

УДК 621.791.16

doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-57-63

Исследование амплитудной и фазовой ошибок датчика-опоры при ультразвуковой сварке пластмасс

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

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Research of the support sensor amplitude and phase errors during the plastics ultrasonic welding

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

Bauman Moscow State Technical University

Изложена методика, позволяющая оценивать амплитудную и фазовую ошибки магнитоупругого датчика-опоры, применяемого при ультразвуковой сварке пластмасс. Измеряя амплитуду колебаний датчика-опоры, можно отслеживать изменение основных физических свойств свариваемого полимера — температуры и толщины — в процессе его сварки. Описан динамический режим работы датчика-опоры. Установлено, что оценка ошибок измерения по предложенной методике при изготовлении каких-либо других конструкций датчиков-опор позволит точно определить их работоспособность с параметрами процесса ультразвуковой сварки полимерных материалов. Рассмотрен вопрос оценки точности работы применяемых в процессе сварки магнитоупругих датчиков-опор. Исследованы амплитудная и фазовая ошибки датчиков-опор при ультразвуковой сварке. Разработан магнитоупругий датчик-опора, обеспечивающий повышение точности измерения амплитуды колебаний опоры в процессе ультразвуковой сварки полимерных материалов. Проведенные эксперименты подтвердили четкую взаимосвязь амплитуды колебаний опоры с нагревом свариваемых образцов, их толщиной и свойствами в процессе ультразвуковой сварки.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, магнитоупругий датчик-опора, амплитуда колебаний опоры, статическое давление, частота колебаний, сварное соединение

The paper presents a technique making it possible to evaluate amplitude and phase errors of the magnetoelastic support sensor used in the plastics ultrasonic welding. Measurement of the support sensor vibration amplitude allows monitoring alterations in the basic physical properties of the polymer being welded, i.e. its temperature and thickness. The support sensor operation dynamic mode is described. It is established that evaluating measurement errors with the proposed method in manufacture of any support sensor of different design makes it possible to accurately determine its performance with parameters of the polymer material ultrasonic welding process. The problem of evaluating accuracy of the magnetoelastic support sensor operation used in the welding process was considered. The support sensor amplitude and phase errors during ultrasonic welding were studied. A magnetoelastic sensor was designed and developed ensuring improved accuracy in measuring the support vibrations amplitude during the polymer material ultrasonic welding. The experiments carried out confirmed clear relationship between the support vibrations amplitude and heating of the welded samples, their thickness and properties during the ultrasonic welding.

Keywords: ultrasonic welding, magnetoelastic sensor, support vibrations amplitude, static pressure, vibration frequency, welded joint

При ультразвуковой сварке (УЗС) полимерных материалов электрические колебания ультразвуковой (УЗ) частоты, вырабатываемые УЗ-генератором, преобразуются в механические продольные колебания электроакустического магнестрикционного преобразователя, амплитуда колебаний которого невелика (3...5 мкм).

Чтобы увеличить амплитуду, к преобразователю присоединяют трансформатор упругих колебаний, а к последнему — волновод. Задаваясь оптимальным законом сужения площади поперечного сечения трансформатора и волновода, можно увеличить амплитуду колебаний торца преобразователя в 10–20 раз. Трансформатор упругих колебаний также служит для согласования параметров преобразователя и нагрузки, а волновод — для введения УЗ-колебаний в свариваемое изделие [1, 2].

Подвод механической энергии УЗ-колебаний осуществляется за счет контакта излучающей поверхности сварочного инструмента — волновода, которую в дальнейшем будем называть рабочим торцом волновода, с одной или несколькими свариваемыми деталями. Такой контакт обеспечивается статическим сварочным давлением рабочего торца волновода $p_{ст}$ на свариваемые детали, расположенные на опоре [1, 2].

Это давление также способствует концентрации в зоне соединения. Внешняя переменная сила F , возникающая в результате воздействия колеблющегося волновода, приводит к нагреву свариваемого материала, а действие статического сварочного давления $p_{ст}$ обеспечивает получение прочного сварного соединения [1, 3, 4].

При УЗС пластмасс с большим модулем упругости и малым акустическим сопротивлением (оргстекло, полистирол, винипласт и др.) наиболее эффективно применять схему сварки с настроенной опорой. Назначение опоры состоит в фиксации одной верхней части изделия относительно нижней, которая расположена на опоре, в формировании нижней части сварного шва и уменьшения потерь энергии УЗ-колебаний ввиду перехода УЗ-волн из опоры в станцию сварочной машины.

Для реализации указанных свойств рекомендовано использовать настроенные опоры с высотой, равной четверти длины волны УЗ-колебаний в материале опоры. Целесообразность применения опоры связана с возможно-

стью контроля физического состояния полимера по изменению амплитуды ее колебаний во время УЗС [1, 5].

В процессе УЗС сначала происходит нагрев изделия, затем уменьшение его толщины в зоне сварки, поэтому амплитуда колебаний торца опоры будет зависеть от времени УЗС с учетом того, что деформируется уже нагретый полимер.

Таким образом, амплитуда колебаний опоры, на которой происходит сварка, определяется интенсивностью УЗ-волны, прошедшей через полимер. Амплитуда колебаний опоры имеет вид

$$a = AD\sqrt{re^{\gamma h}}, \quad (1)$$

где A — амплитуда колебаний волновода; D — коэффициент пропускания границы *полимер — опора*; r — коэффициент рассеивания УЗ-волны в полимере; γ — коэффициент затухания; h — толщина слоя полимера.

Анализ выражения (1) показывает, что параметр a является комплексной характеристикой состояния материала в процессе УЗС и отражает изменение температуры материала через коэффициенты D , r , γ и его толщину h .

Цель работы — исследование амплитудной и фазовой погрешностей (ошибок) датчиков-опор, позволяющих получать высококачественные сварные соединения при УЗС пластмасс.

Установлено, что изменение амплитуды колебаний опоры, зависящее от указанных параметров, полно и всесторонне описывает изменение свойств полимера и процесс образования сварного соединения. Поэтому изменение амплитуды колебаний опоры при УЗС, определяемое зависимостью $a = f(t)$, получило название кинетической характеристики процесса [1, 6, 7].

Измеряя амплитуду колебаний опоры, можно следить за изменением основных физических свойств свариваемого полимера — температуры и толщины — в процессе УЗС.

Наиболее интенсивно на амплитуду колебаний опоры влияют изменения двух параметров — толщины свариваемого полимера h под действием статического сварочного давления волновода и коэффициента затухания γ вследствие нагревания полимера при УЗС [8].

Так как амплитуда колебаний опоры связана во времени с важнейшими параметрами УЗС — температурой в сварном шве и деформацией

полимерного материала, зависимость $a = f(t)$ можно использовать для связи продолжительности сварочного импульса с состоянием полимерного материала, т. е. контролировать качество получаемого соединения.

Чтобы наблюдать за свойствами свариваемого материала при УЗС, необходимо непрерывно измерять амплитуду колебаний опоры или ее деформацию. Это можно делать с помощью датчиков разного типа: сопротивления, емкостных, индуктивных и основанных на магнитоупругом эффекте [3, 8].

Магнитоупругие датчики обладают высокой механической прочностью, надежностью при длительной эксплуатации, чувствительностью, стабильностью работы при изменении влажности и температуры, простотой изготовления [5, 7, 9].

Для контроля амплитуды колебаний опоры на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан магнитоупругий датчик-опора (МДО), позволяющий измерять быстропеременные усилия с частотой 22 кГц при УЗС пластмасс (рис. 1).

МДО, выполненный в виде настроенной четвертьволновой опоры, представляет собой никелевый стержень, верхняя часть которого является опорой, где размещают свариваемую деталь. Для уменьшения износа рабочей поверхности на верхний слой МДО наплавляют стеллит на никелевой основе ВХН.

На никелевом стержне расположены две обмотки: I — обмотка подмагничивания для создания постоянного магнитного потока; II — рабочая обмотка, в которой возникает измеря-

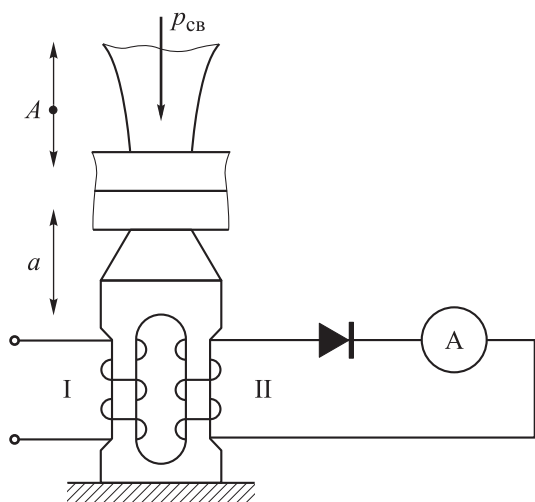


Рис. 1. Схема МДО для измерения колебаний торца опоры

емая электродвижущая сила при нагружении МДО внешней переменной механической нагрузкой [10, 11].

При проектировании датчиков такого типа определяют следующие параметры: высоту, площадь сечения рабочего стержня, число обмоток и витков в них. Колебания волновода приводят к появлению переменного напряжения в материале МДО, вследствие чего изменяются его магнитные характеристики.

Возникновение переменного магнитного потока вызывает переменное напряжение на рабочей обмотке МДО. Полезную информацию о ходе процесса УЗС или состоянии полимера в каждый момент времени несет амплитудное значение этого переменного напряжения. Поэтому характеристикой состояния полимера или процесса УЗС является огибающая сигнала, получаемая в результате выпрямления напряжения МДО.

При использовании мощных источников УЗ-колебаний, достигающих 1,0...1,5 кВт, время УЗС составляет 0,5...2,0 с. С уменьшением толщины свариваемых деталей оно снижается. Так как скорость процесса высокая, выполнена оценка точности работы применяемых МДО. Исследованы амплитудная и фазовая ошибки МДО при работе в динамическом режиме.

Схема преобразования перемещения в электрическую величину для МДО при УЗС показана на рис. 2.

Внешняя переменная сила $F_{св}$ воздействует на массу m , которая связана с неподвижным столом упругим элементом, обладающим жесткостью W и демпфером с коэффициентом успокоения P . Демпфирующим элементом МДО являются обмотка и вязкость материала датчика. Электрическая величина на выходе преобразо-

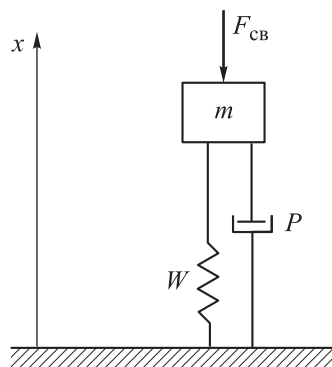


Рис. 2. Схема МДО для преобразования перемещения в электрическую величину

вателя есть функция перемещения массы m относительно неподвижного стола [11, 12].

При дальнейшем рассмотрении динамического режима работы МДО введем следующие упрощения:

- пренебрегаем массой упругого элемента по сравнению с массой m ;
- считаем, что конструкция преобразователя допускает перемещение массы только по оси x ;
- принимаем, что успокоитель оказывает сопротивление движению массы, пропорциональное первой степени скорости;
- в начальный момент перемещение x подвижной части и ее скорость $\partial x/\partial t$ равны нулю;
- считаем, что вынуждающая сила (от колебания волновода) изменяется строго по синусоидальному закону.

Дифференциальное уравнение движения в случае приложения силы, изменяющейся по синусоидальному закону, запишем как [6]

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + P \frac{dx}{dt} + Wx = F_{\max}. \quad (2)$$

Здесь F_{\max} — амплитуда силы, вызывающей перемещение x подвижной части,

$$F = F_{\max} \sin \omega t,$$

где ω — угловая частота вынужденных колебаний; t — время.

Общее решение уравнения (2) складывается из общего решения уравнения без свободного члена и частного решения уравнения со свободным членом. Окончательное решение уравнения (2) имеет вид

$$x = \frac{F_{\max}}{W} \frac{e^{-\beta \omega_0 t}}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin \left[\omega_0 t \sqrt{1-\beta^2} + \arctg \sqrt{\frac{1-\beta^2}{\beta^2}} \right] + \frac{F_{\max}}{W} \frac{1}{\sqrt{(\lambda^2-1)^2 + 4\beta^2 \lambda^2}} \sin \left[\omega t - \arctg \frac{2\beta \lambda}{\lambda^2-1} \right], \quad (3)$$

где β — степень успокоения, $\beta = P/P_{\text{кр}}$ ($P_{\text{кр}}$ — коэффициент успокоения при критическом режиме движения массы); ω_0 — частота собственных колебаний; λ — отношение угловой частоты вынужденных колебаний к частоте собственных колебаний, $\lambda = \omega/\omega_0$.

Первое слагаемое уравнения (3) состоит из двух частей, выражающих амплитуду собственных затухающих колебаний,

$$\frac{F_{\max}}{W} \frac{e^{-\beta \omega_0 t}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

и собственную частоту системы. При степени успокоения $\beta > 0,4$ собственные колебания затухают весьма быстро и, как показано в работе [5], их можно не принимать во внимание.

Второе слагаемое правой части уравнения (3) выражает вынужденные колебания с частотой ω изменения измеряемой силы и амплитудой

$$x_{\max} = \frac{F_{\max}}{W} \frac{1}{\sqrt{(\lambda^2-1)^2 + 4\beta^2 \lambda^2}}. \quad (4)$$

Для статической силы амплитуда вынужденных колебаний имеет вид

$$x_{\text{ст max}} = \frac{F_{\max}}{W}. \quad (5)$$

Согласно выражениям (4) и (5), вынужденные колебания имеют амплитудную ошибку

$$\Delta = \frac{x_{\max}}{x_{\text{ст max}}} = \frac{1}{\sqrt{(\lambda^2-1)^2 + 4\beta^2 \lambda^2}}.$$

Кроме того, вынужденные колебания характеризуются фазовой ошибкой, определяемой углом

$$\psi = \arctg \frac{2\beta \lambda}{\lambda^2-1}.$$

Амплитудная Δ и фазовая ψ ошибки зависят от λ и степени успокоения β . Установлено, что для малой степени успокоения максимальная ошибка амплитуды имеет место при резонансе системы:

$$\lambda = 1,00.$$

Поэтому датчик-опора должен характеризоваться величиной λ , меньшей единицы, т. е. собственная частота датчика ω_0 должна быть больше частоты колебаний волновода. В противном случае волновод или промежуточный элемент (свариваемая деталь), через который переменная сила $F(t)$ воздействует на массу преобразователя, выйдет из соприкосновения с опорой, и электрический сигнал не будет соответствовать форме УЗ-колебаний [12, 13].

Собственную частоту колебаний МДО определяли с помощью электронного осциллографа С-1-4 путем сравнения с известной частотой, подаваемой от УЗ-генератора ИЛ10-1.5. Она составила 44 кГц при рабочей частоте магнитостриктора, равной 22 кГц:

$$\lambda = 0,44.$$

Наименьшая амплитудная ошибка МДО наблюдается при $\beta \approx 0,7$. В этом случае амплитудная ошибка не превышает нескольких процентов уже при

$$\lambda = 0,20 \dots 0,25.$$

Что касается фазовой ошибки, то при $\lambda = 1,00$, т. е. при $\omega = \omega_0$, наступает резонанс, и она достигает 90° . При $\beta = 0,7$ амплитудная ошибка почти линейно зависит от параметра λ , поэтому запаздывание вынужденных колебаний подвижной части МДО от изменения измеряемой величины будет по фазе одинаковым, что важно при замерах сложных по форме электрических сигналов.

Аналитический расчет степени успокоения МДО затруднен. Значения степени успокоения β проще определить экспериментальным путем, для чего необходимо получить характеристику затухания собственных колебаний МДО. Характеристику МДО определяли в режиме импульсного нагружения — удара.

Регистрацию процесса осуществляли посредством электронного осциллографа С-1-4 с послесвечением в режиме ждущей развертки. К осциллографу подсоединяли выводы катушки МДО. В момент удара по стержню датчика в последнем возникали затухающие колебания, что регистрировалось осциллографом и фотографировалось.

По результатам измерений можно определить амплитудную и фазовую ошибки МДО. При параметрах $\lambda = 0,44$ и $\beta = 0,45$ амплитудная ошибка достаточно мала ($\Delta = 1,15$), а фазовая ошибка $\psi = 35^\circ$.

При оценке фазовой ошибки следует сравнить амплитуду колебаний МДО с продолжительностью сварочного цикла, которая равна примерно 0,5 с. Результаты расчетов показывают, что фазовая ошибка при частоте 22 кГц, составляет запаздывание сигнала по времени

$$t_{\text{зап}} = 50 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Величина запаздывания сигнала $t_{\text{зап}}$ по сравнению со временем УЗС ничтожно мала.

Таким образом, амплитудная и фазовая ошибки, вызываемые инерционностью МДО, малы и не вносят серьезных погрешностей в показания разработанного прибора, а электрический сигнал МДО достаточно точно отражает исследуемый процесс УЗС.

При изготовлении других конструкций датчиков-опор, а также при уменьшении времени УЗС следует оценивать ошибки измерения по изложенной методике, что позволит выявить соответствие используемых датчиков-опор параметрам процесса сварки.

Выводы

1. Проведен аналитический расчет значения степени успокоения МДО, для чего получена характеристика затухания собственных колебаний МДО.

2. Разработан МДО, позволяющий повысить точность измерения амплитуды колебаний опоры в процессе УЗС.

3. Исследованы амплитудная и фазовая ошибки МДО при работе в динамическом режиме.

Литература

- [1] Крыжановский В.К., ред. *Технические свойства полимерных материалов*. Санкт-Петербург, Профессия, 2005. 235 с.
- [2] Люшинский А.В. *Диффузионная сварка разнородных материалов*. Москва, Академия, 2006. 208 с.
- [3] Комаров Г.В. *Способы соединений деталей из пластических масс*. Москва, Химия, 2007. 288 с.
- [4] Маслов Б.Г., Выборнов А.П. *Производство сварных конструкций*. Москва, Академия, 2019. 284 с.
- [5] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [6] Волков С.С. Ультразвуковая стыковая сварка жестких пластмасс. *Сварочное производство*, 2011, № 9, с. 15–20.
- [7] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, СПбПУ, 2013. 646 с.
- [8] Volkov S.S., Shestel' L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Weld. Int.*, 2016, vol. 30, no. 2, pp. 150–154, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1036535>

- [9] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastic. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 1, pp. 63–66, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695155>
- [10] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Weld. Int.*, 2011, vol. 25, no. 11, pp. 898–902, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.581433>
- [11] Volkov S.S. Ultrasonic welding of brush elements. *Weld. Int.*, 2012, vol. 26, no. 10, pp. 796–799, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.653164>
- [12] Volkov S.S. The effect of conditions of ultrasound welding on the fracture force of non-woven materials. *Weld. Int.*, 2005, no. 19, no. 6, pp. 484–489, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3473>
- [13] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Weld. Int.*, 2003, vol. 17, no. 6, pp. 482–486, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2003.3154>

References

- [1] Kryzhanovskiy V.K., ed. *Tekhnicheskie svoystva polimernykh materialov* [Technical properties of polymer materials.]. Sankt-Petersburg, Professiya Publ., 2005. 235 p. (In Russ.).
- [2] Lyushinskiy A.V. *Diffuzionnaya svarka raznorodnykh materialov* [Diffusion welding of dissimilar materials]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 208 p. (In Russ.).
- [3] Komarov G.V. *Sposoby soedineniy detaley iz plasticheskikh mass* [Methods of connections of details from plastic masses]. Moscow, Khimiya Publ., 2007. 288 p. (In Russ.).
- [4] Maslov B.G., Vybornov A.P. *Proizvodstvo svarnykh konstruksiy* [Production of welded structures]. Moscow, Akademiya Publ., 2019. 284 p. (In Russ.).
- [5] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and bonding of polymeric materials.]. Moscow, Khimiya Publ., 2001. 376 p. (In Russ.).
- [6] Volkov S.S. Ultrasonic butt-seam welding of rigid plastic. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2011, no. 9, pp. 15–20. (In Russ.).
- [7] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes in welding]. Sankt-Petersburg, SPbPU Publ., 2013. 646 p. (In Russ.).
- [8] Volkov S.S., Shestel' L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Weld. Int.*, 2016, vol. 30, no. 2, pp. 150–154, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1036535>
- [9] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastic. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 1, pp. 63–66, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695155>
- [10] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Weld. Int.*, 2011, vol. 25, no. 11, pp. 898–902, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.581433>
- [11] Volkov S.S. Ultrasonic welding of brush elements. *Weld. Int.*, 2012, vol. 26, no. 10, pp. 796–799, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.653164>
- [12] Volkov S.S. The effect of conditions of ultrasound welding on the fracture force of non-woven materials. *Weld. Int.*, 2005, no. 19, no. 6, pp. 484–489, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3473>
- [13] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Weld. Int.*, 2003, vol. 17, no. 6, pp. 482–486, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2003.3154>

Статья поступила в редакцию 16.03.2023

Информация об авторах

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

КОНОВАЛОВ Алексей Викторович — доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: avk@bmstu.ru).

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

БИГУС Георгий Аркадьевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». 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, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: map@bmstu.ru).

KONVALOV Alexey Viktorovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: avk@bmstu.ru).

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

BIGUS Georgy Arkadievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. 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., Коновалов А.В., Неровный В.М., Бигус Г.А. Исследование амплитудной и фазовой ошибок датчика-опоры при ультразвуковой сварке пластмасс. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 10, с. 57–63, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-57-63

Please cite this article in English as:

Volkov S.S., Konvalov A.V., Nerovny V.M., Bigus G.A. Research of the support sensor amplitude and phase errors during the plastics ultrasonic welding. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 10, pp. 57–63, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-57-63