

УДК 621.791.46/.48:621.791.16

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ И СОЗДАНИЕ АППАРАТОВ ДЛЯ ЕЁ РЕАЛИЗАЦИИ

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

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова
E-mail: vnh@bti.secna.ru

Представлены результаты исследований процессов, происходящих при введении ультразвуковых колебаний в свариваемые изделия с учётом особенностей реализации прессовой и непрерывной сварки при формировании точечных, линейных, кольцевых и протяжённых непрерывных сварных швов. Выявленные зависимости необходимой для ультразвуковой сварки энергии от свойств соединяемых материалов, скорости сварки (скорости перемещения свариваемых материалов), формы прижимного ролика, трения при сварке тонких плёнок позволили установить оптимальные режимы ультразвукового воздействия для сварки различных по форме сварных швов заклёпочного типа, швов линейной формы и кольцевой формы или швов по сложному замкнутому контуру. Разработанные и представленные сварочные аппараты позволяют обеспечить качественную сварку производимых промышленностью и вновь создаваемых изделий из полимерных термопластичных материалов.

Ключевые слова:

Ультразвуковая сварка, термопласты, технология, аппараты.

Ультразвуковая (УЗ) сварка получает самое широкое распространение в различных отраслях промышленности, обеспечивая герметизацию упаковок с жидкими и сыпучими материалами, формируя надежное и качественное соединение при изготовлении изделий различной формы и назначения (рис. 1) из отдельных составляющих.

Возможность и эффективность применения УЗ сварки для соединения изделий из термопластичных материалов обусловлена ее несомненными достоинствами, к числу которых следует отнести [1]:

- возможность создания сварного соединения с прочностью не менее 75 % от прочности основного материала;
- отсутствие влияния на качество сварки пылеобразных или жидких загрязнений на свариваемых поверхностях;
- возможность упаковки горючих и взрывоопасных веществ;
- простота механизации и возможность автоматизации процесса.

Перечисленные достоинства ультразвуковой сварки могут быть реализованы с максимальной эффективностью только при создании оптималь-

ных режимов и условий, определяемых способом подведения энергии к свариваемым изделиям (способом формирования контакта сварочного инструмента и способом перемещения его по поверхности свариваемого материала). На практике распространена технология подведения энергии в процессе прессовой сварки, с вертикальной подачей и прижимом рабочего инструмента к свариваемым поверхностям с определенным усилием.

Аналогичным образом осуществляется подвод энергии в случае непрерывной протяжённой сварки скользящим по поверхности материалов инструментом. Прижим и перемещение инструмента при этом осуществляется с определенным усилием, но без вертикальной подачи. Таким образом, необходимость выполнения шва определенного размера, формы или длины определяет выбор способа подведения энергии.

Важнейшим условием сварки, также связанным с подведением энергии, является выбор формы и размеров излучающей поверхности сварочных инструментов, которые определяются требованиями формирования необходимого по форме и размерам шва (прямоугольного, с замкнутым контуром, непрерывного и т. п.).

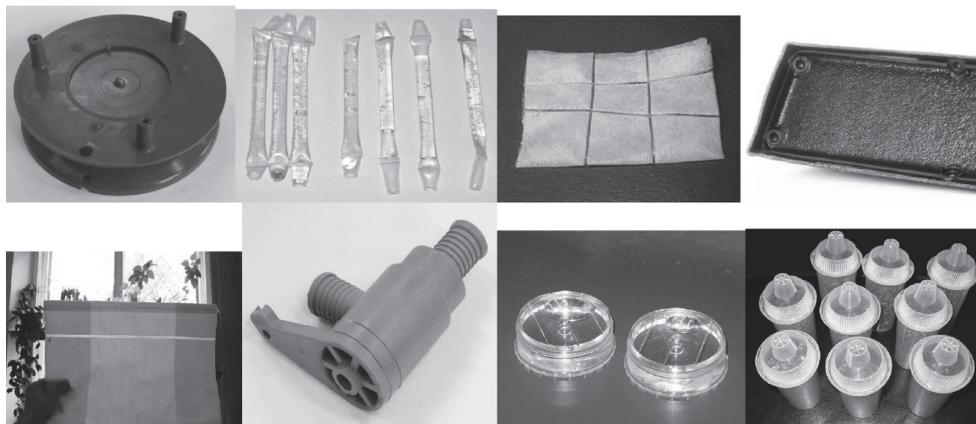


Рис. 1. Изделия из полимеров, изготовленные с применением УЗ сварки

Величина вводимой в свариваемые материалы энергии зависит еще и от вспомогательных элементов, таких как опора, дополнительные подложки и т. п. Выполнение опор в виде массивной неподвижной пластины, что необходимо при реализации прессовой сварки или вращающегося ролика, облегчающего процесс непрерывной сварки, существенно меняют условия сварки.

Условия сварки, определяемые способом подведения энергии ультразвуковых колебаний к свариваемым поверхностям, обуславливают необходимость обеспечения для реализации процесса сварки определенных режимов ультразвукового воздействия. При этом режимы ультразвукового воздействия определяются такими параметрами, как частота и амплитуда колебаний излучающей поверхности сварочного инструмента. К параметрам сварки следует отнести также время ультразвукового воздействия в процессе прессовой сварки и скорость протяжки свариваемых материалов при непрерывной сварке.

Таким образом, необходимость обеспечения оптимальных условий и режимов процесса сварки требует выбора способа подведения УЗ энергии и выработки общих требований к создаваемому специализированному оборудованию, обеспечивающему реализацию режимов воздействия для формирования качественного (по прочности и герметичности) сварного соединения в изделиях из различных материалов.

Поэтому при создании оборудования для обеспечения оптимальных условий реализации процесса сварки различных изделий и материалов необходимо последовательно решить ряд задач:

1. Выбрать условия реализации процесса сварки, обеспечив оптимальные условия подвода энергии и перемещения сварочного инструмента к свариваемым материалам или скорость перемещения сварочного инструмента вдоль их поверхности.
2. Разработать и реализовать рабочий инструмент, который должен обеспечивать выполнение сварочного шва необходимой формы и размера при производстве конкретного изделия.
3. Теоретически или на основании имеющегося опыта установить необходимые и достаточные параметры ультразвукового воздействия (по частоте, амплитуде колебаний и скорости реализации процесса) для сварки различных изделий и материалов в выбранных условиях реализации процесса.
4. Для обеспечения энергетического воздействия на изготавливаемое изделие разработать пьезоэлектрическую колебательную систему, способную обеспечить, на выбранной частоте, необходимую для сварки и достаточную для реализации заданной производительности процесса амплитуду ультразвуковых колебаний излучающей поверхности рабочего инструмента.
5. Разработать и реализовать сварочные аппараты, способные обеспечить выбранные условия и

требуемые режимы сварки. Практически установить оптимальные режимы сварки и реализовать технологии сварки различных изделий. Исследовать функциональные возможности и подтвердить эффективность созданных сварочных УЗ аппаратов.

Решение перечисленных задач [2] в каждом отдельном случае обеспечивает развитие технологий ультразвуковой сварки и создание специализированного оборудования.

Так, например, развитие направления прессовой сварки связано с формированием точечных сварных швов различной формы, линейных сварных швов максимальной длины и ширины, а также швов по замкнутому контуру максимального периметра. При этом наиболее часто используемые для соединения листовых материалов точечные сварные швы могут быть различной формы. Наиболее типичными являются швы дисковой или прямоугольной формы, а также в виде заклёпок.

Линейные швы определенной длины, формируемые без горизонтального перемещения инструмента, могут быть не только сплошными. Они могут выполняться в виде двух параллельно идущих сварных швов или чередующихся вдоль длины формируемого шва участков сварки какой-либо формы (дисковой, прямоугольной, диагональные и косые площадки и т. п.).

Швы по замкнутому контуру могут быть круглыми кольцевыми, прямоугольными или иметь сложную замкнутую или прерывающуюся поверхность.

Форма и размеры сварочных инструментов для формирования протяжённых непрерывных сварных швов определяют ширину формируемого соединения. Обычно при формировании протяженных швов перемещением инструмента размеры рабочей поверхности инструмента превышают ширину шва, а ширина и вид такого непрерывного шва определяется шириной и формой внешней поверхности (накаткой на поверхности или наличием площадок) прижимного ролика.

При реализации прессовой или непрерывной сварки, для введения энергии УЗ колебаний с максимальной эффективностью, необходимо осуществить максимальный по площади акустический контакт излучающей поверхности со свариваемыми материалами изделия, что обеспечивается подводом сварочного инструмента по нормали к свариваемым поверхностям и достаточным усилием прижима.

При реализации непрерывной сварки технология подвода и прижима сварочного инструмента практически такая же. Однако отличие заключается в протягивании свариваемых плёночных или листовых материалов под поверхность сварочного инструмента или в обеспечении скольжения инструмента по поверхностям свариваемых изделий.

Для определения необходимых и достаточных значений энергетического воздействия, диапазонов необходимой перестройки энергетических па-

раметров ультразвуковых аппаратов в процессе сварки проведены теоретические исследования процессов формирования и ввода УЗ колебаний в свариваемые материалы, при реализации прессовой и непрерывной сварки, схематично показанных на рис. 2 [2, 3].

Проведенные исследования позволили представить зависимость времени формирования сварного соединения от энергии ультразвуковых колебаний, выделяющейся в слоях различных по свойствам материалов в следующем виде

$$t = \frac{\rho_1 V_1 \int_{T_n}^{T_{пл}} C dT + \lambda \rho_1 V_2 + Q_3}{2\pi^2 f^2 A_0^2 S \rho_0 c_0 (1 - \eta_1) \times [1 - e^{-4\alpha x} + \eta_2 e^{-4\alpha x} - \eta_2 e^{-8\alpha x}]}, \quad (1)$$

где f – частота; A_0 – амплитуда; S – площадь инструмента; $\rho_0 c_0$ – акустический импеданс сварочного инструмента; $\rho_1 c_1$ – акустический импеданс материала ролика; $\rho_2 c_2$ – акустический импеданс материала ролика; $\rho_3 c_3$ – импеданс воздушной среды; η_1 – коэффициент отражения волны на границе сварочный инструмент – материал; η_2 – коэффициент отражения волны на границе материал–опора; α – коэффициент затухания волны; x – толщина материала; C – теплоемкость материала; ΔT – разность между температурой плавления материала и начальной температурой; V_1 – объем зоны сварки; V_2 – объем расплавляемой зоны; λ – удельная теплота плавления материала; T_n – температура начальная; $T_{пл}$ – температура плавления материала, Q_3 – потери энергии.

Схематично показанный на рис. 2, а общий вид процесса сварки позволил выявить особенности формирования различных сварных соединений.

При этом было установлено, что при формировании швов по замкнутому контуру или швов кольцевой формы происходит сложение продольных основных и наведенных (сдвиговых) колебаний рабочего инструмента [4].

Установленная зависимость времени сварки от амплитуды ультразвуковых колебаний (2), свойств материалов и скорости ультразвука в них, частоты колебаний, диаметра и ширины формируемого кольцевого сварного соединения имеет следующий вид

$$t = \frac{\pi h (dr d_2 - dr^2) (C \Delta T + \gamma)}{2\pi^2 f^2 A^2 c_n}, \quad (2)$$

где c_n – скорости колебаний в полимере и сварочном инструменте; h – высота плавления; dr – ширина кольцевого шва; d_2 – диаметр кольцевого шва; γ – удельная теплота плавления полимера; ΔT – изменение температуры в процессе сварки до температуры плавления полимера.

На основании общей энергетической зависимости (1) были установлены параметры сварки – скорости протяжки свариваемых изделий при реализации схемы непрерывной протяжённой сварки с опорой в виде вращающегося ролика (рис. 2, б) [5].

Установлены основные зависимости выделяемой в зоне сварки энергии от влияющих факторов, таких как скорость вращения ролика, ширина формируемого шва, свойства и толщина материалов, параметры ультразвука (3), (4).

$$W = I_1 \begin{pmatrix} 1 - e^{-2\alpha x} S - e^{-4\alpha x} S + \eta_2 e^{-4\alpha x} s - \\ - \eta_2 e^{-8\alpha x} s + \eta_3 e^{-4\alpha x} (S - s) - \\ - \eta_3 e^{-8\alpha x} (S - s) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где η_3 – коэффициент отражения на границе материал–воздух.

$$V_{пр} = \frac{Wl}{\rho_1 V_1 \int_{T_n}^{T_{пл}} C dT + \lambda \rho_1 V_2 + Q_3}. \quad (4)$$

Таким образом, были получены зависимости энергетических параметров УЗ воздействия (выделяемой в зоне сварки энергии) от скорости вращения ролика, от термодинамических и акустиче-

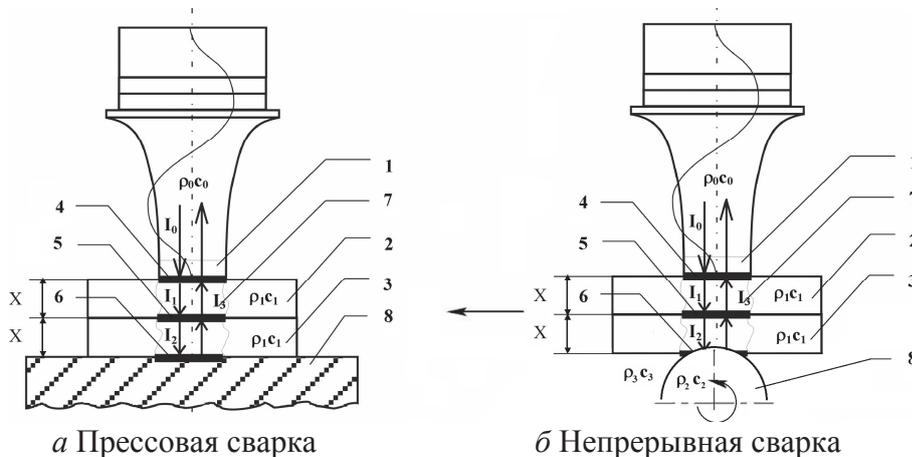


Рис. 2. Схемы введения ультразвуковых колебаний в свариваемые материалы: 1 – сварочный инструмент; 2, 3 – свариваемые материалы; 4–6 – границы раздела сред материалов, инструмента и опоры; 7 – зона сварки; 8 – опора (ролик); I_{0-3} – интенсивности ультразвуковых колебаний

ских свойств, толщины свариваемых листовых материалов.

При этом удалось установить, что при сварке тонких плёнок на фиксированной опоре [5] существенное влияние на процесс оказывает энергия трения (5) между слоями свариваемых материалов.

$$W_{\text{тр}} = 8\mu\rho_1cSA^2f^2. \quad (5)$$

Таким образом, была установлена зависимость скорости протяжки тонких плёнок от основных энергетических параметров, с учётом особенностей процесса и влияния энергии трения (6).

$$V_{\text{пр}} = \frac{(W_{\text{тр}} + W)l}{T_{\text{пл}} \rho_1 V_1 \int_{T_{\text{н}}} CdT + \lambda \rho_1 V_2}, \quad (6)$$

где $W_{\text{тр}}$ – энергия внешнего трения; W – скорость диссипации УЗ энергии; l – длина мгновенной зоны сварки; ρ_1 – плотность среды; V_1 – объем нагреваемого материала; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления полимера; $T_{\text{н}}$ – начальная температура; λ – удельная теплота плавления свариваемых материалов; V_2 – объем расплавляемого материала; μ – коэффициент трения; c – скорость звука в материале; S – площадь зоны сварки; $V_{\text{пр}}$ – скорость протяжки материалов.

Расчет энергетических параметров ультразвукового воздействия при различных условиях реализации процесса сварки позволил установить диапазоны необходимой перестройки УЗ сварочных аппаратов (по амплитуде и скорости протяжки материалов) при формировании непрерывных сварных швов. Установленные при этом зависимости скорости протяжки свариваемых материалов от ширины опоры-ролика (4), толщины и свойств свариваемых материалов позволили сформулировать требования к сварочным аппаратам, времени или скорости сварки при заданной частоте и амплитуде

колебаний, определенных свойствах и толщине материалов, размерах формируемого сварного соединения, определяемого формой и площадью излучающей поверхности сварочного инструмента.

При решении двух последних из поставленных задач, для реализации сварки различных изделий и материалов, предложены и разработаны специализированные сварочные аппараты (рис. 3) для прессовой сварки различных по форме сварных швов заклёпочного типа, швов линейной формы и кольцевой формы или швов по сложному замкнутому контуру.

Для формирования швов значительного размера (до 350 мм при ширине до 12 мм) предложены и разработаны ультразвуковые аппараты для прессовой сварки серии «Гиминей-Ш» мощностью от 1 до 3 кВт, обеспечивающие формирования линейных продольных сварных швов с площадью от 250 до 1800 мм² [6] (рис. 4).

Развитие технологии сварки линейных сварных швов позволило обеспечить высокоскоростное (менее 1 с) формирование герметичных сварных швов длиной до 360 мм и шириной до 12 мм, с возможностью формирования сдвоенных сварных швов для выполнения операции обрезки на автоматизированных упаковочных производствах.

На рис. 5 представлены УЗ сварочные аппараты серии «Гиминей-К», разработанные для формирования кольцевых сварных швов. Применение сварочных аппаратов этой серии позволило решать технологические задачи формирования сварных соединений кольцевой формы диаметром от 15 до 100 мм с шириной сварного шва до 10 мм [6].

Учет особенностей сварки тонких пленок и отработка технологии их соединения позволили создать ультразвуковые сварочные аппараты для формирования протяжённых сварных швов в тонких плёнках (рис. 6).

Необходимость реализации процесса сварки тонких пленок с высокой скоростью (до 3 м/с) по-



Рис. 3. Сварочные аппараты для прессовой сварки сварных швов заклёпочного типа



Рис. 4. Сварочные аппараты для прессовой сварки линейных швов



Рис. 5. Сварочные аппараты для прессовой сварки кольцевых швов



Рис. 6. Аппараты для сварки протяжённых непрерывных швов

требовала создания ультразвуковых аппаратов повышенной мощности, обеспечивающих амплитуду колебаний сварочного инструмента не менее 80 мкм. Применение УЗ оборудования серии «Гиминей-ультра» с различными по форме сварочными инструментами позволило не только формировать протяженные сварные швы, но и производить резку с возможностью одновременного оплавления кромок полимерных термопластичных и синтетических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сливин А.Н., Хмельёв В.Н., Абрамов А.Д. Развитие технологий и создание ультразвуковых аппаратов для сварки изделий из полимерных термопластичных материалов // Проведение научных исследований в области машиностроения: матер. Всеросс. научно-техн. конф. В 3-х ч. Ч. 1. – Тольятти, 27–28 ноября 2009. – Тольятти: ТГУ, 2009. – С. 35–41.
2. Сливин А.Н. Создание ультразвуковых аппаратов с оптимизацией энергетического воздействия для повышения эффективности сварки: дис. ... канд. техн. наук. – Бийск, 2008. – С. 77–95.
3. Lehr A.V., Khmelev V.N., Slivin A.N., Abramov A.D. Theoretical Investigations of Continuous Ultrasonic Seam Welding of Thermoplastic Polymers and Fabrics International Conference and Seminar on Micro // Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proc. – Novosibirsk: NSTU, 2010. P. 341–344.

Выводы

Таким образом, необходимость совершенствования технологии сварки привела к выработке общих подходов к реализации процессов сварки разнообразных деталей и материалов в различных условиях, позволяющих выбрать необходимые режимы ультразвукового воздействия для обеспечения качественной сварки и реализовать их на практике, используя созданные ультразвуковые сварочные аппараты.

4. Abramov A.D., Khmelev V.N., Slivin A.N. Researches of Ultrasonic Welding of Polymer Ring-Shaped Materials International Conference and Seminar on Micro // Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proc. – Novosibirsk: NSTU, 2010. P. 345–349.
5. Slivin A.N., Khmelev V.N., Nesterov V.A., Lehr A.V., Abramov A.D. The Development of ultrasonic welder for the formation of continuous welding seams // Nanotechnologies and Electron Devices EDM: XIII International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro. – Novosibirsk, NSTU, 2012. P. 148–156.
6. Zariadenia na ultrazvukové zváranie s automatickou optimalizáciou ultrazvukového pôsobenia / Chmelev V.N., Barsukov R.V., Slivin A.N., Cyganok S.N., Abramov A.D. // ZVÁRAČ. – Slovenská Republika, Bratislava, 2008. – Ročník. V. 3. P. 13–16.

Поступила 18.04.2013 г.

IMPROVEMENT OF ULTRASONIC WELDING AND DEVELOPMENT OF DEVICES FOR ITS IMPLEMENTATION

V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov

Biysk Technological Institute (branch) of I.I. Polzunov Altai State Technical University

The paper introduces the results of investigation of processes occurring at introduction of ultrasonic oscillations into weld items considering the features of implementing press cold and continuous welding when forming spot, line, circular and extended continuous welds. The identified dependences of energy required for ultrasonic welding on properties of weld materials, welding speed (speed of weld materials tracking), forms of pressure roller, frictions when welding thin films made it possible to define optimal modes of ultrasonic exposure for welding rivet, line and circular weld of different forms and welds of complex closed loop. The developed welding units allow supporting quality of welding items of polymeric thermoplastic materials.

Key words:

Ultrasonic welding, thermoplastic materials, technology, devices.

REFERENCES

1. Slivin A.N., Khmelev V.N., Abramov A.D. Razvitie tekhnologii i sozдание ultrazvukovykh apparatov dlya svarki izdeliy iz polimernykh termoplastichnykh materialov (Development of technology and ultrasonic devices for welding thermoplastic polymeric materials). *Provedenie nauchnykh issledovaniy v oblasti mashinostroeniya. Vserossiyskaya naucho-tekhnicheskaya konferentsiya* (Proc. All-Russian scientific and technical conference Carrying out the research in the field of mechanical engineering). Tolyatti, TGU Publ., 2009. 1, pp. 35–41.
2. Slivin A.N. *Sozдание ultrazvukovykh apparatov s optimizatsiey energeticheskogo vozdeystviya dlya povysheniya effektivnosti svarki*. Diss. kand. tekhn. nauk (Creation of ultrasonic devices with optimized power influence to improve the efficiency of welding. Cand. tech. sci. diss). Biysk, 2008. 77–95 p.
3. Lehr A.V., Khmelev V.N., Slivin A.N., Abramov A.D. *Theoretical Investigations of Continuous Ultrasonic Seam Welding of Thermoplastic Polymers and Fabrics International Conference and Seminar on Micro Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proc.* Novosibirsk: NSTU, 2010. pp. 341–344.
4. Abramov A.D., Khmelev V.N., Slivin A.N. Researches of Ultrasonic Welding of Polymer Ring-Shaped Materials. *International Conference and Seminar on Micro Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proc.* Novosibirsk: NSTU, 2010. pp. 345–349.
5. Slivin A.N., Khmelev V.N., Nesterov V.A., Lehr A.V., Abramov A.D. The Development of ultrasonic welder for the formation of continuous welding seams. *Nanotechnologies and Electron Devices EDM: XIII International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro.* Novosibirsk, NSTU, 2012. pp. 148–156.
6. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Slivin A.N., Tsyganok S.N., Abramov A.D. *Zariadenia na ultrazvukové zváranie s automatickou optimalizáciou ultrazvukového pôsobenia* (Apparatus for ultrasonic welding with automatic optimization of the ultrasonic influence). Slovak Republic, Bratislava, 2008. 3, pp. 13–16.