

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2022-8-3-49-55>

УДК 678.027.942:534.22

## ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР

В. В. КОЖУШКО<sup>+</sup>

Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

*Цель работы — показать возможности применения лазерных оптико-акустических методов для измерения пропускания ультразвука слоистыми металлополимерными структурами и для проведения мониторинга процесса отверждения полимерного слоя.*

*Зондирующие ультразвуковые импульсы возбуждали оптико-акустическим методом. Для этого использовали наносекундные импульсы лазера, работающего в режиме модулированной добротности на длине волны 532 нм. Поглощение оптического излучения в тонком приповерхностном слое создает термоупругие напряжения, в результате чего возбуждается продольный импульс с выраженной фазой сжатия и широкополосным спектром, охватывающим полосу частот от 0,5 МГц до 50 МГц. Ультразвуковые импульсы, прошедшие слоистую структуру, регистрировали широкополосным пьезоэлектрическим преобразователем с противоположенной стороны структуры. Чувствительный элемент преобразователя изготовлен из поляризованной пленки поливинилдифторида толщиной 25 мкм и диаметром 3 мм. Акустический контакт между структурой и преобразователем обеспечивает слой дистиллированной воды толщиной 2 мм.*

*Провели измерения в двух металлополимерных структурах. В рамках одномерной модели на основании граничных условий равенства давления и колебательных скоростей продольных волн выполнили расчет спектра пропускания структуры титан–полиуретан–титан. Обратное преобразование Фурье использовали для представления временной зависимости давления, которая хорошо согласуется с измеренным в эксперименте сигналом. Последовательно измеренное пропускание структуры алюминий–эпоксидная смола–алюминий во время полимеризации смолы показало сокращение времени прибытия первого импульса, связанное с изменением жесткости смолы и переходом ее в твердое состояние.*

**Ключевые слова:** оптико-акустический эффект, лазерный ультразвук, металлополимерные слоистые структуры, эпоксидная смола, полимеризация, скорость ультразвука.

## OPTOACOUSTIC METHOD OF DIAGNOSTICS OF METAL-POLYMER LAYERED STRUCTURES

V. V. KOZHUSHKO<sup>+</sup>

V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus

*The purpose of this work is to show the possibilities of using laser optoacoustic methods to measure the ultrasound transmission of layered metal-polymer sandwich structures and to monitor the curing process of a polymer layer.*

*The excitation of probing ultrasonic pulses was performed by the optoacoustic method. The nanosecond pulses of a Q-switched laser at a wavelength of 532 nm were used. The absorption of optical radiation in a thin near-surface layer creates thermoelastic stresses, as a result of which a longitudinal pulse is excited with a pronounced compression phase and a broadband spectrum covering the frequency band from 0.5 to 50 MHz. Registration of ultrasonic pulses that have passed through the layered structure is performed by a*

<sup>+</sup>E-mail: vkozhushko@mpri.org.by

broadband piezoelectric transducer on the opposite side of the structure. The sensitive element of the transducer is made of a polarized polyvinylidene fluoride film 25  $\mu\text{m}$  thick and 3 mm in diameter. Acoustic contact between structure and transducer is provided by 2 mm thick layer of distilled water.

Measurements were carried out in two metal-polymer structures. Within the framework of a one-dimensional model, based on the boundary conditions of equality of pressure and vibrational velocities of longitudinal waves, the transmission spectrum of the titanium-polyurethane-titanium structure was calculated. The inverse Fourier transform was used to represent the time dependence of the pressure, which is in good agreement with the signal measured in the experiment. Sequentially measured transmission of the structure aluminum-epoxy resin-aluminum during polymerization of the resin showed a decrease in the arrival time of the first pulse due to a change in the rigidity of the resin and its transition to a solid state.

**Keywords:** optoacoustic effect, laser ultrasound, metal-polymer layered structures, epoxy resin, polymerization, ultrasound velocity.

Поступила в редакцию 15.08.2022

© В. В. Кожушко, 2022

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в [редакцию журнала](#)  
Full text of articles can be purchased from the editorial office

Адрес редакции: ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь  
Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Address: Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus  
Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: [polmattex@gmail.com](mailto:polmattex@gmail.com)  
Web: <http://mpri.org.by/izdaniya/pmt/>

#### Образец цитирования:

Кожушко В. В. Оптико-акустический метод диагностики металлополимерных слоистых структур // Полимерные материалы и технологии. 2022. Т. 8, № 3. С. 49–55. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2022-8-3-49-55>

#### Citation sample:

Kozhushko V. V. Optiko-akusticheskiy metod diagnostiki metalopolimernykh sloistykh struktur [Optoacoustic method of diagnostics of metal-polymer layered structures]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2022, vol. 8, no. 3, pp. 49–55. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2022-8-3-49-55>

#### Литература

1. Emerging Technologies in Non-destructive testing VI : Proceedings of the 6th International Conference on Emerging Technologies in Non-Destructive Testing (Brussels, Belgium, 27–29 May 2015) / Eds: D. G Aggelis [et al.]. London : Taylor & Francis Group, 2016. 578 p.
2. Glorieux C. Perspective on non-invasive and non-destructive photoacoustic and photothermal applications // *J. Appl. Phys.*, 2022, vol. 131, is. 17. doi: 10.1063/5.0091261
3. Sokolovskaya Yu. G., Podymova N. B., Karabutov A. A. Laser optoacoustic method for detecting violations in the periodicity of the structure of carbon fiber reinforced plastic composites // *Acoust. Phys.*, 2022, vol. 68, pp. 408–414. doi: 10.1134/S106377102204011X
4. Ambrozinski L., Mrówka J., O'Donnell M., Pelivanov I. Detection and imaging of local ply angle in carbon fiber reinforced plastics using laser ultrasound and tilt filter processing // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 126. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105581
5. Lafci B., Mercep E., Herraiz J. L., Deán-Ben X. L., Razansky D. Noninvasive multiparametric characterization of mammary tumors with transmission-reflection optoacoustic ultrasound // *Neoplasia*, 2020, vol. 22, is. 12, pp. 770–777. doi: 10.1016/j.neo.2020.10.008
6. Estrada H., Rebling J., Hofmann U., Razansky D. Discerning calvarian microvascular networks by combined optoacoustic ultrasound microscopy // *Photoacoustics*, 2022, vol. 19. doi: 10.1016/j.pacs.2020.100178
7. Zhang Yanjie, Wang Xiaochen, Yang Quan, Xue Renjie, Zhang Jiamin, Sun Youzhao, Xu Dong, Krishnaswamy Sridhar. Research on epoxy resin curing monitoring using laser ultrasonic // *Measurement*, 2020, vol. 158. doi: 10.1016/j.measurement.2020.107737
8. Spytek J., Ziaja-Sujdak A., Dziedzic K., Pieczonka L., Pelivanov I., Ambrozinski L. Evaluation of disbands at various interfaces of adhesively bonded aluminum plates using all-optical excitation and detection of zero-group velocity Lamb waves // *NDT & E Int.*, 2020, vol. 112. doi: 10.1016/j.ndteint.2020.102249
9. Красильников В. А., Крылов В. В. Введение в физическую акустику. М. : Наука, 1984. 400 с.
10. Chakraborty B. C., Ratna Debdatta. *Polymers for vibration damping applications*. Amsterdam : Elsevier, 2020. 338 p.

11. Podymova N. B., Karabutov A. A. Transformation of laser-induced broadband pulses of longitudinal ultrasonic waves into pulses of shear waves in an isotropic solid plate immersed in liquid // *Ultrasonics*, 2021, vol. 116. doi: 10.1016/j.ultras.2021.106517
12. Kozhushko V. V., Paltauf G., Krenn H., Scheriau S., Pippin R. Broadband optoacoustic measurements of ultrasound attenuation in severely plastically deformed nickel // *J. Appl. Phys.*, 2010, vol. 107, is. 9. doi: 10.1063/1.3371685
13. Карабутов А. А., Кожушко В. В., Пеливанов И. М., Подымова Н. Б. Исследование оптико-акустическим методом прохождения широкополосных ультразвуковых импульсов через периодические одномерные структуры // *Акуст. журн.* 2000. Т. 46, № 4. С. 509–514.
14. Fu Y., Kabir I. I., Yeoh G. H., Peng Z. A review on polymer-based materials for underwater sound absorption // *Polymer Testing*, 2021, vol. 96. doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107115

## References

1. *Emerging Technologies in Non-destructive testing VI : Proceedings of the 6th International Conference on Emerging Technologies in Non-Destructive Testing (Brussels, Belgium, 27–29 May 2015)*. Eds: D. G Aggelis [et al.]. London : Taylor & Francis Group, 2016. 578 p.
2. Glorieux C. Perspective on non-invasive and non-destructive photoacoustic and photothermal applications. *J. Appl. Phys.*, 2022, vol. 131, is. 17. doi: 10.1063/5.0091261
3. Sokolovskaya Yu. G., Podymova N. B., Karabutov A. A. Laser optoacoustic method for detecting violations in the periodicity of the structure of carbon fiber reinforced plastic composites. *Acoust. Phys.*, 2022, vol. 68, pp. 408–414. doi: 10.1134/S106377102204011X
4. Ambrozinski L., Mrówka J., O'Donnell M., Pelivanov I. Detection and imaging of local ply angle in carbon fiber reinforced plastics using laser ultrasound and tilt filter processing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 126. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105581
5. Lafci B., Mercep E., Herraiz J. L., Deán-Ben X. L., Razansky D. Noninvasive multiparametric characterization of mammary tumors with transmission-reflection optoacoustic ultrasound. *Neoplasia*, 2020, vol. 22, is. 12, pp. 770–777. doi: 10.1016/j.neo.2020.10.008
6. Estrada H., Rebling J., Hofmann U., Razansky D. Discerning calvarian microvascular networks by combined optoacoustic ultrasound microscopy. *Photoacoustics*, 2022, vol. 19. doi: 10.1016/j.pacs.2020.100178
7. Zhang Yanjie, Wang Xiaochen, Yang Quan, Xue Renjie, Zhang Jiamin, Sun Youzhao, Xu Dong, Krishnaswamy Sridhar. Research on epoxy resin curing monitoring using laser ultrasonic. *Measurement*, 2020, vol. 158. doi: 10.1016/j.measurement.2020.107737
8. Spytek J., Ziąja-Sujdak A., Dziedzic K., Pieczonka L., Pelivanov I., Ambrozinski L. Evaluation of disbonds at various interfaces of adhesively bonded aluminum plates using all-optical excitation and detection of zero-group velocity Lamb waves. *NDT & E Int.*, 2020, vol. 112. doi: 10.1016/j.ndteint.2020.102249
9. Krasil'nikov V. A., Krylov V. V. *Vvedenie v fizicheskuyu akustiku* [Introduction to physical acoustics]. Moscow : Nauka Publ., 1984. 400 p.
10. Chakraborty B. C., Ratna Debdatta. *Polymers for vibration damping applications*. Amsterdam : Elsevier, 2020. 338 p.
11. Podymova N. B., Karabutov A. A. Transformation of laser-induced broadband pulses of longitudinal ultrasonic waves into pulses of shear waves in an isotropic solid plate immersed in liquid. *Ultrasonics*, 2021, vol. 116. doi: 10.1016/j.ultras.2021.106517
12. Kozhushko V. V., Paltauf G., Krenn H., Scheriau S., Pippin R. Broadband optoacoustic measurements of ultrasound attenuation in severely plastically deformed nickel. *J. Appl. Phys.*, 2010, vol. 107, is. 9. doi: 10.1063/1.3371685
13. Karabutov A. A., Kozhushko V. V., Pelivanov I. M., Podymova N. B. Issledovanie optiko-akusticheskim metodom prokhozheniya shirokopolosnykh ul'trazvukovykh impul'sov cherez periodicheskie odnomernye struktury [Photoacoustic Study of the Transmission of Wide-Band Ultrasonic Signals through Periodic One-Dimensional Structures]. *Akusticheskiy zhurnal* [Acoustical Physics], 2000, vol. 46, no. 4, pp. 509–514.
14. Fu Y., Kabir I. I., Yeoh G. H., Peng Z. A review on polymer-based materials for underwater sound absorption. *Polymer Testing*, 2021, vol. 96. doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107115