

УДК 621.778

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ЧАСТИЧНО КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕРМОПЛАСТОВ

В. В. РУБАНИК¹, В. Ф. ЛУЦКО¹⁺, А. А. КАЗЬМИН², О. С. ПОПОВА¹, В. С. ЛАБЕЦКИЙ¹¹ Институт технической акустики НАН Беларуси, пр. Генерала Лядникова, 13, 210009, г. Витебск, Беларусь² Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь

Целью работы является экспериментальное исследование влияния положения концентраторов энергии на прочностные характеристики сварного шва с целью минимизации энергии, подводимой к свариваемому изделию, и повышения качества сварного соединения. Для определения прочности сварного соединения проведены испытания на растяжение в соответствии ГОСТ 11262-80 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение». Сварку образцов проводили внахлест, когда ультразвуковые колебания от излучателя передавались в зону контакта через образец с концентраторами энергии и через образец без выступа. Для испытаний сварного соединения одноосным растяжением использовали разрывную машину INSTRON 3369. Исследовано влияние расположения концентраторов энергии, выполненных в виде трехгранной призмы, относительно ввода ультразвуковых колебаний на прочностные характеристики сварного шва. Показано, что передача ультразвуковых колебаний в зону сварки через образец с концентратором энергии требует меньше временных и энергетических затрат, что позволяет повысить производительность процесса и предотвращает появление следа на поверхности изделия от вибрирующего излучателя. С ростом высоты концентраторов увеличивается площадь сварки, что приводит к возрастанию прочности сварного соединения.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, частично кристаллические термопласты, ультразвуковые колебания, методы испытания на разрыв при растяжении, концентраторы энергии.

PECULIARITIES OF ULTRASONIC WELDING OF SEMICRYSTALLINE THERMOPLASTICS

V. V. RUBANIK¹, V. F. LUTSKO¹⁺, A. A. KAZMIN², A. S. PAPOVA¹, U. S. LABETSKI¹¹ Institute of Technical Acoustics of National Academy of Sciences of Belarus, General Ludnikov avenue, 13, 210009, Vitebsk, Belarus² Yanka Kupala State University of Grodno, Ozheshko st., 22, 230023, Grodno, Belarus

The aim of the present paper is to show the results of the welding experimental study focused on the influence of the position of energy director on strength characteristics of a welded joint in order to minimize energy supplied to the welded article and improve the quality of a welded joint. Tensile tests were carried out on the welded samples according to GOST 11262-80 "Plastics. Tensile strength test method". A method for producing overlapping weld joints comprises the following steps: the ultrasonic vibrations are applied to the contact zone via energy director and without energy director. The uniaxial tensile tests were carried out using an INSTRON 3369 to investigate the uniaxial tensile properties of the welded joints. The influence of the position of energy directors having the form of a three-sided prism with respect to the introduction of ultrasonic vibrations on the strength characteristics of the welded joint is analyzed. It has been shown that the welding process requires less time and energy consumption when the ultrasonic vibrations applied to the welding zone of the sample via energy director. This allows one to increase the productivity of the process and help to reduce the probability of surface defects of the workpiece caused

⁺ Автор, с которым следует вести переписку: E-mail: lutsko_v@mail.ru

by the vibrating transducer. As the height of the energy director increases, the welding zone increases. Due to this, the weld strength tends to increase.

Keywords: ultrasonic welding, semicrystalline thermoplastics, ultrasonic vibrations, tensile test methods, energy director.

Введение

Из разнообразия методов сварки термопластичных полимеров с генерированием тепла внутри свариваемого материала путем преобразования различных видов энергии наиболее перспективными являются три из них – это сварка токами высокой частоты (ТВЧ), лазером и ультразвуком. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и существенные недостатки.

Сварка ТВЧ основана на нагреве диэлектрического материала в высокочастотном электромагнитном поле в результате преобразования электрической энергии в тепловую благодаря наличию молекулярного трения, обеспечивает быстрый и локальный нагрев соединяемых поверхностей без проплавления всего объема материала. Однако сварка ТВЧ может использоваться только для полимеров с высокими диэлектрическими потерями, поэтому высокочастотный способ пригоден для частично кристаллических полимерных материалов и не пригоден для множества широко распространенных материалов, например, аморфных полимерных материалов. Кроме того, сварка ТВЧ характеризуется высокой энергоемкостью (КПД не превышает 20%) и требует специальных мер по защите персонала и электронной аппаратуры от высокочастотного излучения.

При сварке термопласта лучом лазера нагрев соединяемых поверхностей достигается в результате превращения лучевой энергии лазера в тепловую в месте фокусировки луча. В процессе сварки лазерный луч проходит сквозь прозрачную для него деталь и приводит к нагреву и размягчению соединяемого участка абсорбирующей его детали. Благодаря передаче тепла от нее к прозрачной детали соединяемый участок последней также размягчается и под действием давления образует с нижней деталью сварной шов. Низкая распространенность лазерной сварки обусловлена технической сложностью и реализацией таких сварочных аппаратов. Именно отсутствие простоты не позволяет стать лазерной сварке на массовый путь применения.

Ультразвуковая сварка основывается на нагреве свариваемых поверхностей до температуры размягчения в результате превращения энергии колебаний ультразвуковой частоты в тепловую энергию, при этом механические колебания ультразвуковой частоты и давление действуют по одной линии, перпендикулярно к соединяемым поверхностям. Ультразвуковая сварка деталей из термопластичных полимеров, вследствие очень короткой продолжительности цикла и экологической безопасности, имеет

большой потенциал для использования в серийном производстве в различных отраслях промышленности. В тоже время, широкому ее использованию для соединения частично кристаллических термопластов, таких как полипропилен, пластифицированный поливинилхлорид, полиэтилен, препятствует их низкий модуль упругости ($E < 2 \cdot 10^3$ МПа) и большой коэффициент затухания ультразвуковых колебаний, приводящих к значительному тепловыделению не только на границе раздела свариваемых материалов, но и в объемах, прилегающих к излучателю [1]. В результате, происходит существенная деформация поверхностей свариваемых деталей и внедрение рабочего торца волновода в пластмассу с вытеснением пластифицированного материала. Кроме того, необходима высокая амплитуда ультразвуковых колебаний, чтобы выработать достаточное для сварки тепло.

Решить эту задачу можно путем совместного проектирования ультразвукового оборудования и самого изделия, позволяющих сконцентрировать и уменьшить полную энергию и, таким образом, снизить время сварки и предотвратить деформацию свариваемых деталей, а также появления следа от вибрирующего излучателя на контактной поверхности. Известно, что развитие и образование сварного соединения может быть интенсифицировано за счет создания искусственных концентраторов энергии на поверхности контакта. Традиционно, при производстве изделий из пластмассы концентраторы энергии формируются прямо на соединяемых поверхностях в виде треугольных, полукруглых или прямоугольных выступов [2–6]. Преимущественный нагрев концентраторов энергии является результатом более высокой циклических деформаций и концентрации генерации теплоты на поверхности раздела через механизмы граничного и вязкоупругого трения. Благодаря этому происходит разогрев выступов, их оплавление, растекание полимера под действием статического давления по поверхности контакта деталей и образование при остывании сварного соединения. Таким образом, морфология, размер и конфигурация выступов определяют качество сварного шва [7]. В то же время, нет достаточной информации о влиянии положения концентраторов энергии относительно направления ввода ультразвуковых колебаний на процесс сварки частично кристаллических полимеров.

Цель работы — экспериментальное исследование влияния положения концентраторов энергии на прочностные характеристики сварного шва с целью минимизации энергии, подводимой к свариваемому изделию, и повышения качества сварного соединения.

Материалы и методы

В исследовании использовали созданную в ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси» установку для ультразвуковой сварки изделий из термопластичных полимеров [8] (рис. 1). Основными узлами разработанного оборудования являются: электронный ультразвуковой генератор 1, пневматический пресс 2 и акустическая система (рис. 1, *а*).

Электронный генератор формирует и подает электрические сигналы частотой 20 кГц с регулируемой мощностью от 800 до 1200 Вт на акустическую систему. Генератор имеет микропроцессорное управление, которое контролирует направление движения пресса, удержание свариваемых деталей под давлением и включение/выключение ультразвуковой энергии. В генератор встроены частотомер и ваттметр для измерения в режиме реального времени частоты и мощности сигнала, подаваемого на преобразователь. Реле времени генератора позволяет дозированно подавать ультразвуковую энергию в зону обработки.

Акустическая система состоит из соосно установленных и последовательно соединенных пьезоэлектрического преобразователя 3, бустера 4 и волновода-излучателя 5 (рис. 1, *б*). Пьезоэлектрический преобразователь преобразует электрические сигналы от электронного генератора в механические колебания той же частоты. Бустер увеличивает амплитуду этих колебаний до заданной величины и передает их на волновод-излучатель. Излучатель имеет несколько функций. Первая функция — передача ультразвуковой энергии колебаний свариваемым изделиям 6, расположенным на ложементе 7 через прямой механический контакт, и локализация энергии в области, где должна произойти сварка. Вторая функция — усиление амплитуды колебаний рабоче-

го торца, исходя из требований технологического процесса сварки. Третья функция — передача от пневматического пресса давления, необходимого для формирования сварного шва. Увеличение амплитуды колебаний может быть достигнуто за счет изменения размеров и формы поперечного сечения излучателей по определенному закону.

Пневматический пресс предназначен для подвода акустической системы к свариваемым деталям и приложения к ним посредством излучателя необходимого усилия сжатия.

Для определения прочности сварного соединения проведены испытания на растяжение в соответствии ГОСТ 11262-80 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» [9]. Образцы изготавливали методом литья под давлением на термопластавтомате БЗСТ 125/310 из полиэтилена марки ПЭВД в виде полос толщиной 1,6 мм, шириной 25 мм и длиной 100 мм. На одном из свариваемых образцов в качестве концентраторов энергии были выполнены треугольные выступы высотой h равной 0,7; 0,4 и 0,1 мм с углом при вершине 60° и равные ширине полосы.

Сварку образцов проводили внахлест по схеме (рис. 2), когда ультразвуковые колебания от излучателя передавали в зону контакта через образец с концентраторами энергии (рис. 2, *а*) и через образец без выступа (рис. 2, *б*). Использовали волновод-излучатель ступенчатой формы с диаметром рабочего торца 50 мм. Сварку осуществляли с усилием прижатия излучателя к свариваемым образцам $F = 154$ Н и амплитудой колебаний рабочего торца излучателя $\xi = 55$ мкм. Выходная мощность генератора составляла 1200 Вт. Сила прижима при затвердевании расплава сварного шва была сохранена неизменной, а время при этом оставалось постоянным и составляло 1000 мс.

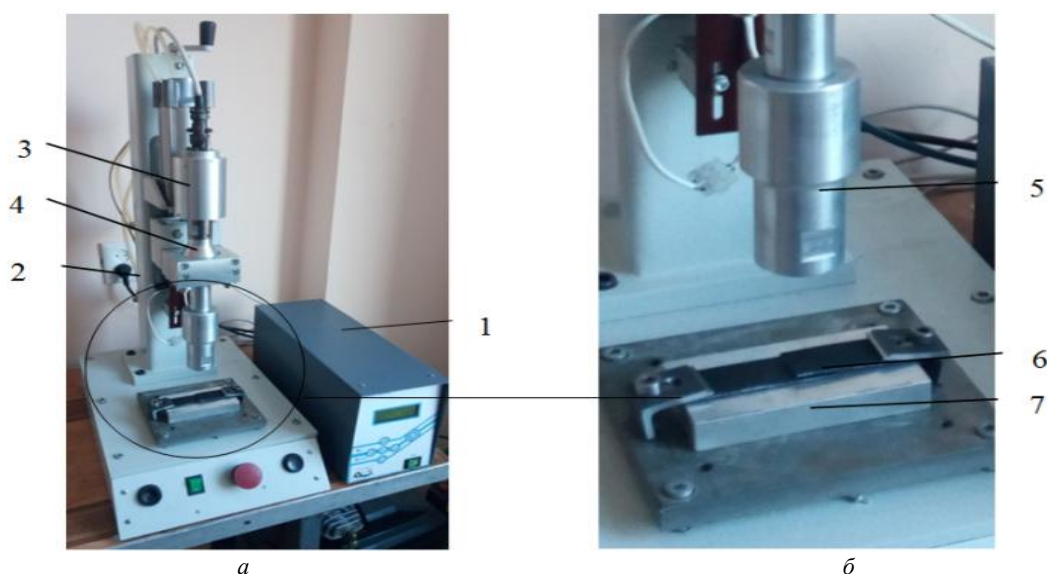


Рисунок 1 — Ультразвуковая сварочная машина: *а* — общий вид; *б* — зона ультразвуковой сварки; 1 — ультразвуковой генератор, 2 — пневматический пресс, 3 — пьезоэлектрический преобразователь, 4 — бустер, 5 — волновод-излучатель, 6 — свариваемые детали, 7 — ложемент.

Fig. 1 — Ultrasonic welding machine: *a* — general view; *b* — ultrasonic welding zone; 1 — ultrasonic generator, 2 — pneumatic press, 3 — piezoelectric transducer, 4 — booster, 5 — horn, 6 — welding parts, 7 — substrate

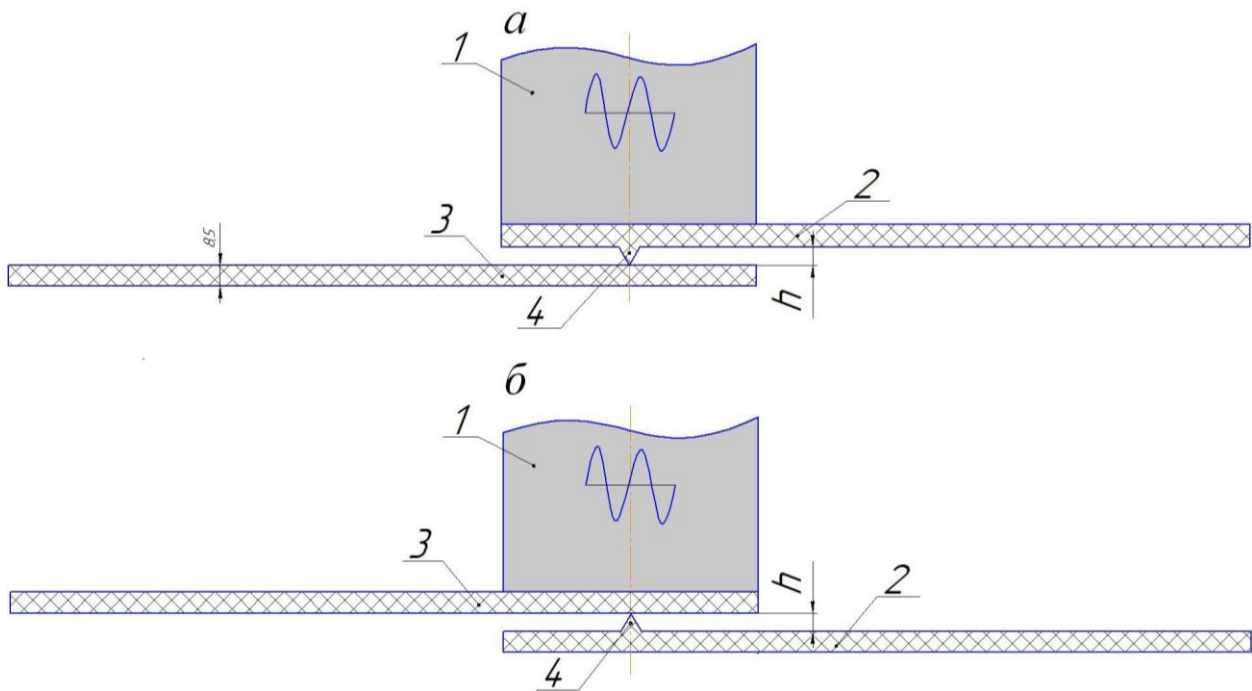


Рисунок 2 — Схема ультразвуковой сварки образцов с различным расположением концентратора энергии: (а) подача ультразвуковой энергии сверху, (б) подача ультразвуковой энергии снизу: 1 – излучатель, 2 – образец с концентратором энергии, 3 – образец без концентратора энергии, 4 – концентратор энергии, h – высота концентратора энергии
 Fig. 2 — Scheme of ultrasonic welding of samples with different position of energy directors: upper introduction of ultrasonic energy (а) and lower introduction of ultrasonic energy (б) : 1 – transducer, 2 – with energy director, 3 – without energy director, 4 – energy director, h – height of energy director

Для испытаний сварного соединения одноосным растяжением использовали разрывную машину INSTRON 3369. Принцип работы машины заключается в создании нагружающего усилия на образец и регистрации нагрузки. Микропроцессорный блок машины позволяет производить наблюдение за процессом испытания на растяжение до момента достижения заданного параметра (нагрузки или деформации) по диаграммам в координатах «нагрузка–перемещение». Скорость нагружения составляла 100 мм/мин.

Результаты и обсуждения

На рис. 3 представлены результаты измерения максимальной нагрузки при растяжении F_{pp} сварных соединений образцов, в зависимости от времени ультразвукового воздействия t . Кривая 1 соответствует ультразвуковой сварке, проведенной по схеме, представленной на рис. 2, а, кривая 2 — по схеме, представленной на рис. 2, б. Каждая точка на кривых, соответствует среднеквадратичному отклонению пяти измерений для заданного времени генерации ультразвуковых колебаний.

Очевидно, что при одинаковом времени генерации ультразвуковых колебаний в интервале от 0,3 до 1,2 с более высокое значение максимальной нагрузки соответствует схеме передачи ультразвуковой энергии в зону контакта через образец с концентраторами энергии (кривая 1, рис. 3). В этом случае время, необходимое для достижения максимальной прочности сварного соеди-

нения, равно 0,7 с, а величина энергии составляет 756 Вт·с. Во втором случае, когда колебания в зону контакта передаются через образец без треугольного выступа, эти величины соответственно равны 1,2 с и 1296 Вт·с. Анализ поверхностей разрыва сваренных образцов, полученных после достижения вышеуказанных величин времени генерации ультразвуковых колебаний, указывает на то, что наряду с плавлением концентраторов энергии одновременно плавится и материал прилегающей к нему зоны.

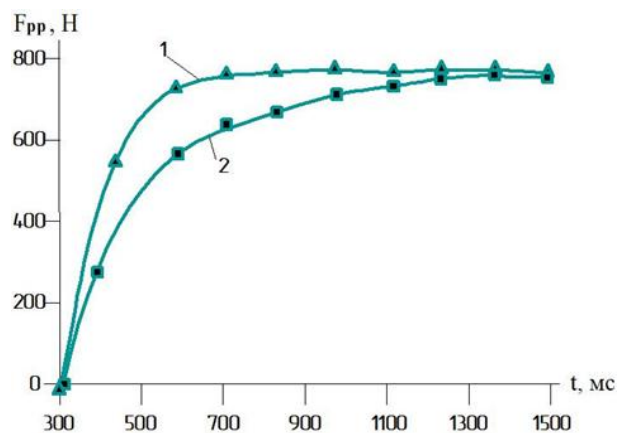


Рисунок 3 — Зависимость максимальной нагрузки при растяжении F_{pp} сварных соединений образцов от времени генерации ультразвуковых колебаний t : 1 – по схеме, рис. 2, а; 2 – по схеме, рис. 2, б
 Fig. 3 — Dependence of the maximum tensile load F_{pp} of the welded joints on the ultrasonic vibration time t : 1 – according to the scheme, Fig. 2, а; 2 – according to the scheme, Fig. 2, б

Кривые на рис. 4 показывают зависимости максимальной нагрузки при растяжении F_{pp} от времени ультразвукового воздействия t для сваренных образцов с тремя высотами концентраторов энергии: 0,7 мм (1), 0,4 мм (2) и 0,1 мм (3).

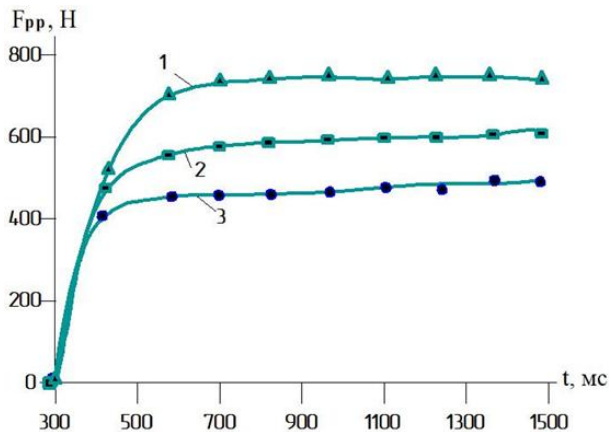


Рисунок 4 — Зависимость максимальной нагрузки при растяжении F_{pp} сварных соединений образцов от времени генерации ультразвуковых колебаний t с высотой h концентраторов энергии 0,7 мм (кривая 1), 0,4 мм (кривая 2) и 0,1 мм (кривая 3)

Fig.4 — Dependence of the maximum tensile load F_{pp} of the welded joints on the ultrasonic vibration time t with different height of energy directors $h = 0.7$ mm — curve 1, $h = 0.4$ mm — curve 2 and $h = 0.1$ mm — curve 3

Поведение кривых показывает, что в начальной стадии процесса сварки за время генерации ультразвуковых колебаний 450 мс сваренные образцы имеют близкие значения прочности. Это можно объяснить тем, что количество необходимого для формирования сварного шва расплавленного полимера, образовавшегося под совместным воздействием ультразвуковых колебаний и давления, для всех

трех конфигураций концентраторов энергии приблизительно одинаково. Визуальное наблюдение поверхности разрыва также указывает на сопоставимую площадь сварки (сварного шва) для всех конфигураций. После указанного времени генерации более высокое значение максимальной нагрузки соответствуют более высоким значениям высот концентраторов энергии. Очевидно, что с возрастанием размеров концентраторов энергии увеличивается объем полимера, который плавится и выдавливается на контактные поверхности свариваемых образцов. При этом, увеличивается площадь сварки, что приводит к увеличению прочности сварного соединения. В тоже время, для сваренных образцов с концентратором энергии высотой 0,1 мм наряду с концентратором энергии одновременно может происходить сварка в отдельных точках поверхностей, являющихся местами первоначального контакта свариваемых деталей, что не позволяет получить прочное и герметичное соединение.

Результаты этих исследований были использованы при проектировании деталей картриджа и разработке технологического процесса их ультразвуковой сварки. Полипропилен каплен 01180-110 (материал детали картриджа), также как и полиэтилен, относятся к классу кристаллических полиолефинов и имеют сходные свойства.

Для ультразвуковой сварки корпуса 1, крышки 2 с ситами 3 картриджа фильтра-кувшина в литейной форме была выполнена треугольная канавка, за счет которой и формировался в свариваемых деталях выступ (концентратор энергии) с углом при вершине 60° , высотой 0,7 мм, расположенный по периметру сварки (рис. 5).

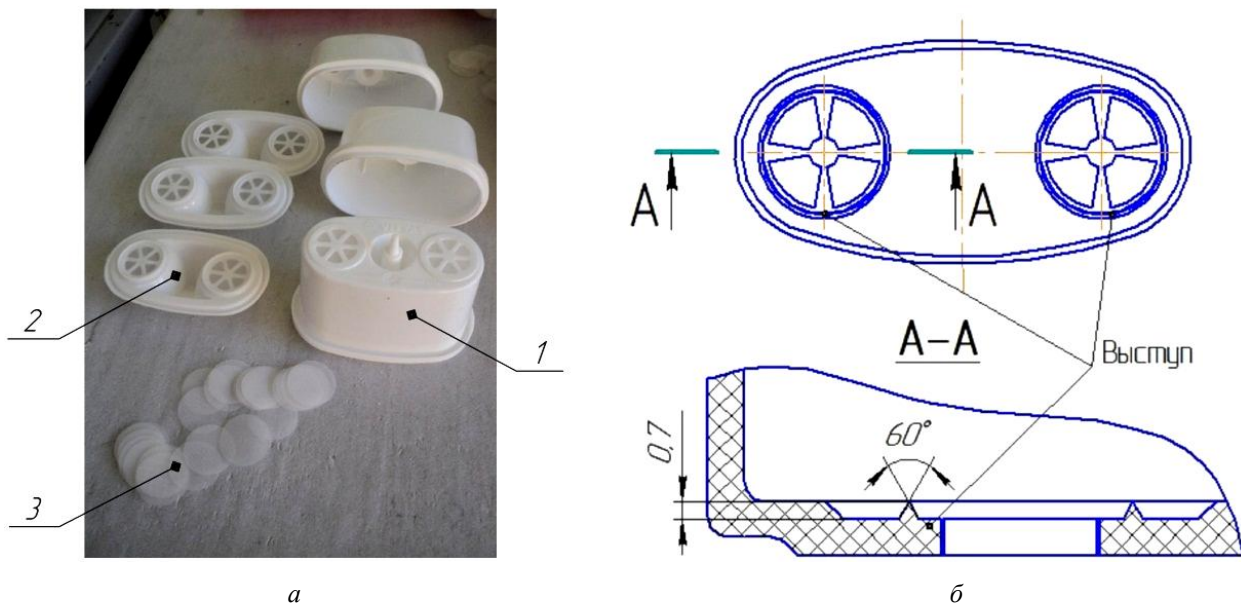


Рисунок 5 — Картридж фильтра-кувшина: а — детали картриджа: 1 — корпус картриджа, 2 — крышка картриджа, 3 — сито;

б — конструкция треугольной кромки на крышке и корпусе картриджа

Fig. 5 — Cartridges for water filter jugs: а — cartridge parts: 1 — cartridge body, 2 — cartridge top, 3 — sieve; б — design of triangular edges on cartridge top and cartridge body

На сварные швы, полученные ультразвуковой сваркой сит с крышкой и корпусом картриджа, в процессе эксплуатации действуют нагрузки на отрыв. Так как в настоящее время не существует стандартной методики испытаний прочности сварного шва на отрыв, то была проведена визуальная оценка качества соединения полученных по разным схемам ультразвуковой сварки. Установлено, что передача ультразвуковых колебаний по схеме через крышку и корпус картриджа с выполненными на них треугольными выступами позволяет получить более качественный сварной шов и за более короткое время, чем по схеме передачи через сито. Более короткое время контакта вибрирующего излучателя с деталями картриджа снижает вероятность появления следа на контактной поверхности и выплеска пластмассы по периметру сварного шва.

Заключение

Таким образом, передача ультразвуковых колебаний в зону сварки через образец, содержащий концентратор энергии, позволяет значительно снизить как время сварки, так и энергетические затраты. Как следствие, возрастает производительность процесса и уменьшается вероятность появления следа от вибрирующего излучателя на поверхности готового изделия. С ростом высоты концентраторов увеличивается площадь сварки, что приводит к увеличению прочности сварного соединения.

Обозначения

КПД — коэффициент полезного действия; ТВЧ — токи высокой частоты; Е, МПа — модуль упругости; F, Н — усилие прижатия к излучателя к сварочным образцам; F_{pp}, Н — максимальная нагрузка при растяжении; h, мм — высота концентратора энергии; t, мс — время генерации ультразвуковых колебаний; ξ — амплитуда колебаний рабочего торца излучателя.

Литература

1. Rani M. R., Prakasan K, Rudramoorthy R. Study of different joints for ultrasonic welding of semicrystalline polymers // *Experimental Techniques*, 2009, vol. 33, no 4, pp. 36–42. doi: 10.1111/j.1747-1567.2008.00399.x
2. Yan J, Wang X, Li R. et. al. The effects of energy director shape on temperature field during ultrasonic welding of thermoplastic composites // *Key Eng. Mater.*, 2007, vol. 353–358, pp.2007–2010.
3. Villegas I. F. Strength development versus process data in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors and its application to the definition of optimum processing parameters // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, vol.65, pp. 27–37. doi: 10.1016/j.compositesa.2014.05.019.
4. Клубович В. В., Рубаник В. В., Луцко В. Ф., Казьмин А. А., Попова О. С. Особенности ультразвуковой сварки изделий из полукристаллических полимеров // *ПОЛИКОМТРИБ–2017: тезисы докладов Гомель, 2017. С. 248.*

5. Palardy G., Villegas I. F. On the effect of flat energy directors thickness on heat generation during ultrasonic welding of thermoplastic composites // *Composite Interfaces*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 203–214. doi:10.1080/09276440.2016.1199149
6. Villegas I. F., Grande B. V., Bersee HEN, Benedictus R. A comparative evaluation between flat and traditional energy directors for ultrasonic welding of thermoplastic composites // *ECCM 2014: Proceedings of the ECCM 16th European conference on composite materials (22–26 June 2014) / University of Seville; ed. F. Paris. Seville, 2014. pp.1–8.*
7. Palardy G., Agricola F. M., Dransfeld C., Villegas I. F. Up-Scaling of the Ultrasonic Welding Process for Joining Thermoplastic Composites // *Proceedings of the SAMPE Baltimore conference and exhibition, Baltimore, USA, 2015, pp. 1–15.*
8. Рубаник В. В., Луцко В. Ф., Шрубиков С. Н., Попова О. С., Шурмелевич Д. Д. Технология и оборудование для ультразвуковой сварки полимерных материалов // *ПОЛИКОМТРИБ–2015: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. Гомель, 2015. С. 300.*
9. ГОСТ 11262–80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. Введ. 1980-01-12. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. 16 с.

References

1. Rani M. R., Prakasan K, Rudramoorthy R. Study of different joints for ultrasonic welding of semicrystalline polymers. *Experimental Techniques*, 2009, vol. 33, no. 4, pp. 36–42. doi: 10.1111/j.1747-1567.2008.00399.x
2. Yan J, Wang X, Li R. et al. The effects of energy director shape on temperature field during ultrasonic welding of thermoplastic composites. *Key Eng. Mater.*, 2007, vol. 353–358, pp. 2007–2010.
3. Villegas I. F. Strength development versus process data in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors and its application to the definition of optimum processing parameters. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, vol.65, pp. 27–37. doi: 10.1016/j.compositesa.2014.05.019.
4. Klubovich V. V., Rubanik V. V., Lutsko V. F., Kazmin A. A., Popova O. S. Osobennosti ultrazvukovoy svarki izdeliy iz polukristallicheskih polimerov. [Features of ultrasonic welding of products from semi-crystalline thermoplastics]. *POLIKOMTRIB–2017: tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [POLIKOMTRIB–2017]. Gomel, 2017, pp. 248.
5. Palardy G., Villegas I. F. On the effect of flat energy directors thickness on heat generation during ultrasonic welding of thermoplastic composites. *Composite Interfaces*, 2017, vol.24, no. 2, pp. 203–214. doi:10.1080/09276440.2016.1199149
6. Villegas I. F., Grande B. V., Bersee HEN, Benedictus R. A comparative evaluation between flat and traditional energy directors for ultrasonic welding of thermoplastic composites. *ECCM 2014: Proceedings of the ECCM 16th European conference on composite materials (22–26 June 2014)*. University of Seville; ed. F. Paris. Seville, 2014. pp.1–8.
7. Palardy G., Agricola F. M., Dransfeld C., Villegas I. F. Up-Scaling of the Ultrasonic Welding Process for Joining Thermoplastic Composites. *Proceedings of the SAMPE Baltimore conference and exhibition, Baltimore, USA, 2015, pp. 1–15.*
8. Rubanik V. V., Lutsko V. F., Shrubikov S. N., Popova O. S., Shurmelevich D.D. Tekhnologiya i oborudovanie dlya ultrazvukovoy svarki polimernykh materialov. [Technology and equipment for ultrasonic welding of polymeric materials]. *POLIKOMTRIB–2015: Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [POLIKOMTRIB–2015]. Gomel, 2015, pp. 300.
9. GOST 11262–80. Plastmassy. Metod ispytaniya na rastyazhenie [State Standard 11262–80. Plastics. Tensile strength test method]. Moscow, 1980, 16 p.

Поступила в редакцию 15.01.2018