



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)

УДК620.179.16

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.034

 EDN: SVSGPX

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ИМПЕДАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Роман Владиславович Барсуков¹, Александр Романович Барсуков²,
Алексей Николаевич Сливин³, Владислав Анатольевич Шакура⁴

^{1,2,3,4} Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия

¹ roman@bti.secna.ru

² barsukov.ar@bti.secna.ru

³ san@bti.secna.ru

⁴ shakura.va@u-sonic.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке системы контроля импедансных характеристик ультразвуковых излучателей в процессе сварки термопластичных полимерных материалов. Результаты работы направлены на совершенствование оборудования, предназначенного для реализации ультразвуковой сварки полимерных материалов, повышение качества изделий, получаемых путем ультразвуковой сварки. Интеграция предлагаемой системы в существующее оборудование позволит оперативно, косвенным образом контролировать все стадии ультразвуковой сварки (разогрев, начало пластификации, пластификация, переход в вязкотекучее состояние, текучее состояние и т.д.). Предложена структура системы контроля, а также представлены зависимости импеданса ультразвукового излучателя, его действительного и мнимой составляющих в ходе воздействия на свариваемый полимерный материал, полученные в процессе работы разработанной системы контроля.

Ключевые слова: ультразвук, контроль, сварка, полимеры, воздействие на вещество, качество.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00314, <https://rscf.ru/project/24-22-00314/>.

Для цитирования: Система контроля импедансных характеристик ультразвуковых излучателей в процессе сварки термопластичных полимерных материалов / Р. В. Барсуков [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 1. С. 220–223. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.034. EDN: <https://elibrary.ru/SVSGPX>.

Original article

SYSTEM FOR MONITORING ULTRASONIC EMITTERS IMPEDANCE CHARACTERISTICS IN THE WELDING THERMOPLASTIC POLYMERIC MATERIALS PROCESS

Roman V. Barsukov¹, Aleksandr R. Barsukov²,
Alexey N. Slivin³, Vladislav A. Shakura⁴

^{1,2,3,4} Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russia

¹ roman@bti.secna.ru

² barsukov.ar@bti.secna.ru

³ san@bti.secna.ru

⁴ shakura.va@u-sonic.ru

Abstract. The article is devoted to the development of a system for monitoring ultrasonic emitters impedance characteristics in the process of welding thermoplastic polymer materials. The results of the work are aimed at improving the equipment intended for the implementation of polymer materials ultrasonic welding improving the quality of products obtained by ultrasonic welding. The integration of the proposed system into the existing equipment will make it possible to control all stages of ultrasonic welding quickly, indirectly (warming up, beginning of plasticization, plasticization, transition to a viscous state, a fluid state, etc.). The structure of the control system is proposed, as well as the dependences of the impedance of the ultrasonic emitter, its real and imaginary components during the impact on the welded polymer material, obtained during the operation of the developed control system.

© Барсуков Р. В., Барсуков А. Р., Сливин А. Н., Шакура В. А., 2026

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ИМПЕДАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Keywords: ultrasonic, control, friction, polymers, impact on substance, quality.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 24-22-00314, <https://rscf.ru/en/project/24-22-00314/>.

For citation: Barsukov, R.V., Barsukov, A.R., Slivin, A.N. & Shakura, V.A. (2025). System for monitoring ultrasonic emitters impedance characteristics in the welding thermoplastic polymeric materials process. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 220-223. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.01.034. EDN: <https://elibrary.ru/SVSGPX>.

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковая (УЗ) сварка полимерных материалов широко используется в промышленности и является в настоящее время востребованной [1, 2, 3]. Данный способ сварки в ряде случаев выгодно отличается от других существующих способов сварки полимерных материалов по качеству и скорости формирования сварных соединений, требованию к чистоте соединяемых поверхностей, стоимости существующего оборудования. Несмотря на то, что технология УЗ сварки полимерных материалов существует достаточно давно, вопросы качества формируемых сварных соединений до сих пор являются актуальными, а исследования, в том числе и фундаментальные, в этой области до сих пор ведутся многими учеными [4].

Известны следующие способы контроля процесса сварки полимерных термопластичных материалов:

- по изменению амплитуды колебаний рабочего инструмента в процессе сварки при фиксированном напряжении питания УЗ излучателя;
- по изменению потребляемой мощности сварочным аппаратом при фиксированной амплитуде УЗ воздействия;
- по изменению величины электрического тока, протекающего через УЗ излучатель в процессе сварки при фиксированном напряжении питания УЗ излучателя;
- по изменению параметров УЗ излучателя в процессе сварки, таких как резонансная частота;
- по потребленной энергии, необходимое количество которой должно быть заранее известно;
- по тепловыделению в зоне формирования сварного соединения;
- по величине осадки свариваемых материалов в процессе формирования сварного соединения;
- по динамике перемещения рабочего инструмента в процессе формирования сварного соединения.

Поскольку УЗ излучатель непосредственно контактирует со свариваемыми материалами, акустические свойства которых меняются в ходе УЗ сварки, очевидно, что импеданс излучателя будет так же изменяться, что может быть использовано для контроля процесса сварки термопластичных полимерных материалов.

МЕТОДЫ

В процессе УЗ сварки полимерный материал находится в различных состояниях (твердое, пластичное, вязкое, вязкотекучее, текучее), что определяет его различные акустические свойства.

Излучатель ультразвуковых колебаний, как нагрузка на электронный генератор, имеет комплексное сопротивление, величина и характер которого определяется его собственными механическими и электромеханическими параметрами [5]. С другой стороны, импеданс УЗ излучателя зависит от акустической нагрузки, влияние которой может быть достаточно сильной.

Влияние акустической нагрузки на импеданс УЗ излучателя, с одной стороны, является нежелательным явлением, поскольку это может являться причиной сбоев в работе УЗ аппаратов, изменения их параметров. С другой стороны, связь акустических свойств свариваемых

материалов с импедансом УЗ излучателей может быть использована для контроля физических параметров этих сред, контроля процессов в них протекающих (контроль процесса сварки).

Одним из направлений развития УЗ аппаратов для сварки полимерных материалов является их оснащение системой контроля импеданса УЗ излучателей, которые работают в силовом режиме и воздействуют на акустическую нагрузку. На рисунке 1 представлена блок-схема такой системы контроля.

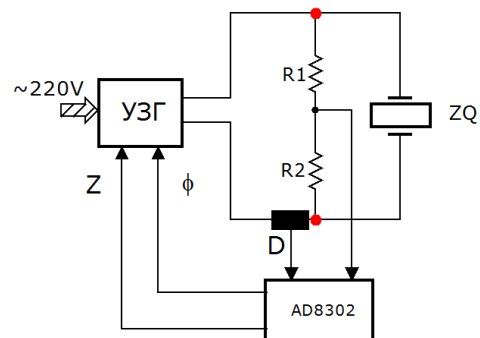


Рисунок 1 – Блок-схема измерителя импеданса УЗ излучателей

Figure 1 – Block diagram of the ultrasonic emitter impedance meter

При помощи резистивного делителя R1, R2, токового датчика D, формируются сигналы, пропорциональные напряжению и току, потребляемым УЗ излучателем ZQ. В качестве узла, реализующего формирование сигнала, пропорционального отношению напряжения и тока, протекающего через УЗ излучатель, а также сигнала, пропорционального их фазовому соотношению, используется микросхема AD8302 (фирма Analog Device) [6], которая представляет собой аппаратно реализованный измеритель усиления / затухания и фазы сигналов. Структура этой микросхемы представлена на рисунке 2. Она состоит из двойного логарифмического усилителя-измерителя амплитуды и фазового детектора.

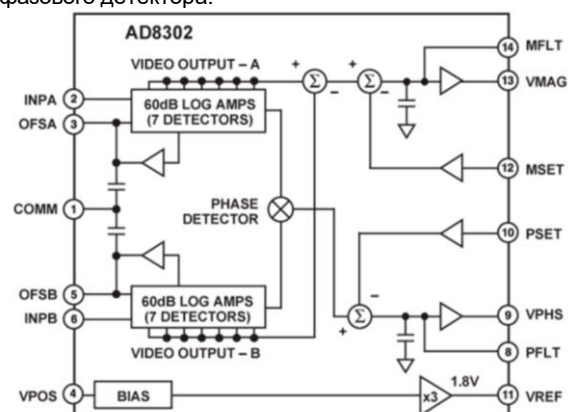


Рисунок 2 – Структура микросхемы AD8302

Figure 2 – The structure of the AD8302 chip

В процессе работы микросхемы AD8302 в составе измерителя импеданса УЗ излучателя на ее выходах V_{mag} и V_{phs} формируются два аналоговых сигнала. Первый сигнал (V_{mag}) пропорционален отношению амплитуд входных сигналов, второй (V_{phs}) – разности их фаз. По этим двум значениям можно рассчитать все характеристики УЗ преобразователя (активное сопротивление Re , реактивную Im составляющие входного сопротивления УЗ излучателя и комплексное сопротивление $Z=Re+jIm$). Кроме того, если эти измерения проводить в процессе перестройки частоты задающего генератора УЗ аппарата, то возможно получение частотных зависимостей данных параметров. Сформированные микросхемой AD8302 сигналы поступают на входы АЦП управляющего микроконтроллера УЗ генератора.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 3 представлен эскиз зоны воздействия на образец полимерного материала при ультразвуковой сварке [7, 8], где: 1 – рабочий инструмент УЗ сварочной головки; 2 – неподвижная опора, на которой располагаются свариваемые материалы; 3 – термопластичный полимерный материал; 4 – термопластичный материал после УЗ воздействия. Ультразвуковое воздействие на образец термопластичного материала осуществляется с амплитудой рабочего инструмента A и статическим усилием, равным F . При поглощении полимерным материалом ультразвуковой энергии происходит его размягчение и переход из твердого состояния в текучее, при этом величина зазора ΔX будет уменьшаться вплоть до нуля при полном вытеснении расплава полимерного материала из зоны ультразвукового воздействия.

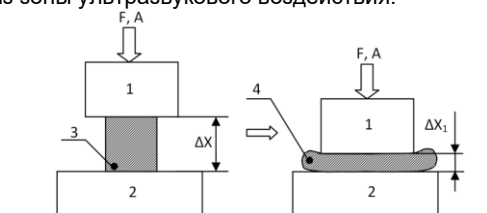


Рисунок 3 – Схема воздействия УЗ колебаний на полимерный образец

Figure 3 – Diagram of the effect of ultrasonic vibrations on a polymer sample

На рисунке 4 представлены кривые, характеризующие изменение импеданса УЗ излучателя Z , его активной Re и реактивной Im составляющих, полученные в процессе работы сварочного аппарата в режиме ультразвукового воздействия полимерный термопластичный материал.

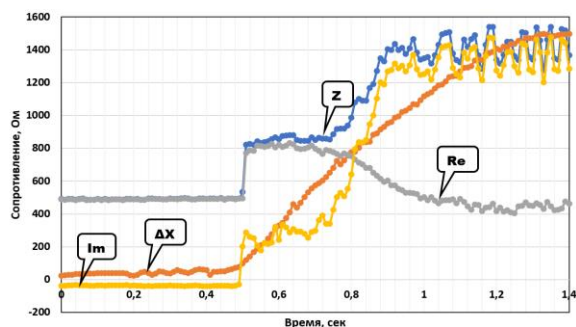


Рисунок 4 – Зависимость импеданса УЗКС во времени

Figure 4 – Time dependence of the impedance of the UZKS

На рисунке 4, кроме импедансных кривых, в том же временном масштабе представлена кривая деформирования образца ΔX , которая позволяет сопоставить различные фазы деформирования зоны ультразвукового воздействия с изменением импеданса УЗ излучателя.

Из представленных на рисунке 4 кривых видно, что на интервале времени $t = 0 \dots 0,49$ с (при наличии УЗ воздействия) контролируемые параметры стабильны, что свидетельствует о том, что импеданс твердого полимерного материала не меняется (слабо изменяется) в процессе его разогрева.

В момент времени $t = 0,49$ с начинается деформирование зоны УЗ воздействия, возникает хороший акустический контакт рабочего инструмента с «прогретым» образцом, и как следствие наблюдается резкое увеличение импеданса Z на 380 Ом, его активной составляющей Re на 330 Ом, реактивной составляющей на 360 Ом.

На интервале времени $t = 0,49 \dots 0,72$ с, наблюдается относительная стабилизация параметров Z , Re , Im , при этом в конце этого интервала деформировано около 40 % толщины свариваемого образца.

На интервале времени $t = 0,72 \dots 1,4$ с наблюдается рост импеданса и его мнимой составляющей. Они достигают значений в среднем 1300 Ом. Действительная составляющая импеданса начинает уменьшаться и устремляется к значению 420 Ом, что меньше начального значения на 70 Ом.

Характер кривых, представленных на рисунке 4, свойствен различным режимам УЗ воздействия на свариваемые полимерные материалы (различные амплитуды УЗ воздействия, различное статическое давление на рабочий инструмент). Предварительные эксперименты по свариванию листовых материалов одинаковой толщины показали, что максимальную прочность сварное соединение набирает при экспозиции УЗ колебаниями зона сварки до момента появления второго скачка на кривой изменения импеданса Z , что легко контролируется на стороне электронного УЗ генератора и может являться критерием достижения оптимального УЗ воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана принципиальная возможность оперативного косвенного контроля процесса сварки термопластичных полимерных материалов за счет непрерывного контроля импеданса (и его составляющих) УЗ излучателя, работающего в силовом режиме, в процессе реализации сварного соединения. Получены зависимости импеданса УЗ излучателя, его действительной и мнимой составляющих, в ходе деформирования термопластичного полимерного материала в присутствии УЗ воздействия и статического давления излучающего ультразвукового рабочего инструмента. Характерные особенности полученных зависимостей позволяют определять оптимальные временные интервалы УЗ воздействия на свариваемые материалы для получения максимальной прочности сварных соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультразвук в комбинированных технологиях машиностроения / В.М. Приходько [и др.] // Научно-технические технологии электро-физико-химической и комбинированной обработки. 2020. № 9. С. 21–26.
2. Villegas I.F. Ultrasonic welding of thermoplastic composites // Frontiers in Materials. 2019. Vol. 6. doi:

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ИМПЕДАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

10.3389/fmats.2019.00291.

3. A review on ultrasonic welding of various materials and their mechanical properties / S. Titahun [et al.] // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 988. doi: 10.1016/j.fuel.2019.03.011.

4. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелёв [и др.]. Бийск : Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (АлтГТУ), 2007. 400 с.

5. Ультразвук. Принципы построения, алгоритмы и системы управления ультразвуковыми аппаратами / В.Н. Хмелёв [и др.]. Бийск : Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (АлтГТУ), 2021. 200 с.

6. LF–2.7 GHz RF/IF Gain and Phase Detector. URL: <https://www.micro-semiconductor.com/datasheet/64-AD8302ARUZ-REEL.pdf> (дата обращения: 26.09.2025).

7. Стенд для исследования динамики осадки полимерных материалов в процессе воздействия на них ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности / Р.В. Барсуков [и др.] // Механика композиционных материалов и конструкций. 2025. Т. 31, № 1. С. 117–126. doi: 10.33113/mkml.ras.2025.31.01.09.

8. Барсуков Р.В., Шакура В.А., Барсуков А.Р., Сливин А.Н. Стенд для исследования осадки полимеров в процессе воздействия на них ультразвуковыми колебаниями // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы (ТА2025) : сборник материалов V Международной научной конференции. Тольятти : Тольяттинский государственный университет, 2025. С. 61–62.

Информация об авторах

Р. В. Барсуков – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

А. Р. Барсуков – старший преподаватель кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

А. Н. Сливин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

В. А. Шакура – младший научный сотрудник отдела научно-исследовательской работы сотрудников и преподавателей Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения

высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

REFERENCES

1. Prikhodko, V.M. [et al.]. (2020). Ultrasound in combined technologies of mechanical engineering. *Science-Intensive Technologies of Electro-Physical, Chemical and Combined Processing*, (9), 21–26. (In Russ.).

2. Villegas, I.F. (2019). Ultrasonic welding of thermoplastic composites. *Frontiers in Materials*, 6. doi: 10.3389/fmats.2019.00291.

3. Titahun, S. [et al.]. (2020). A review on ultrasonic welding of various materials and their mechanical properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 988. doi: 10.1016/j.fuel.2019.03.011.

4. Khmelev, V.N. [et al.]. (2007). *Ultrasonic multifunctional and specialized devices for the intensification of technological processes in industry, agriculture and household*. Biysk: Altay State Technical University. (In Russ.).

5. Khmelev, V.N. [et al.]. (2021). *Ultrasound: Principles of design, algorithms and control systems of ultrasonic devices*. Biysk: Altay State Technical University. (In Russ.).

6. LF–2.7 GHz RF/IF Gain and Phase Detector. Retrieved from: <https://www.micro-semiconductor.com/datasheet/64-AD8302ARUZ-REEL.pdf>.

7. Barsukov, R.V., Shakura, V.A., Barsukov, A.R. & Slivin, A.N. (2025). Test bench for studying the dynamics of polymer material compaction under high-intensity ultrasonic vibrations. *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 31(1), 117–126. (In Russ.). doi: 10.33113/mkml.ras.2025.31.01.09.

8. Barsukov, R.V., Shakura, V.A., Barsukov, A.R. & Slivin, A.N. Test bench for studying polymer compaction under ultrasonic vibration. *Proceedings of the 5th International Scientific Conference: Technical Acoustics: Developments, Problems, Prospects (TA2025)*. Tolyatti: Tolyatti State University. (In Russ.).

Information about the authors

R.V. Barsukov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

A.R. Barsukov - Senior Lecturer of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

A.N. Slivin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

V.A. Shakura - Junior Research Fellow, Department of Research Work of Staff and Faculty of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 октября 2025; одобрена после рецензирования 24 февраля 2026; принята к публикации 16 марта 2026.

The article was received by the editorial board on 07 Oct 2025; approved after editing on 24 Feb 2026; accepted for publication on 16 Mart 2026.