

Научная статья
УДК 620.179.01
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181897>

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПОСЛЕ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Сергей Владимирович Кузнецов¹, Александр Валерьевич Мамонов²,
Дмитрий Юрьевич Русаков³, Вячеслав Александрович Чернушин⁴

^{1,2,3,4}АО ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина,

Обнинск, Московская область, Россия

¹serkuzzz84@yandex.ru

²a_mamonoff@mail.ru

³rusakovdyu@technologiya.ru

⁴ximik99911@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрено применение оптической измерительной системы в качестве экспресс-метода оценки состояния сотовых конструкций авиационного назначения из полимерных композиционных материалов в процессе их эксплуатации. Изготовлен экспериментальный образец, на который были нанесены подмятия, имитирующие последствия ударных повреждений. Проанализированы результаты измерений изготовленного образца с помощью оптической системы и неразрушающего контроля акустическим импедансным методом.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, полимерные композиционные материалы, сотовые конструкции, визуальный контроль, импедансный метод

Для цитирования: Кузнецов С.В., Мамонов А.В., Русаков Д.Ю., Чернушин В.А. Экспресс-метод оценки состояния сотовых конструкций авиационного назначения после ударного воздействия // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181897>

Original article

EXPRESS METHOD FOR ASSESSING THE CONDITION OF AIRCRAFT HONEY-COMB STRUCTURES AFTER IMPACT

**Sergey V. Kuznetsov¹, Alexander V. Mamonov², Dmitry Yu. Rusakov³,
Vyacheslav A. Chernushin⁴**

^{1,2,3,4}Obninsk Research and Production Enterprise «Technologiya» named after A.G. Romashin,

Obninsk, Kaluga region, Russia

¹serkuzzz84@yandex.ru

²a_mamonoff@mail.ru

³rusakovdyu@technologiya.ru

⁴ximik99911@yandex.ru

Abstract. The conditions of the modern aviation industry market place extremely high demands on the reliability of structures, especially for civil purposes. However, a high level of product quality is not enough to ensure flight safety. During operation, honeycomb structures made of polymer composite materials (PCM), used in particular for sound absorption of noise emitted by an aircraft engine, experience significant loads of various types: vibration, static, dynamic, shock. Of all the listed types of loads, shock ones are the most unpredictable.

The paper discusses the use of an optical measuring system as an express method for assessing the condition of honeycomb structures for aviation purposes made of polymer composite materials during their operation. An experimental sample was made, on which dents were applied, simulating the effects of impact damage.

The study shows the advantages of simultaneous use of various NDT methods. Their combination allows us to fully evaluate the external and internal conditions of a honeycomb structure that has received impact damage during operation. The results of measurements of the manufactured sample using an optical system and non-destructive testing using the acoustic impedance method are analyzed.

Experimental data obtained during the work can be used as methodological recommendations for monitoring aircraft parts during their operation. Based on the results of the work, the possibility of using a visual method for assessing the integrity of a structure using optical measuring systems as an express method for monitoring honeycomb structures made of PCM was confirmed. To more accurately determine the localization of underdent areas, one of the most suitable methods is acoustic impedance, used in conjunction with other NDT methods.

Keywords: non-destructive testing, polymer composite materials, honeycomb structures, visual inspection, impedance method

For citation: Kuznetsov S.V., Mamonov A.V., Rusakov D.Yu., Chernushin V.A. Express method for assessing the condition of aircraft honey-comb structures after impact. Trudy MAI, 2024, no. 137. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181897>

Условия современного рынка авиационной промышленности предъявляют чрезвычайно высокие требования к надежности конструкций, в особенности гражданского назначения [1-2]. Однако высокого уровня качества продукции недостаточно для обеспечения безопасности полетов. В процессе эксплуатации сотовые конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ), применяемые в частности для звукопоглощения шумов, выпускаемых авиационным двигателем, испытывают значительные нагрузки различного характера: вибрационные, статические, динамические, ударные. Из всех перечисленных видов нагрузок именно ударные носят наиболее непредсказуемый характер. В процессе взлета и посадки в турбину могут попадать: лед, камни и птицы, которые способны нанести трехслойным сотовым панелям звукопоглощающего контура непоправимый ущерб и привести к аварийной ситуации.

Перед каждым полётом производится визуальный осмотр панелей звукопоглощающего контура с целью выявления ударных повреждений. Данная операция позволяет выявлять значительные вмятины и сквозные пробития, однако вмятины, имеющие незначительную глубину, данным способом не выявляются. Наличие вмятин малой глубины, особенно при их значительном количестве, приводит к снижению несущей способности панелей звукопоглощающего контура. Также, вмятины малой глубины являются концентраторами напряжений и могут приводить к появлению таких опасных дефектов, как непрочности и расслоение в процессе эксплуатации авиационной конструкции.

Обнаружение вмятин малой глубины не представляет сложности в случае применения методов неразрушающего контроля (НК) [3-4], таких как: ультразвуковой эхо-импульсный, импедансный, свободных колебаний, активной термографии или шерографии. Однако применение методов неразрушающего контроля не представляется возможным без снятия панели звукопоглощающего контура с авиационного двигателя. Таким образом, необходима разработка экспресс-метода оценки состояния сотовых конструкций без осуществления их демонтажа.

Наиболее перспективными для экспресс-оценки состояния сотовых конструкций представляются оптические методы. Их применение позволяет осуществлять контроль конструкции без непосредственного контакта с её поверхностью, а также обеспечивают высокую производительность контроля.

С целью оценки применимости оптических измерительных систем для оценки состояния сотовых конструкций после ударных повреждений был изготовлен контрольный образец. Образец представляет собой трёхслойную панель звукопоглощающего контура с алюминиевым сотовым наполнителем высотой около 15 мм, длиной грани ячейки 5,5 мм и обшивками из стеклопластика толщиной около 0,9 мм (рис. 1).



Рис. 1. Контрольный образец трёхслойной панели из ПКМ.

Выполнение искусственных вмятин (8 шт.) с глубинами от 0,2 до 1,6 мм с шагом в 0,2 мм проводилось на испытательной машине И1147М-50-02-0,5. В силу сложной геометрии образца, имеющего двойную кривизну, существовала опасность его прогиба в процессе нагружения. Для устранения возможности прогиба образца была изготовлена оснастка в точности повторяющая геометрию образца из материала Raku-Tool MB-0670. Данный материал используется для производства мастер-моделей и производственных оснасток, имеет высокие прочностные характеристики и прост в обработке.

Образец с опорной пластиной устанавливался на неподвижную зафиксированную плиту (рис. 2). В качестве нагружающего элемента использовался сферический наконечник (индентор) с радиусом 22 мм, изготовленный из стали 45 и установленный на подвижной траверсе испытательной машины.



Рис. 2. Внешний вид образца, установленного на оснастке в испытательной машине.

Скорость нагружения выбиралась таким образом, чтобы время воздействия в каждой точке было одинаковым и составляло 2 мин (для внедрения на 0,2 мм скорость составляла 0,1 мм/мин и т.д.). В виду нестандартного типа испытаний диаграмма нагрузка-перемещение не записывалась, однако в процессе нагружения была зафиксирована максимальная нагрузка, она составила 287 Н. Схема нагружения представлена на рисунке 3.

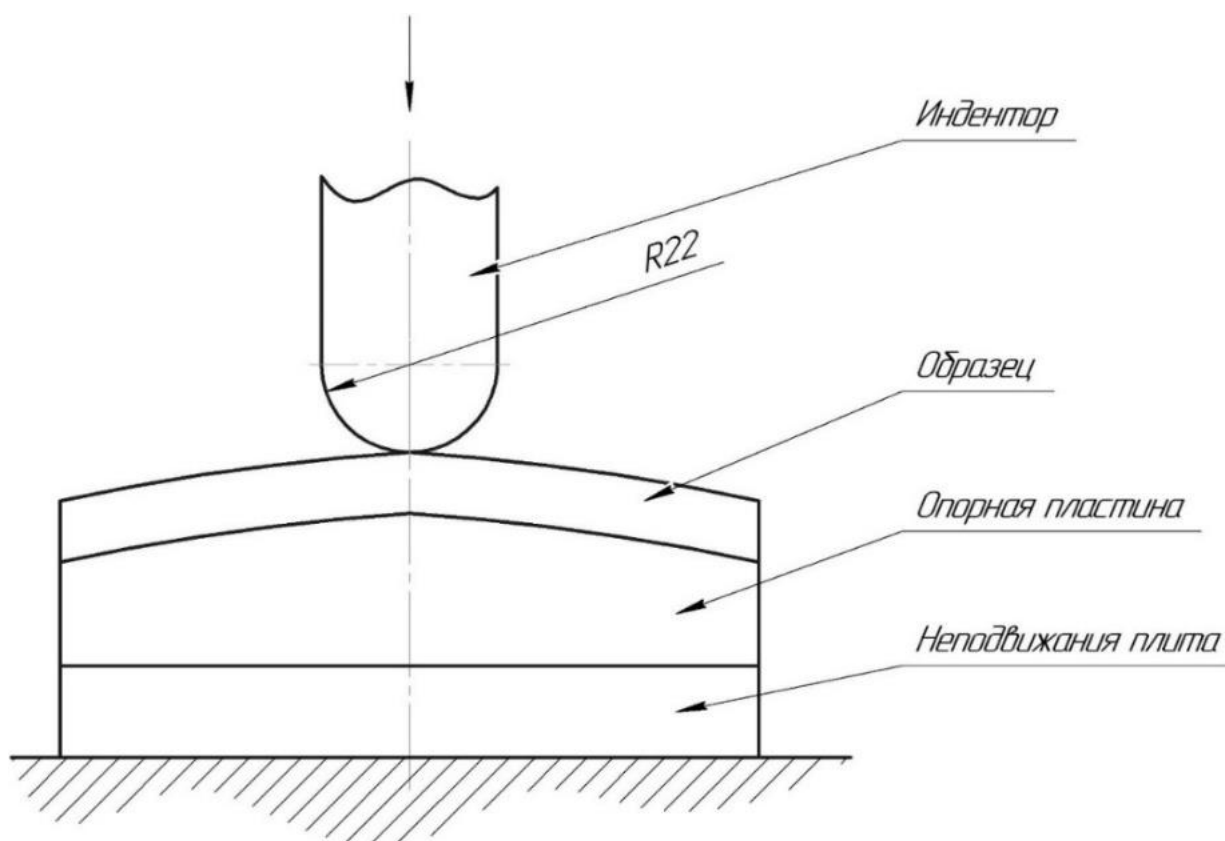


Рис. 3. Схема нагружения образца.

В результате процесса нагружения [5-8] образца были получены 8 (пронумерованы с 1-й по 8-ю) искусственных вмятин, имитирующих последствия ударных повреждений (рис. 4). При проведении визуального осмотра при помощи лупы кратностью $\times 4$ вмятины с глубинами 0,2; 0,4 и 0,6 мм выявлены не были. Вмятина глубиной 0,8 мм выявляется при контрольном освещении, вмятины с большими глубинами выявляются уверенно вне зависимости от освещения.

Контроль поверхности образца при помощи оптической измерительной системы (лазерного трекера Leica AT960-MR) проводился путем измерения величин отклонений от номинального (теоретического) контура поверхности, деформированной вследствие механического воздействия [9-14].



Рис. 4. Внешний вид вмятин (5-я, 6-я) на образце.

По результатам проведенных измерений был создан цифровой двойник образца, представляющий собой пространственную полигональную сетку исследуемой поверхности. Регистрация трёхмерного образа в системе координат эталонной математической модели образца производилась по методу наилучшего совпадения с той частью поверхности, которая не подвергалась деформации. Анализ полученных отклонений трёхмерных образов поверхностей от математических моделей в местах деформаций предполагает нахождение точек предельных отклонений в каждой из областей деформаций, а также определение границ этих областей с учетом точности измерительной системы. На рис. 5 показаны диаграммы отклонений, а также границы зон деформации образца.

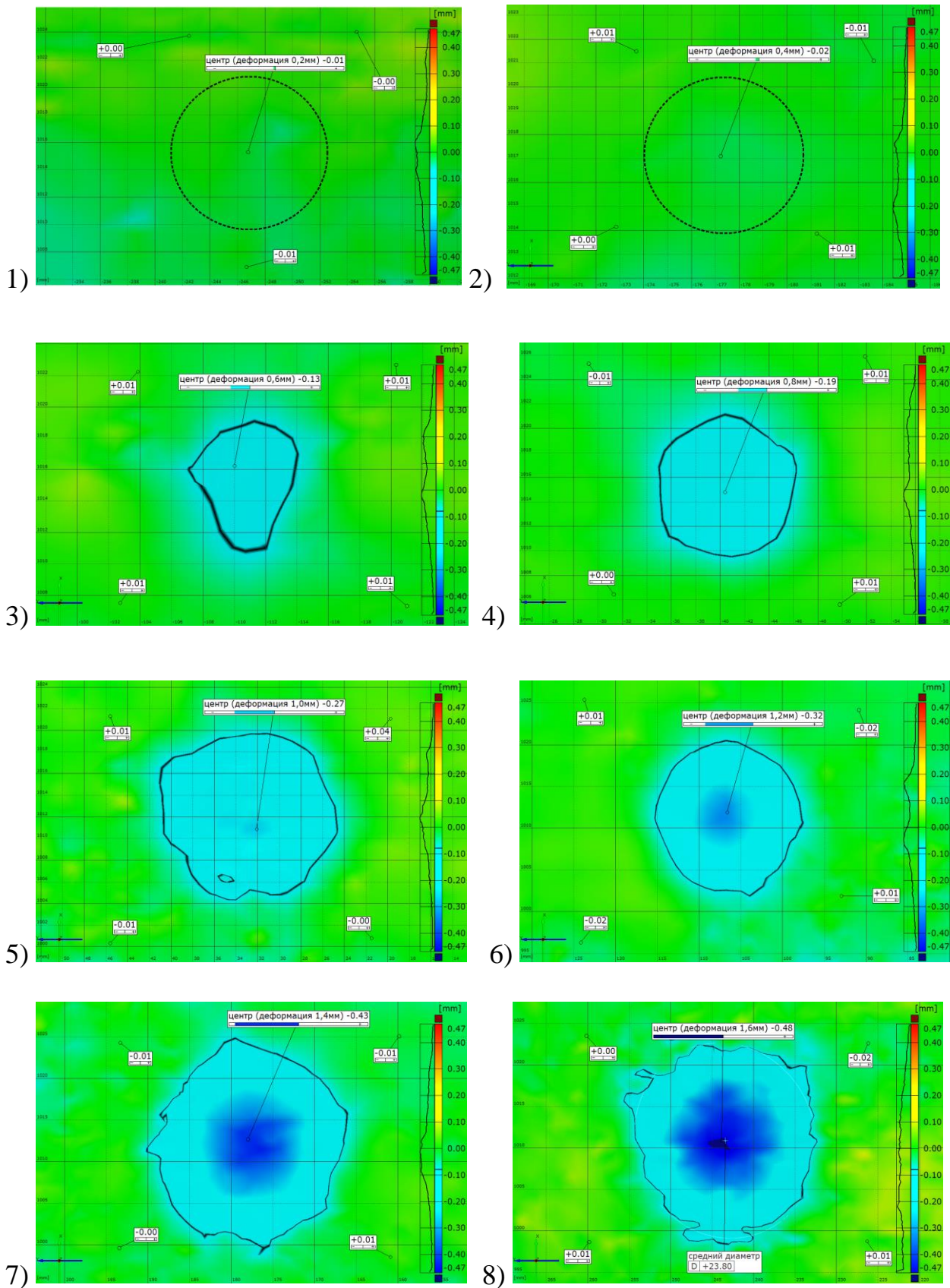


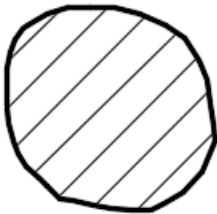

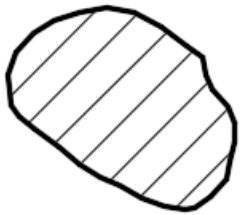
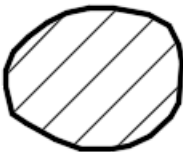
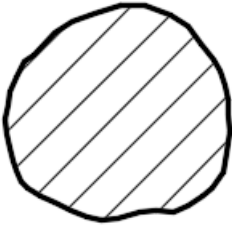
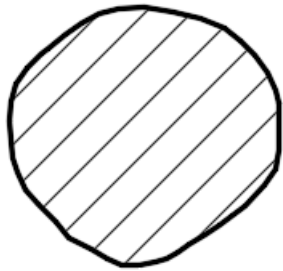


Рис. 5. Диаграмма отклонений деформированных зон поверхности образца от номинального (теоретического) контура.

Основным методом НК сотовых конструкций является акустический импедансный метод [15, 16]. Метод основан на различии механического импеданса дефектных и бездефектных зон объекта контроля и позволяет обнаруживать такие дефекты, как расслоения в обшивке, зоны несплошности в клеевых слоях (непроклеи), зоны снижения локальной жёсткости конструкций – подмятия сотового заполнителя, вызванные как потерей устойчивости стенок заполнителя (внутренние подмятия), так и образованные внешним воздействием на конструкцию – ударом (с образованием видимой вмятины). Поэтому данным методом возможно наиболее точно определить границы зон подмятий, выполненных в образце.

Таблица 1. Контуры зон подмятий, обнаруженные импедансным методом.

№	1	2	3	4
Контур и площадь дефекта, см ²				
	0,62	1,96	3,24	2,79
№	5	6	7	8
Контур и площадь дефекта, см ²				
	2,96	1,88	3,57	4,98

Анализируемый контрольный образец был проконтролирован акустическим импедансным методом дефектоскопом ИД-92НМ совмещённым преобразователем до и после (с одинаковой настройкой) выполнения в образце искусственных подмятий. Площади обнаруженных дефектов приведены в таблице 1. Уверенно выявляются все области с подмятиями, включая имитаторы под номерами 1 и 2, не обнаруживаемые оптическим методом. Неравномерное изменение обнаруженных площадей зон подмятий объясняется неоднородностью сотовой структуры с крупным размером ячейки.

Таким образом, экспериментально подтверждается возможность применения визуального способа оценки целостности конструкции с помощью оптических измерительных систем в качестве экспресс–метода контроля сотовых конструкций из ПКМ. Для более точного определения локализации зон подмятий одним из наиболее подходящих методов является акустический импедансный, применяемый совместно с другими методами НК [17-20].

Список источников

1. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Механика деформирования и разрушения полимерных композитов при наличии множественных расслоений произвольной формы под действием динамических нагрузок // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=166912>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-06](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-06)

2. Толстикова В.Г., Пыхалов А.А. Анализ напряженно-деформированного состояния деталей планера самолета из композиционных материалов на основе сканирования и решения глобально-локальной задачи // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158214>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-05](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-05)
3. Славин А.В., Далин М.А., Диков И.А., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю. Современные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля в авиационной отрасли (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 12 (106). С. 96-106. DOI: [10.18577/2307-6046-2021-0-12-96-106](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-12-96-106)
4. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. № 4. С. 23 - 31.
5. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения. - М.: Стандартинформ, 2008.
6. Межгосударственный стандарт ГОСТ 33496-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом. - М.: Стандартинформ, 2016.
7. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 56816-2015. Композиты полимерные. Определение механических характеристик при сжатии материала внутреннего слоя «сэндвич»-конструкций перпендикулярно к плоскости образца. - М.: Стандартинформ, 2016.
8. Чан К.Т. Идентификация динамических свойств монослоя в металло-полимерном слоистом композите // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178456>

9. Гришанин В.Н., Ойнонен А.А. Современные лазерные измерительные системы в производственном цикле космической техники // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 1 (32). С. 24-35.
10. Демкин В.Н., Привалов В.Е. Лазерные технологии при измерении геометрии поверхности сложной формы. – СПб.: СПбГПУ, 2008. – С. 137-138.
11. Жаренов И.А., Кулеш В.П., Курулюк К.А. Измерение методом видеogramметрии полей деформации панелей в результате ударного повреждения // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=96605>
12. Курулюк К.А. Видеogramметрическая система для бесконтактных измерений полей деформаций крупногабаритных объектов // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=98870>
13. Garibaldi A.V., Kulesh V.P. Contactless measurements with high point density and the construction of three-dimensional numerical models of complexly shaped bodies // Measurement Techniques, 2011, vol.54, no.1, pp. 25-30. DOI: [10.1007/s11018-011-9680-5](https://doi.org/10.1007/s11018-011-9680-5)
14. Игнашкина А.В. Исследование возможности применения бесконтактных средств измерений для обеспечения качества изделий // Транспортное машиностроение. 2014. № 3 (43). С. 35-37.
15. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. - М.: Машиностроение, 1991. - 272 с.
16. Клюев В.В. Неразрушающий контроль: справочник. Т.3. Ультразвуковой контроль. - М.: Машиностроение, 2006, - 864 с.

17. Курятин А.А., Русаков Д.Ю., Чернушин В.А. Идентификация типа дефекта при неразрушающем контроле конструкций из полимерных композиционных материалов // XXII Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике «Трансформация неразрушающего контроля и технической диагностики в эпоху цифровизации. Обеспечение безопасности общества в изменяющемся мире» (Москва, 3–5 марта 2020): сборник трудов. – М.: Спектр, 2020. С. 311–314.
18. Чернушин В.А., Русаков Д.Ю., Курятин А.А. Особенности неразрушающего контроля многослойных композиционных деталей авиационных двигателей // Материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» – 2021. – Пермь: ПНИПУ, 2022. С. 180-186.
19. Русаков Д.Ю., Чернушин В.А., Нахабов А.В. Повышение достоверности результатов неразрушающего контроля сотовых конструкций из ПКМ // VIII международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (Москва, 15–20 апреля 2019): сборник тезисов. – М.: МИФИ, 2019. С. 270-272.
20. Сляднев А.М. Акустический неразрушающий контроль многослойных конструкций из ПКМ при производстве и эксплуатации авиационной техники // Контроль. Диагностика. 2019. № 10. С. 36–49. DOI: [10.14489/td.2019.10.pp.036-049](https://doi.org/10.14489/td.2019.10.pp.036-049)

References

1. Medvedskii A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=166912>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-06](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-06)
2. Tolstikov V.G., Pykhalov A.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158214>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-05](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-05)
3. Slavin A.V., Dalin M.A., Dikov I.A., Boichuk A.S., Chertishchev V.Yu. *Trudy VIAM*, 2021, no. 12 (106), pp. 96-106. DOI: [10.18577/2307-6046-2021-0-12-96-106](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-12-96-106)
4. Murashov V.V., Rummyantsev A.F. *Kontrol'. Diagnostika*, 2007, no. 4, pp. 23 - 31.
5. *GOST R ISO 6507-1-2007. Metally i splavy. Izmerenie tverdosti po Vickersu. Chast' 1. Metod izmereniya* (GOST R ISO 6507-1-2007 Metals and alloys. Measurement of hardness on Vickers. Part 1. Measurement method), Moscow, Standartinform, 2008.
6. *Mezhhgosudarstvennyi standart GOST 33496-2015. Kompozity polimernye. Metod ispytaniya na soprotivlenie povrezhdeniyu pri udare padayushchim gruzom* (Interstate standard GOST 33496-2015. Composites polymeric. A test method on resistance to damage at blow by the falling load), Moscow, Standartinform, 2016.
7. *Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii GOST R 56816-2015. Kompozity polimernye. Opredelenie mekhanicheskikh kharakteristik pri szhatii materiala vnutrennego sloya «sendvich»-konstruktsii perpendikulyarno k ploskosti obraztsa* (National standard of the Russian Federation of GOST R 56816-2015. Composites polymeric. Definition of mechanical characteristics at compression of material of an inside layer "sandwich" - designs perpendicularly to the sample surface. Moscow, Standartinform, 2016.
8. Chan K.T. *Trudy MAI*, 2024, no. 134. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178456>

9. Grishanin V.N., Oinonen A.A. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2012, no. 1 (32), pp. 24-35.
10. Demkin V.N., Privalov V.E. *Lazernye tekhnologii pri izmerenii geometrii poverkhnosti slozhnoi formy* (Laser technologies at measurement of geometry of a surface of irregular shape), Saint Petersburg, SPbGPU, 2008, pp. 137-138.
11. Zharenov I.A., Kulesh V.P., Kurulyuk K.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 101. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=96605>
12. Kurulyuk K.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 102. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=98870>
13. Garibaldi A.V., Kulesh V.P. Contactless measurements with high point density and the construction of three-dimensional numerical models of complexly shaped bodies, *Measurement Techniques*, 2011, vol.54, no.1, pp. 25-30. DOI: [10.1007/s11018-011-9680-5](https://doi.org/10.1007/s11018-011-9680-5)
14. Ignashkina A.V. *Transportnoe mashinostroenie*, 2014, no. 3 (43), pp. 35-37.
15. Lange Yu.V. *Akusticheskie nizkochastotnye metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya mnogosloinykh konstruksii* (Acoustic low frequency methods and means of nondestructive testing of multilayer structures), Moscow, Mashinostroenie, 1991, 272 p.
16. Klyuev V.V. *Nerazrushayushchii kontrol': spravochnik. T.3. Ul'trazvukovoi kontrol'* (Non-destructive testing: handbook. Vol.3. Ultrasonic testing), Moscow, Mashinostroenie, 2006, 864 p.
17. Kuryatin A.A., Rusakov D.Yu., Chernushin V.A. *XXII Vserossiiskaya konferentsiya po nerazrushayushchemu kontrolyu i tekhnicheskoi diagnostike «Transformatsiya nerazrushayushchego kontrolya i tekhnicheskoi diagnostiki v epokhu tsifrovizatsii.*

Obespechenie bezopasnosti obshchestva v izmenyayushchemsya mire»: sbornik trudov.
Moscow, Spektr, 2020, pp. 311–314.

18. Chernushin V.A., Rusakov D.Yu., Kuryatin A.A. *Materialy XXII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii» – 2021.* Perm', PNIPU, 2022, pp. 180-186.

19. Rusakov D.Yu., Chernushin V.A., Nakhobov A.V. *VIII mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya shkola-konferentsiya «Sovremennye problemy fiziki i tekhnologii»:* sbornik tezisov. Moscow, MIFI, 2019, pp. 270-272.

20. Slyadnev A.M. *Kontrol'. Diagnostika*, 2019, no. 10, pp. 36–49. DOI:
[10.14489/td.2019.10.pp.036-049](https://doi.org/10.14489/td.2019.10.pp.036-049)

Статья поступила в редакцию 08.04.2024

Одобрена после рецензирования 20.04.2024

Принята к публикации 28.08.2024.

The article was submitted on 08.04.2024; approved after reviewing on 20.04.2024; accepted for publication on 28.08.2024