

Совершенствование Технологии и Создание Аппаратов для Ультразвуковой Сварки

Алексей Н. Сливин, Владимир Н. Хмелёв, *Senior Member*, IEEE, Алексей Д. Абрамов
Центр ультразвуковых технологий, Бийск, Россия

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета и. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

Аннотация – Предложена методика совершенствования технологии прессовой и непрерывной ультразвуковой сварки полимерных термопластичных материалов. Совершенствование технологии сварки, новой методики её развития, разработка новых сварочных инструментов и аппаратов, отработка новых технологий, позволили обеспечить высокую эффективность решения различных технологических задач, обеспечить организацию и развитие новых производств сборки и сварки изделий из полимерных термопластичных материалов.

Ключевые слова – Ультразвуковая сварка, термопласты, технология, аппараты.

I. ВВЕДЕНИЕ

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 (см. 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;
- простоту механизации и возможность автоматизации процесса.

Перечисленные достоинства ультразвуковой сварки могут быть реализованы с максимальной эффективностью только при создании оптимальных условий и режимов реализации процесса формирования сварного соединения.

Условия сварки определяются способом подведения энергии ультразвуковых колебаний к свариваемым поверхностям (способом формирования контакта сварочного инструмента и способом перемещения его по поверхности свариваемого материала).

Наибольшее распространение на практике получила технология подведения энергии в процессе прессовой сварки,

когда осуществляется вертикальная подача и прижим рабочего инструмента к свариваемым поверхностям с определенным усилием.



Рис. 1. Изделия из полимерных термопластичных материалов различного назначения, изготовленные с применением УЗ сварки.

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, контактирующих с поверхностью свариваемых материалов. Поэтому, следующим необходимым условием реализации процесса является выбор размера и формы рабочего инструмента. Форма и размеры рабочего инструмента, а также форма его излучающей поверхности определяются требованиями формирования необходимого по форме и размерам шва (прямоугольного, с замкнутым контуром, непрерывного и т.п.).

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.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Таким образом, необходимость обеспечения оптимальных условий и режимов процесса сварки требует выбора необходимых условий 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 изде-

лий 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 реализовать 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.

III. ТЕОРИЯ

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 так же 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 заданной длины, формируемые без горизонтального перемещения инструмента могут выполняться не только в виде сплошного шва, но могут представлять собой два параллельно идущих сварных шва, либо чередующиеся вдоль длины формируемого шва площадки 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.

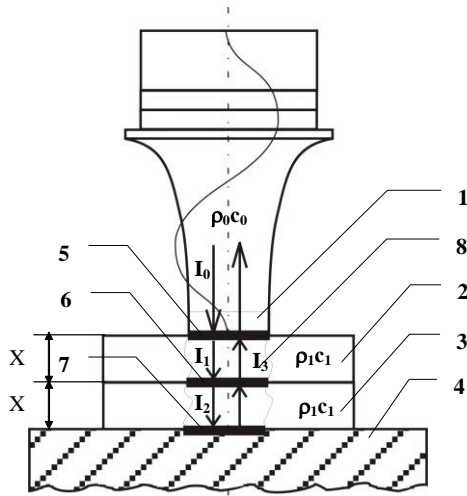
При реализации прессовой или непрерывной сварки, для обеспечения введения энергии ультразвуковых колебаний с максимальной эффективностью, необходимо обеспечивать максимальный по площади акустический контакт излучающей поверхности со свариваемыми материалами изделия. Это обеспечивается подводом сварочного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

При реализации непрерывной сварки технология подвода и прижима сварочного инструмента практически такая же. Однако, отличие заключается в протягивании свариваемых плёночных или листовых материалов под поверхностью

сварочного инструмента или в обеспечении скольжения сварочного инструмента по поверхностям свариваемых изделий.

Для определения необходимых и достаточных значений энергетического воздействия и диапазонов необходимой перестройки энергетических параметров ультразвуковых аппаратов в процессе сварки проведены теоретические исследования процесса формирования и ввода ультразвуковых колебаний в свариваемые материалы, схематично показанного на Рис.2 [2,3].

Проведенные исследования позволили установить зависимости времени формирования сварного соединения от энергии ультразвуковых колебаний, выделяющейся в слоях различных по свойствам материалов (1).



1 – сварочный инструмент; 2,3 – свариваемые материалы; 4 – опора; 5,6,7 – границы раздела сред материалов, инструмента и опоры; 8 – зона сварки; I_0, I_1, I_2, I_3 – интенсивности ультразвуковых колебаний.

Рис. 2. Введение ультразвуковых колебаний в свариваемые материалы.

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

где f – частота; A_0 – амплитуда; S – площадь инструмента; $\rho_0 c_0$ – акустический импеданс сварочного инструмента; $\rho_1 c_1$ – акустический импеданс материала; ρ_1 – плотность свариваемого материала; η_1 – коэфф. 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_{nl} – температура плавления материала.

Схематично показанный на Рис.2 общий вид процесса сварки позволил изучить особенности формирования различных сварных соединений.

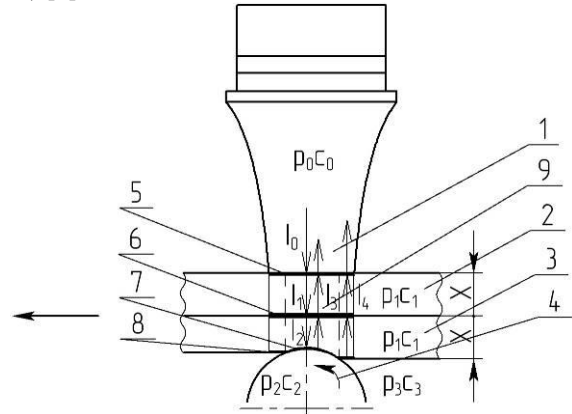
Так было установлено, что при формировании швов по замкнутому контуру или швов кольцевой формы происходит сложение продольных основных и наведенных (сдвиговых) колебаний рабочего инструмента [4].

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

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

где c_n – скорости колебаний в полимере и сварочном инструменте; h – высота плавления; dr – ширина шва; d_2 – диаметр 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 (см. Рис.3) [5].



1 – сварочный инструмент; 2,3 – свариваемые материалы; 4 – опора-ролик;

5,6,7 – границы раздела сред материалов, инструмента и опоры; 8 – зона сварки; I_0, I_1, I_2, I_3, I_4 – интенсивности ультразвуковых колебаний

Рис. 3. Формирование протяжённых непрерывных сварных швов.

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).

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

$$V_{np} = \frac{W \cdot l}{T_{nn} \rho_1 V_1 \int C dT + \lambda \rho_1 V_2 + Q_3} \quad (4)$$

Таким образом, были получены зависимости энергетических параметров УЗ воздействия (выделяемой в зоне сварки энергии) от скорости от сварки и свойств материалов, в частности от толщины свариваемых листовых материалов.

При этом удалось установить, что при сварке тонких плёнок на фиксированной опоре [6] существенное влияние на процесс оказывает энергия трения (5) между слоями свариваемых материалов.

$$W_{mp} = 8\mu\pi r c S A^2 f^2 \quad (5)$$

$$V_{np} = \frac{(W_{mp} + W) \cdot l}{\rho_1 V_1 \int_{T_{nn}}^{T_{nn}} C dT + \lambda \rho_1 V_2}, \quad (6)$$

где W_{mp} – энергия внешнего трения; W – энергия диссипации; l – длина мгновенной зоны сварки; ρ – плотность среды; V_1 – объем нагреваемого материала; T_{nn} – температура плавления полимера; T_{nn} – 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.

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.

IV. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При решении двух последних из поставленных задач, для реализации сварки различных изделий и материалов, предложены и разработаны специализированные сварочные аппараты (см. Рис.4.) для прессовой сварки различных по форме сварных швов заклёпочного типа, швов линейной формы и кольцевой формы или швов по сложному замкнутому контуру.



Рис. 4. Сварочные аппараты для прессовой сварки сварных швов заклёпочного типа.

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 кВт до 3кВт, обеспечивающие формирование линейных продольных сварных швов с площадью от 250 мм² до 1800 мм² [7] (см. Рис.5).



Рис. 5. Сварочные аппараты для прессовой сварки линейных швов.

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.6 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 мм до 100 мм с шириной сварного шва до 10 мм [8].



Рис. 6. Сварочные аппараты для прессовой сварки кольцевых швов

Учет особенностей сварки тонких пленок и отработка технологии их соединения, позволили создать ультразвуковые сварочные аппараты для формирования протяжённых сварных швов в тонких плёнках (см. Рис.7). Необходимость реализации процесса сварки тонких пленок с высокой скоростью (до 3 м/с) потребовала 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.



Рис. 7. Ультразвуковые аппараты для формирования протяжённых непрерывных сварных швов

VI. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Сливин, А.Н. Развитие технологий и создание ультразвуковых аппаратов для сварки изделий из полимерных термопластичных материалов // В.Н. Хмельев, А.Д. Абрамов // Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции «Проведение научных исследований в области машиностроения». – Тольятти, 27–28 ноября 2009 г. В 3-х ч. / под общ. Ред. М.М. Криштала. – Тольятти: ТГУ, 2009. – Ч.1. – стр. 35–41
- [2]. Сливин, А.Н. «Создание ультразвуковых аппаратов с оптимизацией энергетического воздействия для повышения эффективности сварки» // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Бийск: 2008. – стр. 1–180.
- [3]. Slivin, AN Theoretical Investigations of Continuous Ultrasonic Seam Welding of Thermoplastic Polymers and Fabrics International Conference and Seminar on Micro // Khmelev V.N. Lehr, A.V. Abramov A.D.// Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P.341-344.
- [4]. Abramov, A.D. Researches of Ultrasonic Welding of Polymer Ring-Shaped Materials International Conference and Seminar on Micro / Khmelev V.N. Slivin A.N., Abramov A.D. Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P.345-349.
- [5]. Lehr, A.V. Studies of transformation of longitudinal ultrasonic vibrations into radial ones // Khmelev V.N., Nesterov V.A., Slivin A.N., Lehr A.V. XII International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2011, Novosibirsk, NSTU. 2011. – P.288-291.
- [6]. Леер, А.В. Влияние поверхностного трения на процесс непрерывной ультразвуковой сварки тонких полимерных пленок // Хмельев В.Н., Нестеров В.А., Сливин А.Н. // Южно-сибирский научный вестник –2012. – № 1. – С. 63-66.
- [7]. Slivin, A.N., The Development of ultrasonic welder for the formation of continuous welding seams // Khmelev V.N., Nesterov V.A., , Lehr A.V. Abramov A.D. XIII International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2012, Novosibirsk, NSTU. 2012. – P.148-156.
- [8]. Abramov, A.D. The Development of Ultrasonic Vibrating Systems for the Formation of Circular Joint Welds // V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A. D. Abramov International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies