

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ КОЛЬЦЕВОЙ ФОРМЫ

В.Н. Хмелёв, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов

Бийский технологический институт, г. Бийск

В статье представлены результаты теоретического анализа процесса ультразвуковой сварки полимерных материалов сварочным инструментом, имеющим рабочее окончание кольцевой формы. Исследования направлены на поиск оптимального управления процессом ультразвуковой кольцевой сварки термопластичных материалов. Проведенные теоретические исследования позволят применить новый подход к проектированию ультразвукового оборудования для сварки термопластичных материалов.

Ключевые слова: колебательная система, кольцевой сварной шов, полимерный материал, ультразвуковая сварка.

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 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), но механизм ультразвуковой сварки применительно к кольцевым швам мало изучен.

В связи с этим необходимо исследовать механизм распространения ультразвуковых колебаний в кольцевых трубчатых конструкциях для установления оптимальных параметров ультразвуковой сварки полимерных материалов кольцевой формы (расширительные бачки, компасы, упаковка и т.д.).

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.

Проведенный обзор обобщенных этапов ультразвуковой сварки полимеров (тела вращения) и принципы распространения в них ультразвуковых колебаний, а также обзор существующих ультразвуковых колебательных систем (УЗКС) и оборудования для кольцевой сварки, показал, что основная сложность при проектировании кольцевых сварочных инструментов заключается в отсутствии методики их расчета.

Поэтому необходимо провести теоретический анализ процесса ультразвуковой сварки сварочным инструментом, имеющим рабочее окончание кольцевой формы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд частных задач:

– установить взаимосвязь диаметра и ширины сварного шва с энергетическими параметрами ультразвуковой колебательной системы, для установления оптимального УЗ воздействия;

– подтвердить эффективность теоретического анализа на практике.

ТЕОРИЯ

Для ввода в материал ультразвуковых колебаний и создания необходимого акустического контакта между соединяемыми 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.

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 ξ_0 – амплитудные значения смещений в зоне ввода ультразвуковых колебаний, ρ_m – плотность материала из которого 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 $S = S_{ин}$ (площадь торца сварочного инструмента).

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

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

где r_1 и r_2 радиусы внутренней и внешней окружностей соответственно.

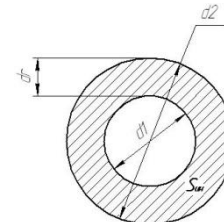


Рис. 1. Изображение торца кольцевого сварочного инструмента

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

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

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

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

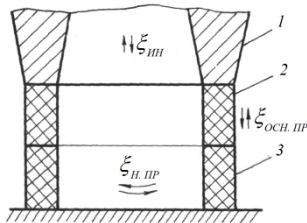
$$\xi_0 = \frac{A \cdot (c_n - \pi \cdot \rho_n \cdot h \cdot (dr \cdot d_2 - dr^2)) \cdot \omega^2}{2\pi \cdot f \cdot \rho_m \cdot c_m}, \quad (10)$$

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 (рис. 2) – основная волна.

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

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



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

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

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

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

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

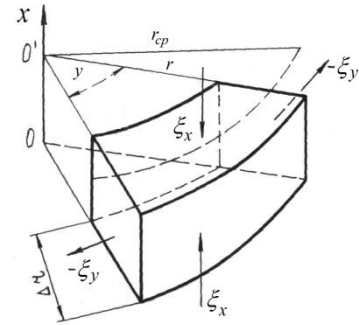


Рис. 3. Расчетная схема определения смещения материала при УЗС кольцевых образцов

Так как распределение смещений рассматривается в зоне ввода УЗК, то $x=0$. 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 ($\phi=2\pi$) формула (13) примет вид:

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

где $r_{сп}$ – средний радиус (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.

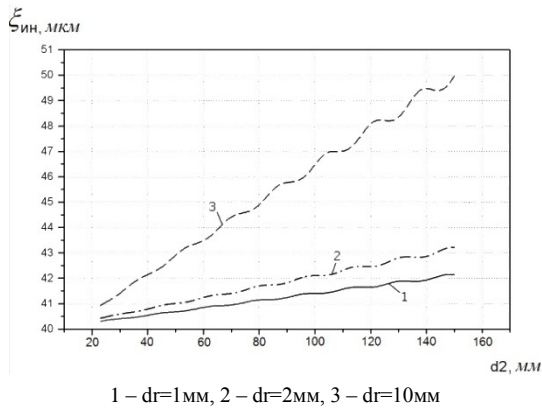


Рис. 4. Зависимость амплитуды рабочего инструмента от диаметра сварного шва

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.

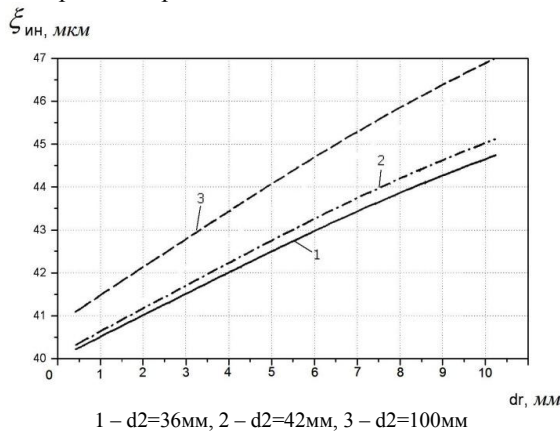


Рис. 5. Зависимость амплитуды рабочего инструмента от ширины сварного шва

Полученные зависимости (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.

Расчет давления сварочного инструмента

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

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

Так как максимальное ультразвуковое давление развивается в плоскости контакта

инструмента с изделием, то сила давления инструмента:

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

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

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

где σ_T – предел текучести полимера.

Площадь торца сварочного инструмента находится по формуле площади поверхности кольца (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.

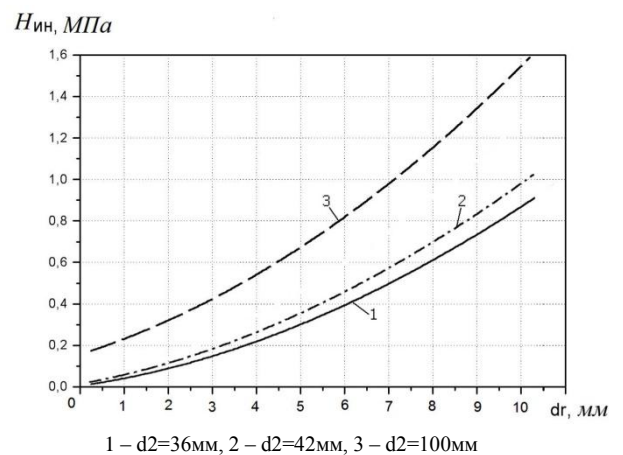


Рис. 6. Зависимость давления рабочего инструмента от ширины сварного кольцевого шва

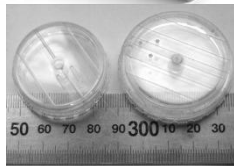
Из графика четко видно, что значение величины статического давления сварочного инструмента которое необходимо обеспечить должно быть прямо-пропорционально ширине стенки тел вращения, которые необходимо сварить.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

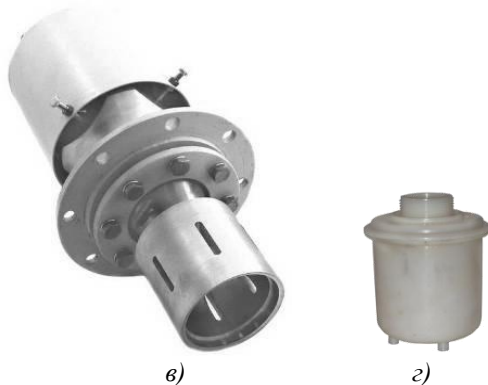
Для подтверждения результатов теоретического анализа были проведены измерения электрических параметров трех ультразвуковых колебательных систем (рис. 7) в процессе сварки при различных параметрах ультразвукового воздействия (амплитуда колебаний, сварочное давление,

продолжительность
 воздействия).
 ультразвукового

систем, имеющих рабочее окончание кольцевой
 формы.



а) б)



а – УЗКС для сварки корпусных элементов компаса б; в –
 УЗКС для сварки бочков г;

Рис. 7. Ультразвуковые колебательные системы

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

В табл. 1 представлены теоретические и экспериментальные результаты, полученные в результате измерения параметров ультразвуковых колебательных систем.

Табл. 1. Сравнение 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 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических исследований предложен новый подход к проектированию ультразвуковых колебательных

Предложенный подход позволяет установить энергетические требования, предъявляемые к ультразвуковой колебательной системе, для обеспечения герметичного сварного шва заданного диаметра.

Решены следующие частные задачи:

1 Установлена взаимосвязь диаметра и ширины сварного шва с энергетическими параметрами ультразвуковой колебательной системой, для установления оптимального УЗ воздействия.

2 Подтверждено эффективность теоретического анализа на практике.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления [Текст]. – Введ. 2004–07–01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 166 с.
- О конференции ИАМП [Электронный ресурс] // Веб-узел научно-технической конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях». – 2010. – Режим доступа: <http://iamp.e-digit.ru>.
- Волков С.С., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком, М., Химия.
- Барсуков Р.В., Сливин А.Н., Хмельв В.Н., Цыганок С.Н., Шалунов А.В., Савин И.И., Левин С.В., Хмельв 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.
- Казанцев Р.Ф. Расчет ультразвуковых преобразователей для технологических установок. – М.: Машиностроение, 1980. – 44 с.
- Кайгородский Ю.И., Яхимович Д.Ф. Инженерный расчет ультразвуковых колебательных систем. – М.: Машиностроение, 1982. – 56 с.
- Зайцев К.И., Мацук Л.И. Сварка пластмасс. – М.: Машиностроение, 1978.
- Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1988. – 224 с.: ил.

Хмельв Владимир Николаевич – заместитель директора Бийского технологического института по НИР, профессор, доктор технических наук., Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Сливин Алексей Николаевич – к.т.н., доцент, Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: san@bti.secna.ru.

Абрамов Алексей Дмитриевич – инженер, Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: abramov@bti.secna.ru.