УДК 621.791.16/.14

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕНИЯ НА ПРОЦЕСС НЕПРЕРЫВНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ТОНКИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

А.В. Леер, В.Н. Хмелев, В.А. Нестеров, А.Н. Сливин
Бийский технологический институт АлтГТУ, г. Бийск

Статья посвящена теоретическому исследованию процесса непрерывной ультразвуковой сварки тонких полимерных пленок. Теоретические исследования процесса выделения энергии ультразвуковых колебаний в зоне сварки позволили установить, что энергия трения при непрерывной сварке пленок малых толщин (менее 0,5 мм) оказывает основное влияние на производительность процесса непрерывной сварки.

Ключевые слова – сварка, ультразвук, термопласт, пленка, трение.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для получения непрерывного шовного соединения полимерных материалов на производстве применяется три технологических способа. Это склеивание, термическая и ультразвуковая сварка. Однако для склеивания различных полимеров требуется множество специальных клеев и тщательная очистка соединяемых поверхностей от жиров, масел и других загрязнений. Таким образом, склеивание и термическая сварка не обеспечивают необходимого качества непрерывного сварного соединения полимерных материалов.

Наиболее перспективным способом получения непрерывного шовного соединения является ультразвуковая сварка.

Как показали исследования [1,2], основные параметры процесса сварки взаимосвязаны, качество формируемого непрерывного шовного сварного соединения зависит от величины ультразвуковой энергии, выделяемой в зоне сварки. В свою очередь, энергия, выделяющаяся в зоне сварки, определяется частотой, амплитудой ультразвуковых колебаний, площадью контакта и скорости протяжки свариваемых материалов. Наибольшее распространение такая сварка получила для соединения упаковочных материалов, представляющих собой тонкие листовые полимеры – пленки.

К сожалению, процессы, происходящие при формировании непрерывного сварного шва в тонких пленках, не исследованы. Отсутствует информация о механизме выделения необходимой и достаточной энергии.

Это не позволяет устанавливать оптимальные режимы воздействия при использовании имеющихся ультразвуковых сварочных аппаратов и создавать новые

На сегодняшний день отсутствуют модели процесса ультразвуковой сварки, способные учитывать все основные процессы, происходящие в зоне сварки. Эти процессы настолько скоротечны и быстро сменяют друг друга, что учитывать их очень сложно. Особенно сложно поддается математическому описанию процессы сварки тонких пленок. Есть лишь разрозненные математические описания явлений, происходящих во время такой сварки [3].

В работах [2,3] предложена методика расчета, рассматривающая нагревание и пластификацию полимера во время сварки за счет диссипации вводимой и отраженной ультразвуковой энергии. Однако, на практике, предложенная авторами методика расчета производительности протяженной сварки применительно к тонким пленкам не дает достоверных результатов. Расчетная производительность оказывалась существенно ниже реальной.

Очевидно, что причина несоответствия теоретических и практических результатов заключается в том, что при непрерывной сварке тонких пленок большое значение имеют неучтенные ранее в расчетах факторы.

Это обуславливает необходимость детального исследования процесса протяженной сварки тонких пленок с целью выявления причин, влияющих на производительность процесса и поиска путей ее повышения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На рис. 1 схематично представлен процесс распространения УЗ колебаний при формировании 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 имеют толщину X каждый, ограничены с одной стороны рабочим сварочным инструментом 1 (Рис.1) УЗКС с акустическим импедансом

$$Z_0 = \rho_0 c_0 ,$$

U-sonic.ru – Лаборатория акустических процессов и аппаратов БТИ АлтГТУ
Центр ультразвуковых технологий

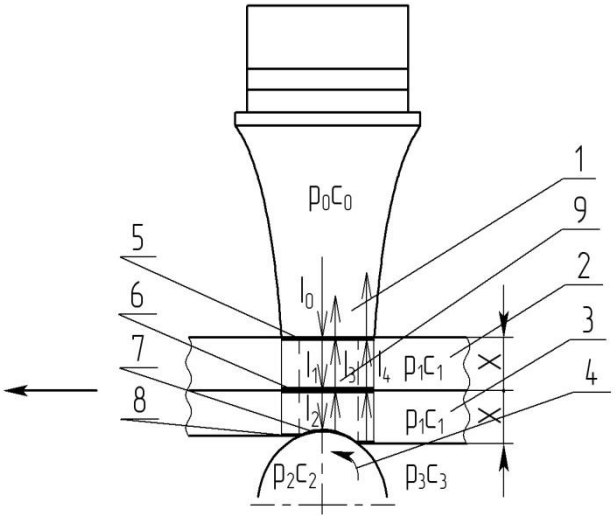
с другой стороны – роликом 4 с акустическим импедансом

$$Z_2 = \rho_2 c_2 .$$

К ролику осуществляется прижим свариваемых материалов посредством фиксированного зазора сварочный инструмент – ролик-опора и воздушной средой с акустическим импедансом

$$Z_3 = \rho_3 c_3 ,$$

где ρ - плотность соответствующей среды, а c - скорость звука в этой среде.



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

Рис. 1. Схема процесса непрерывной шовной УЗ сварки термопластов

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. На излучающей поверхности УЗКС. формируется УЗ колебания с заданной интенсивностью.

Одной из основных характеристик, определяющих эффективность непрерывной шовной сварки, является производительность процесса, т. е. скорость протяжки свариваемых материалов и формирования шва. Для вычисления скорости протяжки используем выражение, полученное в работе[3]:

$$V_{пр} = \frac{W \cdot l}{\rho_1 V_1 \int_{Tнч}^{Tnk} C dT + \lambda \rho_1 V_2 + Q_3} , \qquad (1)$$

где ρ_1 – плотность свариваемых материалов, V_1 – объем нагреваемого материала, Tnn – температура плавления полимера, $Tнн$ – начальная температура, C – удельная теплоемкость свариваемых материалов, λ – удельная теплота плавления свариваемых материалов, V_2 – объем расплавляемого материала, Q_3 – некоторые потери из зоны сварки, скорость тепловыделения в свариваемых материалах:

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

где f – частота колебаний, A - амплитуда, l – длина мгновенной зоны сварки, η - коэффициент отражения в зависимости от границы раздела рассчитывается по формуле:

$$\eta_1 = \left(\frac{\rho_0 c_0 - \rho_1 c_1}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} \right)^2 . \qquad (3)$$

Но как показали исследования [4], при сварке материалов толщиной менее 0,5 мм в зоне тракта ультразвука и вблизи него возникают поперечные (относительно оси ввода ультразвуковых колебаний) смещения свариваемых материалов (зона 6 Рис. 1). Эти смещения могут объяснять резкое повышение на практике производительности сварки тонких полимерных пленок, поскольку приводят к увеличению энергии поверхностного трения между свариваемыми материалами, в сравнении с вкладом энергии трения при сварке материалов большей толщины (> 0,5 мм).

Причиной увеличения поверхностного трения в зоне тракта являются поперечные смещения, обусловленные появлением эффекта «молотка и наковальни». При этом полимер, под действием смещений торца инструмента и статического давления деформируется в продольном направлении по всей толщине и сдвигается в периферийные зоны от оси тракта [4], как показано на Рис. 2. Трение между свариваемыми материалами возникает, предположительно, из-за разницы в фазе поперечных смещений свариваемых материалов друг относительно друга равной $\pi/2$.

Энергию, выделяемую вследствие поверхностного трения свариваемых материалов друг о друга, при относительном смещении верхнего материала относительно нижнего, в соответствии с законом сохранения энергии, можно вычислить как работу сил трения одного цикла деформирования:

$$E_{тр} = F_{тр} s , \qquad (4)$$

где $F_{тр}$ – сила трения, а s – перемещение верхнего материала относительно нижнего. Силу трения можно вычислить, используя закон Амонтона–Кулона:

$$F_{тр} = \mu F , \qquad (5)$$

где μ – коэффициент трения, а F – сила нормальной реакции опоры:

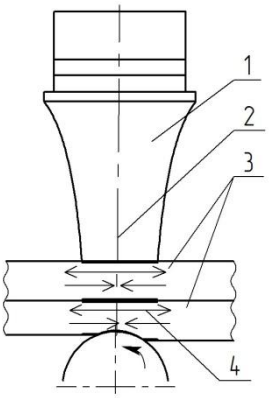
$$F = pS\,, \qquad (6)$$

где p - максимальное акустическое давление в веществе свариваемых материалов

$$p = 2\pi f \rho c A\,, \qquad (7)$$

а S - площадь трения (принимается равной площади зоны сварки (Рис. 2)). Отсюда, подставив (5), (6) и (7) в (4) получим:

$$E_{тр} = \mu p S s\,. \qquad (8)$$



1 – инструмент, 2 – ось акустического тракта, 3 – свариваемые материалы, 4 –поперечные смещения.

Рис. 2. Поперечные смещения свариваемых материалов в периферийные зоны относительно оси тракта

Для одного цикла деформирования с учетом трансформации продольной волны в поперечные смешения перемещение свариваемых материалов [4]:

$$s=4A, \qquad (9)$$

где A – амплитуда вводимых колебаний. Подставив (7) и (9) в (8) с учетом частоты колебаний получаем выражение для скорости выделения энергии поверхностного трения:

$$W_{тр} = 8\mu\pi\rho c S A^2 f^2\,. \qquad (10)$$

Суммируя скорость выделения энергии поверхностного трения $W_{тр}$ со скоростью диссипации W, получим скорость протяжки свариваемых материалов (1) с учетом энергии трения:

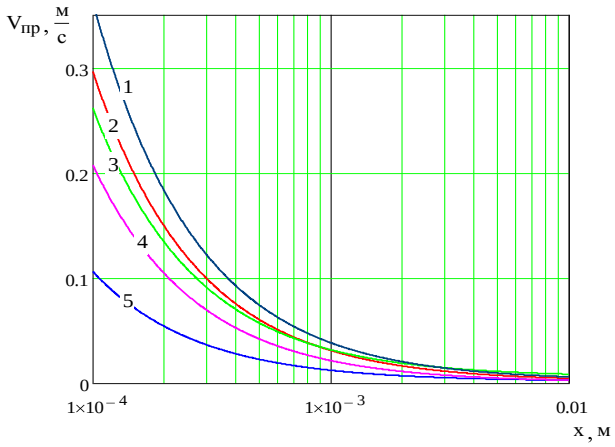
$$V_{пр} = \frac{(W + k \cdot W_{тр}) \cdot l}{\rho_1 V_1 \int\limits_{Tнч}^{Tnk} C dT + \lambda \rho_1 V_2 + Q_3}\,, \qquad (11)$$

где k - коэффициент пропорциональности (<1), компенсирующий неучтенные факторы, например, такие как отсутствие постоянного контакта в зоне внешнего трения и изменение акустического давления в зоне сварки из-за скачкообразного изменения свойств свариваемых материалов.

Исходя из выражения (11) были исследованы зависимости скорости протяжки свариваемых материалов от таких влияющих факторов как: толщина свариваемых материалов, амплитуда и частота вводимых колебаний.

На Рис. 3 представлены графики зависимостей расчетной скорости протяжки различных свариваемых материалов от их толщины.

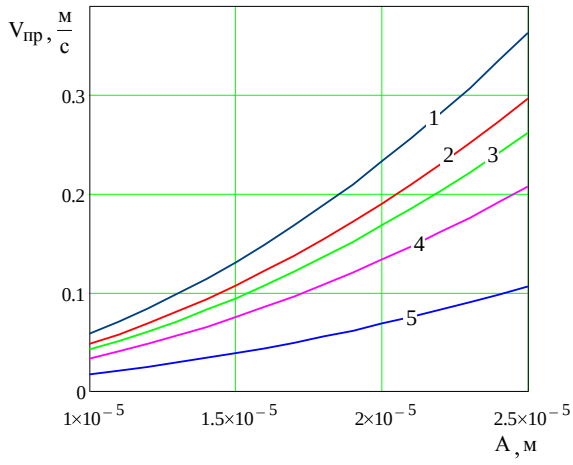
Как следует из графиков (Рис. 3), с уменьшением толщины свариваемых материалов расчетная скорость сварки существенно возрастает.



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

Рис. 3. Графики зависимостей расчетной скорости протяжки различных свариваемых материалов от их толщины

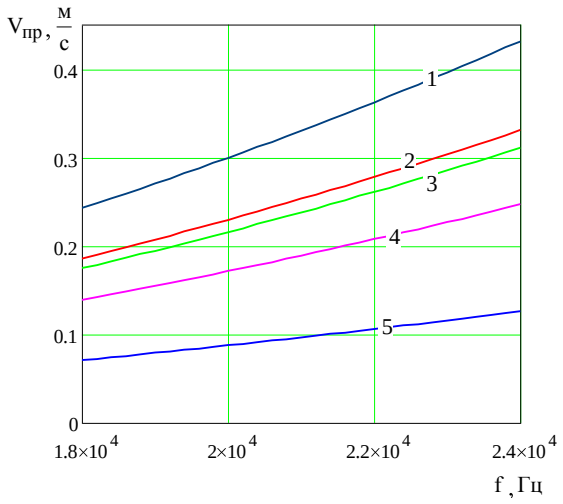
Это объясняется тем, что с уменьшением толщины энергия диссипации W и энергия, необходимая для сварки, пропорционально уменьшаются, а энергия трения $W_{тр}$ остается неизменной, так как она не зависит от толщины. На рис. 4 представлены графики зависимостей расчетной скорости протяжки различных свариваемых материалов от амплитуды вводимых колебаний.



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

Рис. 4. Графики зависимостей расчетной скорости протяжки различных свариваемых материалов от амплитуды вводимых колебаний

Исходя из зависимостей, представленных на рис. 4, учитывая выражения (10) и (11) для скорости выделения энергии поверхностного трения и скорости протяжки соответственно, можно оценить увеличившийся вклад амплитуды, а также частоты вводимых колебаний (рис. 5).



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

Рис. 5. Графики зависимостей расчетной скорости протяжки различных свариваемых материалов от частоты вводимых колебаний

Таким образом, оценка влияния энергии трения при протяженной сварке тонких пленок показала, что именно явление внешнего трения является основным влияющим фактором, определяющим возможность увеличения производительности сварки. Для сравнения, в таблице 1 представлены результаты теоретических расчетов скоростей выделения энергий, обеспечивающих сварку.

Табл. 1. Скорости выделения энергии трения и диссипации относительно общей скорости выделения энергии в зоне сварки пленок толщиной 0,1 мм

Материал	Скорость выделения энергии трения (Дж/с)	Скорость выделения энергии диссипации (Дж/с)	Общая скорость выделения энергии (Дж/с)
ПВХ	61.201	0,357	61.558
ПП	41.054	0,706	41.76
ПЭ	42.385	0,984	43.369
ПЭТФ	81.253	0,326	81.579
ПС	49.037	0,344	49.381

Из представленных в табл. 1 данных следует, что энергия трения при непрерывной сварке пленок малых толщин (менее 0,5 мм) оказывает основное влияние на скорость процесса сварки. Используя полученные данные можно предположить, что максимизируя параметры (амплитуду и частоту колебаний), положительно влияющие на трение можно достичь повышения производительности непрерывной сварки тонких пленок.

В данный момент основные разработки аппарата для шовной ультразвуковой сварки направлены на создание технологического оборудования с рабочей частотой более 22 кГц и амплитудой колебаний до 80–100 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы исследован процесс непрерывной сварки тонких пленок:

1. Выявлено, что определяющим фактором, влияющим на производительность протяженной сварки тонких пленок, является поверхностное трение между свариваемыми материалами.
2. Получены теоретические зависимости расчетной производительности протяженной сварки от параметров, вводимых ультразвуковых колебаний и свойств свариваемых материалов.
3. Анализ полученных в ходе исследовании данных позволяет рекомендовать для повышения производительности сварки интенсификацию процессов поверхностного трения, в частности путем создания технологического оборудования с рабочей частотой более 22 кГц и амплитудой колебаний до 80–100 мкм.
4. Для повышения производительности сварки можно рекомендовать интенсификацию процессов поверхностного трения, в частности за счет применения ролика-опоры с насечками на рабочей поверхности, это может уменьшить амплитуду поперечных смещений нижнего материала, тем самым увеличив амплитуду поверхностного трения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сливин, А.Н. Создание ультразвуковых аппаратов с оптимизацией энергетического воздействия для повышения эффективности сварки: дис. канд. тех. наук.: 25.12.08: защищена 25.12.08 / А.Н.Сливин – Бийск, 2008. – 181 с.

2. Khmelev, V.N. Theoretical Investigations of Continuous Ultrasonic Seam Welding of Thermoplastic Polymers and Fabrics (статья) / Khmelev, V.N., Lehr A.V., Abramov A.D.// International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P.341-344.

3. Холопов, Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 128 – 224 с.: ил.

4. Мозговой, И.В. Основы технологии ультразвуковой сварки полимеров И.В. Мозговой//Учеб. Пособие, Изд-во красноярского ун-та, 1991,280 с.

5. Хмелев, 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.

Леер Андрей Владимирович – аспирант, инженер ОАО «ФНПЦ «Алтай», e-mail: burma_88@mail.ru.

Хмелев Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, заместитель директора по НР, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ, тел. (3854)432581

Нестеров Виктор Александрович – аспирант, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ, e-mail: nest2004@mail.ru.

Сливин Алексей Николаевич – к.т.н., доцент каф. МСиА, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ, тел.(3854)432570