

## Неразрушающий контроль полимерных композиционных материалов методом вихретоковой дефектоскопии в процессе циклического нагружения

© П.В. Михеев<sup>1</sup>, С.В. Бухаров<sup>2</sup>, А.К. Лебедев<sup>3</sup>, Р. Сундер<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Научно-образовательный центр «Цифровые высокоскоростные транспортные системы», Российская открытая академия транспорта РУТ МИИТ, Москва, 127055, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт, Москва, 125993, Россия

<sup>3</sup>Центр управления проектами МГТУ «СТАНКИН», Москва, 127994, Россия

<sup>4</sup>Компания БИСС, г. Бангалор, Индия

*Высокотемпературные термопластики в настоящее время находят все большее применение в технике. Рассмотрена возможность измерения интегральной дефектности изделия из углепластика на основе полиэфирэфиркетона. При исследовании образца для анализа накопления повреждения использована методика регистрации вихретокового сигнала. Исследовалось несколько деталей тракта воздушно-реактивного двигателя, относящихся к компрессору низкого давления. Причем применение традиционных методов контроля усложняется, если тонкостенная деталь, выполненная методом прессования из листовой заготовки, имеет двойную кривизну. После изготовления изучались свойства материала, качество изготовления, а также оценивался ресурс детали путем циклирования на вибростенде. Показано, что методика вихретоковой дефектоскопии позволяет находить локальные отклонения структуры по отклонению в электропроводности и фиксировать микроразрушения материала при виброиспытаниях и при накоплении повреждений.*

**Ключевые слова:** термопластик, компрессор, ресурс, неразрушающий контроль, метод вихретоковой дефектоскопии, композитные материалы

**Введение.** В настоящее время в промышленности широко применяются материалы на основе углерода и углеродных волокон. Однако их внедрение сдерживается недостаточным исследованием свойств таких материалов. Например, при циклическом нагружении в деталях из композитов могут накапливаться микроразрушения [1], а в изделиях небольшой толщины осложняется проведение исследований сдвиговых свойств [2].

Прогрессивный метод производства композитных деталей — прессование из высокотемпературных термопластиков, армированных углеродной тканью [3]. Тем не менее, на рынке отсутствуют методы оперативного контроля изделий из композитных многослойных материалов на основе углеродного волокна. Применяемые в настоящее время средства контроля габаритных деталей либо дорогостоящие и не могут быть использованы для диагностики (рентгеновские томографы), либо требуется контакт с поверхностью исследуемого изделия

и, соответственно, оборудование не обладает приемлемой производительностью контроля (ультразвуковые приборы).

Применение полимерных композитных материалов (ПКМ) в гражданской авиационной технике и транспорте позволяет снизить вес корпуса и тем самым повысить экономическую эффективность перевозок. Такие материалы легки и прочны, но ввиду слоистой структуры склонны к расслоению, поэтому в современных неметаллических материалах существует проблема обнаружения (углепластиках) производственных дефектов и повреждений, возникающих в процессе эксплуатации. Решение этой проблемы особенно важно для использования композитов в гражданской авиации, транспортной и энергетической отраслях. Традиционные методы — ультразвуковой метод, рентгеновские методы (включая томографию) и современные методы, например, шерография (метод сравнения оптического образа поверхности до и после воздействия) или метод возбуждения акустического сигнала импульсным лазером — лазерная оптико-акустическая система (ЛОАС) имеют ограничения.

В случае применения методов ультразвукового контроля (УЗК) в ряде случаев требуется двусторонний доступ к исследуемой детали, что сложно обеспечить. Кроме того, при проведении УЗК всегда необходима контактная жидкость, а сигнал быстро затухает в слоистой среде полимерного композита. Для слоистых композитов затруднено использование такого совершенного УЗК-метода, как фазированные решетки ввиду очень сложной картины рассеяния отраженного сигнала. Контроль УЗК-методами проводится сравнительно медленно, что осложняет регулярное обследование объектов транспорта в процессе их коммерческой эксплуатации. К преимуществам УЗК можно отнести то, что такой контроль отработан, недорог, позволяет определить глубину дефекта.

Рентгеновские методы, в случае обычного рентгена, работающие на просвет объекта, могут применяться при условии, что доступ к объекту исследования существует с двух сторон. Размер объекта при проведении рентгеновской томографии ограничен. Кроме того, рентгеновское оборудование дорого и опасно в эксплуатации.

Шерография имеет ограничения по исследуемой области, т. е. при обследовании большой конструкции, например, крыла или фюзеляжа самолета, оборудование приходится перемещать много раз. Кроме того, по шерографическому изображению трудно определить глубину, а значит, и опасность обнаруженного дефекта.

Метод ЛОАС не нашел пока широкого применения. Обладая высокой разрешающей способностью, он имеет ограничения по толщине исследуемой детали. И хотя существуют модели сканеров на основе этого метода, отсутствует информация о возможности сборки датчиков ЛОАС в массивы. Кроме того, требуется использование

контактной жидкости, что ограничивает применение такого оборудования при регулярном обследовании техники.

Прогрессивные методы встроенного контроля материалов невозможно применять для диагностики вращающихся деталей [4].

Предлагаемый вихретоковый метод опирается на использование свойства слабой электропроводности углеродных материалов и углепластиков. Так, в работе [5] сделано предположение, что изменение величин действительной и мнимой части вихретокового отклика в режиме структуроскопа может фиксировать интегральную повреждаемость структуры материала, а в работах [6, 7] предложено использовать подобную методику и для углепластиков. Фактически речь идет об изменении амплитуды и фазы измеряемого высокочастотного сигнала при взаимодействии с композитом [8, 9].

Прогноз свойств композитных материалов и оценка остаточного ресурса являются важнейшими задачами авиационного материаловедения. Это необходимо учитывать в целях обеспечения безопасности гражданской авиационной техники. Для повышения весовой эффективности двигателя SaM146 изучалась возможность замены его металлических деталей углепластиковыми, изготовленными из листовых полуфабрикатов на основе полиэфирэфиркетона толщиной 1,2 мм. В данном случае проводилось исследование внутренней панели компрессора низкого давления.

Преимущество использования вихретокового дефектоскопа в рассматриваемой задаче заключается в том, что он работает с тонкостенными объектами эффективнее по сравнению с традиционным ультразвуковым методом. Следует также учитывать большую кривизну исследуемой детали компрессора, что препятствует эффективному прилеганию ультразвукового преобразователя. При исследовании УЗК-метод обычно выявляет возникновение макрорасслоений материала, а вихретоковый контроль, фиксирующий аномалии локальной электропроводности [10, 11], по мнению авторов, отражает интегральное изменение проводимости среды, свидетельствующее о дефектах типа нарушения фазовой структуры материала.

Цель работы — рассмотреть возможность измерения накопления дефектов методом вихретоковой дефектоскопии в высокопрочном полимерном композитном материале в процессе циклического нагружения. В качестве объекта исследования выбрана деталь воздушного тракта авиационного двигателя, изготовленная из углепластика, которая в процессе эксплуатации подвергается знакопеременным нагрузкам.

**Эксперимент.** В основе вихретокового метода контроля лежит индукция электрического тока в проводящем материале, возбуждаемая внешним переменным электромагнитным полем. Измеряемый и анализируемый параметр относится к распределению индуцированных

токов, он фиксируется в виде амплитуды и фазы тока в приемной катушке датчика [12]. При переменном возбуждении он представляет собой вектор в комплексной плоскости. В углепластиках армирующая система определяет распространение вихревых токов в поверхности слоя, искажая картину поля в зависимости от схемы расположения волокон. С помощью преобразователей возможно достигнуть требуемой чувствительности, необходимой для диагностирования заданного изменения электропроводности. Поскольку абсолютные значения тока сложно связать с абсолютным значением величины электросопротивления материала в точке контроля, в методике используются условные единицы, во-первых, на основе сравнения с тестовым ступенчатым образцом; во-вторых, на основе сравнения сигнала в точке по мере нарастания числа циклов.

Для проведения экспериментальных работ методом прессования изготовлено пять панелей, одна из которых показана на рис. 1. Материал исследуемой панели — полимерный волокнистый слоистый композитный материал — с армирующей системой в виде ткани полотняного плетения на основе углеродных полиакрилонитрильных волокон и матрицей на основе полиэфирэфиркетона TPCL РЕЕК-4-40-НТА40 Е13 3К. Панель изготовлена по технологии прессования из листовых заготовок термопластичного препрега, число слоев ткани — 6, общая толщина детали — 1,2 мм.



**Рис. 1.** Ступенчатая панель разной толщины для настройки датчика

Панели нагружали в резонанс в направлении, перпендикулярном ее плоскости, на резонансном вибростенде, что, по мнению авторов, эквивалентно нагружению панелей при работе двигателя.

Для анализа сигнала в процессе деградации материала использовался вихретоковый дефектоскоп «ГАЛС ВД-103» производства ООО «Главдиагностика» с датчиками 0,8 мм и 3,0 мм. Программное обеспечение прибора позволяет накапливать значения действительной и мнимой амплитуды сигнала: рабочая частота — 250 кГц,

операционная система — Widows 7 Professional. Для контроля толщины и несплошностей до виброн нагружения использовался ультразвуковой дефектоскоп Velograph II производства ООО «Конструкция» (ГОСТ 23049–84 «Контроль неразрушающий. Дефектоскопы ультразвуковые»). Указанные приборы настраивали с помощью ступенчатой панели из углепластика, изготовленной по той же технологии, что и исследуемые детали компрессора. Датчики настраивали и проверяли на отфрезерованной панели (см. рис. 1), на которой четыре ступеньки обеспечивали настройку датчика, причем минимальная ступенька соответствовала толщине исследуемой панели. Изменение электропроводности в разных точках детали исследовалось до и после циклирования, что отражает повреждаемость в ходе виброиспытаний.

Разработанная методика устанавливает процедуру неразрушающего контроля вихретоковым методом изделий из полимерных композитных материалов с армирующей системой на основе непрерывных углеродных волокон.

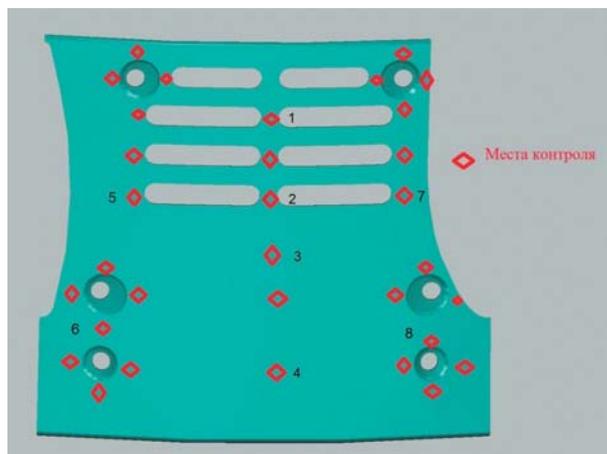
Проведение неразрушающего контроля вихретоковым методом позволяет выявить следующие виды дефектов: расслоение, непроклеи, пористость, посторонние включения.

Для фиксации датчика в отдельных точках детали ортогонально к поверхности были изготовлены кондукторы из полиэфирной смолы Norsodyne O 12335 AL, повторяющие форму панели (рис. 2).



**Рис. 2.** Деталь с кондуктором для датчика

Предварительно были определены зоны максимальных отклонений от плоскости в процессе возбуждения на вибростенде при амплитуде по перемещению до 2 мм, механической частоте 582 Гц. В процессе нагружения детали на вибростенде определялись действительная и мнимая части сигнала вихретокового датчика в точках контроля, указанных на рис. 3. Деталь, размещенная на кондукторе, показана на рис. 2.



**Рис. 3.** Схема контроля детали компрессора:  
1, 2, 3, 4 — расчетные точки максимальных деформаций детали



**Рис. 4.** Проведение контроля детали с помощью кондуктора

Общий контроль толщины детали и контроль производственных дефектов проводили с помощью ультразвукового толщиномера «Веллограф-2». Момент контроля детали вихретоковым дефектоскопом представлен на рис. 4.

**Результаты исследований.** По четырем разным деталям до циклирования усреднялись результаты измерений. Так, значение сигнала до циклирования усреднено по деталям 041, 058, 063, 044, значение сигнала после циклирования определено на детали 051. Усредненная

по деталям 041, 058, 063, 044 действительная составляющая сигнала датчика в восьми выбранных точках показана на рис. 5, а мнимая часть сигнала датчика — на рис. 6. Точки контроля выбраны по расчетам максимальных отклонений поверхности детали при циклировании. Из 32-х точек отображены восемь наиболее характерных. Значения тока приведены в условных единицах.

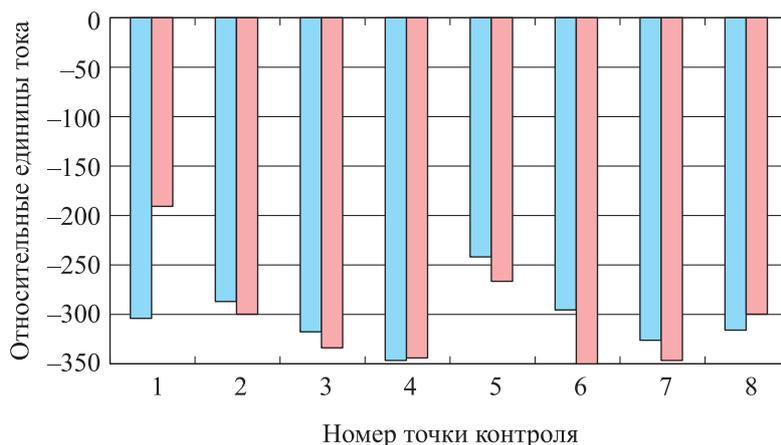


Рис. 5. Значения действительной части сигнала до (■) и после (■) циклирования по восьми точкам детали снаружи

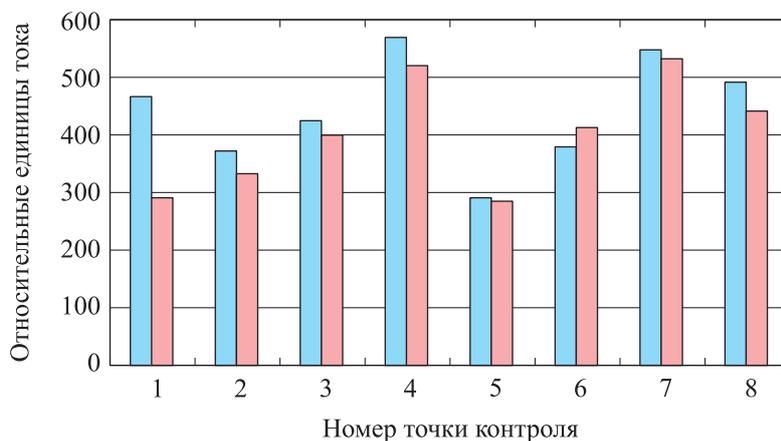
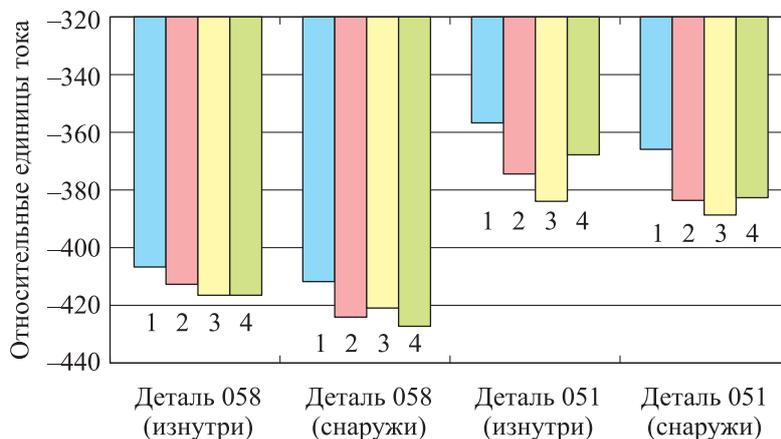


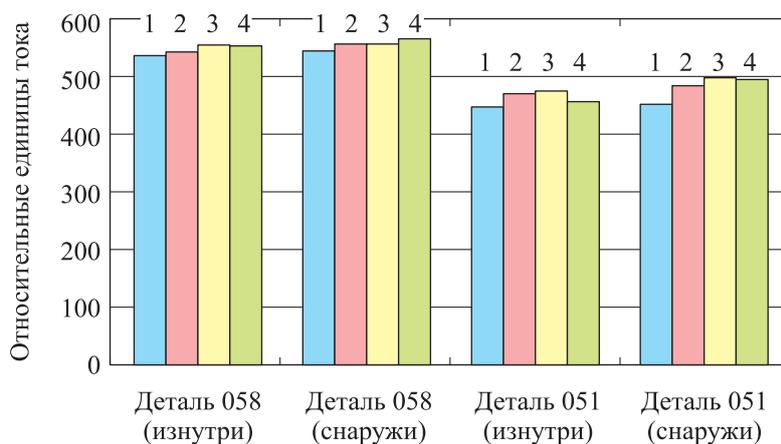
Рис. 6. Значения мнимой части сигнала до (■) и после (■) циклирования по восьми точкам детали снаружи

Поскольку деталь имеет значительную кривизну (412 мм), влияющую на значение сигнала, на двух деталях были измерены значения сигнала снаружи и внутри детали. Значения сигнала в точках 1–4,

выбранных как место наибольшей амплитуды колебаний по предварительному расчету, представлены на рис. 7. Значения действительной составляющей сигнала датчика приведены на рис. 7, а, значения мнимой составляющей — на рис. 7, б.



а



б

**Рис. 7.** Точки деталей 058 (до циклирования) и 051 (после циклирования):

а — действительная составляющая сигнала датчика; б — мнимая составляющая сигнала датчика; 1, 2, 3, 4 — номера точек максимальных деформаций детали

**Заклучение.** На примере исследования авиационной детали из углепластика при циклическом нагружении показано, что методика анализа поля вихревых токов может применяться при изучении поврежденности слабопроводящего материала — углепластика на основе полиэфериэфиркетона. С помощью изложенной методики можно контролировать детали авиадвигателя сложной формы, которым оснащают пассажирские самолеты.

Методика анализа вихретокового сигнала может быть также применена к прогнозу ресурса компрессоров и других деталей, используемых в авиадвигателях, в том числе и деталей из полимерных композитов при циклическом нагружении.

*Некоторые результаты данного исследования получены в рамках работ по договору от 28 февраля 2017 г. № 53160-02030 с дополнительным соглашением от 02 мая 2017 г. № 1 «Разработка модернизированного компрессора низкого давления для двигателя российского регионального самолета».*

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sunder R., Andronik A., Savkin A., Biakov A., Eremin A., Panin S. Combined action of crack closure and residual stress under periodic overloads: a fractographic analysis. *International Journal of Fatigue*, 2016, vol. 82, pp. 667–675. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.09.025
- [2] Михеев П.В., Муранов А.Н., Гусев С.А. Экспериментальное определение модуля межслоевого сдвига слоистого углепластика. *Конструкции из композиционных материалов*, 2015, № 4 (140), с. 46–50.
- [3] Смирнов Г.К., Лапин Р.В., Фатеева М.А., Ходнев А.Д., Гареев А.Р., Резник С.В. Выбор температурного режима термопрессования композиционного материала на основе полифениленсульфида. *Сб. науч. тр. V Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения»*, Москва, 19 ноября 2021 года. Москва, 2021, с. 168–176.
- [4] Нелюб В.А., Буянов И.А., Чуднов И.В., Бородулин А.С., Михеев П.В., Пнев А.Б. Встроенный контроль текущего состояния нагруженных конструкций из полимерных композиционных материалов. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2012, № 8, с. 56–58.
- [5] Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. *Вихретоковый контроль*. Издание 2-е. Москва, Издат. дом «Спектр», 2014, 224 с. (Серия «Диагностика безопасности»).
- [6] Сясько В.А., Чертов Д.Н. Выявление расслоений углепластиковых материалов с использованием тангенциальных вихретоковых преобразователей. *В мире неразрушающего контроля*, 2012, № 2 (56), с. 9–21.
- [7] Kouyama K., Hoshikawa H., Koiima G. Eddy current nondestructive testing for carbon fiber-reinforced composites. *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*, 2013, vol. 135 (4):041501. DOI: 10.1115/1.4023253
- [8] Шкатов П.Н., Дидин Г.А., Мякушев К.В., Михеев П.В. Использование метода вихревых токов для дефектоскопии углепластиков. *Сб. науч. тр. XX Междунар. науч.-техн. конф. «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов»*. Обнинск, 02–04 октября 2013 года. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013, с. 125–126.
- [9] Gabbler S., Heuer H., Heinrich G. Measuring and imaging permittivity of insulators using high-frequency eddy-current devices. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, vol. 64 (8), pp. 2227–2238. DOI: 10.1109/TIM.2015.2390851
- [10] Berger D., Lanza G. Development and application of eddy current sensor arrays for process integrated inspection of carbon fibre preforms. *Sensors*, 2018, vol. 18 (1), pp. 4–10. DOI: 10.3390/s18010004

- [11] Bardl G., Nocke A., Cherif A., Pooch M., Schulze M., Heuer H., Schiller M. Automated detection of yarn orientation in 3D-draped carbon fiber fabrics and preforms from eddy current data. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 96, pp. 312–324. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.04.040
- [12] Михеев П.В., Дидин Г.А., Шкатов П.Н. Использование метода вихревых токов для дефектоскопии конструкционных материалов на основе углеродных волокон. *Сб. науч. тр. X Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат»*. Москва, 09 февраля 2018 г. Москва, 2018, с. 188–194.

Статья поступила в редакцию 04.09.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Михеев П.В., Бухаров С.В., Лебедев А.К., Сундер Р. Неразрушающий контроль полимерных композиционных материалов методом вихретоковой дефектоскопии в процессе циклического нагружения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-11-2314>

**Михеев Петр Викторович** — канд. физ.-мат. наук, инженер-исследователь, Научно-образовательный центр «Цифровые высокоскоростные транспортные системы», Российская открытая академия транспорта РУТ МИИТ. Область деятельности и научных интересов: механика композиционных материалов, неразрушающий контроль. e-mail: [mirv@yandex](mailto:mirv@yandex)  
orcid.org/0000-0001-8146-8753

**Бухаров Сергей Викторович** — д-р техн. наук, профессор, Московский авиационный институт. e-mail: [bukharovsv@mail.ru](mailto:bukharovsv@mail.ru)  
orcid.org/0000-0002-3205-1190

**Лебедев Александр Константинович** — директор Центра управления проектами МГТУ «СТАНКИН». e-mail: [alebedev.job@gmail.com](mailto:alebedev.job@gmail.com)  
orcid.org/0000-0003-0629-4575

**Сундер Раджив** — д-р техн. наук, директор компании БИСС, г. Бангалор, Индия. e-mail: [r.sunder@ya.ru](mailto:r.sunder@ya.ru)  
orcid.org/0000-0002-5339-0132

## **The eddy-current flaw detection non-destructive testing of polymer composite materials in cyclic loading**

© P.V. Mikheev<sup>1</sup>, S.V. Bukharov<sup>2</sup>, A.K. Lebedev<sup>3</sup>, R. Sunder<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Scientific and Educational Center “Digital High-Speed Transport Systems”, Russian Open Academy of Transport RUT (MIIT), Moscow, 127055, Russia

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute, Moscow, 125993, Russia

<sup>3</sup> Project Management Center, Moscow State University of Technology “STANKIN”, Moscow, 127994, Russia

<sup>4</sup> BISS, Bangalore, India

*High-temperature thermoplastics are currently finding the increased technological application. The paper considers possibility of measuring the integral defectiveness of a carbon fiber plastic product based on the polyetheretherketone. To analyze damage accumulation when studying the sample, the technique of registering the eddy current signal was introduced. Several sections of the air-breathing engine duct related to the low-pressure compressor were examined. The thin-walled part made by pressing from a sheet blank had a double curvature, which complicated using the traditional control methods. After manufacture, material properties and quality of the workmanship were studied; besides, the part service life was assessed by cycling on a vibration stand. It is shown that the eddy current flaw detection technique makes it possible to find local deviations in the structure using the electrical conductivity deviation and to register the material micro-destructions during vibration testing and with the damage accumulation.*

**Keywords:** *thermoplastic, compressor, service life, non-destructive testing, eddy current flaw detection method, composite materials*

*Some results of this study were obtained as part of the work under contract No. 53160-02030 dated February 28, 2017 with additional agreement No. 1 dated May 2, 2017 “Development of a modernized low-pressure compressor for a Russian regional aircraft engine.”*

### REFERENCES

- [1] Sunder R., Andronik A., Savkin A., Biakov A., Eremin A., Panin S. Combined action of crack closure and residual stress under periodic overloads: a fractographic analysis. *International Journal of Fatigue*, 2016, vol. 82, pp. 667–675. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.09.025>
- [2] Mikheev P.V., Muranov A.N., Gusev S.A. Eksperimentalnoe opredelenie modulya mezhsloevogo sdviga sloistogo ugleplastika [Experimental definition of the module of interlayered shift of the layered carbon fibre reinforced plastic]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov — Composite materials constructions*, 2015, no. 4 (140), pp. 46–50.
- [3] Smirnov G.K., Lapin R.V., Fateeva M.A., Khodnev A.D., Gareev A.R., Reznik S.V. Vybór temperaturnogo rezhima termopressovaniya kompozitsionnogo materiala na osnove polifenilensulfida [Selection of temperature conditions for thermal pressing of composite material based on the polyphenylene sulfide]. In: *Sb. nauch. trudov V Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii “Polimernye kompozitsionnye materialy i proizvodstvennyye tekhnologii novogo pokoleniya”*, Moskva, 19 noyabrya

- 2021 goda. [Coll. scientific works of the V All-Russian Scientific and Technical Conference. Polymer composite materials and new generation production technologies, Moscow, November 19, 2021]. Moscow, 2021, pp. 168–176.
- [4] Nelyub V.A., Buyanov I.A., Chudnov I.V., Borodulin A.S., Mikheev P.V., Pnev A.B. Vstroennyi kontrol tekushego sostoyaniya nagruzhennykh konstruksiy iz polimernykh materialov [Built-in control of the current state of loaded structures made of the polymer composite materials]. *Vse Materialy. Entsiklopedicheskii Spravochnik — All materials. Encyclopaedic reference manual*, 2012, no. 8, pp. 56–58.
- [5] Fedosenko Yu.K., Shkatov P.N., Efimov A.G. *Vikhrevoy kontrol. Seriya “Diagnostika bezopasnosti”* [Eddy current testing. Series “Security Diagnostics”]. 2nd edition. Moscow, Spektr Publ., 2014, 224 p.
- [6] Syasko V.A., Chertov D.N. Vyyavlenie rassloeniy ugleplastikovykh materialov s ispolzovaniem tangentsialnykh vikhretokovykh preobrazovateley [Identification of stratifications of carbon fiber materials with use tangential eddy current converters]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya — In the world of nondestructive control*, 2012, no. 2 (56), pp. 9–21.
- [7] Koyama K., Hoshikawa H., Koiima G. Eddy current nondestructive testing for carbon fiber-reinforced composites. *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*, 2013, vol. 135 (4), p. 041501. <https://doi.org/10.1115/1.4023253>
- [8] Shkatov P.N., Didin G.A., Myakushev K.V., Mikheev P.V. Ispolzovanie metoda vikhrevykh tokov dlya defektoskopii ugleplastikov [Using the eddy current method for flaw detection in the carbon fiber reinforced plastics]. In: *Sb. nauch. trudov XX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Konstruksii i tekhnologii polucheniya izdeliy iz nemetallicheskih materialov”, Obninsk, 02–04 oktyabrya 2013 goda*. [Col. of scientific works of the XX International Scientific and Technical Conference “Designs and technologies in products manufacture from the non-metallic materials. Obninsk, October 02–04, 2013]. Moscow, BMSTU Publ., 2013, pp. 125–126.
- [9] Gabbler S., Heuer H., Heinrich G. Measuring and imaging permittivity of insulators using high-frequency eddy-current devices. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, vol. 64 (8), pp. 2227–2238. <https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2390851>
- [10] Berger D., Lanza G. Development and application of eddy current sensor arrays for process integrated inspection of carbon fiber preforms. *Sensors*, 2018, vol. 18 (1), pp. 4–10. <https://doi.org/10.3390/s18010004>
- [11] Bardl G., Nocke A., Cherif A., Pooch M., Schulze M., Heuer H., Schiller M. Automated detection of yarn orientation in 3D-draped carbon fiber fabrics and preforms from eddy current data. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 96, pp. 312–324. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.040>
- [12] Mikheev P.V., Didin G.A., Shkatov P.N. Ispolzovanie metoda vikhrevykh tokov dlya defektoskopii konstruksionnykh materialov na osnove uglerodnykh volokon [Using the eddy current method for flaw detection in structural materials based on the carbon fibers]. In: *Sb. nauch. trudov X Vserossiyskoy konferentsii po ispytaniyam i issledovaniyam svoystv materialov “TestMat”. Moskva, 09 fevralya 2018 g.* [Coll. of scientific works of the X All-Russian Conference on Testing and Research of Material Properties “TestMat”. Moscow, February 09, 2018]. Moscow, 2018, pp. 188–194.

**Mikheev P.V.**, Cand. Sc. (Phys.-Mat.), Research Engineer, Scientific and Educational Center “Digital High-Speed Transport Systems”, Russian Open Academy of Transport RUT (MIIT). Scientific interests: composite materials mechanics, nondestructive control.  
e-mail: mipv@yandex.ru  
orcid.org/0000-0001-8146-8753.

**Bukharov S.V.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Moscow Aviation Institute.  
e-mail: bukharovsv@mail.ru  
orcid.org/0000-0002-3205-1190

**Lebedev A.K.**, Director, Project Management Center, MSUT “STANKIN”.  
e-mail: alebedev.job@gmail.com  
orcid.org 0000-0003-0629-4575

**Sunder R.**, Dr. Sc. (Eng.), Director, BISS.  
e-mail: r.sunder@ya.ru  
orcid.org/0000-0002-5339-0132