

УДК 621.791.16

doi: 10.18698/0536-1044-2019-10-25-32

Влияние материала и геометрической формы волноводов на процесс ультразвуковой сварки пластмасс

С.С. Волков, В.М. Неровный, Г.А. Бигус

МГТУ им. Н.Э. Баумана

The Effect of the Material and the Geometric Shape of the Waveguides on the Process of Ultrasonic Welding of Plastics

S.S. Volkov, V.M. Nerovnyy, G.A. Bigus

Bauman Moscow State Technical University

Дано краткое описание основных элементов машин для ультразвуковой сварки пластмасс. Приведены основные материалы, из которых изготавливают элементы ультразвуковых волноводных колебательных систем. Рассмотрена связь амплитуды колебаний свариваемого материала с соотношением волновых сопротивлений материала изделия и геометрией волновода-инструмента при ультразвуковой сварке пластмасс. Показано, что при ультразвуковой сварке пластмассовых изделий большой толщины целесообразно применять волноводы из алюминиевых сплавов с рабочим торцом диаметром 15 мм. Установлено, что чем ближе акустические характеристики материалов волновода и пластмасс, тем полнее передача ультразвуковой энергии при ее переходе через границу раздела двух связываемых полимерных материалов. Для оценки распределения амплитуд колебаний в свариваемом материале удобнее использовать коэффициент пропускания, который снижается с уменьшением его волнового сопротивления. Выявлено, что размеры рабочего торца волновода определяются чаще всего свойствами, габаритными размерами и геометрией свариваемого изделия. Применение установленных рекомендаций по выбору материала и размеров рабочего торца волновода позволит повысить технологическую надежность процесса ультразвуковой сварки пластмасс и улучшить качество выпускаемой продукции.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, амплитуда колебаний волновода, рабочий торец волновода, коэффициент усиления, частота колебаний, резонансная длина волновода

This article briefly describes basic elements of machines for ultrasonic welding of plastics and the main materials used for manufacturing elements of ultrasonic waveguide oscillatory systems. A relationship between the amplitude of fluctuations of the welded material and a ratio of wave resistance of the product material and the waveguide tool geometry is examined. It is shown that when welding plastic products of a large thickness, it is practical to use waveguides made from aluminum alloys with a working end face with a diameter of 15 mm. It is established that the closer the acoustic characteristics of the waveguide material and the plastic are, the fuller the transfer of ultrasonic energy is when transiting through the interface of the welded polymeric materials. To assess the distribution of amplitudes of fluctuations in the welded material it is more convenient to use a transmission ratio, which decreases with a decrease in the wave resistance. It is established that the sizes of the

working end face of the waveguide are most often defined by the properties, dimensions and geometry of the welded product. The application of the developed recommendations to the choice of material and sizes of the working end face of the waveguide can increase technological reliability of the ultrasonic welding process and improve quality of products.

Keywords: ultrasonic welding, amplitude of fluctuations of a waveguide, working edge of a waveguide, strengthening coefficient, frequency of fluctuations, resonant length of a waveguide

Важнейшим узлом, составляющим основу и заключающим в себе специфику оборудования и технологии ультразвуковой сварки (УЗС) пластмасс, является электромеханическая колебательная система (сварочный узел). Эта система служит для преобразования электрических ко-

лебаний ультразвуковой (УЗ) частоты, вырабатываемых ультразвуковым генератором (УЗГ), в механические колебания той же частоты.

Кроме того, она выполняет функции передачи этой энергии в зону сварки, согласования сопротивления нагрузки с внутренним сопротивлением системы и геометрических размеров зоны ввода энергии с размерами преобразователя — излучателя. С помощью сварочного узла обеспечивается необходимая колебательная скорость на рабочем торце волновода-инструмента (далее волновод) при максимальном коэффициенте полезного действия на резонансной УЗ-частоте колебаний независимо от изменения сопротивления нагрузки [1, 2].

Сварочный узел включает в себя преобразователь энергии (магнитострикционный или пьезокерамический), волновод, через рабочий торец которого ультразвук вводится в свариваемое изделие, и трансформатор упругих колебаний, являющийся согласующим акустическим элементом между волноводом и преобразователем (рис. 1).

Волновод предназначен для усиления амплитуды колебаний выходного торца трансформатора упругих колебаний и передачи УЗ-энергии от последнего к нагрузке — в данном случае к месту, где осуществляется УЗС [1, 3, 4].

Рабочий (выходной) торец волновода может иметь различную форму в зависимости от свариваемого изделия и вида УЗС (контактной, передаточной, непрерывной и т. д.).

Усиление амплитуды колебаний достигается применением сужающихся по определенному закону волноводов. Для сварки в основном применяют волноводы четырех типов: цилиндрические (ступенчатые), катеноидальные, экспоненциальные и конические (рис. 2) [1, 4, 5].

В последнее время получили распространение волноводы новых форм, позволяющих сваривать изделия разного размера по замкнутому контуру, волноводы с изменяемым направлением колебаний, а также ножевые волноводы с ножом большой протяженности (до 360 мм) [2, 5, 6]. Возможность преобразова-

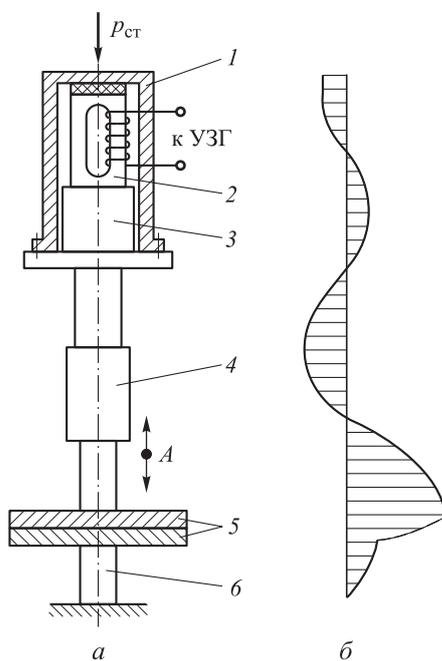


Рис. 1. Схема установки УЗС с нормальным вводом колебаний (а) и эпюра амплитуды колебаний волноводной акустической системы (б):

1 — корпус магнитострикционного преобразователя; 2 — преобразователь с обмоткой; 3 — трансформатор упругих колебаний; 4 — волновод; 5 — свариваемые детали; 6 — опора; A — амплитуда колебаний волновода; $p_{ст}$ — статическое сварочное давление

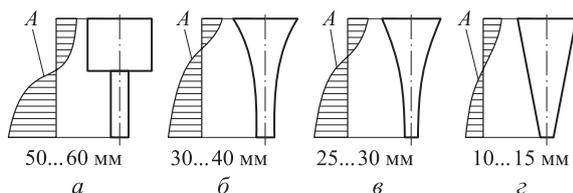


Рис. 2. Значения амплитуды колебаний A для волноводов разной формы:

a — ступенчатой; b — катеноидальной; v — экспоненциальной; z — конической

ния продольных колебаний сужающейся составной стержневой системы в изгибные колебания замыкающего конуса или пластины большого диаметра была использована для разработки контурных волноводов с рабочим торцом диаметром до 100...120 мм. Такие волноводы позволяют сваривать изделия за один цикл, создавая соединения высокого качества по всей длине шва [7, 8].

Цель работы — выбор материала и разработка конструкций волноводных сварочных систем, позволяющих получать высококачественные сварные соединения при УЗС пластмасс.

Расчетные формулы для определения геометрических размеров и формы волноводов УЗ-сварочных машин выводятся из решения дифференциального уравнения распространения продольных волн в волноводах переменного сечения. Наибольшее значение амплитуды колебаний соответствует резонансному режиму работы колебательной системы, когда частоты свободных и вынужденных колебаний равны.

Поэтому решение заключается в нахождении частотного уравнения, связывающего геометрические размеры волновода и физические характеристики материала, из которого он изготовлен, с частотой свободных колебаний [2, 3, 5]. В основу расчета волноводов положено волновое уравнение

$$\rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где ρ — плотность материала волновода; F — площадь поперечного сечения волновода; u — смещение произвольной точки в любой момент времени колебания вдоль оси x ; t — время; E — модуль Юнга.

Обычно уравнение (1) решают при условии, что волновод свободен на концах. Это равносильно тому, что на его концах отсутствует динамическая сила (деформация), т. е.

$$\partial u / \partial x = 0 \text{ при } x = 0 \text{ и } x = l_p, \quad (2)$$

где l_p — резонансная длина волновода.

Следует отметить, что условие (2) не является строго справедливым при УЗС, потому что свариваемые детали представляют собой некоторую нагрузку, приложенную к рабочему торцу волновода. Учесть это обстоятельство довольно трудно, так как нагрузка зависит от статического сварочного давления и изменяется в процессе сварки при изменении температуры [3].

Решение уравнения (1) при граничных условиях (2) для случая гармонического изменения смещений во времени ($u = A \sin \omega t$, где ω — круговая частота колебаний) зависит от закона изменения площади поперечного сечения волновода по экспоненте, катеноиде, конусу и кривой Гаусса. В результате решения можно рассчитать резонансную длину волноводов l_p , коэффициент усиления амплитуды k_y и координату максимального напряжения X_{\max} (рис. 3).

Резонансная длина цилиндрического ступенчатого волновода

$$l_p = \frac{c}{2f}, \text{ мм,}$$

где c — скорость распространения звука в материале, из которого изготовлен волновод; f — частота колебаний волновода.

Коэффициент усиления амплитуды колебаний волновода, т. е. отношение амплитуды колебания правого конца к амплитуде колебания левого конца, для такого ступенчатого волновода будет равен:

$$k_y = \frac{d_1^2}{d_2^2},$$

где d_1 и d_2 — диаметры первой и второй ступеней.

Координата максимального напряжения

$$X_{\max} = \frac{l_p}{2} = \frac{c}{4f}, \text{ мм.}$$

Наибольший коэффициент усиления амплитуды колебания в ступенчатом волноводе, равный отношению большей площади поперечного сечения к меньшей, достигается, когда длины участков волновода равны четверти длины волны [9, 10].

В процессе УЗС пластмасс в поперечных сечениях волновода действуют попеременно силы

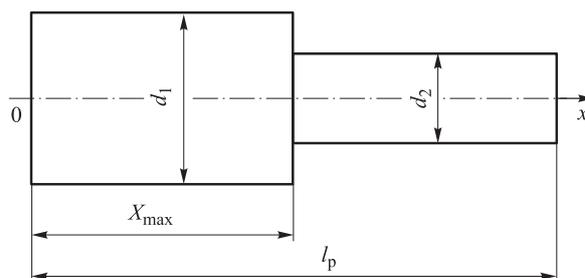


Рис. 3. Схема цилиндрического ступенчатого волновода

Таблица 1

Акустические характеристики металлов

Материал	Предел прочности σ , МПа	Предел выносливости σ^{-1} (при симметричном изгибе), МПа	Модуль Юнга E , ГПа	Плотность ρ , г/см ³	Скорость звука c , м/с	Волновое сопротивление, $\rho c \cdot 10^6$, кг/м ² ·с
Сталь 45	680	300	21,0	7,81	5175	40,37
Сталь 30ХГСА	1500	600	21,0	7,70	5200	40,02
Сплав ВТ5	850	450	11,6	4,52	5072	22,92
Сплав Д16	500	100	7,2	2,66	5200	13,83

растяжения и сжатия, что приводит к возникновению переменных напряжений. Это является причиной разрушения волновода, причем оно происходит в тех сечениях, где значение амплитуды динамических напряжений максимально. Поэтому, помимо вычисления резонансных геометрических размеров волновода, следует проводить расчет на прочность. Опасное сечение расположено в узле колебаний, т. е. в месте перехода от большего сечения к меньшему [10, 11].

Выходной диаметр d_2 не должен быть слишком малым, несмотря на то что коэффициент усиления амплитуды колебаний увеличивается. Это объясняется тем, что при большом значении отношения d_1/d_2 в месте перехода нарушается характер плоской волны и создается значительная концентрация напряжений, что приводит к быстрой поломке волновода.

При конструировании ступенчатых волноводов для УЗС полимерных материалов во избежание их быстрого выхода из строя необходимо, чтобы коэффициент усиления амплитуды колебаний был не более 10. Экспериментально установлено, что оптимальное значение $k_y = 5 \dots 10$. Кроме того, для ослабления концентрации напряжений переход от большего сечения к меньшему должен быть плавным на протяжении 0,05 длины волны без подрезов.

При выборе материалов для изготовления волноводов УЗ-сварочных машин обычно предъявляют такие требования, как высокие прочностные показатели при динамических нагрузках, стабильность свойств при изменении температурного режима, хорошие упругие свойства, низкий декремент затухания, хорошая обрабатываемость резанием и невысокая стоимость [1, 2, 12].

Хорошо зарекомендовали себя при сварке пластмасс волноводы из алюминиевых и титановых сплавов. Волноводы также можно изго-

тавливать из сталей 45, 30ХГСА и 40Х, имеющих малый коэффициент потерь (отношение мощности потерь к колебательной мощности) и хорошие прочностные характеристики по сравнению с другими сталями (табл. 1).

Из табл. 1 следует, что лучшими прочностными характеристиками при статических нагрузках обладает хромо-марганцево-кремнистая сталь 30ХГСА, предел выносливости которой превышает таковой для других материалов. Потери на внутреннее трение у нее меньше, чем у малоуглеродистых сталей, но больше, чем у титанового сплава. Поэтому наиболее высокую амплитуду колебаний на торце волновода можно получить, используя в качестве его материала титановые сплавы [9, 10].

Согласно экспериментальным данным, амплитуда колебаний волноводов из титановых сплавов при длительной работе может в 2 раза выше, чем у волноводов из высокопрочных сталей. К достоинствам волноводов из титана также можно отнести высокую износостойкость.

Таким образом, при сравнении сталей и титановых сплавов для изготовления волноводов преимущество последних очевидно. Однако необходимо отметить дефицитность этого материала, особенно при производстве крупногабаритных волноводов. Обработка этого материала является трудоемкой операцией. Кроме того, в резьбовых соединениях сталь — титан часто возникает схватывание, что может привести к повреждению резьбы при смене волновода [1, 3, 11].

Алюминиевые сплавы имеют такой же коэффициент потерь, что и стали, но их прочностные показатели уступают всем перечисленным материалам. Однако именно алюминиевые сплавы (Д16, АМг, АМц) оказались наиболее пригодными для УЗС пластмасс и успешно конкурируют с титановыми сплавами.

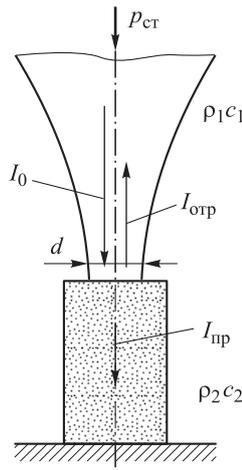


Рис. 4. Условное изображение распределения интенсивностей УЗ-волн при нормальном вводе колебаний в свариваемое изделие:

I_0 — интенсивность вводимых колебаний;
 d — диаметр рабочего торца волновода

Результаты исследований показали, что эта особенность инструментов из алюминиевых сплавов объясняется взаимным влиянием волновода и свариваемого материала. Известно [1, 2], что при нормальном вводе колебаний через границу раздела двух сред с различными акустическими свойствами часть энергии отражается в первую среду — материал волновода, а часть проходит во вторую среду — полимер (рис. 4). В этом случае коэффициент отражения R_I , равный отношению интенсивностей отраженных $I_{отр}$ и прошедших $I_{пр}$ колебаний, определяют по выражению

$$R_I = \left(\frac{m-1}{m+1} \right)^2,$$

где $m = \rho_1 c_1 / \rho_2 c_2$ ($\rho_1 c_1$, и $\rho_2 c_2$ — волновые сопротивления материала волновода и полимера).

Коэффициент отражения, оцениваемый по амплитуде колебаний среды, вычисляют по формуле

$$R_A = \frac{m-1}{m+1}.$$

Для оценки распределения амплитуд колебаний в свариваемом материале удобнее использовать коэффициенты пропускания УЗ-колебаний, зависящие от скорости распространения продольных волн:

- в стержне волновода

$$D_I = 1 - R_I = \frac{4m}{(m+1)^2};$$

- в свариваемом материале

$$D_A = 1 - R_A = \frac{2}{m+1}.$$

Таким образом, зная или определив характеристики свариваемого материала, можно оценить потери УЗ-энергии при ее переходе через границу раздела двух сред волновода — полимерный материал.

Из приведенных зависимостей следует, что чем ближе акустические характеристики материалов волновода и полимера, тем полнее передача энергии. Сравним приведенные акустические характеристики металлов (см. табл. 1) с аналогичными характеристиками пластмасс (табл. 2).

Установлено, что при УЗС оргстекла дюралюминиевым волноводом амплитуда прошедших колебаний составляет около 40 % амплитуды колебаний рабочего торца A_p , при УЗС оргстекла стальным волноводом — 12 % A_p , а при УЗС полиэтилена дюралюминиевым, титановым и стальным волноводами — 16, 9 и 6 % A_p соответственно.

С уменьшением волнового сопротивления свариваемого материала коэффициент прохождения снижается.

Таблица 2

Акустические характеристики пластмасс

Материал	Скорость звука c , м/с	Плотность ρ , г/см ³	Волновое сопротивление $\rho c \cdot 10^6$, кг/м ² ·с	Длина волны λ , мм	Коэффициент затухания β , Нп/см
Полистирол	1990	1,06	2,10	79	0,10
Оргстекло	2370	1,19	2,82	95	0,11
Винипласт	1980	1,40	2,77	79	0,16
Капролон	2280	1,45	2,62	91	0,19
Полиэтилен	1250	0,92	1,15	50	0,35

Таким образом, при выборе материала волновода следует оценивать не только его механоакустические показатели, но и работу устройства как составного акустического звена, качество функционирования которого характеризуется согласованностью волновых сопротивлений свариваемого материала и волновода.

Размеры рабочего торца волновода чаще всего зависят от габаритных размеров или геометрии. В тех случаях, когда геометрия изделия не ограничивает размеры рабочего торца, выбор его оптимальной площади должен определяться толщиной свариваемых изделий [1, 5, 13].

Как показали исследования, увеличение площади рабочего торца волновода существенно интенсифицирует процесс УЗС либо позволяет проводить сварку материалов большой толщины. При экспериментах сравнивалось влияние изменения площади рабочего торца на скорость УЗС, толщину свариваемых образцов и распределение амплитуд колебаний в материале.

Изменение площади волновода оказывает существенное воздействие на распределение энергии УЗ-колебаний в полимере. Причина этого явления кроется в следующем. Как известно из теории электроакустики [2, 7, 11], если размеры площади ввода колебаний одного порядка с длиной волны, то УЗ-колебания распространяются в виде направленного пучка. Вблизи от излучателя на участке ближней зоны (зоны Френеля) УЗ-волны распространяются почти без расхождения. Глубина ближней зоны

$$r_{\text{бл}} \approx \frac{d^2}{4\lambda},$$

где λ — длина волны УЗ-колебаний в полимере, мм.

Если при сварке полиэтилена диаметр рабочего торца волновода $d = 15$ мм, то глубина ближней зоны $r_{\text{бл}} \approx 15^2 / (4 \times 50) = 1,12$ мм, а если $d = 8$ мм, то $r_{\text{бл}} \approx 0,32$ мм.

В дальней зоне начинается постепенное расхождение ультразвука, и поле волны приоб-

ретает форму усеченного конуса, причем расширение пучка колебаний тем больше, чем меньше диаметр применяемого волновода. При таком распределении УЗ-колебаний амплитуда сферической волны в дальней зоне уменьшается обратно пропорционально расстоянию рассматриваемой точки от источника колебаний [4, 6, 10].

Как показали замеры амплитуд, распределяющихся в полиэтиленовом образце, с увеличением диаметра рабочего торца волновода появляется возможность подводить к зоне сварки большие амплитуды колебаний и УЗ-энергию. Если, например, на расстоянии 1 мм от поверхности ввода энергии волновод с рабочим торцом диаметром $d = 2$ мм обеспечивает получение амплитуд колебаний 1...2 мкм, то волновод диаметром 5 мм — 14...15 мкм, а волновод диаметром 15 мм — 18 мкм.

Таким образом, когда геометрия изделия не является решающей при определении размеров рабочего торца волновода, для сварки полимерных материалов, особенно большой толщины, желательно использовать волноводы с максимально развитой торцевой поверхностью.

Выводы

1. Материал волноводов должен обладать хорошими упругими свойствами и обрабатываемостью резанием, низким декрементом затухания, высокой усталостной прочностью и небольшой стоимостью. К таким материалам относятся алюминиевые и титановые сплавы, а также стали 30ХГСА и 45.

2. Для сварки полимерных материалов, особенно большой толщины, желательно использовать волноводы с максимально развитой торцевой поверхностью.

3. Применение рекомендаций по выбору материала и размеров рабочего торца волновода позволит повысить технологическую надежность процесса УЗС и улучшить качество выпускаемой продукции.

Литература

- [1] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [2] Волков С.С., Неровный В.М., Ремизов А.Л. Влияние акустической мощности сварочного узла на свариваемость пластмасс при ультразвуковой сварке. *Сварка и диагностика*, 2017, № 5, с. 25–29.

- [3] Волков С.С., Малолетков А.В. Технология ультразвуковой сварки изделий круглой формы из АБС-пластика. *Сварка и диагностика*, 2016, № 1, с. 37–40.
- [4] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Welding International*, 2012, vol. 26(10), pp. 796–799, doi: 10.1080/09507116.2011.653164
- [5] Volkov S.S., Shestel L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Welding International*, 2012, vol. 30(2), pp. 150–154, doi: 10.1080/09507116.2015.1036535
- [6] Volkov S.S. Joining thermoplastics with metallic and non-metallic materials. *Welding International*, 2013, vol. 27(1), pp. 163–166, doi: 10.1080/09507116.2012.695551
- [7] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Welding International*, 2008, vol. 17(6), pp. 482–486, doi: 10.1533/wint.2003.3154
- [8] Маслов Б.Г., Выборнов А.П. *Производство сварных конструкций*. Москва, Академия, 2015. 288 с.
- [9] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Welding International*, 2011, vol. 25(11), pp. 898–902, doi: 10.1080/09507116.2011.581433
- [10] Гладков Э.А., Бродягин В.Н., Перковский Р.А. *Автоматизация сварочных процессов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 426 с.
- [11] Климов А.С., Герасимов А.А., Ануиборов Н.П., Гончаров М.С. Компьютерный комплекс для исследования и управления процессами сварки. *Сварочное производство*, 2006, № 8, с. 18–20.
- [12] Гладков Э.А. *Управление процессами и оборудованием при сварке*. Москва, Академия, 2006. 432 с.
- [13] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013. 646 с.

References

- [1] Volkov S.S. *Svarka i skleivaniye polimernykh materialov* [Welding and bonding of polymeric materials]. Moscow, Khimiya publ., 2001. 376 p.
- [2] Volkov S.S., Nerovnyy V.M., Remizov A.L. Influence of the acoustic power of the welding unit on the weldability of plastics during ultrasonic welding. *Welding and Diagnostics*, 2017, no. 5, pp. 25–29 (in Russ.).
- [3] Volkov S.S., Nerovnyy V.M., Remizov A.L. Influence of the acoustic power of the welding unit on the weldability of plastics during ultrasonic welding. *Welding and Diagnostics*, 2016, no. 1, pp. 37–40 (in Russ.).
- [4] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Welding International*, 2012, vol. 26(10), pp. 796–799, doi: 10.1080/09507116.2011.653164
- [5] Volkov S.S., Shestel L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Welding International*, 2012, vol. 30(2), pp. 150–154, doi: 10.1080/09507116.2015.1036535
- [6] Volkov S.S. Joining thermoplastics with metallic and non-metallic materials. *Welding International*, 2013, vol. 27(1), pp. 163–166, doi: 10.1080/09507116.2012.695551
- [7] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Welding International*, 2008, vol. 17(6), pp. 482–486, doi: 10.1533/wint.2003.3154
- [8] Maslov B.G., Vybornov A.P. *Proizvodstvo svarnykh konstruksiy* [Production of welded structures]. Moscow, Akademiya publ., 2015. 288 p.
- [9] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Welding International*, 2011, vol. 25(11), pp. 898–902, doi: 10.1080/09507116.2011.581433
- [10] Gladkov E.A., Brodyagin V.N., Perkovskiy R.A. *Avtomatizatsiya svarochnykh protsessov* [Automation of welding processes]. Moscow, Bauman Press, 2017. 426 p.

- [11] Klimov A.S., Gerasimov A.A., Anuiborov N.P., Goncharov M.S. Computer system for the study and control of welding processes. *Welding International*, 2006, no. 8, pp. 18–20 (in Russ.).
- [12] Gladkov E.A. *Upravlenie protsessami i oborudovaniem pri svarke* [Management of processes and equipment during welding]. Moscow, Akademiya publ., 2006. 432 p.
- [13] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes during welding]. Sankt-Petersburg, Polytech publ., 2013. 646 p.

Статья поступила в редакцию 26.03.2019

Информация об авторах

ВОЛКОВ Станислав Степанович — кандидат технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: map@brnstu.ru).

НЕРОВНЫЙ Вячеслав Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vmn@rambler.ru).

БИГУС Георгий Аркадьевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gabigus@rambler.ru).

Information about the authors

VOLKOV Stanislav Stepanovich — Candidate of Science (Eng.), Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: map@bmstu.ru).

NEROVNYY Vyacheslav Mikhailovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vmn@rambler.ru).

BIGUS Georgii Arkadievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: gabigus@rambler.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Волков С.С., Неровный В.М., Бигус Г.А. Влияние материала и геометрической формы волноводов на процесс ультразвуковой сварки пластмасс. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 10, с. 25–32, doi: 10.18698/0536-1044-2019-10-25-32

Please cite this article in English as:

Volkov S.S., Nerovnyy V.M., Bigus G.A. The Effect of the Material and the Geometric Shape of the Waveguides on the Process of Ultrasonic Welding of Plastics. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 10, pp. 25–32, doi: 10.18698/0536-1044-2019-10-25-32