

# Исследование процесса ультразвуковой сварки полимерных материалов кольцевой формы

[Владимир Н. Хмелев](#), *Senior Member, IEEE*, [Алексей Н. Сливин](#),

[Алексей Д. Абрамов](#), *Student Member, IEEE*

*Бийский технологический институт (филиал)*

*ГОУ ВПО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова*

**Аннотация** – В статье рассматривается модель процесса формирования методом ультразвуковой сварки полимерных материалов сварного шва рабочим инструментом кольцевой формы. На основании теоретического анализа процесса установлены зависимости оптимальной амплитуды ультразвукового 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 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.

Из всего разнообразия способов соединения полимерных материалов наиболее эффективным и надежным способом соединения полимерных материалов является ультразвуковая сварка (УЗС). 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 протекания ультразвуковой сварки при формировании кольцевых швов.

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 деструкция. 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 проектировании 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. Для достижения поставленной цели необходимо установить оптимальные режимы УЗ воздействия при формировании кольцевых швов различных размеров (диаметра и ширины) и подтвердить результаты исследований на практике.

## III. ТЕОРИЯ

Для ввода в материал ультразвуковых колебаний и создания необходимого акустического контакта между соединяе-

мыми поверхностями к ним со стороны инструмента-волновода прикладывается статическое давление. В колебательном режиме на свариваемые материалы дополнительно воздействует динамическое ультразвуковое давление, основными параметрами которого являются амплитуда колебаний рабочего торца инструмента-волновода частота колебаний. Также не менее важным параметром является продолжительность ультразвукового воздействия.

#### А. Расчет амплитуды сварочного инструмента

Высокочастотные механические колебания – ультразвуковые, распространяющиеся в свариваемых деталях, являются упругими деформациями среды и представляют синусоидальные или почти синусоидальные функции времени.

Если систему вывести из равновесия толчком и затем: предоставить ее самой себе, то она будет колебаться с некоторой определенной частотой, зависящей только от свойств самой системы: ее массы, сопротивления и возвращающей силы. Если колебания будут не затухающими, то они называются собственными, а их частота – собственной частотой. Однако чтобы тело совершало незатухающие колебания, к нему должно прикладываться постоянное воздействие некоторой внешней силы. В этом случае колебания будут вынужденными. Получив толчок, система совершает в некоторый начальный момент помимо вынужденных и свободные колебания, частота которых может быть рассчитана по формуле

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость распространения ультразвуковых колебаний в среде,  $m$  – масса колеблющегося тела.

Амплитуда колебаний, или смещение частиц, зависит от силы колебаний и среды, в которой распространяются колебания. Наибольшая амплитуда наступает при резонансе, то есть при совпадении собственной и вынуждающей частот. В случае затухания резонанс наступает при такой частоте вынужденных колебаний, которая меньше собственной частоты и частоты свободных колебаний. Разность между этими тремя частотами тем меньше, чем слабее затухание. Однако возрастание амплитуды колебаний ограничено, так как при увеличении ее увеличивается скорость колебательного движения, а с увеличением скорости растет сопротивление, то есть с возрастанием амплитуды колебаний система начинает интенсивнее расходовать энергию. Таким образом, амплитуда автоматически принимает значение, при котором прибыль энергии компенсирует ее расход на трение или излучение.

Если приравнять сумму двух сил, действующих на систему, возвращающей и внешней к произведению колеблющейся массы на ускорение, то получим:

$$m \cdot \omega^2 \cdot x = c_n \cdot x - P_0 \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (2)$$

где  $P_0$  – амплитуда давления колебаний,  $c_n$  – скорость звука в полимере.

$$P_0 = 2\pi \cdot f \cdot \xi_0 \cdot \rho_m \cdot c_m, \quad (3)$$

где  $\xi_0$  – амплитудные значения смещений в зоне ввода ультразвуковых колебаний,  $\rho_m$  – плотность материала из ко-

торого изготовлен сварочный инструмент,  $c_m$  – скорость звука в этом материале,  $f$  – частота колебаний инструмента.

Из выражения (2) имеем

$$x = \frac{P_0}{c_n - m \cdot \omega^2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что амплитуда вынужденных колебаний зависит от массы тела, к которому приложены колебания.

$$A = \frac{P_0}{c_n - m \cdot \omega^2} \quad (5)$$

$$A = \frac{2\pi \cdot f \cdot \xi_0 \cdot \rho_m \cdot c_m}{c_n - m \cdot \omega^2}$$

$$\xi_0 = \frac{A \cdot (c_n - m \cdot \omega^2)}{2\pi \cdot f \cdot \rho_m \cdot c_m} \quad (6)$$

Выразим массу тела через плотность и геометрические параметры:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot h \cdot S, \quad (7)$$

где  $h$  – ширина плавления и  $S$  – площадь поверхности шва свариваемых полимеров. В нашем случае  $S = S_{шн}$  (площадь торца сварочного инструмента).

Площадь торца сварочного инструмента находится по формуле площади поверхности кольца (см. Рис. 1):

$$S_{шн} = \pi \cdot r_2^2 - \pi \cdot r_1^2, \quad (8)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  радиусы внутренней и внешней окружностей соответственно.

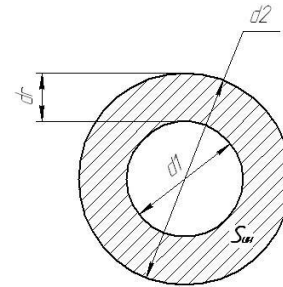


Рис. 1. Изображение торца кольцевого сварочного инструмента

$$S_{шн} = \pi \cdot r_2^2 - \pi \cdot r_1^2 = \pi \cdot (r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = \pi \cdot dr(r_2 + r_1)$$

$$S_{шн} = \pi \cdot (dr \cdot d_2 - dr^2), \quad (9)$$

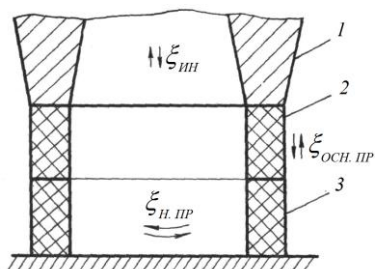
где  $dr$  – ширина шва,  $d_2$  – внешний диаметр кольца.

С учетом (9) выражение (6) примет вид:

$$\xi_0 = \frac{A \cdot (c_n - \pi \cdot \rho_m \cdot h \cdot (dr \cdot d_2 - dr^2) \cdot \omega^2)}{2\pi \cdot f \cdot \rho_m \cdot c_m}, \quad (10)$$

где  $\omega = 2\pi \cdot f$ .

В полимерных образцах кольцевой формы происходит сложение двух продольных волн, распространяющиеся перпендикулярно друг к другу. Одна волна при этом распространяется по кольцевому тракту – наведенная волна, а другая – в направлении оси инструмента (см. Рис. 2) – основная волна.



1 – УЗ инструмент; 2 – верхний кольцевой образец; 3 – нижний образец;  
 $\xi_{осн.пр}$  – смещения в среде от основной продольной волны;  $\xi_{н.пр}$  – смещения в среде от наведенной продольной волны  
 Рис. 2. Схема УЗС кольцевых образцов

Поэтому амплитуда смещений в зоне ввода УЗК есть геометрическая сумма амплитуд основной и наведенной волн

$$\xi_0 = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2} \quad (11)$$

Распределение смещений по длине полуволнового образца в направлении оси инструмента описывается уравнением стоячей волны:

$$\xi_x = \pm 2\xi_{ин} \cdot \cos(K \cdot x), \quad (12)$$

где  $K$  – волновое число,  $K=2\pi/\lambda$ ;  $\lambda$  – длина волны;  $x$  – координата.

Для наведенной волны распространяющейся по кольцевому тракту распределение смещений для полярных координат запишется как:

$$\xi_y = \pm 2\mu\xi_{ин} \cdot \cos(K \cdot r \cdot \varphi), \quad (13)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $\xi_{ин}$  – смещения рабочего торца инструмента.

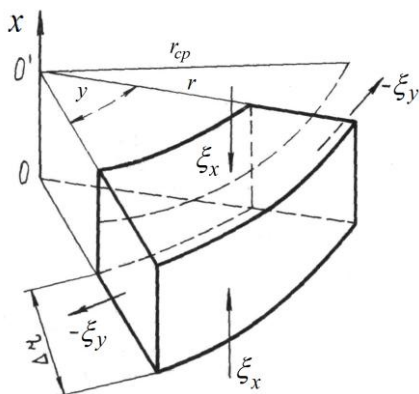


Рис. 3. Расчетная схема определения смещения материала при УЗС кольцевых образцов

Так как распределение смещений рассматривается в зоне ввода УЗК, то  $x=0$ . В связи с этим формула (12) примет вид:

$$\xi_x = \pm 2\xi_{ин} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 0\right) = \pm 2\xi_{ин} \quad (14)$$

Для определения распределения смещений для наведенной волны по всему кольцевому тракту ( $\varphi=2\pi$ ) формула (13) примет вид:

$$\xi_y = \pm 2\mu\xi_{ин} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot r_{cp} \cdot 2\pi\right), \quad (15)$$

где  $r_{cp}$  – средний радиус (см. Рис. 3).

Перепишем выражение (15) для внешнего диаметра и ширины шва

$$\xi_y = \pm 2\mu\xi_{ин} \cos\left(\frac{2\pi^2}{\lambda} \cdot (d_2 - dr)\right). \quad (16)$$

С учетом (14) и (16) выражение (11) примет вид:

$$\xi_0 = \sqrt{4\xi_{ин}^2 + 4\mu^2\xi_{ин}^2 \cos^2\left(\frac{2\pi^2}{\lambda} \cdot (d_2 - dr)\right)}$$

$$\xi_0 = 2\xi_{ин} \sqrt{1 + \mu^2 \cos^2\left(\frac{2\pi^2}{\lambda} \cdot (d_2 - dr)\right)}. \quad (17)$$

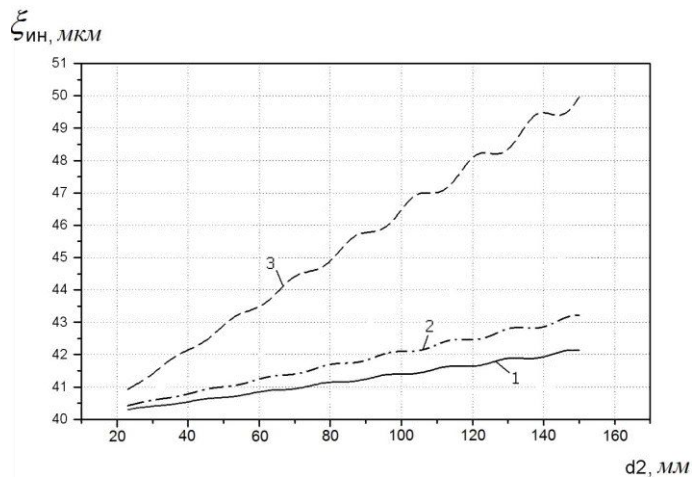
Проанализировав выражения (10) и (17) можно вывести формулу для определения амплитуды смещений рабочего торца инструмента от диаметра и ширины сварного шва:

$$\xi_{ин} = \frac{A \cdot (c_n - \pi \cdot \rho_n \cdot h \cdot (dr \cdot d_2 - dr^2) \cdot \omega^2)}{4\pi \cdot f \cdot \rho_m \cdot c_m \cdot \sqrt{1 + \mu^2 \cos^2\left(\frac{2\pi^2}{\lambda} \cdot (d_2 - dr)\right)}} \quad (18)$$

Для качественного сварного соединения полистирола, имеющего скорость продольных колебаний  $c=2350$  м/с, необходимо, чтобы амплитуда распределения смещений в зоне шва не была меньше 40 мкм ( $A \geq 40$  мкм). На Рис. 4 и Рис. 5 изображены зависимости амплитуды колебаний инструмента от диаметра и ширины сварного шва при частоте  $f=22$  кГц.

Представленные на Рис. 4 зависимости построены при различной ширине стенок свариваемых изделий и монотонно увеличивающемся диаметре 20–160 мм.

На Рис. 5 представлено несколько зависимостей амплитуды рабочего инструмента от ширины сварного шва.



1 –  $dr=1$ мм, 2 –  $dr=2$ мм, 3 –  $dr=10$ мм  
 Рис. 4. Зависимость амплитуды рабочего инструмента от диаметра сварного шва

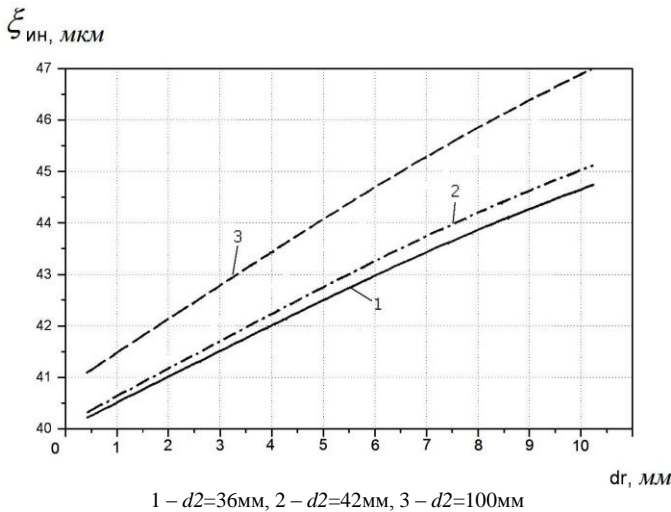


Рис. 5. Зависимость амплитуды рабочего инструмента от ширины сварного шва

Полученные зависимости (см. Рис. 4, Рис. 5) свидетельствуют о том, что при изменении диаметра и ширина кольцевых элементов необходимо увеличивать амплитуду колебаний сварочного инструмента, так как для получения качественного сварного соединения необходимо затрачивать большее количество энергии.

#### В. Расчет давления сварочного инструмента

Давление сварочного инструмента выбирается максимальным возможным из условия предела текучести полимера, наступающего под действием статического давления и амплитудного ультразвукового давления.

$$H_{ин} = S_{ин} \cdot \sigma_T - P_y \quad (19)$$

Так как максимальное ультразвуковое давление развивается в плоскости контакта инструмента с изделием, то сила давления инструмента:

$$H_{ин} = S_{ин} \cdot \sigma_T - S \cdot E \cdot 2\pi \cdot \xi_{ин} \cdot c^{-1} \quad (20)$$

Если площадь поверхности свариваемых полимеров ( $S$ ) равна площади сварочного инструмента ( $S_{ин}$ ), то формула (20) примет вид:

$$H_{ин} = S_{ин} \cdot (\sigma_T - E \cdot 2\pi \cdot \xi_{ин} \cdot c^{-1}), \quad (21)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести полимера.

Площадь торца сварочного инструмента находится по формуле площади поверхности кольца (см. Рис. 1):

$$S_{ин} = \pi \cdot r_2^2 - \pi \cdot r_1^2 \quad (22)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  радиусы внутренней и внешней окружностей соответственно.

$$S_{ин} = \frac{\pi \cdot dr}{2} (d_2 + d_1), \quad (23)$$

где  $dr = \frac{d_2 - d_1}{2}$  – ширина шва.

Графики зависимостей прикладываемого давления рабочего инструмента (полистирол, амплитуда  $\xi_{ин}=40$  мкм) от ширины кольцевого шва изображены на Рис. 6.

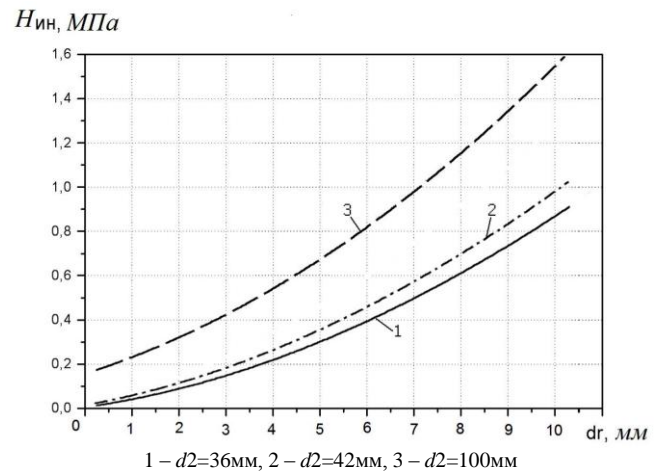


Рис. 6. Зависимость давления рабочего инструмента от ширины сварного кольцевого шва

Из графика четко видно, что значение величины статического давления сварочного инструмента которое необходимо обеспечить должно быть прямо-пропорционально ширине стенки тел вращения, которые необходимо сварить.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для подтверждения результатов теоретического анализа были проведены измерения электрических параметров трех ультразвуковых колебательных систем (см. Рис. 7) в процессе сварки при различных параметрах ультразвукового воздействия (амплитуда колебаний, сварочное давление, продолжительность ультразвукового воздействия).

Ультразвуковые колебательные системы имеют рабочее окончание кольцевой формы различного диаметра и ширины стенки.



Рис. 7. Ультразвуковые колебательные системы

В Таблице I представлены теоретические и экспериментальные результаты, полученные в результате измерения параметров ультразвуковых колебательных систем.

ТАБЛИЦА I  
СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Диаметр, мм	Ширина шва, мм	Амплитуда колебаний, мкм		Сварочное давление, МПа	
		Теоретические результаты	Экспериментальные результаты	Теоретические результаты	Экспериментальные результаты
36	1	40.4	39.8	0.08	0.1
42	2	41.3	42.2	0.1	0.15
100	10	46.7	45.9	1.5	1.2

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения теоретических исследований процесса ультразвуковой сварки сварочным инструментом, имеющим рабочее окончание кольцевой формы разработан новый подход к проектированию УЗ сварочного оборудования основанный на установлении оптимального режима УЗ воздействия при формировании кольцевых швов различных размеров (диаметра и ширины).

Новый подход позволяет на этапе проектирования устанавливать необходимые энергетические требования к ультразвуковой колебательной системе, предназначенной для обеспечения герметичного сварного шва заданного диаметра.

## 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.