

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ К ФРЕТТИНГ-ИЗНОСУ ХВОСТОВИКА ЛОПАТКИ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

© 2019

- Т. Д. Каримбаев** профессор, доктор технических наук, начальник отдела «Прочность композиционных материалов»;
Центральный институт авиационного моторостроения
имени П.И. Баранова, г. Москва;
karimbayev@ciam.ru
- Д. В. Афанасьев** начальник сектора 20606 отдела «Прочность композиционных материалов»;
Центральный институт авиационного моторостроения
имени П.И. Баранова, г. Москва;
afanasiev@rtc.ciam.ru
- Д. В. Матюхин** ведущий инженер отдела «Прочность композиционных материалов»;
Центральный институт авиационного моторостроения
имени П.И. Баранова, г. Москва;
matyukhin@rtc.ciam.ru
- М. А. Орлов** заведующий лабораторией межотраслевого инжинирингового центра композиционных материалов;
Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет);
maksim.orlov@emtc.ru

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят всё более широкое применение в авиадвигателестроительной отрасли. Важной задачей при создании отечественного двигателя последнего поколения является разработка технологии изготовления лопатки вентилятора из ПКМ, отвечающей необходимым прочностным требованиям. Одной из проблем, с которой придётся столкнуться при эксплуатации, является износ хвостовика лопатки, возникающий из-за циклических микроперемещений в замковом соединении под действием внешних сил. Существует несколько технических решений для борьбы с износом контактных поверхностей хвостовика лопаток из ПКМ, которые принципиально можно разделить на три группы: изготовление замковой части из металла и использование известных методов борьбы с износом, использование заменяемых специальных вставок между контактными поверхностями хвостовика лопатки и паза диска, применение упругих и демпфирующих элементов. В работе рассмотрен метод борьбы с износом, принципиальная особенность которого заключается в прошивке преформы лопатки арамидной нитью, формирующей на поверхности слой с более высокой износостойкостью. С целью проверки эффективности предложенного конструктивного решения были изготовлены модельные лопатки и проведены испытания на электродинамическом вибростенде.

Газотурбинный двигатель; лопатка вентилятора; полимерный композиционный материал; фреттинг-износ; циклические испытания; технология автоматической нашивки ровинга.

Цитирование: Каримбаев Т.Д., Афанасьев Д.В., Матюхин Д.В., Орлов М.А. Повышение стойкости к фреттинг-износу хвостовика лопатки из полимерного композиционного материала // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 4. С. 64-75. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-64-75

Введение

Проблеме фреттинг-износа деталей уделяется особое внимание с середины XX века. Одна из первых монографий, посвящённых фреттингу, вышла в 1972 году (переведена на русский в 1976 году) под авторством Р.Б. Уотерхауза [1]. В ней был обобщён накопленный материал по проблеме фреттинга, приведён обзор теорий контактного взаимодействия между телами, показаны примеры повреждений и рассмотрены вопро-

сы фреттинг-усталости. Почти одновременно с ней были опубликованы монографии отечественных исследователей Г.Н. Филимонова, Л.Т. Балацкого [2], Н.Л. Голего, А.Я. Алябьева, В.В. Шевели [3].

Большой вклад в исследования фреттинга деталей авиационных конструкций внёс А.Н. Петухов [4 – 6]. Им были обобщены и отработаны различные методики испытаний деталей газотурбинных двигателей (ГТД) на фреттинг, приведены экспериментальные данные по большому числу металлов и сплавов. Меры по борьбе с фреттингом металлов рассмотрены во многих работах, например [7 – 9].

С растущим объёмом внедрения деталей, изготавливаемых из ПКМ, возникает потребность в изучении механизмов фреттинга и методов борьбы с ним в конструкциях из новых материалов. Так при разработке опытной конструкции рабочей лопатки вентилятора двухконтурного двигателя в ЦИАМ в ходе циклических испытаний столкнулись с проблемой износа рабочей поверхности замка (рис. 1).



Рис. 1. Износ замковой части рабочей лопатки вентилятора из ПКМ

К сожалению, в доступной литературе не так много работ, посвящённых изучению фреттинг-коррозии композиционных материалов. Но благодаря использованию лопаток вентилятора из ПКМ в двигателях зарубежных фирм General Electric, Snecma, Rolls-Royce и др. разработано и запатентовано несколько вариантов конструкций, помогающих бороться с фреттинг-коррозией. Их можно разделить на три основных подгруппы:

1. Изготовление хвостовика лопатки из металла и применение отработанных для металлических сплавов методов борьбы с фреттингом [10 – 13].
2. Использование специальных вкладок между хвостовиком лопатки и пазом диска [14 – 17].
3. Доработка поверхности хвостовика лопатки с целью изменения упругих и демпфирующих характеристик [18;19].

Однако ни один из предложенных методов не предполагает использование технологии повышения прочности самого изделия из композиционного материала.

В работе предлагается способ увеличения износостойкости самой лопатки из ПКМ за счёт особенностей применяемых материалов и технологии изготовления.

Технология изготовления лопатки

В настоящее время всё большую популярность набирает способ изготовления преформ изделий из ПКМ с помощью технологии автоматической нашивки ровинга [20;21]. Используя алгоритмы числового программного управления, специальные станки позволяют укладывать армирующее волокно в виде ровинга в любом направлении с заданной плотностью и скреплять их между собой нитью (рис. 2, 3). В частности, такие станки используются для изготовления изделий из ПКМ в ЦИАМ и МГТУ им. Н.Э. Баумана.

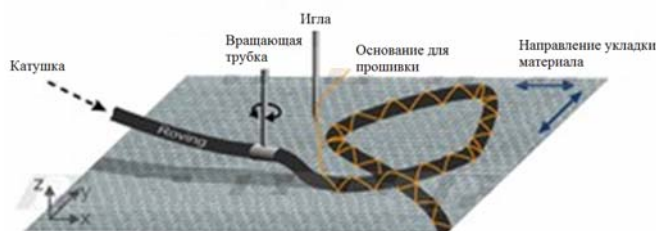


Рис. 2. Принципиальная схема технологии автоматической нашивки ровинга



Рис. 3. Специальный станок для укладки ровинга

В рассматриваемой технологии выбор ровинга, прошивочной нити и параметров нашивки оказывает существенное влияние на свойства изготавливаемой детали. Ключевым техническим решением в работе стало применение в качестве прошивочной нити арамидного волокна, отличающегося повышенной износостойкостью.

Одним из главных недостатков технологии является неравномерность распределения прошивочной нити в объёме. Это вызвано тем, что при нашивке второго и последующих слоёв, расположенные ниже, тоже прошиваются и на внешней поверхности первого слоя плотность стежков увеличивается в несколько раз (пропорционально количеству слоёв) (рис. 4, 5).



Рис. 4. Поверхность верхнего слоя

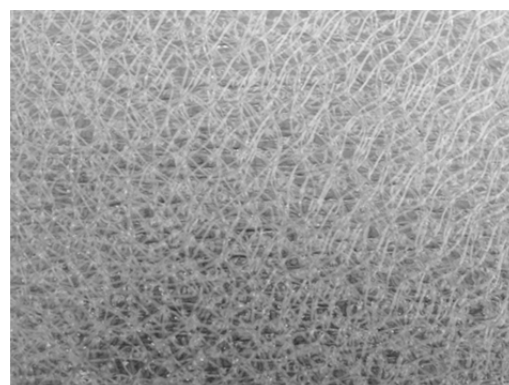


Рис. 5. Поверхность первого слоя

Используя арамидную нить для прошивки и ориентируя преформу таким образом, чтобы поверхность с избыточным количеством стежков образовала наружную поверхность будущей детали, можно получить более стойкую к износу поверхность готового изделия.

Для апробирования рассматриваемого технического решения была изготовлена преформа для модельной лопатки. Технология изготовления методом RTM таких лопа-

ток отработана ранее [22]. Были рассчитаны развёртки слоёв и подобраны режимы пропитки.

Для применения метода автоматической выкладки на первом этапе работы была скорректирована толщина монослоя. Для лопатки из обычной углеродной ткани она составляла 0,22 мм. Для нашивки ровинга толщину монослоя пришлось увеличить до 0,63 мм. Схема армирования $[0^\circ; +45^\circ; 0^\circ; -45^\circ]_n$. В первом приближении геометрия слоёв не менялась, контуры каждого третьего слоя предыдущего проекта были сохранены. Каждые шесть слоёв были объединены в один пакет. Для формирования более толстой области замка лопатки в районе её хвостовика в каждый пакет добавлялись дополнительные три слоя волокон с направлением $[90^\circ]$. Целиком преформа лопатки собиралась из шести пакетов (54 слоёв), которые сшивались вместе на швейной машинке крупным шагом. Готовое изделие получалось путём пропитки полимерным связующим сухой преформы методом RTM (рис. 6).

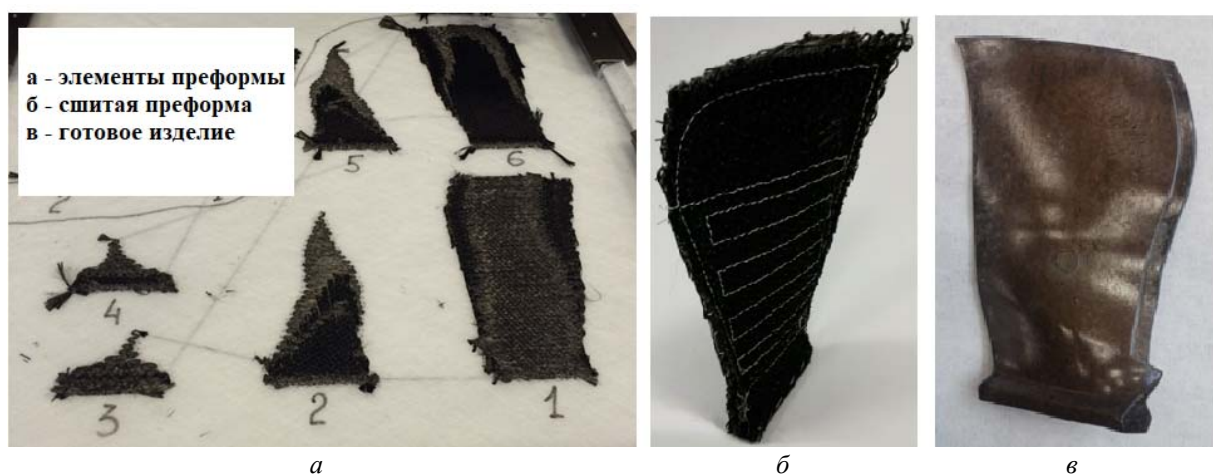


Рис. 6. Этапы процесса изготовления модельной лопатки:
а – подготовка преформы; б – преформа; в – готовая лопатка

Оценка работы конструкции при циклических испытаниях

С целью подтверждения эффективности предложенного решения были проведены сравнительные испытания лопатки, изготовленной по технологии, изложенной выше, и лопатки с послойным армированием. Эксперимент был построен так, чтобы смоделировать опасные возможные эксплуатационные условия работы лопатки в двигателе, вызывающие фреттинг-износ, а именно резонансные колебания по первой изгибной форме. Для определения состояния лопатки в ходе эксперимента был использован тепловой метод контроля.

Износ изделия оценивался по изменению параметров эксперимента, основываясь на фундаментальных законах термодинамики в механике деформируемого твёрдого тела. Это позволяет анализировать процесс фреттинга, не разбирая всей конструкции. Такая методика может быть адаптирована впоследствии и к натурным испытаниям.

Постановка эксперимента

Принципиально схема испытания выглядит следующим образом (рис. 7). Объект исследования 1 устанавливается в специальное приспособление 2, имитирующее эксплуатационные условия закрепления, и крепится на подвижном столе электродинамического вибростенда 3. Контроль за температурой осуществляется тепловизором 4.

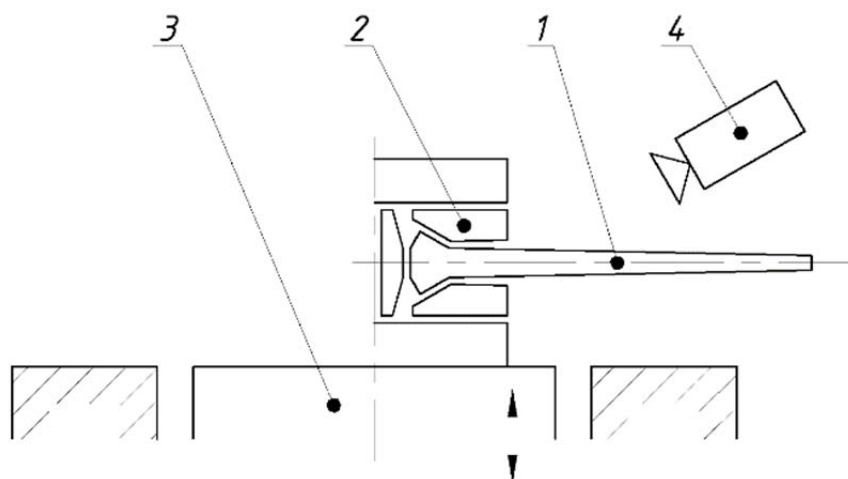


Рис. 7. Схема проведения испытания

Подвижный стол вибростенда, перемещаясь вверх-вниз, кинематически возбуждает колебания объекта исследования. Оператор стенда задаёт частоту и амплитуду перемещений, которые вызывают колебания исследуемой детали по первой изгибной форме колебаний с заданной амплитудой. Испытание на первой изгибной форме колебаний позволяет достигать заданных перемещений (деформаций) детали при минимальной затрачиваемой энергии. В ходе эксперимента резонансная частота поддерживается постоянной путём корректировки частоты перемещений подвижного стола.

Тепловизор позволяет измерять температуру объекта в режиме реального времени. В ходе эксперимента в детали происходят термодинамические процессы, которые можно описать уравнением:

$$\rho C_V \dot{T} = r_0 - \left(\beta : \mathbf{D} : \dot{\mathbf{E}}^e \right) + \mathbf{S} : \dot{\mathbf{E}}^p + K \nabla^2 T.$$

Вывод уравнения приведён в работах [23; 24], а основные вопросы термодинамики твёрдого тела рассмотрены в работе [25].

Здесь слагаемое r_0 определяет внешние термические воздействия на твёрдое тело.

Слагаемое $\beta : \mathbf{D} : \dot{\mathbf{E}}^e$ демонстрирует изменение температуры, вызванное обратимым преобразованием механической и тепловой энергий при деформациях в упругой зоне:

β – коэффициент термического расширения; \mathbf{D} – тензор упругости материала четвёртого порядка; $\dot{\mathbf{E}}^e$ – тензор скорости изменения упругих деформаций. Слагаемое $\mathbf{S} : \dot{\mathbf{E}}^p$ показывает нагрев, возникающий при рассеивании внутренней энергии при пластических деформациях: \mathbf{S} – тензор напряжений; $\dot{\mathbf{E}}^p$ – тензор скорости изменения пластических деформаций. $K \cdot \nabla^2 T$ характеризует повышение температуры путём распространения тепла в теле от источника, расположенного на поверхности: K – коэффициент теплопроводности материала; T – температура. C_V – удельная теплоёмкость при постоянной деформации; ρ – плотность материала.

В рассматриваемом эксперименте внешние тепловые воздействия на объект отсутствуют, а нагрев из-за упругих деформаций, как показано в работе [26], равняется

нулю. Основное влияние на тепловое состояние объекта оказывает выделение внутренней энергии при деформациях за упругой зоной, которые вызывают растрескивание матрицы, и нагрев поверхности замковой части от действия сил трения при циклических колебаниях.

Предполагается, что растрескивание матрицы и другие повреждения, возникающие в ходе эксперимента, приводят к снижению модуля упругости и, как следствие, к падению резонансной частоты. Наличие микропроскальзывания в месте закрепления и возникновение износа поверхностей приводит к значительному повышению температуры и росту демпфирования, что выражается в необходимости повышения для поддержания заданной амплитуды колебаний возбуждающего усилия.

Результаты эксперимента

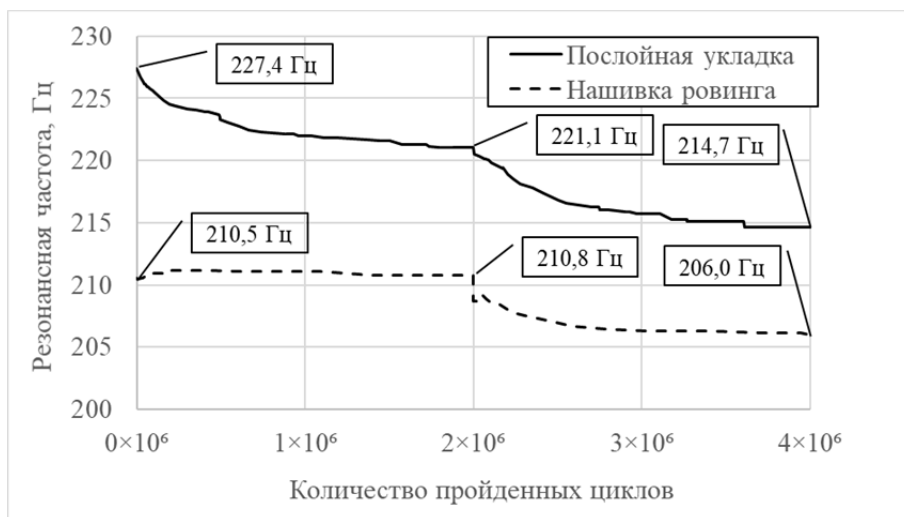
Проведены циклические испытания двух вариантов модельных лопаток. Одна лопатка была изготовлена путём формирования преформы по разработанной технологии нашивки ровинга с углеволокном в качестве армирующего элемента и арамидной нити для нашивки. Другая лопатка была выполнена известным послойным выкладыванием углеродной ткани [22]. Обе лопатки прошли одинаковый технологический процесс пропитки и имели одинаковые геометрические размеры.

Каждая лопатка испытывалась отдельно при двух одинаковых режимах. В ходе каждого испытания частота колебаний соответствовала резонансу лопатки по первой изгибной форме, который определялся по сдвигу фаз между задающим сигналом и сигналом отклика. В начальный момент времени ускорения были равны 15g – на первом режиме и 20g – на втором, а в дальнейшем корректировались из условия поддержания постоянного значения амплитуды колебаний на свободном конце лопатки. При указанных ускорениях в начальный момент амплитуда колебаний соответствовала 4,7 мм и 5,3 мм – для лопатки со слоистой структурой армирования и 4,7 мм и 6,0 мм – для лопатки, изготовленной методом нашивки ровинга.

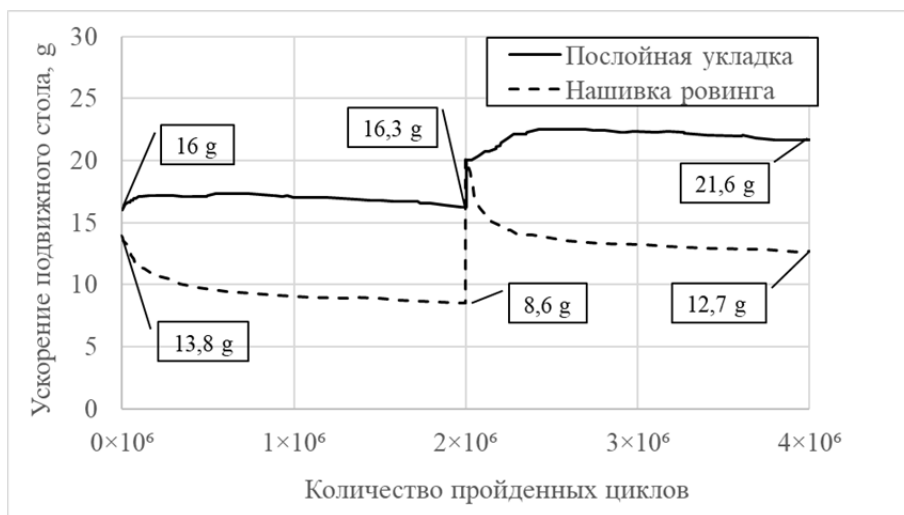
В ходе эксперимента контролировались три параметра: резонансная частота, ускорение подвижного стола и температура на поверхности изделия.

На рис. 8 показано изменение контрольных параметров в ходе эксперимента. Из приведённых данных видно, что резонансные частоты лопаток отличались. Так в начале эксперимента первая изгибная собственная частота у лопатки со слоистой укладкой (первая лопатка) была равна 227,4 Гц, а у лопатки, изготовленной методом нашивки ровинга (вторая лопатка) – 210,5 Гц. На первом уровне нагружения падение собственной частоты первой лопатки составило 6,3 Гц или 2,8%, второй – 0 Гц. На втором уровне – 12,7 Гц и 5,6%, 4,5 Гц и 2,1% соответственно.

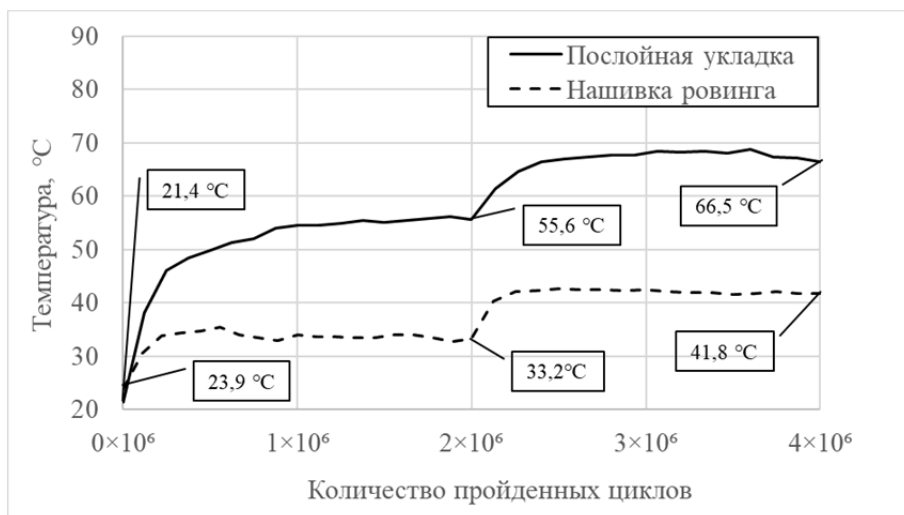
Характер изменения ускорения у рассматриваемых лопаток отличался принципиально. У первой лопатки падение частоты сопровождалось повышением требуемого для поддержания заданной амплитуды колебаний ускорения. При испытаниях второй лопатки ускорение снижалось. Таким образом, анализируя поведение лопатки, изготовленной методом нашивки ровинга, можно сделать вывод о несущественном изменении демпфирования. Такие результаты подтверждаются и измерениями температуры на поверхности изделия с помощью тепловизора. Так, на графике (рис. 8, в) наблюдаются существенный разогрев первой лопатки и относительная стабильность температуры второй лопатки.



а



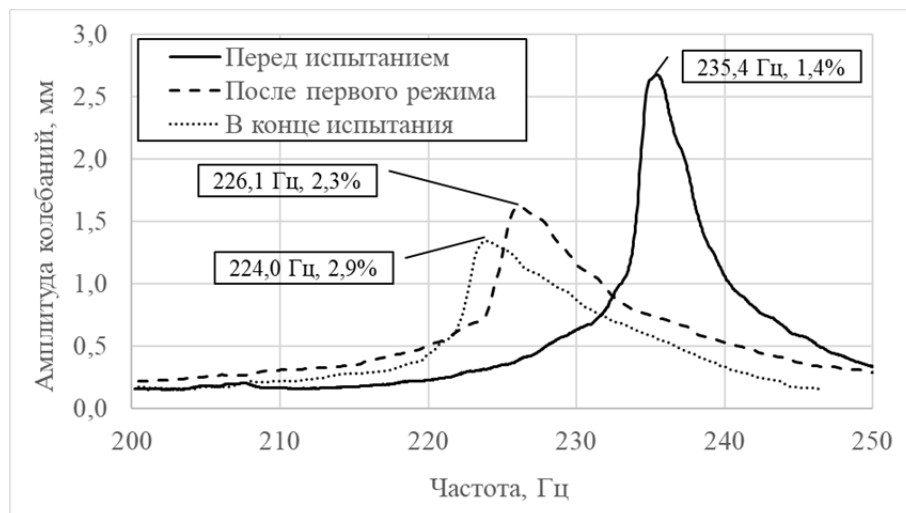
б



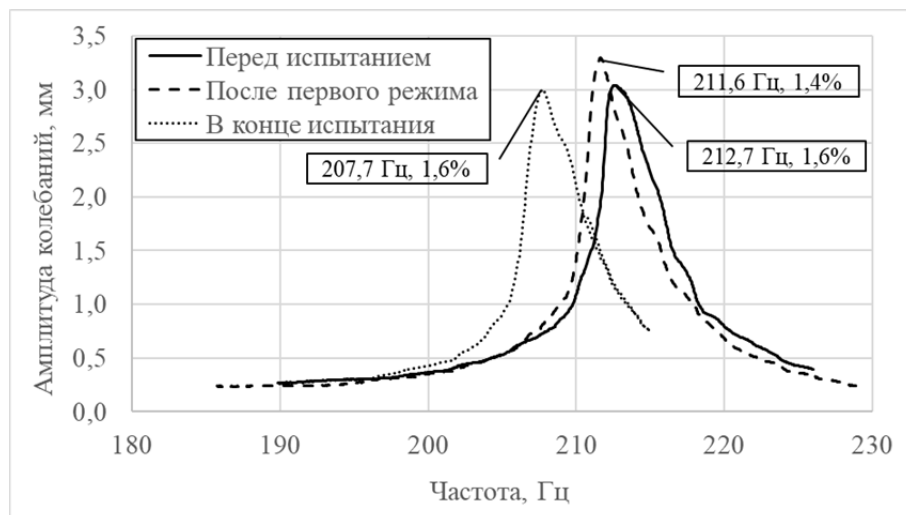
в

Рис. 8. Изменение контрольных параметров в ходе циклических испытаний лопатки со слоистой структурой армирования и лопатки, изготовленной с применением технологии нашивки ровинга: а – изменение резонансной частоты; б – изменение ускорения подвижного стола; в – изменение температуры

Амплитудно-частотные спектры лопаток (рис. 9), полученные перед испытаниями, в ходе и после их проведения, также показали различный характер затухания колебаний на лопатках, изготовленных по различным технологиям. Так, демпфирование лопатки с послойной укладкой выросло в два раза (с 1,4 до 2,9%), а демпфирование лопатки, полученной нашивкой ровинга, сохранилось на уровне 1,6%.



а



б

Рис. 9. Амплитудно-частотные спектры лопаток на различных этапах испытания со слоистой структурой (а) и полученной нашивкой ровинга (б)

По окончании испытаний была проведена попытка осуществить люминесцентный контроль лопаток, заключающийся в нанесении на поверхность специального раствора, светящегося под действием ультрафиолетового света. В местах поверхностных дефектов ожидалось более интенсивное свечение в ультрафиолетовом свете, но из-за особенностей структуры материалов лопаток эксперимент не удался – раствор впитался как на дефектных, так и на бездефектных образцах. При этом при визуальном осмотре наибольший износ имела лопатка со слоистой структурой армирования. Стоит отметить, что следы незначительного износа у лопатки, изготовленной нашивкой ровинга, тоже присутствовали, но ограничивались местами с незначительным избытком связующего на поверхности.

Заключение

По полученным результатам можно сделать следующие выводы.

В начальный момент на обеих лопатках наблюдается изменение контрольных параметров, которое, скорее всего, вызвано «приработкой» лопаток при прикладываемых нагрузках.

Падение резонансной частоты сопровождается ростом температуры на поверхности изделия, что можно объяснить освобождением внутренней энергии и переходом её в тепло при образовании микродефектов.

Рост потребного ускорения подвижного стола вибростенда на лопатке со слоистой структурой армирования связан с ростом демпфирования, в первую очередь в месте закрепления.

В лопатке, изготовленной методом нашивки ровинга, практически отсутствует рост демпфирования и происходит незначительный рост температуры в ходе эксперимента, что подтверждено визуальным осмотром мест закреплений.

Таким образом, можно говорить о том, что применение метода нашивки ровинга с использованием арамидной нити в качестве прошивочной можно рассматривать как способ защиты поверхности изделия от износа.

Библиографический список

1. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия. Л.: Машиностроение, 1976. 272 с.
2. Филимонов Г.Н., Балацкий Л.Т. Фреттинг в соединениях судовых деталей. Л.: Судостроение, 1973. 296 с.
3. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. Киев: Техника, 1974. 272 с.
4. Петухов А.Н. Метод оценки предела выносливости деталей при фреттинг-коррозии // В сб.: «Проблемы прочности и динамики в двигателестроении». Вып. 3. М.: ЦИАМ, 1985. С. 225-238.
5. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993. 232 с.
6. Петухов А.Н. Фреттинг-коррозия и фреттинг-усталость в малоподвижных соединениях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. 2006. № 2 (10), ч. 1. С. 115-120.
7. Горюнов В.Н., Гринберг П.Б., Тарасов Е.Е., Полещенко К.Н. Влияние поверхностной модификации на фреттингостойкость материалов энергоустановок и газотурбинных двигателей // Вестник Омского университета. 2012. № 2 (64). С. 241-244.
8. Соловьев А.А. Повышение стойкости к износу лопаток ГТД методом лазерной обработки // Вестник СиБАДИ. 2010. № 4 (18). С. 14-17.
9. Смыслов А.М., Селиванов К.С. Разработка и исследование технологических методов повышения фреттинг-стойкости рабочих лопаток из титановых сплавов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2007. Т. 9, № 1 (19). С. 77-83.
10. Kray N.J., Finn S.R., Baehmann P.L., Shim D.-J., Gemeinhardt G.C. Attachment of composite article. Patent no. US9777579B2. (Publ. 2017.10.03)
11. Kray J.N., Gemeinhardt G.C., Jadhav P.K. Klei D.E., Nandula Ph., Subramanian S. Composite compressor blade and method of assembling. Patent no. US20160130955A1. (Publ. 2016.05.12)
12. Blanchard S.P.G., Illand H., Renon G. J.-C. R., Roussille C. Composite material turbomachine blade with a reinforced root. Patent no. US20100189562A1. (Publ. 2010.07.29)

13. Liotta G.C., Garcia-Crespo A. Composite turbine bucket assembly. Patent no. US8727730B2. (Publ. 2014.05.20)
14. Kray N.J., Li Q. Composite blade root stress reducing shim. Patent no. US20160333889A1. (Publ. 2016.11.17)
15. Li Q., Kray N.J., Finn S.R. Composite airfoil metal patch. Patent no. US20160341052A1. (Publ. 2016.11.24)
16. Cairo R.R., Parolini J.R., McConnell Delvaux J. Apparatus and method to reduce wear and friction between CMC-to-metal attachment and interface. Patent no. US9500083B2. (Publ. 2016.11.22)
17. Cairo R.R. Apparatus and method for reducing wear in disk lugs. Patent no. US8282356B2. (Publ. 2012.10.09)
18. Care I.C.D., Jevons M.P. Retainer plate. Patent no. US9803648B2. (Publ. 2017.10.31)
19. Radomski S.A. Retention device for a composite blade of a gas turbine engine. Patent no. US9039379B2. (Publ. 2015.05.26)
20. Mattheij P., Gliesche K., Feltin D. Tailored fiber placement-mechanical properties and applications // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 1998. V. 17, Iss. 9. P. 774-786. DOI: 10.1177 / 073168449801700901
21. Грелен Э. Способ изготовления преформы: патент РФ № 2609168; опублик. 30.01.2017; бюл. № 4.
22. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В. Рабочие лопатки вентиляторов из углепластика для перспективных двигателей // Двигатель. 2011. № 6 (78). С. 4-9.
23. Luong M.P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals // Nuclear Engineering and Design. V. 158, Iss. 2-3. P. 363-376. DOI: 10.1016/0029-5493(95)01043-H
24. Kratochvil J., Dillon O.W. Thermodynamics of elastic-plastic materials as a theory with internal state variables // Journal of Applied Physics. 1969. V. 40, Iss. 8. P. 3207-3218. DOI: 10.1063/1.1658167
25. Бережной Д.В., Секаева Л.Р. Вопросы термодинамики в механике деформируемого твёрдого тела. Ч. II. Основы термодинамики необратимых процессов: учебное пособие. Казань: Казанский университет, 2012. 54 с.
26. Karama M. Determination of the fatigue limit of a carbon/epoxy composite using thermographic analysis // Structural Control and Health Monitoring. 2011. V. 18, Iss. 7. P. 781-789. DOI: 10.1002/stc.485

IMPROVEMENT OF FRETTING WEAR RESISTANCE OF BLADE ROOT MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIAL

© 2019

- T. D. Karimbayev** Doctor of Science (Engineering), Head of the Department of Strength of Composite Materials;
Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation;
karimbayev@ciam.ru
- D. V. Afanasiev** Head of Sector 20602, Department of Strength of Composite Materials;
Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation;
afanasiev@rtc.ciam.ru
- D. V. Matyukhin** Lead Engineer, Department of Strength of Composite Materials;
Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation;
matyukhin@rtc.ciam.ru
- M. A. Orlov** Head of Laboratory, Interdisciplinary Engineering Center of Composite Materials,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
maksim.orlov@emtc.ru

Polymer composite materials (PCM) are being increasingly used in aircraft engine industry. Development of PCM fan blade manufacturing technology that meets all the necessary strength requirements is an important task in creating Russian-made latest-generation engines. One of the problems to be faced is the wear of the blade root caused by cyclic micro-displacements in the interlock under the action of external forces. There are several engineering solutions to control surface wear of blade roots made of PCM that can basically be divided into three groups: manufacture of metal roots and the use of known methods of metal fretting prevention, use of replaceable special inserts placed between the contact surfaces of the root and the disk slot, application of elastic and damping elements. In this paper, we consider another method of controlling wear, the principal feature of which is stitching the blade pre-form with aramid thread that forms a layer with higher wear resistance on the root surface. In order to verify the efficiency of the proposed approach, model blades were made and tests were carried out on an electrodynamic shaker.

Gas turbine engine; fan blade; polymer composite material; fretting-wear; cyclic tests; technology of automatic woven roving application.

Citation: Karimbayev T.D., Afanasiev D.V., Matyukhin D.V., Orlov M.A. Improvement of fretting wear resistance of blade root made of polymer composite material. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 4. P. 64-75. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-64-75

References

1. Waterhous R.B. Fretting corrosion. Oxford: Pergamon Press, 1972. 253 p.
2. Filimonov G.N., Balatskiy L.T. *Fretting v soedineniyakh sudovykh detaley* [Fretting in connections of ship components]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1973. 296 p.
3. Golego N.L., Alyab'ev A.Ya., Shevelya V.V. *Fretting-korroziya metallov* [Fretting corrosion of metals]. Kiev: Tekhnika Publ., 1974. 272 p.
4. Petukhov A.N. Metod otsenki predela vynoslivosti detaley pri fretting-korrozii. *V sb.: «Problemy prochnosti i dinamiki v dvigatelestroenii»*. Vyp 3. Moscow: TsIAM Publ., 1985. P. 225-238. (In Russ.)
5. Petukhov A.N. *Soprotivlenie ustalosti detaley GTD* [Fatigue resistance of gas turbine engine components]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1993. 232 p.
6. Petukhov A.N. Fretting-corrosion and fretting-fatigue in low-moving jointst. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2006. No. 2 (10), part 1. P. 115-120. (In Russ.)
7. Goryunov V.N., Grinberg P.B., Tarasov E.E., Poleshchenko K.N. Influence of superficial updating on materials' fretting constancy of power installations and gatzurbine engines. *Herald of Omsk University*. 2012. No. 2 (64). P. 241-244. (In Russ.)
8. Solovyov A.A. Firmness increase to deterioration shovels GTD the method of laser processing. *Vestnik SibADI*. 2010. No. 4 (18). P. 14-17. (In Russ.)
9. Smyslov A.M., Selivanov K.S. Development and research of technological methods for improving fretting wear resistance of blades made of titanium alloys. *Vestnik UGATU*. 2007. V. 9, no. 1 (19). P. 77-83. (In Russ.)
10. Kray N.J., Finn S.R., Baehmann P.L., Shim D.-J., Gemeinhardt G.C. Attachment of composite article. Patent no. US9777579B2. (Publ. 2017.10.03)
11. Kray J.N., Gemeinhardt G.C., Jadhav P.K., Klei D.E., Nandula Ph., Subramanian S. Composite compressor blade and method of assembling. Patent no. US20160130955A1. (Publ. 2016.05.12)
12. Blanchard S.P.G., Illand H., Renon G. J.-C. R., Roussille C. Composite material turbomachine blade with a reinforced root. Patent no. US20100189562A1. (Publ. 2010.07.29)
13. Liotta G.C., Garcia-Crespo A. Composite turbine bucket assembly. Patent no. US8727730B2. (Publ. 2014.05.20)
14. Kray N.J., Li Q. Composite blade root stress reducing shim. Patent no. US20160333889A1. (Publ. 2016.11.17)

15. Li Q., Kray N.J., Finn S.R. Composite airfoil metal patch. Patent no. US20160341052A1. (Publ. 2016.11.24)
16. Cairo R.R., Parolini J.R., McConnell Delvaux J. Apparatus and method to reduce wear and friction between CMC-to-metal attachment and interface. Patent no. US9500083B2. (Publ. 2016.11.22)
17. Cairo R.R. Apparatus and method for reducing wear in disk lugs. Patent no. US8282356B2. (Publ. 2012.10.09)
18. Care I.C.D., Jevons M.P. Retainer plate. Patent no. US9803648B2. (Publ. 2017.10.31)
19. Radomski S.A. Retention device for a composite blade of a gas turbine engine. Patent no. US9039379B2. (Publ. 2015.05.26)
20. Mattheij P., Gliesche K., Felten D. Tailored fiber placement-mechanical properties and applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1998. V. 17, Iss. 9. P. 774-786. DOI: 10.1177 / 073168449801700901
21. Grelin H. *Sposob izgotovleniya preformy* [Method for manufacturing a preform]. Patent RF, no. 2609168, 2017. (Publ. 30.01.2017, bull. no. 4)
22. Karimbaev T.D., Luppov A.A., Afanas'ev D.V. Carbon fiber (CFRP) fan blades for advanced engines. *Dvigatel'*. 2011. No. 6 (78). P. 4-9. (In Russ.)
23. Luong M.P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals. *Nuclear Engineering and Design*. V. 158, Iss. 2-3. P. 363-376. DOI: 10.1016/0029-5493(95)01043-H
24. Kratochvil J., Dillon O.W. Thermodynamics of elastic-plastic materials as a theory with internal state variables. *Journal of Applied Physics*. 1969. V. 40, Iss. 8. P. 3207-3218. DOI: 10.1063/1.1658167
25. Berezhnoy D.V., Sekaeva L.R. *Voprosy termodinamiki v mekhanike deformiruемого tverdogo tela. Ch. II. Osnovy termodinamiki neobratimyykh protsessov: uchebnoe posobie* [Issues of thermodynamics in mechanics of a deformable body. Part II. Fundamentals of thermodynamics of irreversible processes: tutorial]. Kazan: Kazan University Publ., 2012. 54 p.
26. Karama M. Determination of the fatigue limit of a carbon/epoxy composite using thermographic analysis. *Structural Control and Health Monitoring*. 2011. V. 18, Iss. 7. P. 781-789. DOI: 10.1002/stc.485