



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 620.179.16

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.033



ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ И ВТОРИЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ПРОЦЕСС ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИСУТСТВИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Роман Владиславович Барсуков ¹, Роман Николаевич Голых ²,
Александр Романович Барсуков ³, Алексей Николаевич Сливин ⁴,
Владислав Анатольевич Шакура ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} 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 grn@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

³ barsukov.ar@bti.secna.ru

⁴ san@bti.secna.ru

⁵ shakura.va@u-sonic.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния кавитационных явлений и вторичных акустических эффектов на процесс деформации полимерных материалов в присутствии ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. В основе исследований лежит анализ динамики деформации тестовых образцов акрилонитрилбутадиенстирола при различных условиях (различная амплитуда ультразвукового воздействия, различные статические усилия воздействия на исследуемый образец). Результаты исследований иллюстрируют искажения динамики скорости деформации тестовых образцов на интервале их текучего состояния в присутствии ультразвуковых полей. Результаты исследований направлены на максимальное раскрытие потенциала ультразвуковой сварки полимеров, изучение вклада кавитационных явлений в процесс сварки полимерных материалов, в том числе с различными физическими свойствами.

Ключевые слова: ультразвук, кавитационные явления, сварка, полимеры, воздействие на вещество, интенсификация диффузии.

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

Для цитирования: Влияние кавитационных явлений и вторичных акустических эффектов на процесс деформации полимерных материалов в присутствии ультразвуковых колебаний высокой интенсивности / Р. В. Барсуков [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 251–255. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.033. EDN: <https://elibrary.ru/BJQTQJ>.

Original article

INFLUENCE OF CAVITATION PHENOMENA AND SECONDARY ACOUSTIC EFFECTS ON THE PROCESS OF POLYMERIC MATERIALS DEFORMATION IN THE PRESENCE OF HIGH-INTENSITY ULTRASONIC OSCILLATIONS

Roman V. Barsukov ¹, Roman N. Golykh ²,
Aleksandr R. Barsukov ³, Alexey N. Slivin ⁴, Vladislav A. Shakura ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russia

¹ roman@bti.secna.ru

² grn@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

³ barsukov.ar@bti.secna.ru

⁴ san@bti.secna.ru

⁵ shakura.va@u-sonic.ru

Abstract. The article is devoted to the study of the cavitation phenomena influence and secondary acoustic effects on the process of polymeric materials deformation in the presence of high-intensity ultrasonic oscillations. The research is based on the analysis of the deformation dynamics of acrylonitrile butadiene styrene test samples under various conditions (different amplitudes of ultrasonic action, different static forces of action on the sample under study). The research results illustrate the distortions of the deformation rate dynamics of test samples in the range of their fluid state in the presence of ultrasonic fields. The research results are aimed at maximizing the potential of ultrasonic welding of polymers, studying the contribution of cavitation phenomena to the welding process of polymeric materials, including those with different physical properties.

© Барсуков Р. В., Голых Р. Н., Барсуков А. Р., Сливин А. Н., Шакура В. А., 2025

Keywords: *ultrasonic, cavitation phenomena, welding, polymers, effect on matter, diffusion intensification.*

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., Golykh, R. N., Barsukov, A. R., Slivin, A. N. & Shakura, V. A. (2025). Influence of cavitation phenomena and secondary acoustic effects on the process of polymeric materials deformation in the presence of high-intensity ultrasonic oscillations. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 251-255. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.033. EDN: <https://elibrary.ru/BJQTQJ>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ультразвуковая (УЗ) сварка термопластичных материалов является одним из передовых способов их соединения. Данный способ сварки реализуется за счет воздействия ультразвуковыми колебаниями на соединяемые слои полимеров, за счет чего происходит разогрев до температуры плавления и их соединение.

Исследования различных авторов в области полимеров показывают, что в их расплавах в присутствии УЗ полей высокой интенсивности могут возникать различные гидродинамические эффекты, которые влияют (способствуют их ускорению) на диффузионные процессы.

В связи с этим, большой интерес представляет изучение вклада гидродинамических эффектов в процесс пластификации полимеров при наличии ультразвуковых полей высокой интенсивности, оценка вклада этих эффектов в процесс ультразвуковой сварки полимерных материалов. В первую очередь интерес представляют кавитационные явления, возникающие в расплавах полимеров, их влияние на реологические свойства расплавов и диффузионные процессы на границе раздела свариваемых полимерных материалов [1–4].

Существуют различные способы оценки кавитационных явлений [5–10], возникающих в жидких средах, большинство из которых неприменимы для проведения измерений в расплавах полимеров, что усложняет поставленную задачу.

Одним из вариантов изучения кавитационных явлений в расплавах полимеров и определения условий их зарождения является исследование динамики осадки тестовых образцов акрилонитрилбутадиенстирола (АБС пластика) толщиной 2,5 мм, при наличии УЗ воздействия и статического усилия, сжимающего образец, находящийся между неподвижной опорой и ультразвуковым волноводом.

Далее представлены результаты анализа динамики осадки тестовых образцов акрилонитрилбутадиенстирола (АБС пластика) толщиной 2,5 мм, при наличии УЗ воздействия и статического усилия, сжимающего образец, находящийся между неподвижной опорой и ультразвуковым волноводом.

МЕТОДЫ

На рисунке 1 показана механическая часть установки для контроля деформации термопластичных материалов при воздействии на них ультразвуковыми колебаниями различной интенсивности, а также различных уровней статического воздействия УЗ излучателя на тестируемые образцы. В основе работы установки лежит система контроля перемещений УЗ излучателя.

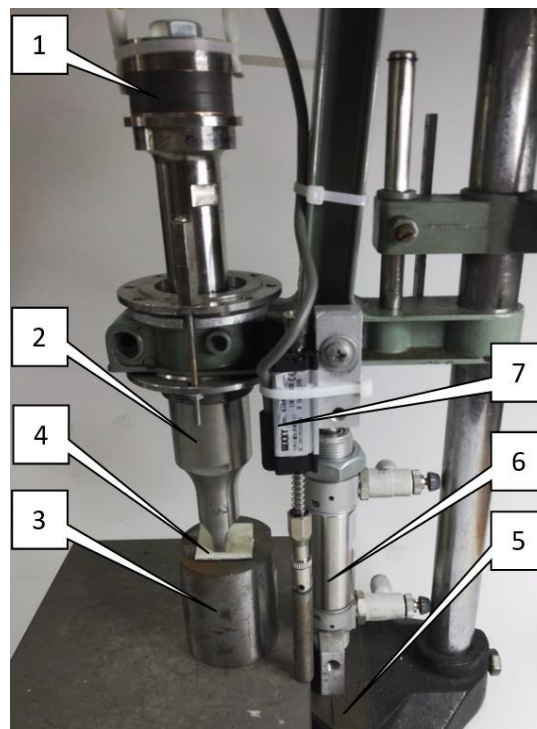


Рисунок 1 – Механический узел УЗ воздействия с пневматическим приводом и системой контроля перемещения УЗ излучателя

Figure 1 – Mechanical ultrasonic impact unit with a pneumatic actuator and a motion control system for ultrasonic emitter

Механический узел состоит из пьезоэлектрического преобразователя 1, волновода с рабочим инструментом 2, металлической опорной площадки 3, тестируемого образца 4, стандартного штатива 5, пневматического привода 6, датчика перемещений резистивного типа 7. В состав установки также входит блок АЦП, преобразующий сигнал с датчика перемещений в цифровой код и персональный компьютер со специализированным программным обеспечением, предназначенным для получения, обработки и визуализации получаемых экспериментальных данных.

Первичные данные, получаемые при работе стенда, представляют собой временную зависимость деформации тестируемого образца. Диапазон контролируемых деформаций составляет 5 мм (разрешающая способность установки при оценке деформаций составляет 204 точек/мм). В течение одной секунды стенд выдаёт 1000 измеренных значений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предварительно, при помощи измерительного стенда были получены кривые, характерные для осадки пластического материала (пластилин), при его выдавливании из зазора между торцом УЗ вол-

ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ И ВТОРИЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ПРОЦЕСС ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИСУТСТВИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

новода и опорной поверхностью при наличии статического усилия $F = 15H$ и без подведения к тестовому образцу дополнительной энергии. На рисунках 2, а и 2, б представлены кривая, характеризующая деформацию тестового образца во времени, и кривая, характеризующая изменение скорости деформирования образца во времени соответственно.

Из представленных рисунков видно, что в процессе выдавливания пластического материала из зазора между подвижным волноводом и опорой деформация образца от времени не является линейной функцией. При малых зазорах между подвижным волноводом и опорой (менее 1 мм) скорость деформации резко снижается, что обусловлено особенностью выдавливания пластической массы через уменьшенный зазор. Представленные на рисунке 2 кривые, их характер в данной работе принимаются за «эталонные»

поведение пластичной среды, выдавливаемой из зазора экспериментальной установки.

Тестированию подвергались образцы АБС пластика толщиной 2,5 мм, статические усилия F на ультразвуковой волновод устанавливались равными $F_1 = 36H$, $F_2 = 72H$, $F_3 = 108H$, амплитуда УЗ воздействия A устанавливалась равной $A_1 = 20$ мкм, $A_2 = 30$ мкм, $A_3 = 40$ мкм. Были получены данные для всевозможных сочетаний амплитуд УЗ воздействия и статических усилий, прикладываемых к тестируемому образцу.

На рисунке 3 представлены первичные данные, которые были получены в ходе каждого эксперимента. В данном случае – это сгруппированные зависимости для трёх различных экспериментов, проведённых при наличии статического усилия на УЗ волновод, равного $F_2 = 72H$ и амплитудах УЗ воздействия $A_1 = 20$ мкм, $A_2 = 30$ мкм, $A_3 = 40$ мкм.

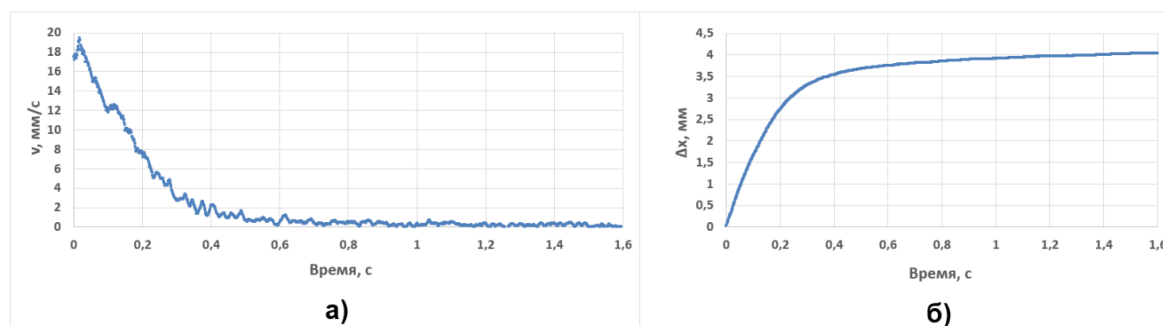


Рисунок 2 – Зависимость: а) пластической деформации образца от времени; б) скорости деформирования образца от времени

Figure 2 – Dependency: a) plastic deformation of the sample as a function of time; b) the rate of deformation of the sample as a function of time

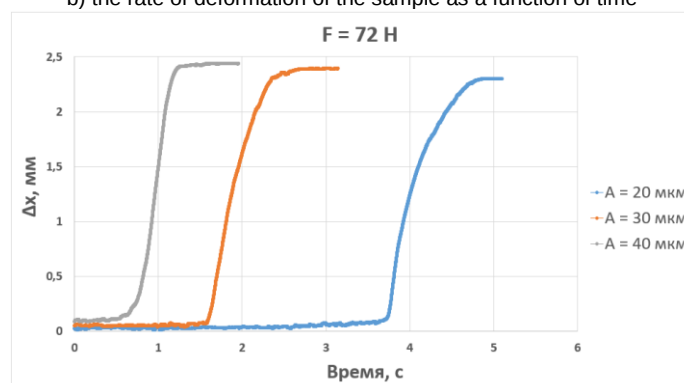


Рисунок 3 – Зависимость деформации тестовых образцов АБС пластика от времени для различных амплитуд УЗ воздействия

Figure 3 – Dependence of the deformation of ABS plastic test samples on time for various amplitudes of ultrasonic effects

Из представленных на рисунке 3 кривых видно, что при воздействии на тестовые образцы УЗ колебаниями с различной амплитудой:

- время от начала УЗ воздействия до начала пластификации различно и уменьшается при увеличении амплитуды УЗ воздействия;
- характер кривых на интервале пластического деформирования различный;
- время от начала пластической деформации до момента полного выдавливания расплава тестового образца из зазора экспериментальной установки различное (уменьшается при увеличении амплитуды УЗ воздействия).

Аналогичные первичные зависимости получены для всех условий проведения эксперимента.

Очевидно, что кавитационные явления в полимерных материалах возможны только тогда, когда они находятся в жидком состоянии (в состоянии расплава). При воздействии на твёрдый полимер УЗ колебаниями можно выделить несколько характерных временных интервалов:

- поглощение твёрдым полимером УЗ энергии и его разогрев;
- начало пластификации и пластификация твердого полимера;
- переход пластичного полимера в текучее состояние.

Таким образом, интерес представляет интервал времени, в течение которого полимер находится в текучем состоянии. На графиках, пред-

ставленных на рисунке 3, этот интервал начинается в окрестностях точки перегиба (когда первая производная функции принимает максимальное значение) и заканчивается моментом полного выдавливания расплава из зазора между УЗ волноводом и опорной площадкой. Было принято решение анализировать изменение скорости деформирования тестовых образцов, для чего первичные данные были продифференцированы.

На рисунке 4 представлены графики, иллюстрирующие эволюцию профиля скорости в ходе осадки тестируемых образцов для различных уставок амплитуды УЗ воздействия на различных уровнях статического усилия воздействия на тестируемый образец.

Первая группа графиков, представленных на рисунке 4, а, иллюстрирует характер изменения скорости осадки тестового образца от времени при ультразвуковом воздействии с амплитудой $A_1 = 20$ мкм и различных статических усилиях воздействия УЗ инструментом на тестовый образец ($F_1 = 36H$, $F_2 = 72H$, $F_3 = 108H$). Этой группе графиков характерны следующие черты:

- резкое увеличение скорости осадки тестового образца до точки максимума;
- плавно замедляющийся (асимптотически приближающийся к нулю) спад скорости деформации до нуля.

Время полной деформации тестового образца от исходной толщины до нуля для статических усилий сжатия $F_1 = 36H$, $F_2 = 72H$, $F_3 = 108H$ составило 1,88 с, 1,2 с и 1,48 с соответственно.

Вторая группа графиков, представленных на рисунке 4, б, иллюстрирует характер изменения ско-

рости осадки тестового образца от времени при ультразвуковом воздействии с амплитудой $A_2 = 30$ мкм и различных статических усилиях воздействия УЗ инструментом на тестовый образец ($F_1 = 36H$, $F_2 = 72H$, $F_3 = 108H$). Этой группе графиков характерны следующие черты:

- так же, как и для первой группы графиков характерно резкое увеличение скорости осадки тестового образца до точки максимума;

- спад зависимостей визуально отличается от аналогичных кривых первой группы графиков (для различных уровней давления наблюдается либо локальное увеличение скорости, либо более линейный характер спада скорости, либо локальная стабилизация скорости с последующим резким спадом).

Время полной деформации тестового образца от исходной толщины до нуля для статических усилий сжатия $F_1 = 36H$, $F_2 = 72H$, $F_3 = 108H$ составило 1,98 с, 1,1 с и 1,0 с соответственно.

Третья группа графиков, представленных на рисунке 4, в, иллюстрирует характер изменения скорости осадки тестового образца от времени при ультразвуковом воздействии с амплитудой $A_3 = 40$ мкм и различных статических усилиях воздействия УЗ инструментом на тестовый образец ($F_1 = 36H$, $F_2 = 72H$, $F_3 = 108H$). Этой группе графиков характерна следующая черта:

- профиль скорости более острый и более симметричный.

Время полной деформации тестового образца от исходной толщины до нуля для статических усилий сжатия $F_1 = 36H$, $F_2 = 72H$, $F_3 = 108H$ составило 0,28 с, 0,7 с и 0,56 с соответственно.

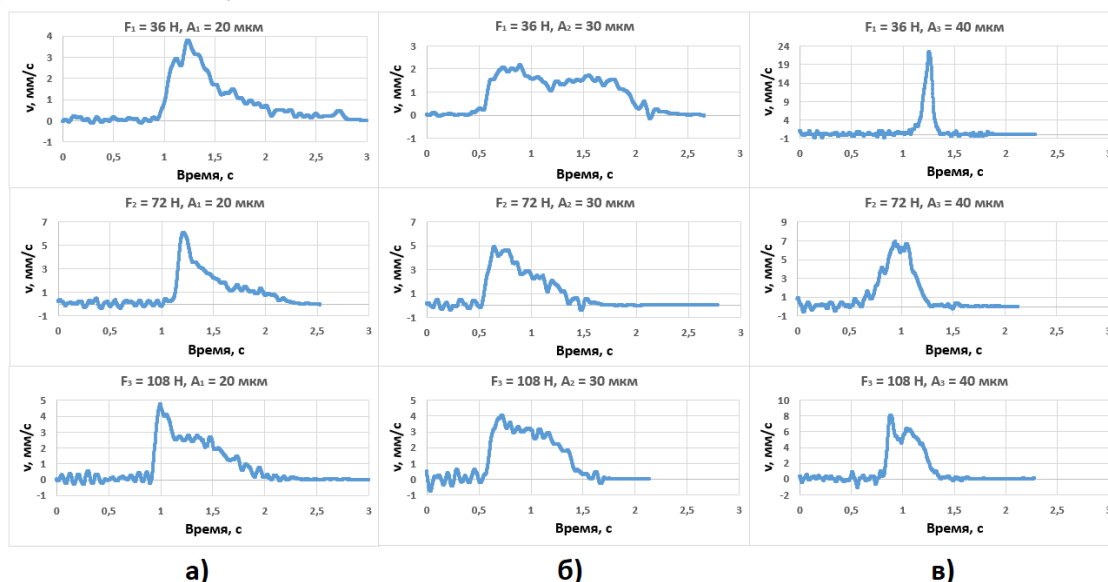


Рисунок 4 – Эволюция профиля скорости в ходе осадки тестового образца для различных уставок амплитуды колебаний и статических усилий воздействия на тестируемые образцы

Figure 4 – Evolution of the velocity profile during precipitation of the test sample for various settings of the oscillation amplitude and static forces acting on the test samples

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы было показано, что при воздействии на полимер УЗ колебаниями высокой интенсивности на интервале нахождения

полимера в жидком состоянии, возможно зарождение в нём вторичных акустических эффектов, таких как кавитация, связанные с ней микропотоки и т.п., что выражается в искажении при определенных условиях

ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ И ВТОРИЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ПРОЦЕСС ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИСУТСТВИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

(статическое давление, амплитуда УЗ воздействия), динамики деформации полимерных материалов.

Проведенные исследования являются частью работ, направленных на изучение новых механизмов инициации взаимной диффузии полимеров под действием ультразвука, изучении влияния гидродинамических эффектов (акустических микропотоков, кавитационных явлений, релаксационных эффектов вязкости и т.п.) на реологические свойства полимерных материалов. Результаты данных исследований, в частности, позволят в полной мере раскрыть потенциал ультразвуковой сварки полимерных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Prihod'ko, V.M., Nigmatzyanov, R.I., Simonov, D.S., Sundukov, S.K. & Fatyuhin, D.S. (2020). Ultrasound in combined mechanical engineering technologies. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, (9), 21-26. (In Russ.). doi: 10.1063/5.0056988.
2. Asano, Y., Watanabe, H. & Noguchi, H. (2021). Effects of polymers on the cavitating flow around a cylinder: a large-scale molecular dynamics analysis. *The journal of chemical physics*, 155(1), e014905. doi: 10.1063/5.0056988.
3. Chen, Z., Wang, Y., Li, Z., Zhang, H., Wan, M., Zheng, N., Xiong, B. & Zhu, J. (2024). Control of nanocavitation in semi-crystalline polymer nanocomposites during uniaxial tension: in situ synchrotron X-ray study. *Polymer*, (296), e126786. doi: 10.1016/j.polymer.2024.126786.
4. Ohlopko, T.A., Borisova, R.V., Nikiforov, L.A., Spiridonov, A.M., Sharin, P.P. & Ohlopko, A.A. (2016). Liquid phase combination technology ultra-high molecular polyethylene with nanoparticles of inorganic compounds under the influence of ultrasonic vibrations. *The journal of applied chemistry*, 89(9), 1179-1186. (In Russ.).
5. Qian, L., Zhang, Y., Zhao, X., Xiang, M., Lu, Y. & Men, Y. (2021). Temperature dependency of cavitation in impact copolymer polypropylene during stretching. *Polymer*, 217(1), e123428. doi: 10.1016/j.polymer.2021.123428.
6. Tzanakis, I., Khavari, M., Titze, M. & Eskin, D.G. (2022). Cavitation in thermoplastic melts: new insights into ultrasound-assisted fibre-impregnation. *Composites Part B: Engineering*, 229(6), e109480. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109480.
7. Ultrasonic technologies and devices. Ultrasonic technological device of the "Volna" series. (2024). Retrieved from https://u-sonic.ru/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_protessov_v_zhidkikh_sredakh/volna_v6/. (In Russ.).
8. Khmelev, V.N., Barsukov, R.V., Genne, D.V., Abramenko, D.S. & Barsukov, A.R. (2021). *Ultrasonic. Principles of construction, algorithms and control systems of ultrasonic devices*. Biysk: AltSTU. (In Russ.).
9. Sackmann, J. [et al.]. (2015). Review on ultrasonic fabrication of polymer micro devices. *Ultrasonics*, (56), 189-200. doi: 10.1016/j.ultras.2014.08.007.
10. Benatar, A. & Marcus, M. (2023). Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites. *Power Ultrasonics (Second Edition)*, 205-225. doi: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00006-3.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.

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».

Р. Н. Голых – доктор технических наук, профессор 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».

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.

R.N. Golykh - Doctor of Technical Sciences, 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.