

УДК 534-8  
EDN GUQDID (<https://elibrary.ru/guqdid>)  
DOI 10.33113/mkmk.ras.2025.31.01.09



## СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОСАДКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ\*

Барсуков Р.В., Голых Р.Н., Барсуков А.Р., Сливин А.Н.

*Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский  
государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,  
г. Бийск, Россия*

### АННОТАЦИЯ

Статья посвящена разработке экспериментального стенда, предназначенного для изучения динамики осадки полимерных материалов (в том числе полимерных композитных материалов) в процессе воздействия на них ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности. В основе работы экспериментального стенда лежит контроль перемещения ультразвукового излучателя, который в процессе контактного взаимодействия с исследуемым образцом, при наличии статического давления, с помощью которого ультразвуковой излучатель прижат к тестируемому образцу, становится подвижным по мере поглощения образцом ультразвуковой энергии и, как следствие, перехода образца из твердого состояния в вязкое, а затем в текучее. Полученные при помощи разработанного стенда экспериментальные данные, характеризующие динамику осадки полимерных материалов в совокупности с другими данными, характеризующими процесс ультразвукового воздействия (частота ультразвукового воздействия, вводимая в зону ультразвукового воздействия мощность, характер её изменения и т.п.) позволят более подробно изучить стадии процесса воздействия ультразвука на полимер, выявить, в частности, вклад гидродинамических эффектов (кавитационные явления, акустические микротоки, релаксационные эффекты вязкости) в изменение свойств и интенсификацию диффузии на границе раздела полимеров под действием мощных ультразвуковых колебаний. Получение экспериментальных данных осуществляется в диапазоне амплитуд ультразвукового воздействия от 5 до 40 мкм и диапазоне статических усилий до 180 Н. Диапазон контролируемых деформаций 5 мм. Разработанный стенд позволит изучить и максимально раскрыть потенциал ультразвуковой сварки полимерных материалов, в частности, позволит выработать методы эффективной реализации процесса сварки как однородных, так и разнородных материалов.

**Ключевые слова:** ультразвук; полимеры; сварка; измерительный стенд; воздействие на вещество

## STAND FOR STUDYING THE DYNAMICS OF POLYMER MATERIALS SEDIMENTATION DURING EXPOSURE TO HIGH-INTENSITY ULTRASONIC OSCILLATIONS

Barsukov R.V., Golykh R.N., Barsukov A.R., Slivin A.N.

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00314.

### ABSTRACT

The article is devoted to the development of an experimental setup designed to study the dynamics of polymeric material precipitation (including polymer composite materials) during exposure to high-intensity ultrasonic oscillations. The operation of the experimental setup is based on the ultrasonic emitter movement control. It is pressed against the test sample in the process of contact interaction with the material under study, in the presence of static pressure. The ultrasonic emitter becomes mobile as the sample absorbs ultrasonic energy and, as a result, the sample transitions from a solid state to a viscous state and then to a fluid state. The experimental data were obtained using the developed stand and characterize the dynamics of the polymeric materials precipitation in combination with other data characterizing the process of ultrasonic exposure (frequency of ultrasonic exposure, power introduced into the zone of ultrasonic exposure, the nature of power's change, etc.). This data will allow to study in more detail the stages of the ultrasonic action on the polymer process, to identify, in particular, the contribution of hydrodynamic effects (cavitation phenomena, acoustic microflows, relaxation effects of viscosity) to the change in properties and intensification of diffusion at the interface of polymers under the action of powerful ultrasonic oscillations. Obtaining experimental data is carried out in the range of ultrasonic action amplitudes from 5 to 40  $\mu\text{m}$  and the range of static forces up to 180 N. The range of controlled deformations is 5 mm. The developed setup will allow to study and maximize the potential of ultrasonic welding of polymeric materials, in particular, will allow to develop methods for the effective implementation of the welding process of both homogeneous and dissimilar materials.

**Keywords:** ultrasonic; polymers; welding; measuring stand; impact on matter

### ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковая (УЗ) сварка полимеров является перспективным способом их соединения, которая реализуется за счет воздействия ультразвуковыми колебаниями на соединяемые слои полимеров, их нагрева до температуры плавления.

Различные исследования в области полимеров показывают, что тепловые эффекты несут побочные и нежелательные явления, ограничивающие прочность соединения при ультразвуковой сварке, к которым относятся, например, термическая деструкция полимеров и ускорение химических реакций окисления.

В то же время установлено, что ультразвуковые колебания приводят к возникновению гидродинамических эффектов в расплавах полимеров, способных ускорять диффузионные процессы.

Таким образом, перспективными являются исследования, которые заключаются в установлении вклада гидродинамических эффектов (кавитационных явлений, акустических микропотоков, релаксационных эффектов вязкости) в изменение свойств и интенсификацию диффузии на границе раздела полимеров под действием мощных ультразвуковых колебаний в ходе реализации ультразвуковой сварки.

В частности, определенный интерес представляет процесс осадки полимерных материалов, его динамика в ходе воздействия на материалы УЗ колебаниями высокой интенсивности, в присутствии статического усилия, сжимающего расплавляемый образец, находящийся между неподвижной опорой

и ультразвуковым волноводом. Возникающие при определенных условиях различного рода гидродинамические эффекты (кавитационные явления, акустические микропотоки и т.п.) должны повлиять на характер осадки полимерных материалов в процессе воздействия на них УЗ колебаниями высокой интенсивности [1-18].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ, ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

На рис.1 представлен эскиз зоны воздействия на образец полимерного материала, где 1 – рабочий инструмент УЗ колебательной системы, 2 – неподвижная металлическая опора, 3 – тестируемый исходный (твердый) образец полимерного материала, 4 – тестируемый образец после УЗ воздействия. Ультразвуковое воздействие на тестируемый образец осуществляется с амплитудой рабочего инструмента  $A$  и статическим усилием на тестовый образец равным  $F$ . В ходе воздействия УЗ энергией на тестируемый образец происходит его размягчение и переход из твердого состояния в текучее, при этом величина зазора  $\Delta X$  будет уменьшаться вплоть до нуля при полном вытеснении расплава тестового образца из зоны воздействия.

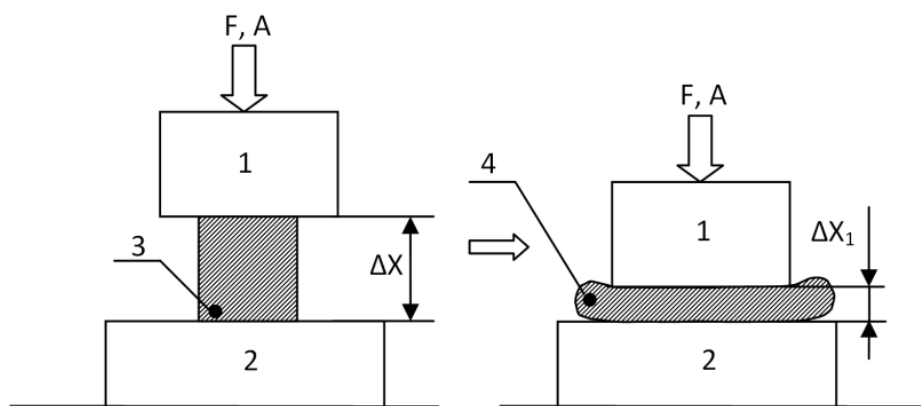


Рис.1. Схема воздействия УЗ колебаний на полимерный образец.

Характер изменения зазора  $\Delta X$  во времени зависит от: физических свойств тестируемого образца, амплитуды колебаний УЗ волновода, силы прижатия волновода к образцу, теплопроводящих свойств УЗ волновода и подложки, контактирующих с тестируемым образцом. Кроме того, возможны локальные характерные искажения кривой за счет возникновения в тестовом образце вторичных явлений, например, за счет возникновения кавитационных явлений, появления крупных пузырей газа за счет дегазации полимера или его деструкции с выделением дыма и т.п. Т.е., изучая характер осадки, можно изучать стадии сварки полимеров и изучать происходящие в них явления.

Таким образом, возникает потребность в измерительном стенде, при помощи которого можно получать кривые, иллюстрирующие характер осадки полимерных материалов в процессе воздействия на них УЗ энергии.

Осадка полимерных материалов в процессе воздействия на них УЗ колебаниями (например, при ультразвуковой сварке) является сопутствующим явлением. Степень осадки, а также динамика осадки полимерных материалов характеризуют, в конечном итоге, качество формируемых сварных соединений.

Таким образом, контроль осадки полимерных материалов является актуальной задачей. Существует ряд прямых и косвенных методов, предназначенных для контроля степени осадки полимерных материалов. Например, методы оперативного контроля осадки материалов, которые основаны на:

- фото- и видеосъемке области деформации области УЗ воздействия;
- изменении амплитуды колебаний волновода в ходе УЗ воздействия (контроль осуществляется как при помощи лазерных виброметров, так и при помощи косвенных измерений – по току, потребляемому УЗ излучателем);
- контроле энергетических параметров УЗ колебаний, проходящих в опору через область УЗ воздействия, акустическая проводимость которой меняется в ходе ее осадки;
- изменении электрических параметров УЗ излучателей, таких как резонансная частота, импеданс, потребляемая мощность;
- контроле перемещения УЗ излучателя в ходе воздействия на полимер (метод основан на базе применения датчиков перемещений различного типа и точности).

Существуют также методы неоперативного контроля осадки полимерных материалов, реализуемых, например, при помощи таких инструментов как: микрометр, штангенциркуль, индикаторы перемещений часового типа и т.п.

Предпочтения, конечно же, отдаются оперативным методам контроля осадки полимерных материалов, поскольку они позволяют оценить все фазы УЗ воздействия на материал: нагрев, пластификация, разжижение и т.д.

Предлагаемый стенд и методика, в сравнении с существующими, отличается: технической простотой, возможностью получать измерительные данные в «динамике», достаточной точностью измерений по координатам «деформация – время», относительной дешевизной, возможностью получения дополнительных графических зависимостей («деформация – время», «скорость деформации – время», «скорость деформации от степени деформирования»), возможностью использования с различными типами и конструкциями УЗ излучателей, стандартным форматом выходных измерительных данных.

На рис.2 представлена структурная схема разработанного стенда, где 1 – ультразвуковая колебательная система с рабочим инструментом, 2 – исследуемый образец, 3 – металлическая опора, 4 – ультразвуковой электронный генератор, 5 – пневматический привод для перемещения УЗКС, 6 – пневматическая педаль, 7 – регулятор давления с манометром, 8 – компрессор, 9 – датчик перемещения, жестко соединенный с УЗКС, 10 – аналогово-цифровой преобразователь, 11 – микроконтроллер, 12 – персональный компьютер, 13 – программное обеспечение для визуализации полученных зависимостей.

В качестве ультразвукового генератора 4 с излучателем 1 был использован аппарат серии «Гиминей» [19].

В качестве датчика перемещений 9 используется датчик WXXY модель KTRA-5L [20], который представляет собой преобразователь перемещений резистивного типа.

Микропроцессорный блок (поз.10, 11 рис.2) построен на базе микроконтроллера ATmega48, в составе которого имеется АЦП с разрядностью 10 бит и последовательный интерфейс, используемый для связи с ПК 12. Компрессор 8 обеспечивает максимальное давление до 5 атм.

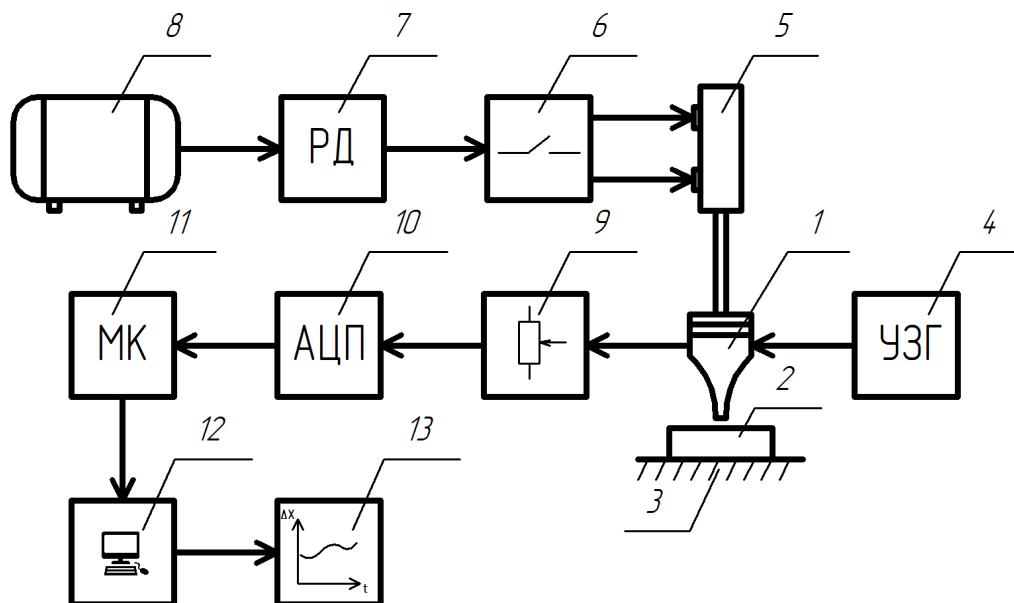


Рис.2. Структурная схема измерительного стенда.

На рис.3 показан механический узел УЗ воздействия с пневматическим приводом и системой контроля перемещения.

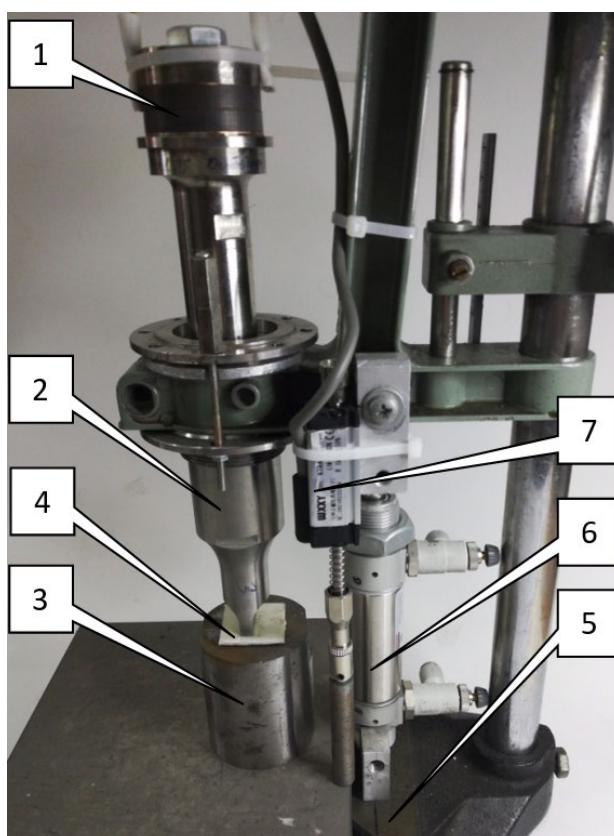


Рис.3. Механический узел УЗ воздействия с пневматическим приводом и системой контроля перемещения.

Узел сварки состоит из электромеханического преобразователя пьезоэлектрического типа – 1, волновода с рабочим инструментом – 2,

металлической опоры – 3, исследуемого образца – 4, штатива – 5, пневматического цилиндра – 6, датчика перемещений – 7.

В Таблице 1 приведены технические характеристики разработанного стенда.

Таблица 1.

Технические характеристики стенда

Диапазон амплитуд УЗ воздействия на тестовый образец	5...40 мкм
Диапазон контролируемых деформаций	5 мм
Частота УЗ воздействия	35 кГц
Диапазон сжимающих усилий	0...180 Н
Количество измерений в секунду	1000
Формат выходных данных	CSV

Частота УЗ воздействия зависит от УЗ оборудования, которое используется в составе измерительного стенда, и может быть произвольной. В данном конкретном случае стенд был укомплектован УЗ излучателем с рабочей частотой 35 кГц.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.4 представлена кривая деформации тестового образца, полученная при воздействии УЗ энергии на пластинку из АВС пластика толщиной 2,5 мм, при этом амплитуда УЗ воздействия составляла 40 мкм, сила воздействия на тестируемый образец 54 Н. Частота УЗ колебаний составляла 35 кГц.

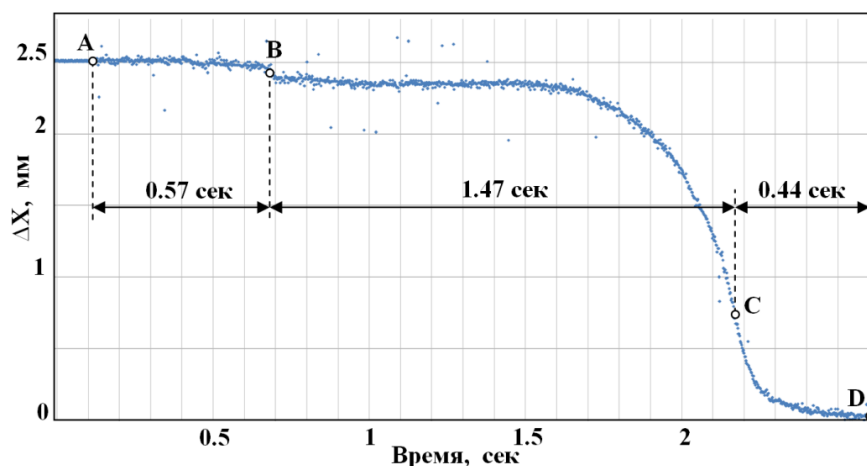


Рис.4. Зависимость деформации твердого полимера от времени УЗ воздействия.

На кривой, представленной на рис.4, можно отметить ряд характерных точек. Точка А соответствует началу ультразвукового воздействия. Точка В соответствует моменту начальной осадки материала на величину примерно 0,14 мм, что обусловлено изначально отсутствием «хорошего» акустического контакта УЗ излучателя с тестовым образцом, его начальным разогревом, размягчением и, соответственно, небольшим перемещением рабочего инструмента до полного касания тестового образца. На отрезке ВС происходит поглощение образцом тестового полимерного материала УЗ энергии, его

размягчение и переход из твердого состояния в пластичное и далее в текучее состояние. Точка С соответствует точке максимальной скорости деформирования материала, которая составляет примерно 9,6 мм/сек. В ультразвуковой сварке достижение этой точки считается моментом, при котором прекращают УЗ воздействие, поскольку свариваемые материалы перешли в текучее состояние и произошла солидация слоев. Далее скорость деформации замедляется, что связано с устремлением величины зазора  $\Delta X$  к нулю и затруднением истекания из него расплавленного материала. Точка D соответствует точке полного вытеснения расплавленного полимера из области УЗ воздействия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы был разработан, изготовлен и апробирован измерительный стенд для исследования динамики осадки полимерных материалов в процессе воздействия на них УЗ колебаниями высокой интенсивности. Проведенные предварительные эксперименты показали работоспособность стенда.

Разработанный стенд предназначен для изучения новых механизмов инициации взаимной диффузии полимеров под действием ультразвука, изучении влияния гидродинамических эффектов (кавитационных явлений, акустических микропотоков, релаксационных эффектов вязкости) на процесс осадки полимерных материалов. Исследования подобного рода позволят в полной мере раскрыть потенциал ультразвуковой сварки полимеров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Приходько В.М. и др. *Ультразвук в комбинированных технологиях машиностроения* // Научноёмкие технологии электро-физикохимической и комбинированной обработки. – 2020. – №9. – С.21-26.
2. Asano Y., Watanabe H., Noguchi H. *Effects of polymers on the cavitating flow around a cylinder: a large-scale molecular dynamics analysis* // The journal of chemical physics. – 2021. – Vol.155. – Iss.1. – e014905.
3. Chen Z. et al. *Control of nano-cavitation in semi-crystalline polymer nanocomposites during uniaxial tension: in situ synchrotron X-ray study* // Polymer. – 2024. – Vol.296. – e126786.
4. Охлопкова Т.А. и др. *Технология жидкофазного совмещения сверхвысокомолекулярного полиэтилена с наночастицами неорганических соединений под действием ультразвуковых колебаний* // Журнал прикладной химии. – 2016. – Т.89. – №9. – С.1179-1186.
5. Qian L. et al. *Temperature dependency of cavitation in impact copolymer polypropylene during stretching* // Polymer. – 2021. – Vol.217. – Iss.1. – e123428.
6. Tzanakis I. et al. *Cavitation in thermoplastic melts: new insights into ultrasound-assisted fibre-impregnation* // Composites Part B: Engineering. – 2022. – Vol.229. – Iss.6. – e109480.
7. *Ультразвуковые технологии и аппараты. Ультразвуковой технологический аппарат серии «Волна»*. URL: [https://u-sonic.ru/catalog/apparaty\\_dlya\\_uskoreniya\\_protsesov\\_v\\_zhidkikh\\_sredakh/volna\\_v6/](https://u-sonic.ru/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_protsesov_v_zhidkikh_sredakh/volna_v6/) (дата обращения: 05.07.2024).

8. Хмелёв В.Н. и др. *Ультразвук. Принципы построения, алгоритмы и системы управления ультразвуковыми аппаратами.* – Бийск, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2021.
9. Kumar A. et al. *Ultrasonics in polymer science: applications and challenges* // Progress in Materials Science. – 2023. – Vol.136. – e101113.
10. Sackmann J. et al. *Review on ultrasonic fabrication of polymer micro devices* // Ultrasonics. – 2015. – Vol.56. – Pp.189-200.
11. Benatar A., Marcus M. *Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites* / In book: Power Ultrasonics (Second Edition). – Woodhead Publishing, 2023. – Chapter 11. – Pp.205-225.
12. Bhudolia S.K. et al. *Advances in ultrasonic welding of thermoplastic composites: a review* // Ultrasonics. – 2020. – Vol.13. – Iss.6. – e1284.
13. Vendan S.A., Natesh M., Garg Akhil, Gao Liang. *Ultrasonic welding of polymers* / In book: Confluence of Multidisciplinary Sciences for Polymer Joining. – Springer Singapore, 2018. – Pp.73-101.
14. Unnikrishnan T.G., Kavan P. *A review study in ultrasonic-welding of similar and dissimilar thermoplastic polymers and its composites* // Materials Today Proceedings. – 2015. – Vol.56. – Iss.7. – Pp.3294-3300.
15. Lee T.H. et al. *Enhanced performance of ultrasonic welding of short carbon fiber polymer composites through control of morphological parameters* // J. Manuf. Sci. Eng. – 2019. – Vol.142. – Iss.1. – e011009.
16. Villegas I.F. *Ultrasonic welding of thermoplastic composites* // Frontiers in Materials. – 2019. – Vol.6.
17. Titahun S. et al. *A review on ultrasonic welding of various materials and their mechanical properties* // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol.988. – Iss.1. – e012113.
18. Kumar R.K., Omkumar M. *Investigation of ultrasonic welding of carbon fiber reinforced thermoplastic to an aluminum alloy using a interfacial coating* // Materials and Manufacturing Processes. – 2021. – Vol.36. – Iss.11. – Pp.1323-1331.
19. *Ультразвуковые технологии и аппараты. Ультразвуковой технологический аппарат серии «Гиминей».* URL: [https://u-sonic.ru/catalog/apparaty\\_dlya\\_svarki\\_polimernykh\\_materialov\\_i\\_izdeliy/giminey100/](https://u-sonic.ru/catalog/apparaty_dlya_svarki_polimernykh_materialov_i_izdeliy/giminey100/) (дата обращения: 05.07.2024).
20. *Taizhou Quantum Electronic Technology.* URL: <http://www.wxxy-lz.com/> (дата обращения: 05.07.2024).

## REFERENCES

1. Prikhod'ko V.M. et al. *Ul'trazvuk v kombinirovannykh tekhnologiyakh mashinostroeniya [Ultrasonic in combined mechanical engineering technologies].* Naukoymkie tekhnologii ehlektro-fizikokhimicheskoy i kombinirovannoj obrabotki, 2020, Iss.9, Pp.21-26.
2. Asano Y., Watanabe H., Noguchi H. *Effects of polymers on the cavitating flow around a cylinder: a large-scale molecular dynamics analysis.* The journal of chemical physics, 2021, Vol.155, Iss.1, e014905.
3. Chen Z. et al. *Control of nano-cavitation in semi-crystalline polymer nanocomposites during uniaxial tension: in situ synchrotron X-ray study.* Polymer, 2024, Vol.296, e126786.

4. Okhlopkova T.A. et al. *Tekhnologiya zhidkofaznogo sovmeshheniya sverkhvysokomolekulyarnogo poliehtilena s nanochastitsami neorganicheskikh soedinenij pod dejstviem ul'trazvukovykh kolebanij [Technology of liquid-phase combination of ultra-high molecular weight polyethylene with nanoparticles of inorganic compounds under the influence of ultrasonic vibrations]*. Zhurnal prikladnoj khimii, 2016, Vol.89, Iss.9, Pp.1179-1186.
5. Qian L. et al. *Temperature dependency of cavitation in impact copolymer polypropylene during stretching*. Polymer, 2021, Vol.217, Iss.1, e123428.
6. Tzanakis I. et al. *Cavitation in thermoplastic melts: new insights into ultrasound-assisted fibre-impregnation*. Composites Part B: Engineering, 2022, Vol.229, Iss.6, e109480.
7. *Ul'trazvukovye tekhnologii i apparaty. Ul'trazvukovoj tekhnologicheskij apparat serii "Volna" [Ultrasonic technologies and devices. Ultrasonic technological apparatus of the "Volna" series]*. URL: [https://u-sonic.ru/catalog/apparaty\\_dlya\\_uskoreniya\\_protsesov\\_v\\_zhidkikh\\_sredakh/volna\\_v6/](https://u-sonic.ru/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_protsesov_v_zhidkikh_sredakh/volna_v6/) (retrieved: 05.07.2024).
8. Khmelev V.N. et al. *Ul'trazvuk. Printsipy postroeniya, algoritmy i sistemy upravleniya ul'trazvukovymi apparatami [Ultrasonic. Design principles, algorithms and control systems for ultrasonic devices]*. Bijsk, AltGTU im. I.I. Polzunova, 2021.
9. Kumar A. et al. *Ultrasonics in polymer science: applications and challenges*. Progress in Materials Science, 2023, Vol.136, e101113.
10. Sackmann J. et al. *Review on ultrasonic fabrication of polymer micro devices*. Ultrasonics, 2015, Vol.56, Pp.189-200.
11. Benatar A., Marcus M. *Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites*. In book: Power Ultrasonics (Second Edition). Woodhead Publishing, 2023, Chapter 11, Pp.205-225.
12. Bhudolia S.K. et al. *Advances in ultrasonic welding of thermoplastic composites: a review*. Ultrasonics, 2020, Vol.13, Iss.6, e1284.
13. Vendan S.A., Natesh M., Garg Akhil, Gao Liang. *Ultrasonic welding of polymers*. In book: Confluence of Multidisciplinary Sciences for Polymer Joining. Springer Singapore, 2018, Pp.73-101.
14. Unnikrishnan T.G., Kavan P. *A review study in ultrasonic-welding of similar and dissimilar thermoplastic polymers and its composites*. Materials Today Proceedings, 2015, Vol.56, Iss.7, Pp.3294-3300.
15. Lee T.H. et al. *Enhanced performance of ultrasonic welding of short carbon fiber polymer composites through control of morphological parameters*. J. Manuf. Sci. Eng., 2019, Vol.142, Iss.1, e011009.
16. Villegas I.F. *Ultrasonic welding of thermoplastic composites*. Frontiers in Materials, 2019, Vol.6.
17. Titahun S. et al. *A review on ultrasonic welding of various materials and their mechanical properties*. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020, Vol.988, Iss.1, e012113.
18. Kumar R.K., Omkumar M. *Investigation of ultrasonic welding of carbon fiber reinforced thermoplastic to an aluminum alloy using a interfacial coating*. Materials and Manufacturing Processes, 2021, Vol.36, Iss.11, Pp.1323-1331.
19. *Ul'trazvukovye tekhnologii i apparaty. Ul'trazvukovoj tekhnologicheskij apparat serii "Giminej" [Ultrasonic technologies and devices. Ultrasonic technological apparatus of the "Giminej" series]*. URL: <https://u-sonic.ru/catalog/>

apparaty\_dlya\_svarki\_polimernykh\_materialov\_i\_izdeliy/giminey100/ (retrieved: 05.07.2024).

20. *Taizhou Quantum Electronic Technology*. URL: <http://www.wxxy-lz.com/> (retrieved: 05.07.2024).

*Поступила в редакцию 09 декабря 2024 года.*

---

Сведения об авторах:

Барсуков Роман Владиславович – к.т.н., доц., Кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, Россия; e-mail: [roman@bti.secna.ru](mailto:roman@bti.secna.ru)

Гольх Роман Николаевич – д.т.н., проф., Кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, Россия; e-mail: [grn@bti.secna.ru](mailto:grn@bti.secna.ru)

Барсуков Александр Романович – асп., Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, Россия; e-mail: [barsukov.ar@bti.secna.ru](mailto:barsukov.ar@bti.secna.ru)

Сливин Алексей Николаевич – к.т.н., доц., Кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, Россия; e-mail: [san@bti.secna.ru](mailto:san@bti.secna.ru)