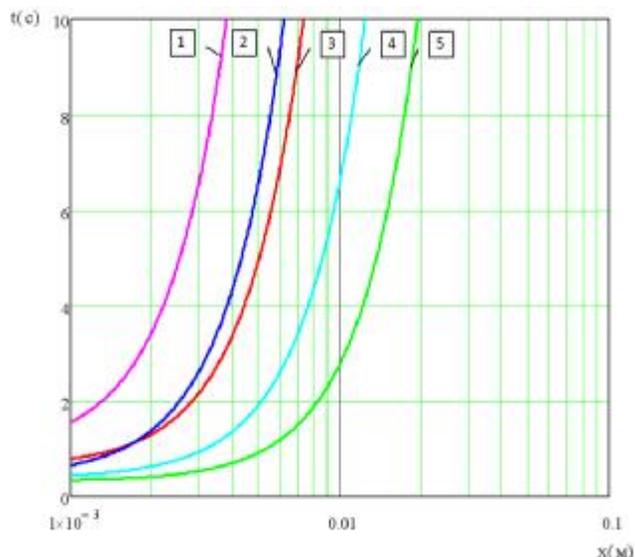


Рисунок 4 – Зависимость времени УЗ воздействия от толщины различных по свойствам материалов:

- 1 – полиэтилентерефталат,
- 2 – полипропилен, 3 – поливинилхлорид,
- 4 – полистирол, 5 – полиэтилен

Для точного дозирования подводимой энергии колебаний необходимо автоматически управлять процессом УЗ сварки при помощи устройств, осуществляющих непрерывный контроль изменяющихся в процессе сварки свойств свариваемых материалов и электрических параметров УЗКС.

Затем, в зависимости от изменяющихся свойств свариваемых материалов, необходимо производить регулирование амплитуды УЗ колебаний, поглощаемых в зоне сварки, автоматическое включение и выключение УЗ колебаний в необходимый момент времени для обеспечения оптимального УЗ воздействия.

Вторая часть главы посвящена поиску критерия автоматического установления формирования сварного соединения в зависимости от изменения электрических параметров УЗКС, свойств и волнового сопротивления свариваемых материалов.

Было установлено, что для автоматического установления момента формирования сварного соединения и автоматического прекращения УЗ воздействия необходимо контролировать изменяющиеся во времени свойства и волновое сопротивление свариваемых материалов (среды) и осуществлять измерение электрических параметров напряжения и тока УЗКС. Таким образом, сама УЗКС выступает в качестве датчика изменяющихся в процессе сварки параметров термопластичных материалов.

Для выявления зависимости электрических параметров УЗКС от изменения свойств свариваемых материалов проанализируем физическую эквивалентную схему УЗКС на основе пьезоэлектрических элементов, показанную на рисунке 5а.

Ветвь, содержащая последовательно установленные индуктивность L_m , конденсатор с электрической емкостью C_m и резистор с номинальным сопротивлением R_m , является эквивалентной электрической схемой механической колебательной системы. Элементы L_m и C_m имитируют массу и

упругость материала колебательной системы соответственно. Элемент (резистор) с номинальным сопротивлением R_m характеризует потери энергии в материале колебательной системы и сопротивление излучению УЗ колебаний в обрабатываемую среду. Сопротивление R_m включает волновое сопротивление и потери в материале УЗКС и пропорционально волновому сопротивлению среды с коэффициентом пропорциональности M .

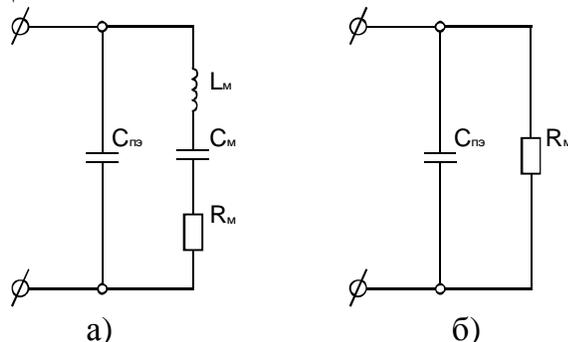


Рисунок 5 – а) Физическая эквивалентная схема УЗКС
б) физическая эквивалентная схема УЗКС на резонансной частоте

Коэффициент пропорциональности зависит от конструкции колебательной системы (коэффициента усиления) и площади излучающей поверхности. Элемент (конденсатор с электрической емкостью) $C_{пз}$ соответствует собственной электрической емкости пьезокерамических элементов, входящих в состав пьезокерамического преобразователя.

В общем случае волновое сопротивление среды состоит из двух составляющих – действительной и мнимой частей. Действительная часть характеризует амплитуду УЗ колебаний и в рассматриваемом способе является информативным параметром. Мнимая часть характеризует изменения резонансной частоты электроакустического преобразователя и в модели колебательной системы может быть представлена в виде «добавок» к номинальным значениям элементов L_m и C_m .

Работа колебательной системы имеет смысл только при соответствии рабочей частоты генератора собственной механической частоте колебательной системы. На резонансной частоте колебательной системы, т.е. на собственной частоте колебательного контура, состоящего из элементов L_m и C_m , их сопротивление уменьшается до нуля. Для исключения влияния мнимой части волнового сопротивления среды необходимо наличие системы автоматической подстройки частоты, обеспечивающей постоянную работу системы на частоте механического резонанса. Следовательно, эквивалентная схема колебательной системы может быть представлена в виде, показанном рисунке 5б.

Из эквивалентной схемы на рисунке 5б следует, что на частоте механического резонанса УЗКС возможно измерять только действительную часть волнового сопротивления и для этого необходимо измерять ток, протекающий через сопротивление излучению колебательной системы R_m , и регистрировать падение напряжения на нем. Так как необходимо контролировать зависимость изменения волнового сопротивления среды от напряжения питания колебательной системы, а не измерять его точное численное значение, то нет необходимости в определении коэффициента пропорциональности M для

установления точного соотношения между сопротивлением излучению и волновым сопротивлением среды. Кривые, представленные на рисунке 6, показывают изменения тока, протекающего через пьезоэлектрические элементы УЗКС, при различном изменении свойств нагрузки.

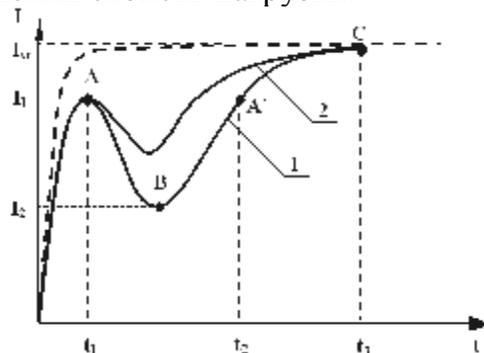


Рисунок 6 – Зависимость амплитуды тока, протекающего через пьезокерамические элементы УЗКС в процессе формирования сварного шва

Пунктирная кривая показывает отсутствие изменений в материалах и УЗ воздействия на свариваемые материалы (излучение в воздух). Из представленных на рисунке зависимостей видно, что при отсутствии процесса сварки значение тока равно $I_{ХС}$ на протяжении всего времени УЗ воздействия не изменяется. Сплошные кривые иллюстрируют изменение величины тока (и соответственно амплитуды механических колебаний), протекающего через пьезокерамические элементы излучателя во время сварки двух полимерных материалов между собой.

Такое изменение тока в процессе формирования шва связано с изменяющимися свойствами материала в зоне сварки (размягчение материала, переход в вязкопластичное и далее в вязкотекучее состояние).

Точка А (кривая 1) соответствует началу УЗ воздействия. Величина тока I_1 в точке А меньше величины тока $I_{ХС}$, что связано с начальным демпфированием УЗКС прижатым к ней материалом. Чем больше сила начального статического давления на свариваемый материал, тем меньше начальный ток сварки. Уменьшение тока на участке АВ обусловлено размягчением полимерного материала, улучшением акустического контакта излучающей поверхности колебательной системы с ним и, как следствие, снижением добротности УЗКС. Уменьшение тока продолжается до значения I_2 (точка В), что соответствует моменту максимального демпфирования излучателя. Участок ВС соответствует переходу материала из вязкопластичного в вязкотекучее состояние. Излишки расплавленного материала начинают выдавливаться из зоны сварки, что изменяет (уменьшает) статическое давление на УЗКС и увеличивает его добротность. Именно на этом участке лежит точка, соответствующая оптимальному качеству шва.

Как следует из предложенного критерия формирования сварного соединения при УЗ сварке, в ходе сварки необходимо осуществлять непрерывный контроль тока, протекающего через пьезоэлектрические элементы УЗКС, при условии обеспечения её резонансного режима, с целью определения изменения волнового сопротивления сред свариваемых материалов.

Третья глава посвящена проведению экспериментальных исследований в ходе формирования сварного соединения, экспериментальным измерениям и непрерывному контролю электрических параметров УЗКС в результате изменения свойств материалов в процессе сварки. Цель – разработка устройств для непрерывного контроля изменяющихся свойств свариваемых материалов в процессе формирования сварного соединения и проведение экспериментальных исследований в процессе УЗ сварки.

Первая часть третьей главы посвящена разработке устройства и методики для непрерывного контроля свойств свариваемых материалов в процессе сварки, учитывающей влияние изменения сред свариваемых материалов на электрические параметры УЗКС.

Методика предусматривает измерение электрических параметров УЗКС, таких как электрический ток и напряжение, выделение составляющей тока, протекающей через механическую ветвь УЗКС, с последующим расчетом изменения нагрузки и волнового сопротивления материалов на основании полученных данных.

Для обеспечения непрерывного контроля напряжения, тока, нагрузки на УЗКС в результате изменения свойств свариваемых материалов в процессе сварки разработана система непрерывного контроля свойств свариваемых материалов и автоматического установления оптимального УЗ воздействия (рисунок 7).

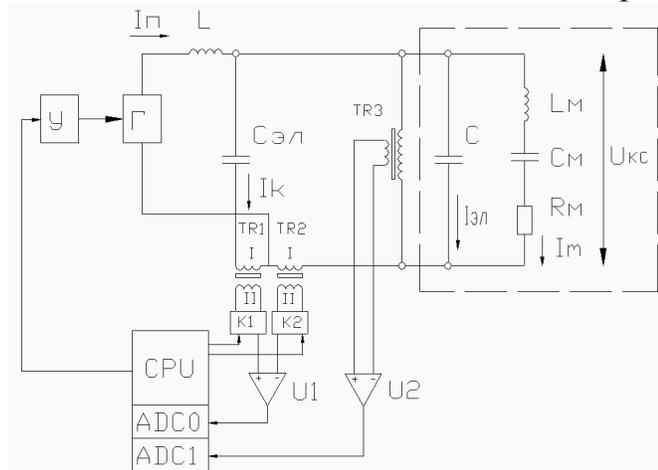


Рисунок 7 – Система непрерывного контроля свойств материалов и установления оптимального УЗ воздействия

Представленная схема состоит из двух блоков: блока измерения амплитудного значения тока, протекающего в механической ветви L_m , C_m , R_m , и блока измерения амплитуды напряжения на колебательной системе.

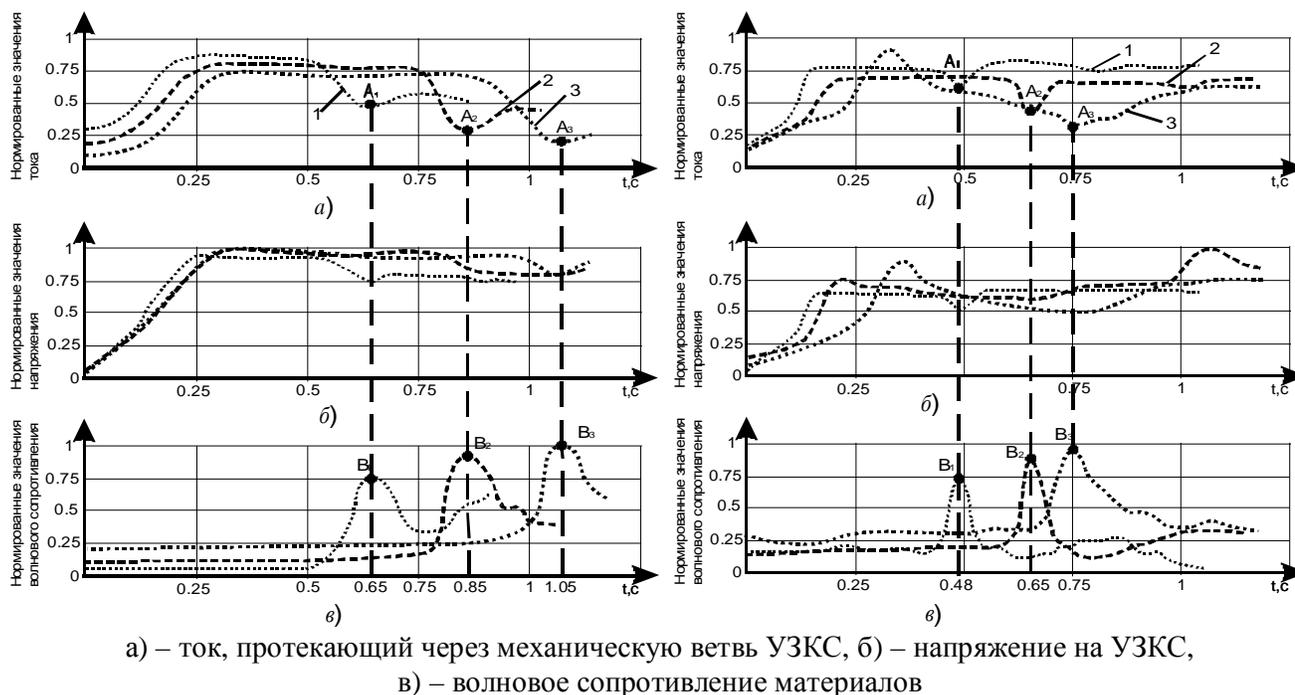
На основе полученных данных от блока измерения амплитудного значения тока и блока измерения амплитудного значения напряжения на колебательной системе блок микропроцессора CPU позволяет контролировать изменения свойств и волнового сопротивления свариваемых материалов и вырабатывать соответствующее управляющее воздействие для обеспечения оптимального УЗ воздействия генератора.

Блок микропроцессора позволяет поддерживать работу генератора в оптимальном резонансном режиме при обеспечении необходимой амплитуды УЗ

колебаний, частоты УЗ колебаний, в течение интервала времени, устанавливаемого автоматически.

Вторая часть третьей главы посвящена экспериментальным исследованиям, которые заключались в УЗ воздействии на различные по свойствам материалы, такие как полиэтилен, поливинилхлорид, полипропилен, полиэтилентерефталат, получении сварных соединений и получении первичных данных напряжения и тока в механической ветви УЗКС в процессе УЗ сварки.

В результате проведенных экспериментальных исследований определено влияние статического сварочного давления при ультразвуковой сварке ПВХ при различном сварочном давлении P : 7 МПа, 9,3 МПа и 13,3 МПа – кривые 1–3 соответственно (рисунок 8), и амплитуды колебаний сварочного инструмента УЗКС 60 мкм, 50 мкм и 40 мкм – кривые 1–3 (рисунок 9) на время УЗ воздействия.



а) – ток, протекающий через механическую ветвь УЗКС, б) – напряжение на УЗКС, в) – волновое сопротивление материалов

Рисунок 8 – Экспериментальные зависимости определения времени УЗ воздействия на ПВХ, при влиянии сварочного давления: 1 – при давлении 7 МПа, 2 – при давлении 9,3 МПа, 3 – при давлении 13,3 МПа

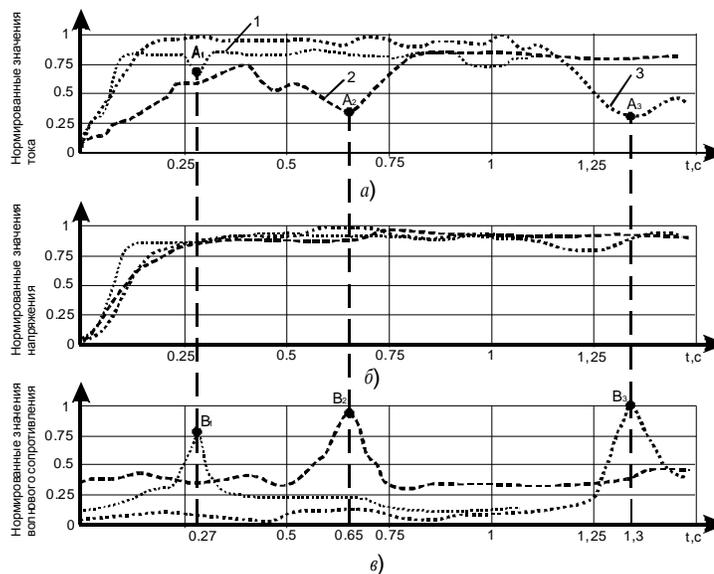
Рисунок 9 – Экспериментальные зависимости определения времени УЗ воздействия на ПВХ при влиянии амплитуды колебаний: 1 – при амплитуде 60 мкм, 2 – при амплитуде 50 мкм, 3 – при амплитуде 40 мкм

Из представленных на рисунке 8 графиков видно, что при сварке материала значения тока и напряжения меньше по уровню, чем при холостом режиме (зависимость 4). На рисунке 8в представлены зависимости изменяющегося в процессе формирования сварного соединения волнового сопротивления нагрузки в результате изменения свойств материалов.

Зависимости, представленные на рисунке 9, были получены при амплитуде колебаний рабочего торца волновода 60 мкм, 50 мкм и 40 мкм соответственно. Из графиков следует, что время сварки существенно зависит от амплитуды колебаний рабочего торца волновода. Продолжительность сварки уменьшается с увеличением амплитуды колебаний. Такой характер изменения времени сварки

связан с тем, что увеличение амплитуды колебаний приводит к увеличению вводимой в свариваемый материал механической энергии.

На рисунке 10 представлены экспериментальные зависимости времени формирования сварного соединения от свойств свариваемых материалов полученных на образцах из ПЭ, ПВХ и ПЭТФ (кривые 1–3 соответственно) в процессе УЗ сварки при сварочном давлении 7 МПа и амплитуде колебаний 50 мкм .



а) – ток, протекающий через механическую ветвь УЗКС, б) – напряжение на УЗКС
 в) – волновое сопротивление материалов

Рисунок 10 – Экспериментальные зависимости определения времени формирования сварного соединения:

1 – для полиэтилена, 2 – для поливинилхлорида, 3 – для полиэтилентерефталата

Из полученных графиков следует, что время перехода в вязкопластичное состояние у материалов различно. Это объясняется различием свойств полимерных материалов.

На основании полученного критерия определения изменения свойств материалов, при изменении свойств материалов происходит изменение значения величины тока, протекающего через механическую ветвь колебательной системы. При формировании сварного шва производилось автоматическое определение момента формирования сварного соединения и отключение ультразвукового воздействия.

Для подтверждения эффективности полученного критерия оптимальности ультразвуковой энергии в свариваемые материалы был произведен сравнительный анализ значений времени формирования сварного соединения, полученных при теоретическом расчете и при экспериментальных исследованиях. В результате проведенных экспериментальных исследований было произведено по десять измерений для различных по свойствам материалов. Результаты сравнения теоретических и экспериментальных средних значений времени формирования сварного соединения приведены в таблице 1.

Полученные экспериментально, средние значения времени УЗ воздействия отличаются от теоретических расчетных значений в среднем на 17 %.

Таблица 1 – Результаты сравнения теоретических и экспериментальных исследований определения оптимального времени УЗ воздействия

Наименование материала	Время сварки среднее, сек		отклонение, %
	определенное теоретически	определенное экспериментально	
Поливинилхлорид	0,758	0,65	15
Полипропилен	0,698	0,6	14
Полиэтилен	0,212	0,27	22
Полиэтилентерефталат	1,568	1,3	17
Полистирол	0,503	0,6	17

Новый критерий позволил предложить и практически реализовать новые способы управления процессами ультразвуковой сварки полимерных материалов, защищенные патентами РФ.

Четвертая глава посвящена разработке и созданию новых схемных и конструктивных решений сварочных УЗ аппаратов, применяющихся для решения самых разнообразных технологических задач.

Первая часть четвертой главы посвящена разработке пьезоэлектрических УЗ колебательных систем, характеризующихся повышенным КПД и чувствительностью к изменению параметров свариваемых сред полимерных термопластичных материалов. Описываются конструкции УЗКС с рабочей частотой $22 \pm 1,33$ кГц и $44 \pm 3,33$ кГц и амплитудой УЗ колебаний до 50 мкм, разработанные и выполненные по полуволновым, двухполуволновым и трехполуволновым технологическим схемам, предназначенные для выполнения точечных, непрерывных, кольцевых и сварных соединений сложной формы.

Вторая часть четвертой главы посвящена описанию ультразвукового оборудования для герметизации контейнеров для хранения компонентов крови, специализированного оборудования для промышленного применения, для формирования сварных соединений длиной 50, 150, 220, 360 мм методом прессовой шовной сварки. Также представлено специализированное УЗ сварочное оборудование для формирования сварных соединений кольцевой формы, диаметром до 100 мм.

Третья часть четвертой главы посвящена подтверждению эффективности созданных аппаратов и исследованию прочности формируемых сварных соединений полимерных термопластичных материалов, которое проводилось по методу испытаний на растяжение образцов из полипропилена и поливинилхлорида по ГОСТ 11262-80. При этом изготовление образцов и получение швов сварных соединений полимерных термопластичных материалов производилось по ГОСТ 16971-71. Образцы изготавливались из листовых материалов толщиной 0,8 мм и обрабатывались по типоразмеру № 3, указанному в стандарте. При этом длина и ширина рабочей зоны образцов составили 250 мм и 25 мм соответственно. Для усиления образцов из полипропилена был выбран идентичный материал и изготовлены усиливающие накладки в местах крепления зажимов разрывной машины. Для усиления образцов из поливинилхлорида

использовался полистирол, обладающий меньшим модулем упругости, чем у испытуемого материала, что удовлетворяет требованиям стандарта. Для определения прочности сварных соединений на растяжение в соответствии с требованиями и установления коэффициента сохранения свойств сварных соединений по отношению к основному материалу, было изготовлено по пять образцов для испытания основного материала и образцов со сварными соединениями того же материала.

Для формирования сварных соединений с использованием системы непрерывного контроля свойств, материалов, изменяющихся в процессе сварки, и установления оптимального временного УЗ воздействия использовалось специализированное ультразвуковое оборудование на базе генератора «Гиминей-ультра-4», имеющее также в составе встроенный, временной таймер, позволяющий установить фиксированный интервал времени УЗ воздействия.

Формирование сварных соединений производилось двумя способами – с предварительно выбираемым и постоянным временем УЗ воздействия, а также при непрерывном контроле изменения свойств материалов и установлении оптимального времени УЗ воздействия.

Испытания проводились на машине Р-10, имеющей возможность установления предела измерения усилия 20 кН и обеспечивающей при растяжении образца измерение нагрузки с погрешностью не более 0,5 % от измеряемой величины и постоянную скорость раздвижения зажимов в пределах, требуемых настоящим стандартом. Результаты испытаний на прочность исследуемых образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний на прочность исследуемых образцов их ПВХ и ПП

Наименование материала	Режим УЗ сварки	Усилие при разрыве, среднее значение $F_{р}, Н$	Прочность при разрыве, среднее значение $\sigma_{р}, (Н/мм^2)$	Кэфф. сохранения $\frac{S_{срсс}}{S_{сром}}$ (%)
ПВХ основной материал	нет	1876	93,8	
ПВХ сварное соединение	при постоянном времени	1184	59,2	63
ПВХ сварное соединение	при определении оптимального времени	1514	75,7	81
ПП основной материал	нет	556	27,8	
ПП сварное соединение	при постоянном времени	372	18,6	67
ПП сварное соединение	при определении оптимального времени	434	21,7	78

Из числа образцов, разрыв которых произошел в пределах рабочей части образцов, для ПВХ и ПП было отобрано по три группы образцов. В таблице 2 представлены средние значения усилия и прочности образцов при разрыве, а также коэффициенты сохранения свойств образцов. По результатам испытаний установлено, что значения коэффициентов сохранения свойств образцов со сварными соединениями, выполненными при фиксированном значении интервала времени сварки меньше допустимого, составляют для поливинилхлорида 63 %, а для полипропилена 67 % и не удовлетворяют требованиям ГОСТ 11262-80.

Коэффициенты сохранения свойств образцов со сварными соединениями, выполненными при непрерывном контроле свойств материалов и автоматическом определении оптимального времени УЗ воздействия удовлетворяют требованиям ГОСТ 11262-80. При этом для образцов из поливинилхлорида коэффициент сохранения свойств составляет 81 %, а для образцов, изготовленных из

полипропилена, 78 %, что не менее 75 % от прочности основного материала. Таким образом, новые схемные и конструктивные решения сварочных УЗ аппаратов, защищенные патентами РФ, для решения самых разнообразных технологических задач, позволили повысить эффективность технологического процесса сварки, качества и прочности сварного соединения полимерных материалов за счет непрерывного контроля параметров пьезоэлектрической УЗКС в результате изменения свойств материалов и автоматического установления оптимального УЗ воздействия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате выполнения работы решена проблема повышения качества (прочности, герметичности, внешнего вида) сварных соединений полимерных материалов за счет создания нового типа ультразвуковых аппаратов, обеспечивающих в автоматическом режиме оптимальное по времени и энергии ультразвуковое воздействие на основании непрерывного контроля и использования информации о состоянии соединяемых материалов для управления электронным генератором.

При этом решены следующие частные задачи:

1. Установлено, что для формирования качественного сварного соединения необходимо обеспечить введение в зону сварки необходимого и достаточного количества энергии за оптимальное время для перехода соединяемых материалов в вязкопластичное состояние, показана необходимость непрерывного контроля состояния соединяемых сред и управления параметрами аппарата, теоретически определены условия оптимального УЗ воздействия, необходимые диапазоны изменения параметров при перестройке УЗ генераторов и изменении условий эксплуатации пьезоэлектрических УЗ колебательных систем в процессе сварки.
2. Доказано теоретически и подтверждено экспериментально, что для точного дозирования подводимой энергии УЗ колебаний достаточно обеспечить автоматическое управление процессом УЗ сварки на основании данных об изменении электрических параметров пьезоэлектрических колебательных систем, обусловленных изменениями акустических характеристик соединяемых материалов в процессе формирования шва.
3. Разработаны и практически реализованы способ и устройство непрерывного контроля акустических свойств (импеданса) соединяемых материалов по изменяемым значениям тока и напряжения механической ветви пьезоэлектрической колебательной системы, что позволило установить зависимости оптимального временного и энергетического воздействия от различных параметров материалов и условий протекания процесса сварки.
4. Созданные новые способы управления процессами и технические решения, защищенные патентами РФ, практически реализованы в сварочном оборудовании различного типа, снабженные новыми пьезоэлектрическими колебательными системами, системами непрерывного контроля и управления, обеспечившие оптимальное временное и энергетическое воздействие при формировании точечных, протяженных до 360 мм, кольцевых диаметром до 100 мм швов с прочностью не менее 75 % от прочности основного материала.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A_0 – амплитуда механических колебаний (начальная), м; f – частота механических колебаний, Гц; I_0 – интенсивность звуковой волны в сварочном инструменте, Вт/м²; I_1 – интенсивность звуковой волны в термопластичном материале, Вт/м²; I_2 – интенсивность в термопластичном материале с учетом отражения звуковой волны, Вт/м²; t – продолжительность ультразвукового воздействия, сек; P – сварочное давление, Па; F_{cp} – усилие при разрыве материала среднее, Н; x – толщина термопластичного материала, м; r_0 – плотность материала рабочего инструмента, кг/м³; r_1 – плотность термопластичного материала, кг/м³; r_2 – плотность материала опоры, кг/м³; c_0 – скорость звука в материале рабочего инструмента, м/сек; c_1 – скорость звука в термопластичном материале, м/сек; c_2 – скорость звука в материале опоры, м/сек; C – теплоемкость Дж/кг·К; d – коэффициент пропускания; h_1 – коэффициент отражения на границе сварочного инструмента и свариваемых материалов; h_2 – коэффициент отражения на границе свариваемых материалов и опоры; W – скорость диссипации ультразвуковой энергии, Дж/с; W_1 – скорость диссипации ультразвуковой энергии в термопластичном материале, Дж/с; W_2 – скорость диссипации ультразвуковой энергии в термопластичном материале с учетом отражения волны, Дж/с; a – коэффициент затухания по амплитуде, 1/м; Q_3 – количество энергии потерь вне зоны сварки, Дж; I – удельная теплота плавления материала, Дж/кг; V_1 – объем зоны сварки, м³; V_2 – объем формируемого сварного соединения, м³; ΔT – разность между комнатной температурой и температурой плавления, К; S_{cp} – прочность при разрыве средняя, Н/мм²; $S_{срсс}$ – прочность сварного соединения при разрыве средняя, Н/мм²; $S_{сром}$ – прочность основного материала при разрыве средняя, Н/мм²; M – Коэффициент пропорциональности; L_M – индуктивность механической ветви, Гн; C_M – емкость механической ветви, Ф; I_{XC} – ток протекающий через пьезокерамические элементы УЗКС при холостой сварке, А; R_M – сопротивление механической ветви, Ом; $C_{пэ}$ – емкость пьезокерамических элементов, Ф; *УЗКС* – ультразвуковая колебательная система; *УЗ* – ультразвуковой; *ПВХ* – поливинилхлорид; *ПП* – полипропилен; *ПЭ* – полиэтилен; *ПЭТФ* – полиэтилентерефталат; *ПС* – полистирол; *CPU* – блок микропроцессора

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. **Сливин, А.Н.** Повышение эффективности ультразвуковых технологических аппаратов [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н Цыганок, А.Н. Сливин, И.И. Савин // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2–2. – С. 177–185.
2. **Сливин, А.Н.** Развитие ультразвуковых технологий, разработка исследование многофункциональных и специализированных ультразвуковых аппаратов [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н Цыганок, А.Н. Сливин// Ползуновский альманах. – 2000. – №3. – С. 193–200.
3. **Сливин, А.Н.** Разработка технологии и оборудования для ультразвуковой сварки элементов картриджа для очистки воды [Текст] / В.Н.

Хмелев, А.Н. Сливин, С.В. Левин // Известия Тульского государственного университета. – Тула, 2004. – Вып. 2. – С. 175–182.

4. **Сливин, А.Н.** Разработка ультразвукового оборудования для упаковочных машин [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, И.И. Савин, А.В. Шалунов // Известия Тульского государственного университета. – Тула, 2006. – Вып. 6. – С. 12–18.

5. **Сливин, А.Н.** Аппараты для ультразвуковой сварки с автоматической оптимизацией ультразвукового воздействия [Текст] / В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.В. Левин, А.Д. Абрамов // Сварщик. – Украина, 2007. – № 6. – С. 24–29.

6. **Slivin, A.N.** Zariadenia na ultrazvukové zváranie s automatickou optimalizáciou ultrazvukového pôsobenia [Текст] / V.N. Chmelev, R.V. Barsukov, A.N. Slivin, S.N. Cyganok, A.D. Abramov // ZVÁRAČ. – Slovenská Republika, Bratislava, 2008. – Ročník V/3. – Str.13–16.

7. **Сливин, А.Н.** Определение критерия качества герметизирующего шва при ультразвуковой сварке [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, И.И. Савин, А.В. Шалунов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях: межвузовский сборник / под ред. Г.В. Леонова. – Бийск, 2004. – С. 200–204.

8. **Slivin, A.N.** Measurement of Parameters and Automatic Selection of Optimal Modes During Ultrasonic Welding of Thermoplastic Materials [Текст] / V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, A.N. Slivin, S.N. Tchyganok, I.I.Savin, A.D. Abramov, A.V. Shalunov, S.V. Levin // International Workshops and Tutorials on EDM'2006: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2006. – P. 289–293., (ISBN 5–7782–0646–1, IEEE Catalog Number 06EX1337).

9. **Slivin, A.N.** Measurement Parameters of Ultrasonic Oscillatory System during Welding Thermoplastics [Текст] / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov, D.S. Abramenko // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P. 323–327., (ISBN 5–7782–0752–3, IEEE Catalog Number 07EX1510).

10. **Slivin, A.N.** Research of Parameter Influence of Ultrasonic Welding Process on Conjunction Formation of Polymeric Thermoplastic Materials [Текст] / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov // Siberian Russian Student Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2008. – P. 272–278., (ISBN 5–7782–0893–3, IEEE Catalog Number CFP08500–PRT).

11. Способ управления процессом ультразвуковой герметизации пластиковых контейнеров для хранения и переработки крови [Текст]: Пат. 2192375 Российская Федерация, МПК 7 А 61 J 1/05. / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2000104737/13; заявл. 28.02.00; опубл. 27.03.02, Бюл. № 4 – 9с.: ил.

12. Способ герметизации пластиковых контейнеров для хранения и переработки компонентов крови [Текст]: Пат. 2269334 Российская Федерация: МПК⁷ А61J1/05, В65B51/22 / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный

технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2004115358/14; заявл. 20.05.04; опубл. 10.02.06, Бюл. № 4. – 3 с.: ил.

13. Устройство ультразвуковой герметизации и сегментации трансфузионных систем [Текст]: Пат. 2267316 Российская Федерация, МПК⁷ А 61 J 1/05. / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, М.В. Хмелев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2004116746/14; заявл. 01.06.04; опубл. 10.01.06, Бюл. № 1 – 7 с.: ил.

14. Способ герметизации картриджей для очистки воды [Текст]: Пат. 2241599 Российская Федерация, МПК⁷ В 29 С 65/08. / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, А.В. Шалунов, И.И. Савин, М.В. Хмелёв, С.В. Левин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2003136136/12; заявл. 11.12.03; опубл. 10.12.04, Бюл. № 34. – 8с.: ил.

15. Способ герметизации пластиковых пакетов при упаковке сыпучих и жидких продуктов [Текст]: Пат. 2276014 Российская Федерация, МПК⁵ В29С 65/08 В65В 51/22 В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, М.В. Хмелев, А.Н. Лебедев, С.В. Левин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2004135854/12; заявл. 07.12.04; опубл. 10.05.06, 9 с.: ил.

16. Способ изготовления решетки с ячеистой структурой для укрепления грунтовых поверхностей [Текст]: Пат. 2322551 Российская Федерация, МПК⁵ E02D 17/20 В29С 65/02 В29С 65/18 В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.В. Левин, А.Д. Абрамов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2006143096/04; заявл. 05.12.2006; опубл. 20.04.2008, 8 с.: ил.

17. Способ управления процессом ультразвукового воздействия [Текст]: Пат. 2247544 Российская Федерация, МПК⁷ А 61 В 18/00. / В.Н.Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н.Цыганок, А.Н.Сливин, А.В.Шалунов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2003117268/14; заявл. 09.06.03; опубл. 10.03.05, Бюл. №7. – 8с.: ил.

Подписано в печать 09.10.2008 г. Печать – ризография. Заказ № 2008-74

Объем 1,4 п.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ВЦ БТИ АлтГТУ им. И.И. Ползунова

659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27