

# Теоретические исследования процесса непрерывной шовной ультразвуковой сварки термопластичных полимерных материалов и тканей

[Алексей Н. Сливин](#), Андрей В. Леер, [Алексей Д. Абрамов](#), *Student Member*, IEEE,  
[Сергей С. Хмельёв](#), *Student Member*, IEEE  
*Бийский технологический институт  
Алтайского государственного технического университета, Бийск, Россия*

**Аннотация** – В статье представлены результаты теоретических исследований процесса формирования непрерывного сварного шва в зоне контакта плоской поверхности излучателя с вращающейся поверхностью прижимного ролика. На основании анализа процесса распространения, отражения и поглощения ультразвуковых колебаний в соединяемых материалах в зоне контакта выработаны рекомендации по выбору параметров прижимного ролика, оптимальной амплитуды ультразвуковых колебаний и скорости протяжки для различных по свойствам и толщине материалов и изменению

**Ключевые слова** – Полимерный материал, ультразвуковая сварка, непрерывный сварной шов, скорость протяжки материалов.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Непрерывная шовная ультразвуковая сварка является самым перспективным способом получения качественного надежного непрерывного сварного шва термопластических полимерных материалов и тканей.

Она находит широкое применение для формирования непрерывных сварных швов при упаковке в полимерные термопластичные пленки как твердых, так и жидких пищевых продуктов.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

В настоящее время при практической реализации непрерывной ультразвуковой сварки реализуется несколькими способами [1]-[5]:

1. Перемещением ультразвуковой колебательной системы со сварочным инструментом скользящего типа вдоль поверхности соединяемых материалов на неподвижной опоре.
2. Перемещением ультразвуковой колебательной системы со сварочным инструментом кольцевой формы, вращающейся вокруг своей оси по поверхности соединяемых материалов на неподвижной опоре.

Основными недостатками применяемых способов непрерывной ультразвуковой сварки являются необходимость использования рабочих опорных столов больших площадей, применение сложных механизмов для перемещения сварочного инструмента. При использовании ультразвуковых колебательных систем вращающегося типа отсутствие концентраторов – усилителей механических

колебаний не позволяет обеспечить необходимые для качественной сварки амплитуды колебаний. Кроме того, необходимость передачи электрической энергии на вращающуюся систему обуславливает применение специальных токосъемников, что усложняет конструкцию и снижает надежность при передаче энергии.

В связи с этим, в последние годы наибольшее распространение получают ультразвуковые аппараты с вращающейся опорой в виде ролика. При этом конфигурация сварного шва, его ширина, форма зависит от ширины и формы поверхности прижимного ролика. Качество формируемого сварного шва при этом определяется не только параметрами ультразвукового воздействия (амплитуда, частота, время), но и параметрами опорного ролика, скоростью его вращения и площадью контакта при изменении свойств и толщины материалов [6]-[9].

Очевидно, что при создании универсального ультразвукового оборудования, основанного на реализации такого способа сварки, необходимо обеспечить возможность его оперативной перестройки, установки и стабилизации необходимой амплитуды колебаний при изменении скорости протяжки различных по свойствам и толщине материалов при всех возможных изменениях конфигурации сварочного инструмента и прижимного ролика, его ширины и формы поверхности (насечек).

Для создания такого универсального оборудования необходима информация о параметрах необходимого ультразвукового воздействия и диапазонах его перестройки [10]-[12]. В связи с этим возникла необходимость в построении модели процесса формирования непрерывного сварного шва в термопластических полимерных материалах при использовании ультразвуковых аппаратов с вращающейся опорой в виде ролика.

## III. ТЕОРИЯ.

На рисунке 1 схематично представлен процесс формирования непрерывного сварного шва в термопластических полимерных материалах ультразвуковой сваркой при использовании в качестве опоры вращающегося ролика.

Свариваемые материалы 2 и 3, характеризуемые акустическим импедансом  $Z_1 = \rho_1 c_1$  и имеющие толщину  $X$  каждый, ограничены с одной стороны рабочим сварочным инструментом 1 УЗКС с акустическим импедансом

$Z_0 = \rho_0 c_0$ , с другой стороны роликом 4 с акустическим импедансом  $Z_2 = \rho_2 c_2$ , к которому осуществляется прижим свариваемых материалов посредством рабочего сварочного инструмента УЗКС под давлением  $P$  и воздушной средой с акустическим импедансом  $Z_3 = \rho_3 c_3$ .

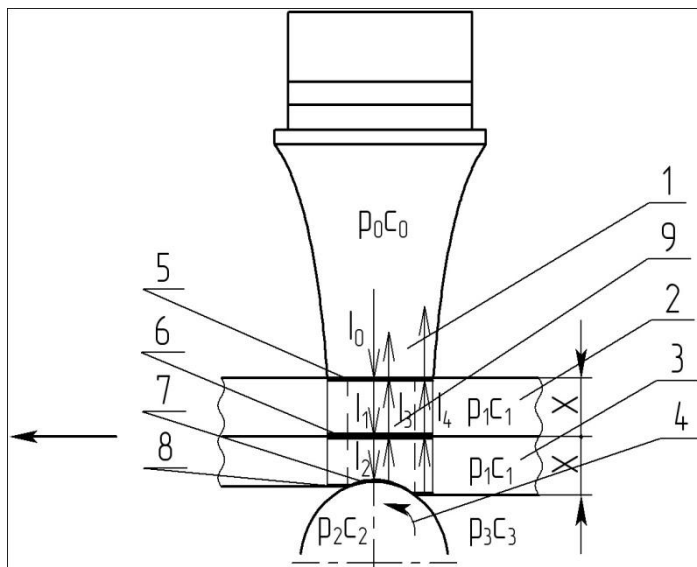


Рис. 2. – Схема процесса непрерывной шовной УЗ сварки термопластов:

1 – сварочный инструмент, 2,3 – свариваемые материалы, 4 – ролик, 5,6,7,8 – границы раздела сред, 9 – зона сварки

Зоне поглощения УЗ колебаний, тепловыделения и формирования сварного соединения будет соответствовать область 9 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

$$I_0 = 2\pi^2 f^2 A_0^2 \rho_0 c_0 \quad (1)$$

Учитывая, что при УЗ сварке обеспечивается полный акустический контакт сварочного УЗКС и свариваемых материалов, на границе раздела 5 происходит отражение УЗ волн, а часть УЗ колебаний проходит через границу в свариваемый материал 2. При этом можно определить коэффициент отражения  $\eta_1$  и коэффициент прохождения  $d$  волны на границе раздела сред.

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

$$d = 1 - \eta_1 \quad (3)$$

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

$$I_1 = 2\pi^2 f^2 A_0^2 \rho_0 c_0 \left( 1 - \left( \frac{\rho_0 c_0 - \rho_1 c_1}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} \right)^2 \right). \quad (4)$$

Энергию диссипации, то есть энергию, поглощаемую термопластичным материалом 2 с акустическим импедансом  $\rho_1 c_1$ , при прохождении УЗ колебаний, можно рассчитать следующим образом:

$$W_1 = (I_1 - I_1 e^{-2\alpha x}) S, \quad (5)$$

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

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

Энергию волны, отраженной от границы свариваемый материал - воздух и ролика 4, также необходимо учесть для определения энергии, поглощаемой материалом 3. При этом можно учесть отражение от границы с воздушной средой 8. Тогда можно найти коэффициенты отражения  $\eta_2$ ,  $\eta_3$  и рассчитать интенсивность отраженных от границ 7 и 8 волн.

$$\eta_2 = \left( \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2, \quad (7)$$

$$\eta_3 = \left( \frac{\rho_1 c_1 - \rho_3 c_3}{\rho_1 c_1 + \rho_3 c_3} \right)^2 \quad (8)$$

$$I_{21} = \eta_2 I_1 e^{-4\alpha x}. \quad (9)$$

$$I_{31} = \eta_3 I_1 e^{-4\alpha x} \quad (10)$$

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

$$I_{22} = \eta_2 I_1 e^{-4\alpha x} - \eta_2 I_1 e^{-8\alpha x} \quad (11)$$

$$I_{32} = \eta_3 I_1 e^{-4\alpha x} - \eta_3 I_1 e^{-8\alpha x} \quad (12)$$

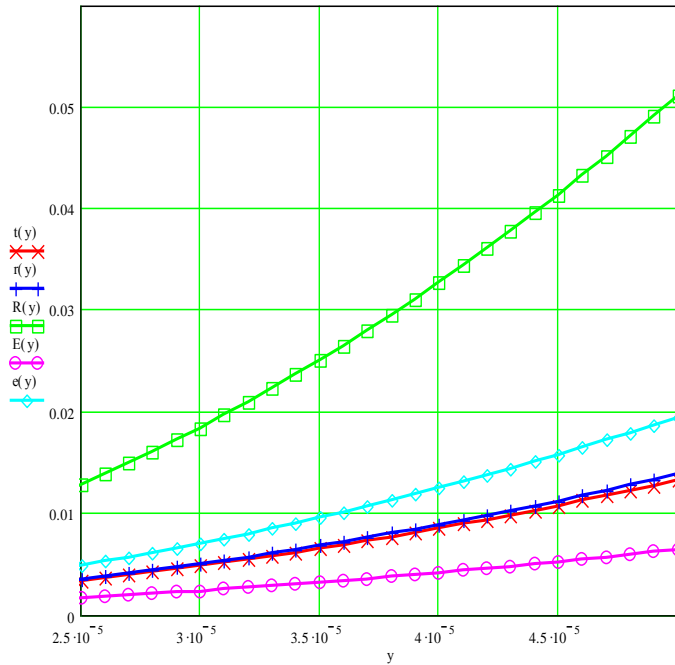
Тогда интенсивность УЗ колебаний и энергия, поглощаемая в материале 3, с учетом энергии отраженных волн и площади контакта с роликом  $s$  рассчитывается следующим образом.

$$I_2 = I_1 e^{-2\alpha x} - I_1 e^{-4\alpha x} + \eta_2 I_1 e^{-4\alpha x} - \eta_2 I_1 e^{-8\alpha x} + \eta_3 I_1 e^{-4\alpha x} - \eta_3 I_1 e^{-8\alpha x}, \quad (13)$$

$$W_2 = I_1 e^{-2\alpha x} S - I_1 e^{-4\alpha x} S + \eta_2 I_1 e^{-4\alpha x} s - \eta_2 I_1 e^{-8\alpha x} s + \eta_3 I_1 e^{-4\alpha x} (S - s) - \eta_3 I_1 e^{-8\alpha x} (S - s) \quad (14)$$

На основании (5), (13), (14) можно определить суммарную энергию, поглощаемую средой 9 термопластичных материалов, в процессе УЗ сварки.

$$v \left( \frac{m}{c} \right)$$



A(м)

t(y) – полиэтилентерефталат, r(y) – поливинилхлорид,  
 R(y) – полипропилен, E(y) – полистирол, e(y) – полиэтилен

Рис. 3 – Зависимость скорости протяжки свариваемых материалов от амплитуды колебаний

$$W = I_1(1 - e^{-2\alpha x} S - e^{-4\alpha x} S + \eta_2 e^{-4\alpha x} s - \eta_2 e^{-8\alpha x} s + \eta_3 e^{-4\alpha x} (S - s) - \eta_3 e^{-8\alpha x} (S - s)) \cdot (15)$$

Введя значения интенсивности УЗ колебаний в средах с учетом различных акустических импедансов, коэффициентов отражения, подставим выражение (4) в (15), после чего получим скорость диссипации энергии УЗ колебаний или мгновенную скорость тепловыделения в свариваемых материалах:

$$W = 2\pi^2 f^2 A_0^2 \rho_0 c_0 (1 - \eta_1) (S - e^{-2\alpha x} S - e^{-4\alpha x} S + \eta_2 e^{-4\alpha x} s - \eta_2 e^{-8\alpha x} s + \eta_3 e^{-4\alpha x} (S - s) - \eta_3 e^{-8\alpha x} (S - s)) \quad (16)$$

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 с учетом выражения (16):

$$t = \frac{T_{nk} \int_{T_{nc}}^{T_{nk}} C dT + \lambda \rho_1 V_2 + Q_3}{W} \quad (17)$$

Выражение (17) отражает основные закономерности, показывающие зависимость времени УЗ сварки от других параметров (амплитуда и частота УЗ колебаний, площадь и толщина формируемого сварного соединения, акустические и термодинамические свойства материалов, плотность, скорость звука и т.д.). Значение величины  $Q_3$  характеризует некоторые потери тепла из зоны сварки.

Одной из основных характеристик непрерывной шовной сварки - скорость протяжки свариваемых материалов, вычислим ее исходя из выражения:

$$V_{np} = \frac{l}{t}, \quad (18)$$

где  $l$  – длина мгновенной зоны сварки,  $t$  – время сварки.

Исходя из выражений (17) и (18) получим выражение для скорости протяжки:

$$V_{np} = \frac{W \cdot l}{T_{nk} \int_{T_{nc}}^{T_{nk}} C dT + \lambda \rho_1 V_2 + Q_3} \quad (19)$$

На рис.3 представлена зависимость скорости протяжки 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.

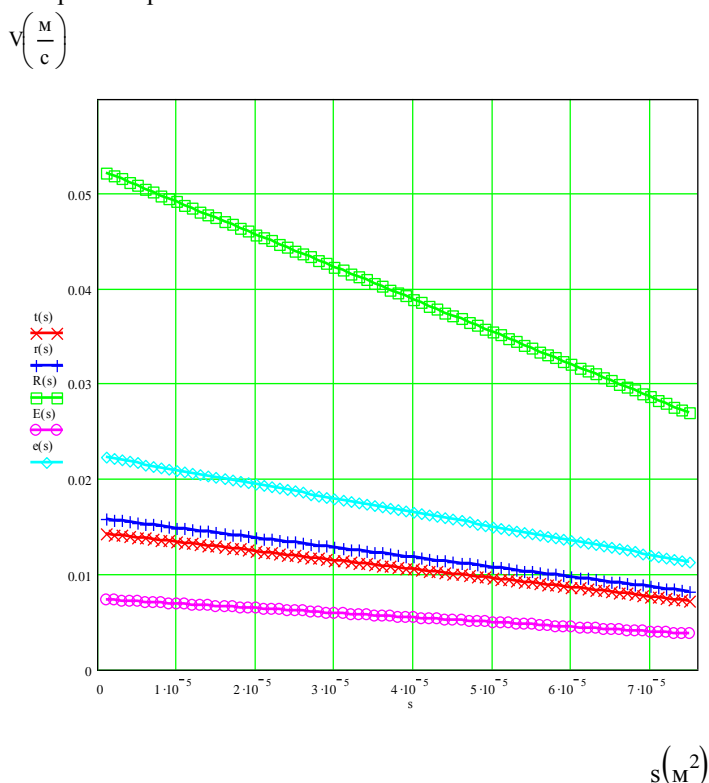
Все расчеты были произведены для листовых материалов толщиной 0,1 мм, и площади сварочного инструмента УЗКС 25 мм<sup>2</sup>. Из полученных зависимостей следует, что при увеличении амплитуды колебаний скорость протяжки необходимо увеличить. Это объясняется тем, что при увеличении амплитуды колебаний значительно возрастает скорость диссипации энергии в материале.

В Таблице 1 представлены значения энергии, необходимые для сварки полиэтиленовой пленки толщиной 0,1 мм и энергии диссипации в зоне сварки за секунду в зависимости от площади ввода УЗ колебаний (мгновенная площадь сварки).

Таблица 1 - Энергия, необходимая для сварки и энергии диссипации в зависимости от мгновенной площади сварки

Мгновенная площадь сварки (мм <sup>2</sup> )	Необходимая энергия (Дж)	Энергия диссипации в зоне сварки в секунду (Дж)
75	2,49	11,71
60	1,99	9,37
45	1,49	7,03
30	0,997	4,68
15	0,498	2,34

На Рис. 4 представлены зависимости скорости формирования сварного соединения от площади контакта материала с роликом.



t(y) – полиэтилентерефталат, r(y) – поливинилхлорид,  
 R(y) – полипропилен, E(y) – полистирол, e(y) – полиэтилен

Рис. 4 – Зависимость скорости протяжки свариваемых материалов от площади контакта с роликом

Полученные зависимости показывают, как влияет ширина прижимного ролика на выделение ультразвуковой энергии в зоне сварки и производительность процесса. Установлено, что наибольшее выделение в свариваемых материалах УЗ энергии осуществляется за счет отражения от границы 8 раздела сред свариваемых материалов и воздуха. Это достигается при минимальном контакте с роликом и позволяет, при уменьшении площади контакта с прижимным роликом увеличивать скорость протяжки свариваемых материалов и обеспечивать повышенную производительность процесса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В результате теоретического анализа процесса ультразвуковой сварки с применением вращающейся опоры по предложенной модели были установлены пределы необходимой для обеспечения качественного соединения различных материалов перестройки ультразвукового оборудования по мощности, амплитуде колебаний и пределы регулирования скорости протяжки в зависимости от различных по свойствам и толщине материалов, для различных по площади и форме поверхности прижимных роликов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Волков С.С., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1986. – 256 с.
- [2] Зайцев К.И., Мацюк Л.Н. Сварка пластмасс. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.
- [3] Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 224 с.: ил.
- [4] Волков С.С., Орлов Ю.Н., Астахова Р.Н. Сварка и склеивание пластмасс. М., «Машиностроение», 1972, 128 с.
- [5] Мозговой И.В. Основы технологии ультразвуковой сварки полимеров И.В. Мозговой//Учеб. Пособие, Изд-во Красноярского ун-та, 1991,280 с.
- [6] Хмелёв В.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.
- [7] 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.
- [8] [Способ герметизации пластиковых пакетов при упаковке сыпучих и жидких продуктов](#) [Текст]: Пат. 2276014 Российская Федерация, МПК<sup>5</sup> 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.
- [9] 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.
- [10] 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., (ISBN57782–0646–1, IEEE Catalog Number 06EX1337).
- [11] Slivin A.N. [Model of Process and Calculation of Energy for a Heat Generation of a Welded Joint at Ultrasonic Welding Polymeric Thermoplastic Materials](#) / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P.316-322.
- [12] 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).