

Теоретические Исследования Процесса и Создание Аппаратов для Ультразвуковой Кольцевой Сварки Изделий из Термопластичных Материалов

Алексей Н. Сливин, Владимир Н. Хмелёв, *Senior Member*, IEEE, Алексей Д. Абрамов
Центр ультразвуковых технологий, Бийск, Россия
Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

Аннотация – В статье рассматриваются результаты теоретических исследований процесса формирования методом ультразвуковой сварки полимерных материалов сварного шва рабочим инструментом кольцевой формы. По результатам теоретических исследований установлены зависимости оптимальных параметров энергетического воздействия в зависимости от диаметра и ширины формируемого шва. Результаты теоретических исследований позволили предложить алгоритм оптимального управления процессом ультразвуковой сварки термопластичных материалов при формировании кольцевых швов большого диаметра и реализовать новый подход к проектированию и выбору специализированного ультразвукового оборудования.

Ключевые слова – Колебательная система, кольцевой сварной шов, полимерный материал, ультразвуковая сварка.

I. ВВЕДЕНИЕ

В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ полимерные материалы применяются во всех отраслях промышленности. Благодаря своим свойствам полимерные материалы успешно вытесняют традиционные конструкционные материалы, такие как сталь, стекло, керамика и др. Во многих случаях переход на полимерные материалы позволяет уменьшить стоимость изделий и упростить их изготовление. Кроме того изделия из полимеров имеют более широкие эксплуатационные характеристики и могут использоваться для работы в контакте с агрессивными средами, при низких температурах, при знакопеременных нагрузках и др.

Практически в любой области применения полимерных материалов проблема обеспечения требуемой прочности изделий изготовленных из них является основной и привлекает пристальное внимание большого числа исследователей, технологов и конструкторов. Особый интерес представляют изделия, при производстве которых необходимо обеспечить герметичное и прочное соединение по кольцевому шву (Рис. 1,2).

Из всего разнообразия способов соединения полимерных материалов наиболее эффективным и надежным способом соединения полимерных материалов является ультразвуко-

вая (УЗ) сварка. На Рис. 3 представлена схема процесса ультразвуковой сварки деталей.

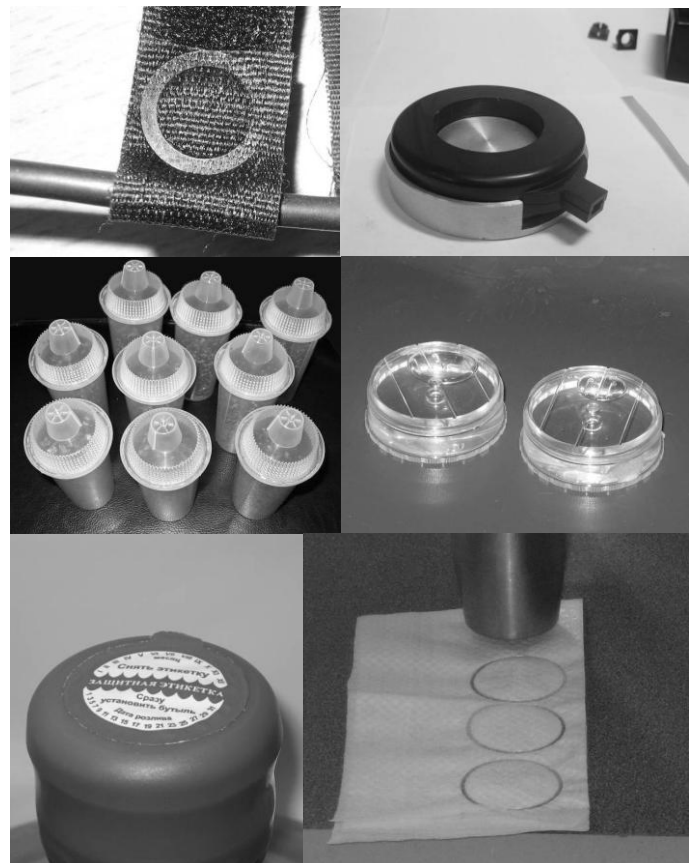


Рис. 1. Виды изделий с кольцевыми сварными швами.

Способ получил широкое распространение при формировании швов с помощью инструментов малого размера (много меньше длины волны) и практически не используется при формировании кольцевых швов с длиной формируемого шва (периметром инструмента) более 200...300 мм. Причина отсутствия специализированного оборудования для формирования кольцевых швов большого диаметра заключается в отсутствии информации об особенностях процесса протека-

ния ультразвуковой сварки при формировании кольцевых швов.



Рис. 2. Виды изделий с кольцевыми сварными швами.

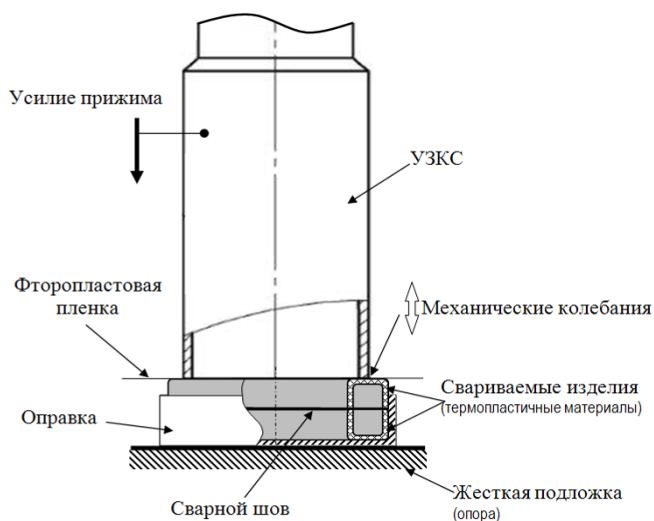


Рис. 3. Схема процесса УЗ сварки деталей.

В связи с этим возникла необходимость в исследовании механизма формирования и распространения до сварочного шва ультразвуковых колебаний в кольцевых трубчатых конструкциях для установления оптимальных параметров ультразвуковой сварки полимерных материалов кольцевой формы (расширительные бачки, компасы, упаковка и т.д.).

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Механизм распространения ультразвуковых колебаний в кольцевых трубчатых конструкциях имеет первостепенное значение при разработке технологии ультразвуковой сварки таких изделий, так как в узлах пучностей напряжений, как правило, возникают очаги перегрева полимера и его дест-

рукция. Особенно чувствительны к неравномерному ультразвуковому полю полимерные материалы с узким температурным интервалом сварки.

Анализ современных требований к качеству формируемых кольцевых швов при изготовлении изделий в виде тел вращения, а также обзор существующих ультразвуковых колебательных систем (УЗКС) и существующего специализированного оборудования для кольцевой сварки, показал практически полное отсутствие методик расчета УЗКС, пригодных для проектирования кольцевых сварочных инструментов.

В связи с этим возникла необходимость в проведении теоретических исследований процесса ультразвуковой сварки сварочным инструментом, имеющим рабочее окончание кольцевой формы, конечной целью которых должна стать разработка нового подхода к проектированию УЗ сварочного оборудования.

Таким образом, для достижения поставленной цели, были поставлены следующие задачи:

1. Провести теоретические исследования процесса сварки для установления зависимостей параметров свариваемых материалов и формируемого кольцевого сварочного соединения, таких как диаметр и ширина шва, с выделяемой в зоне сварки энергией.
2. Установить изменение величины выделяемой энергии от свойств свариваемых материалов и от определённых конфигураций сварочных инструментов (диаметра и ширины шва).
3. Определить оптимальные параметры ультразвукового воздействия для различных моделей ультразвуковых аппаратов при формировании различных кольцевых сварных соединений.

III. ТЕОРИЯ

При решении первой задачи были проведены теоретические исследования процесса сварки по кольцевому сварному шву (Рис. 4).

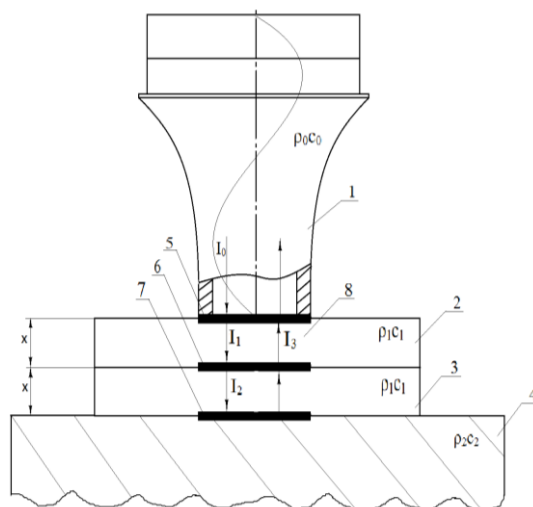


Рис. 4. Схема процесса УЗ кольцевой сварки.

Для решения первой задачи была установлена зависимость скорости диссипации УЗ энергии:

Зоне поглощения УЗ колебаний, тепловыделения и формирования сварного соединения будет соответствовать область 8 в объеме свариваемых материалов, ограниченном площадью поверхности S и толщиной материалов $2x$. Ультразвуковые 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:

$$I_0 = 2\pi^2 \cdot f^2 \cdot A_0^2 \cdot \rho_0 \cdot c_0.$$

На границе 5 происходит отражение УЗ волны, а часть ультразвуковых колебаний (УЗК) проходит через границу в свариваемый материал 2. При этом можно определить коэффициент отражения η и коэффициент прохождения d волны на границе раздела сред:

$$\eta_1 = \left(\frac{\rho_0 \cdot c_0 - \rho_1 \cdot c_1}{\rho_0 \cdot c_0 + \rho_1 \cdot c_1} \right)^2,$$

$$d = 1 - \eta_1.$$

Тогда, в термопластичный материал 2 с акустическим импедансом $\rho_1 c_1$, будет введена волна, интенсивностью:

$$I_1 = 2\pi^2 \cdot f^2 \cdot A_0^2 \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot \left(1 - \left(\frac{\rho_0 \cdot c_0 - \rho_1 \cdot c_1}{\rho_0 \cdot c_0 + \rho_1 \cdot c_1} \right)^2 \right).$$

Энергию, поглощаемую термопластичным материалом 2, можно рассчитать следующим образом:

$$W_1 = (I_1 - I_1 e^{-2\alpha x}) \cdot S,$$

где α – коэффициент затухания по амплитуде, $I_1 e^{-2\alpha x}$ – интенсивность УЗ колебаний на границе раздела 6, $2x$ – путь, пройденный волной.

Так как для обеспечения прохождения через границу свариваемых материалов как можно большей энергии УЗК необходимо обеспечить полный акустический контакт, то границу 6 мы представляем акустически прозрачной и $d=1$. Тогда интенсивность УЗК, поглощаемых в материале 3 можно рассчитать как

$$I_2 = I_1 e^{-2\alpha x} - I_1 e^{-4\alpha x}.$$

Энергию волны, отраженной от границы «свариваемый материал – воздух» и опоры 4, также необходимо учесть для определения энергии, поглощаемой материалом 3.

Тогда можно найти коэффициент отражения η_2 и рассчитать интенсивность отраженных от границ 7 волны.

$$\eta_2 = \left(\frac{\rho_1 \cdot c_1 - \rho_2 \cdot c_2}{\rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot c_2} \right)^2,$$

$$I_2 = \eta_2 \cdot I_1 \cdot e^{-4\alpha x}.$$

Интенсивность отраженной энергии, поглощаемой свариваемыми материалами в зоне сварки.

$$I_{22} = \eta_2 \cdot I_1 \cdot e^{-4\alpha x} - \eta_2 \cdot I_1 \cdot e^{-8\alpha x}.$$

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

$$I_2 = I_1 \cdot e^{-2\alpha x} - I_1 \cdot e^{-4\alpha x} + \eta_2 \cdot I_1 \cdot e^{-4\alpha x} - \eta_2 \cdot I_1 \cdot e^{-8\alpha x},$$

$$W_2 = I_2 \cdot S,$$

$$W_2 = I_2 \cdot S = I_1 \cdot (1 - e^{-4\alpha x} + \eta_2 \cdot e^{-4\alpha x} - \eta_2 \cdot I_1 \cdot e^{-8\alpha x}) \cdot \pi \cdot (h \cdot D + h^2).$$

После чего получим суммарную скорость диссипации энергии УЗ колебаний в свариваемых материалах:

$$W = 2\pi^3 \cdot f^2 \cdot A_0^2 \cdot (h \cdot D + h^2) \cdot \rho_0 \cdot c_0 \times \\ \times (1 - \eta_2) (1 - e^{-4\alpha x} + \eta_2 \cdot e^{-4\alpha x} - \eta_2 \cdot I_1 \cdot e^{-8\alpha x})$$

где I_0 – интенсивность УЗК на излучающей поверхности УЗКС; f – частота колебаний инструмента; A_0 – амплитуда УЗ колебаний инструмента; η_1 – коэффициент отражения от материала 2; η_2 – коэффициент отражения от границы 7; d – коэффициент прохождения; $\rho_0 c_0$, $\rho_1 c_1$, $\rho_2 c_2$ – акустический импеданс; I_1 – интенсивность УЗК в материале 2; W_1 – энергия, поглощаемая термопластичным материалом 2; α – коэффициент затухания по амплитуде; $2x$ – путь, пройденный волной; S – площадь поверхности зоны поглощения УЗК; I_2 – интенсивность УЗК в материале 3; I_3 – интенсивность отраженной энергии, поглощаемой 2 и 3 в зоне 6; W_2 – энергия, поглощаемая в материале 3; W – суммарная энергия, поглощаемая средой 8; D и h – внешний диаметр и ширина кольца УЗ инструмента. Полученное выражение позволяет установить зависимость времени УЗ воздействия для формирования сварного соединения от энергии УЗ колебаний, рассеиваемой в зоне сварки, и значения энергии, необходимой для нагрева материала до температуры плавления и энергии, которая потребуется на плавление определенного объема материала.

$$t = \frac{\rho_1 \cdot V_1 \cdot C \cdot dT + \lambda \cdot \rho_1 \cdot V_2}{2\pi^2 \cdot f^2 \cdot A_0^2 \cdot S \cdot \rho_0 \cdot c_0 (1 - \eta_2) \cdot (1 - e^{-4\alpha x} + \eta_2 \cdot e^{-4\alpha x} - \eta_2 \cdot I_1 \cdot e^{-8\alpha x})}.$$

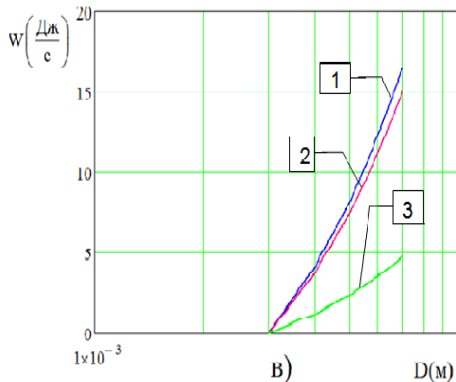
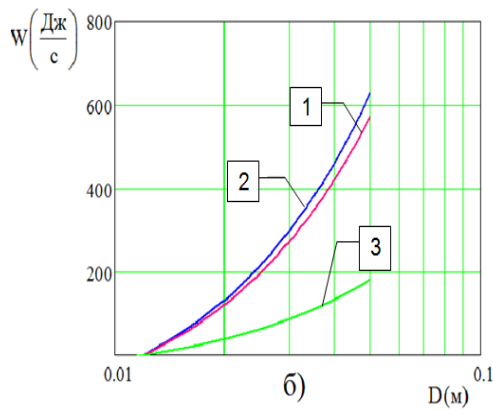
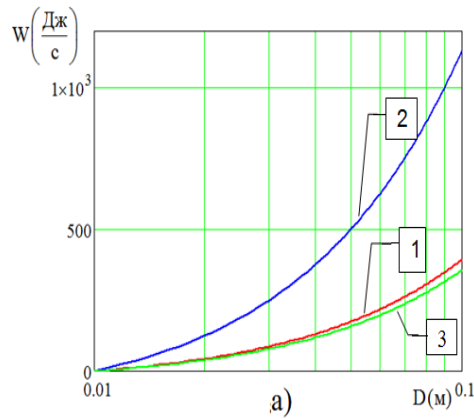
Выражение отражает основные закономерности, показывающие зависимость времени УЗ сварки от других параметров (амплитуда и частота УЗ колебаний, геометрические размеры, такие как площадь и толщина формируемого сварного соединения, акустические и термодинамические свойства материалов, плотность, скорость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

На Рис. 5 представлены зависимости скорости диссипации энергии УЗ воздействия от диаметра D и ширины формируемого сварочным инструментом сварного шва. Амплитуда колебаний рабочего сварочного инструмента $A=50$ мкм.

Из построенных графиков видно, что при увеличении внешнего диаметра D сварного шва кольцевой формы выделяющаяся энергия в зоне шва увеличивается по экспоненте.

На графиках Рис.6 представлены зависимости выделяемой энергии от ширины сварного шва h , при величине внешнего диаметра инструмента D : а) 100 мм, б) 50 мм, в) 7 мм.

По графикам Рис.6 видно, что при увеличении ширины шва h в полимерные материалы вводится больше энергии. Соответствующие ширине кольца инструментов полученные результаты УЗ энергии занесены в Табл. I.



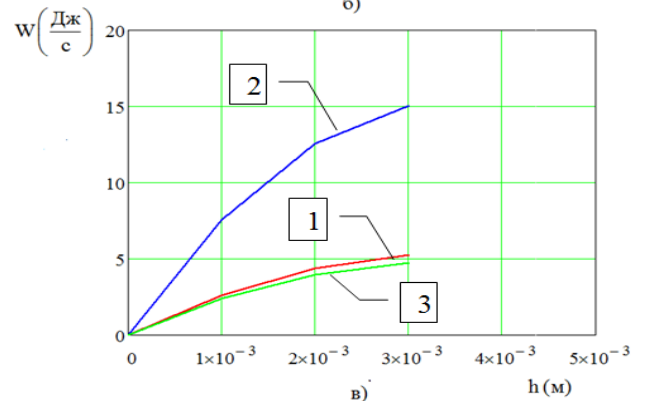
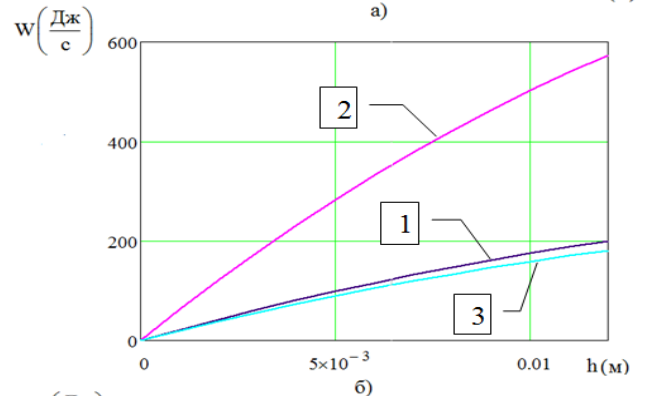
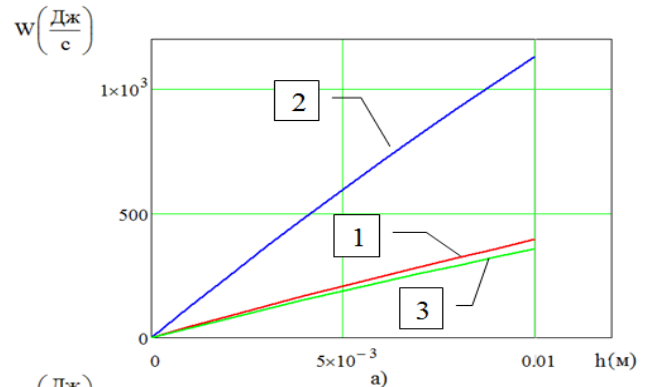
Для инструментов с внешними диаметрами наконечника: а) 100 мм; б) 50 мм; в) 7 мм;

1 – поливинилхлорид, 2 – полиэтилен, 3 – полиэтилентерефталат
 Рис.5. Зависимости скорости выделения энергии в различных материалах от внешнего диаметра сварочного инструмента

ТАБЛИЦА I

ВЕЛИЧИНА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ РАССЕИВАЕМАЯ В ЗОНЕ ШВА РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА И ШИРИНЫ

| Мощность УЗ аппа- ратов, ВА | S, мм ² | D, мм | W ак.теор., Дж/с | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------|------------------|------|------|
| | | | ПВХ | ПЭ | ПЭТФ |
| 400 | 38 | 7 | 17 | 15 | 5 |
| 1000 | 1390 | 50 | 200 | 575 | 180 |
| 3000 | 2826 | 100 | 400 | 1140 | 360 |



Для инструментов с внешними диаметрами наконечника: а) 100 мм; б) 50 мм; в) 7 мм;

1 – поливинилхлорид, 2 – полиэтилен, 3 – полиэтилентерефталат
 Рис.6. Зависимости скорости выделения энергии в различных материалах от ширины сварного шва (сварочного инструмента)

Заметно, что при уменьшении площади акустического контакта S в свариваемые материалы вводится меньшее количество УЗ энергии.

На Рис.7 показано графическое соотношение акустической энергии, типов материалов и площадей кольцевого шва, которое показывает как зависит величина выделяемой энергии от площади сварочного инструмента.

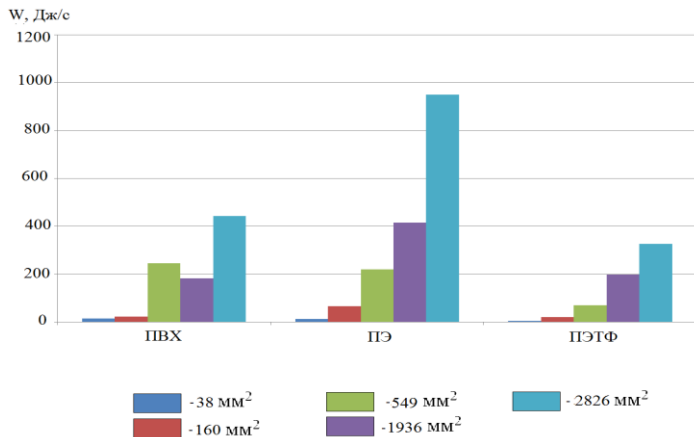


Рис.7. Зависимости величины выделяемой энергии от площади сварочного инструмента.

Определим КПД аппарата отношением акустической энергии, выделяющейся в зоне кольцевого шва, к мощности, потребляемой из сети.

Зная потребляемую мощность аппарата из сети, вычисляем КПД для трёх типов аппаратов по формуле:

$$\eta = \frac{W_{ак.экср}}{P_{потр}}$$

где $W_{ак.экср}$ – экспериментальная акустическая мощность, $P_{потр}$ – мощность потребляемая аппаратом.

ТАБЛИЦА II

ЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН АКУСТИЧЕСКОЙ И ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ И ИХ КПД

| Мощность УЗ аппарата, ВА | Мощность потребляемая аппаратом $P_{потр}$, Вт | Эксп. акустич. мощность $W_{ак.экср}$, Вт | | | КПД для 3 типов аппаратов | | |
|--------------------------|---|--|------|------|---------------------------|------|------|
| | | ПВХ | ПЭ | ПЭТФ | ПВХ | ПЭ | ПЭТФ |
| 400 | 215 | 15 | 12,5 | 4 | 0,07 | 0,06 | 0,02 |
| 1000 | 630 | 183 | 415 | 198 | 0,29 | 0,66 | 0,31 |
| 3000 | 1250 | 442 | 950 | 327 | 0,36 | 0,76 | 0,27 |

Судя по получившимся значениям КПД УЗ аппаратов, можно сделать вывод, что потребляемая аппаратом величина мощности значительно превышает затраты энергии, затрачиваемой на рассеивание в зону свариваемого кольцевого шва.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В Табл. III представлены (рекомендации по использованию аппаратов для формирования кольцевых швов различной конфигураций) диапазоны возможных геометрических величин инструмента и выделяемой акустической энергии, которые соответствовали бы потребляемой мощности УЗ аппаратов.

При решении двух последних из поставленных задач, для реализации сварки различных изделий и материалов, предложены и разработаны специализированные сварочные аппараты (см. Рис.8) для прессовой сварки различных по форме сварных швов заклепочного типа, швов линейной формы и кольцевой формы или швов по сложному замкнутому контуру.

ТАБЛИЦА III

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АППАРАТОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

| Мощность УЗ аппаратов, ВА | h , мм | D , мм | S , мм ² | Величина акустической энергии $W_{ак.теор}$, Дж/с |
|---------------------------|----------|-----------|-----------------------|--|
| 400 | 2 .. 3 | 5 .. 7 | от 19 до 38 | от 5 до 27 |
| 630 | 3 .. 5 | 15 .. 25 | от 113 до 314 | от 46 до 130 |
| 1000 | 5 .. 7 | 25 .. 50 | от 314 до 945 | от 130 до 370 |
| 1000 | 5 .. 12 | 25 .. 50 | от 314 до 1431 | от 130 до 590 |
| 3000 | 5 .. 12 | 50 .. 100 | от 706 до 3316 | от 130 до 1330 |



Рис.8. Специализированные сварочные аппараты для ультразвуковой сварки.

V. ВЫВОДЫ

1) Проведён теоретический анализ процесса ультразвуковой сварки полимерных термопластичных материалов, установлена взаимосвязь параметров свариваемых материалов и формируемого кольцевого сварочного соединения, таких как диаметр и ширина шва, с выделяемой в зоне сварки энергией.

2) Установлены теоретические зависимости энергии выделяемой в зоне УЗ сварки от амплитуды, которая показывает наиболее эффективное значение амплитуды 50 мкм, от величины диаметра и ширины кольцевого шва.

3) Проведены экспериментальные исследования влияния площади инструмента (диаметр инструмента и ширина шва) на энергию, выделяющуюся в зоне шва. Установлены величины акустических энергий для различных аппаратов при формировании кольцевых сварных швов различных площадей.

4) В результате проведения экспериментальных исследований была произведена оценка КПД УЗ аппаратов мощностью 400, 1000 и 3000 ВА. В результате исследований были предложены рекомендации по выбору УЗ аппаратов разной мощности 400, 630, 1000, 3000 ВА для формирования кольцевых швов различной конфигураций диаметрами от 5...100 мм и шириной шва от 2..12 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Волков С.С., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком, М., Химия.
- [2]. Барсуков Р.В., Сливин А.Н., Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Шалунов А.В., Савин И.И., Левин С.В., Хмелев М.В., Разработка технологии и оборудования для ультразвуковой сварки элементов картриджа для очистки воды // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП - 2003): Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции – Бийск: АлтГТУ, 2003 – с.202-210..
- [3]. Казанцев Р.Ф. Расчет ультразвуковых преобразователей для технологических установок. – М.: Машиностроение, 1980. – 44 с.
- [4]. Кайгородский Ю.И., Яхимович Д.Ф. Инженерный расчет ультразвуковых колебательных систем. – М.: Машиностроение, 1982. – 56 с.
- [5]. Зайцев К.И., Мацук Л.И. Сварка пластмасс. – М.: Машиностроение, 1978.
- [6]. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1988. – 224 с.: ил.



Владимир Н. Хмелев – заместитель директора Бийского технологического института по НИР, профессор, доктор технических наук. Заслуженный изобретатель России. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Область научных интересов – ультразвуковая техника и технологии, применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации технологических процессов и изменения свойств веществ и материалов. Член IEEE с 2000, IEEE Senior Member с 2004.



Алексей Н. Сливин родился в г.Бийске, Россия, 1976. Кандидат технических наук. Областью научных интересов является ультразвуковая техника и технологии; применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации технологических процессов и изменения свойств веществ и материалов; применение ультразвуковых колебаний для процессов сварки термопластических полимерных материалов.



Алексей Д. Абрамов родился в г.Бийске, Россия, 1984. Аспирант Бийского Технологического Института. С 2004 года член IEEE. Областью научных интересов является ультразвуковая техника и технологии; применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации технологических процессов и изменения свойств веществ и материалов; применение ультразвуковых колебаний для процессов сварки термопластических полимерных материалов.