

Гринев М.А., Аношкин А.Н., Писарев П.В., Шипунов Г.С., Нихамкин М.Ш., Балакирев А.А., Конев И.П., Головкин А.Ю. Расчетно-экспериментальные исследования собственных частот и форм колебаний лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 4. – С. 106–119. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.4.07

Grinev M.A., Anoshkin A.N., Pisarev P.V., Shipunov G.S., Nikhamkin M.Sh., Balakirev A.A., Konev I.P., Golovkin A.Yu. Experimental and numerical studies of dynamic response of composite outlet guide vane for aircraft jet engine. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 4. Pp. 106-119. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.4.07



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2016

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2016.4.07

УДК 629.7.036.34; 678(075)

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТКИ СПРЯМЛЯЮЩЕГО АППАРАТА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.А. Гринев¹, А.Н. Аношкин², П.В. Писарев², Г.С. Шипунов²,
М.Ш. Нихамкин², А.А. Балакирев², И.П. Конев², А.Ю. Головкин²

¹ОАО «Авиадвигатель», Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 09 сентября 2016 г.
Принята: 22 октября 2016 г.
Опубликована: 30 декабря 2016 г.

Ключевые слова:

лопатка спрямляющего аппарата, собственные частоты, формы колебаний, полимерные композиционные материалы, углепластик, модальный анализ, экспериментальные исследования, метод конечных элементов, жесткость, ANSYS.

АННОТАЦИЯ

Объектом исследования является лопатка спрямляющего аппарата (ЛСА) из полимерных композиционных материалов (ПКМ) современного авиационного двигателя. Лопатка из ПКМ обеспечивает снижение веса до 40 % по сравнению с металлическим аналогом. В процессе эксплуатации лопатка подвергается воздействию интенсивных аэродинамических сил. Для отстройки конструкции лопатки от резонансных частот необходимо проведение её модального анализа, результаты которого представлены в настоящей работе.

Экспериментальные исследования проводились методом трехкомпонентной сканирующей лазерной виброметрии с использованием программно-аппаратного комплекса PSV-400-3D. Описана методика экспериментального модального анализа ЛСА из ПКМ в диапазоне частот до 6,4 кГц. Экспериментальные исследования проводились на трех натурных образцах ЛСА, полностью соответствующих техническим требованиям и изготовленных по одному технологическому процессу. Представлены экспериментальные оценки средних значений и коэффициентов вариации собственных частот ЛСА из ПКМ и проиллюстрированы основные собственные формы колебаний.

© Гринев Михаил Анатольевич – начальник конструкторского отдела, e-mail: grinev@avid.ru
Аношкин Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: anoshkin@pstu.ru
Писарев Павел Викторович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: pisarev@pstu.ru
Шипунов Глеб Сергеевич – младший научный сотрудник, e-mail: shipunov-kt@pstu.ru
Нихамкин Михаил Шмерович – доктор технических наук, профессор, e-mail: Nikhamkin@mail.ru
Балакирев Александр Андреевич – младший научный сотрудник, e-mail: 1st.leonao@gmail.com
Конев Иван Петрович – старший преподаватель, e-mail: kaf-ad@cpl.pstu.ac.ru
Головкин Андрей Юрьевич – старший преподаватель, e-mail: ya.golovkin.andrey@yandex.ru

Mikhail A. Grinev – Director, e-mail: grinev@avid.ru
Aleksandr N. Anoshkin – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: anoshkin@pstu.ru
Pavel V. Pisarev – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: pisarev@pstu.ru
Gleb S. Shipunov – Junior Researcher, e-mail: shipunov-kt@pstu.ru
Mikhail Sh. Nikhamkin – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: Nikhamkin@mail.ru
Alexander A. Balakirev – Junior Researcher, e-mail: 1st.leonao@gmail.com
Ivan P. Konev – Senior Lecturer, e-mail: kaf-ad@cpl.pstu.ac.ru
Andrew Yu. Golovkin – Senior Lecturer, e-mail: ya.golovkin.andrey@yandex.ru

Численный расчет частот и форм ЛСА выполнялся с использованием математической модели, описывающей геометрию, схему укладки и анизотропию армирующих слоев. Расчет проводился методом конечных элементов в программном пакете ANSYS Workbench. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Совпадение расчетных и экспериментальных собственных частот и форм колебаний свидетельствует о том, что жесткость натурной ЛСА при наличии возможных отклонений и разбросов параметров технологического процесса, геометрии выкроек слоев и механических свойств материалов соответствует проектируемой. В последующих исследованиях разработанная модель позволяет оценить изменение амплитудно-частотной характеристики ЛСА при вариации её схемы армирования и конструктивных особенностей исполнения, а лабораторный модальный анализ может использоваться для контроля стабильности геометрических размеров и механических свойств материала слоев.

© ПНИПУ

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL RESEARCH OF THE DYNAMIC RESPONSE OF COMPOSITE OUTLET GUIDE VANE FOR AIRCRAFT JET ENGINE

M.A. Grinev¹, A.N. Anoshkin², P.V. Pisarev², G.S. Shipunov²,
M.Sh. Nikhamkin², A.A. Balakirev², I.P. Konev², A.Yu. Golovkin²

¹ОАО «Aviadvigatel», Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 09 September 2016
Accepted: 22 October 2016
Published: 30 December 2016

Keywords:

outlet guide vane (OGV), natural frequencies, mode shapes, polymer composite materials, carbon fiber-reinforced plastic (CFRP), modal analysis, experimental study, finite element method (FEM), stiffness, ANSYS.

ABSTRACT

The object of this research is composite outlet guide vane (OGV) for advanced aircraft engine. The weight reduction due to using of polymer composite materials (PCM) instead of the metal in OGV can reach 40 %. The vane is exposed to intense aerodynamic loads during operation. The modal analysis is needed for the detuning a structure's resonance frequency. The results of such analysis are presented in this work.

Experimental technique of modal analysis for composite OGV in frequency range up to 6,4 kHz is described in paper. Experimental study was carried out for three full-scale OGV samples with the help of three-component scanning laser vibrometer using PSV-400-3D hardware. As the results the mean values and coefficients of variation of natural frequencies were obtained and the main natural modes were shown.

The numerical simulation of this problem was carried out by finite element method (FEM) with ANSYS Workbench software using high-performance computing complex. The technological scheme of laying out of anisotropic plies was taken into account in the developed OGV model. The results of numerical simulations of natural frequencies and modes were compared with the test data. Good correlation was found. This fact confirmed that the stiffness of a full-scale OGV, manufactured with various possible fluctuations of process parameters and mechanical properties of materials, meets the required conditions.

For further researches the developed numerical model allows to study the effect of reinforcing scheme and other design parameters changing on OGV frequency response. Laboratory modal analysis can be used to control the dimensional stability and material mechanical properties.

© PNRPU

Введение

В настоящее время композиционные материалы активно внедряются в конструкцию силовых деталей и узлов современных авиационных двигательных установок [1]. Лопатки вентилятора либо лопатки спрямляющего аппарата перспективных зарубежных двигателей нового поколения: GENx, Rolls-Royce семейства Advance и UltraFan, LEAP и HF120 выполнены из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Разработка аналогичной лопатки спрямляющего аппарата (ЛСА) для российских двигателей является чрезвычайно актуальной. Ранее в работах [2–4] представлены результаты выбора материала и оценки прочности композитной ЛСА. Показано, что лопатка, выполненная из углепластика, обеспечивает сни-

жение веса на до 40 %, имеет необходимую жесткость и обладает более высоким запасом статической прочности по сравнению с металлическим аналогом. В процессе эксплуатации ЛСА подвергается воздействию интенсивных аэродинамических нагрузок, которые могут приводить к колебаниям, усиливающимся при появлении резонанса, и как следствие – к разрушению. В связи с этим при проектировании ЛСА, так же как и при проектировании подобных конструкций, в том числе из композиционных материалов, [5–10] возникает необходимость в проведении модального анализа для определения собственных частот и форм колебаний, что и является целью расчетно-экспериментальных исследований, представленных в настоящей работе. Кроме того, модальный анализ часто используется для верификации математических моделей оценки состояния и мониторинга конструкций [11–16], поскольку повреждения и трещины меняют их спектр собственных частот колебаний.



Рис. 1. Общий вид образца ЛСА из ПКМ в исходном состоянии (а) и с нанесенным покрытием для лазерного модального анализа (б)

Fig. 1. General view of OGV sample in the initial state (a) and with the coating for laser modal analysis (b)

Объектом настоящих исследований является лопатка спрямляющего аппарата (рис. 1), выполненная из углепластика по препреговой технологии с автоклавным формованием (изготовленная на уникальной установке «Исследовательский комплекс для проведения научно-технологических исследований в области создания изделий из полимерных композиционных материалов»). Перо, верхняя полка, нижняя полка создаются за один технологический процесс, что обеспечивает наиболее высокие механические характеристики композиционного материала, реализуемые в конструкции [3, 4].

Для оценки влияния возможных технологических отклонений на амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ЛСА из ПКМ экспериментальные исследования проводились на трех натурных образцах композитной лопатки, полностью соответствующих конструктивным требованиям и изготовленных по одной технологии. Для численного расчета частот и форм ЛСА из ПКМ в настоящей работе была разработана математическая модель, которая позволяет в последующих исследованиях оценить изменение АЧХ ЛСА при вариации её схемы армирования и конструктивных особенностей её исполнения.

1. Методика экспериментального определения собственных частот и форм колебаний ЛСА

Теоретической основой экспериментального модального анализа является возможность описания динамического поведения исследуемой конструкции компактным набором модальных параметров: собственных частот, форм и декрементов (или коэффициентов демпфирования) колебаний [17, 18]. При этом объект исследования представляют как конечное число n независимых колебательных систем с одной степенью свободы.

Динамические свойства колебательной системы с n степенями свободы полностью определяются набором модальных параметров

$$\{\varphi\}_r, \sigma_r, \omega_{0r}, (r = 1, 2 \dots n)$$

где ω_{0r} – собственные частоты недемпфированной системы; $\{\varphi\}_r$ – собственные формы; σ_r – коэффициенты демпфирования.

Экспериментальное определение этих параметров базируется на анализе матрицы передаточных функций, которая вводится соотношением

$$\{X\} = [H] \{F\}, \quad (1)$$

где $\{X\}$ – вектор спектров механических колебаний, соответствующих всем степеням свободы системы; $\{F\}$ – вектор спектров сил возбуждения для тех же самых степеней свободы. Каждый элемент $H_{ij}(\omega)$ матрицы $[H]$ представляет собой результат измерений отдельной частотной характеристики как отношения

$$H_{ij}(\omega) = \frac{X_i(\omega)}{F_j(\omega)}, \quad (2)$$

где $X_i(\omega)$ – частотная функция реакции (в виде перемещения, скорости или ускорения), соответствующая степени свободы i , на воздействие $F_j(\omega)$, соответствующее степени свободы j . При экспериментальных исследованиях, когда измеряются скорости или ускорения, матрица $[H]$ обычно является матрицей подвижностей или ускоряемостей соответственно [18, 19, 20].

Собственные частоты можно определить по любой замеренной частотной характеристике $H_{ij}(\omega)$. Для определения формы колебаний необходимо принять одну из степеней свободы опорной и провести серию измерений для всех степеней свободы. Для определения вектора формы конкретной моды необходимо определить модули замеренных частотных характеристик при соответствующем значении модальной частоты. Они представляют собой соответствующие модам модальные перемещения. Число степеней свободы при экспериментальном анализе конструкции должно быть выбрано с учетом надежного представления форм мод. Именно сложность форм мод в большей степени, чем количество ожидаемых мод, определяет необходимое число степеней свободы [20].

Описанный выше подход к экспериментальному определению динамических характеристик конструкции тем более точен, чем более точно выполняется условие линейности конструкции, т.е. пропорциональности реакции силе возбуждения. Свойство линейности имеет важные для экспериментальной методики следствия [18]:

- измеряемые частотные характеристики не зависят от типа и временного закона сигнала возбуждения; возбуждение синусоидальной силой, изменяющейся во времени по синусоидальному закону, с разверткой частоты теоретически дает те же результаты, что и возбуждение широкополосной случайной силой;

- измеряемые частотные характеристики не зависят от уровня возбуждения;

- измеряемые частотные характеристики не зависят от того, какая точка используется для возбуждения, а какая – для измерения реакции (теорема взаимности Максвелла).

Таким образом, экспериментальный модальный анализ сводится к определению элементов матрицы передаточных функций $H_{ij}(\omega)$ одним из двух методов:

- возбуждение колебаний $F_j(\omega)$ в одной из точек объекта j и регистрации отклика (виброускорения или виброскорости) $X_i(\omega)$ во множестве точек i ;

– возбуждение колебаний $F_j(\omega)$ во множестве точек объекта j и регистрации отклика (виброускорения или виброскорости) $X_i(\omega)$ в одной из точек i .

В методе сканирующей лазерной виброметрии, используемом в настоящей работе, реализуется первый из этих подходов. К одной из точек объекта прикладывается воздействие в виде внешней сосредоточенной силы, изменяющейся во времени по гармоническому закону с переменной частотой или по более сложному закону, содержащему сумму гармоник с плотным спектром частот (удар, белый шум). Реакция в виде виброскорости измеряется во множестве точек при их последовательном сканировании [17, 18]. Далее по соотношению (2) определяются компоненты матрицы передаточных функций $H_{ij}(\omega)$.

2. Описание экспериментального комплекса модального анализа

Установка для экспериментального модального анализа (рис. 2) включает трехкомпонентный сканирующий лазерный виброметр PSV-400-3D, предназначенный для трехмерного анализа колебаний конструкций сложной формы бесконтактным методом. Виброметр представляет собой исследовательский лазерно-цифровой измерительный комплекс, состоящий из трех оптических сканирующих лазерных головок PSV-I-400, модуля сканирования геометрии PSV-A-420, размещенных на штативах либо на стапеле, и системы управления. В систему управления входят три управляющих модуля оптических головок (контроллеры) OFV-5000, блок сопряжения управляющих модулей с промышленным компьютером PSV-E-408.

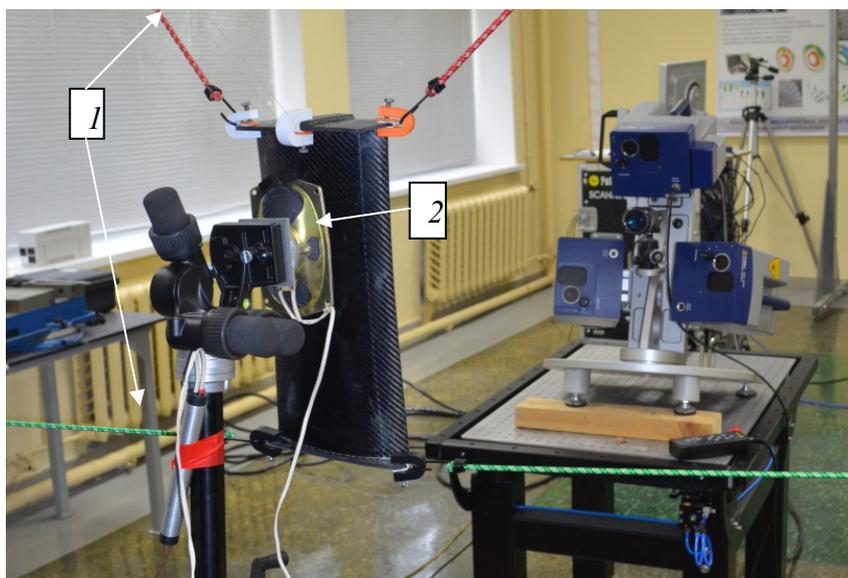


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки: 1 – система крепления исследуемой ЛСА на свободном подвесе; 2 – динамик для возбуждения колебаний

Fig. 2. General view of experimental setup: 1 – OGV fixing with unrestrained suspension; 2 – device for vibrations initiating

Оптические головки PSV-I-400 представляют собой устройства, в которых находятся гелий-неоновые источники лазерных лучей и приемники отраженного сигнала. Работа каждой оптической головки и связь с компьютером обеспечивается управляющим модулем (контроллером) OFV-5000 и блоком сопряжения. В верхней оптической головке дополнительно встроена видеокамера и лазерный модуль сканирования геометрии. Также

для улучшения качества изображения используется портативная цифровая камера со сменными объективами, позволяющая проводить видео триангуляцию для прецизионного сведения лазерных лучей, что повышает качество проводимых экспериментов. Изображение с видеокамеры передается в компьютер и отображается на мониторе.

Проведение модального анализа методом трехкомпонентной сканирующей лазерной виброметрии осуществляется с помощью программного комплекса POLYTECPSV9.0. Он позволяет производить анализ собственных форм колебаний, спектральный анализ, быстрое преобразование.

3. Подготовка и проведение экспериментального модального анализа

Все лабораторные эксперименты для проведения модального анализа ЛСА из ПКМ методом трехкомпонентной сканирующей виброметрии проводились при закреплении лопатки в свободном подвесе с помощью специальных трубочин и эластичных жгутов (рис. 2) и бесконтактном возбуждении вибраций акустическим динамиком, который позволяет исследовать формы колебаний лопаток в диапазоне частот до 6400 Гц. Динамик располагался со стороны спинки лопатки в её центральной зоне, удаленный от лопатки на расстояние около 100 мм (см. рис. 2).

При подготовке лопатки к исследованиям ее поверхность покрывается краской ARDROX 9D1B, обеспечивающей необходимые для лазерной виброметрии оптические свойства поверхности. В проводимых исследованиях в качестве возбуждающего воздействия использован гармонический сигнал с возрастающей частотой (PeriodicChirp) с постоянной амплитудной и возрастающей частотой. Сканирующие лазерные головки размещались на специальном стапеле, на расстоянии 1,5–2 м от исследуемой лопатки. При ориентировании головок выдерживался угол 30° между лазерным лучом и нормалью к поверхности.

Построение сетки сканирования проводилось в автоматическом режиме. При этом учитывалось, что большая густота точек сканирования позволяет более точно определять высокие формы, вместе с тем шаг точек не должен быть менее установленного качества выполнения 3-D-выравнивания. Количество точек сканирования для исследованной лопатки в различных экспериментах составляет до 557. Сканирование поверхности вибрирующей лопатки лазерными лучами осуществлялось автоматически. Количество повторений измерений в каждой точке составляло 3–5.

Обработка результатов лазерной виброметрии проводилась с применением программного обеспечения PolytecPSV9.0. В результате обработки экспериментальных данных получены амплитудно-частотные характеристики каждой из трех компонент виброскорости в любой точке сетки сканирования и осредненные по объекту в целом, а также анимационные представления форм колебаний.

Оценка достоверности результатов и погрешности определения собственных частот выполнялась на основе совместного анализа амплитудно-частотных характеристик и форм колебаний, полученных в различных экспериментах. При этом эксперименты различались частотным диапазоном, разрешением по частоте и параметрами сетки сканирования. Для соответствующих форм колебаний сравнивались собственные частоты, и по коэффициенту вариации оценивался их разброс в различных экспериментах. При наличии значительных расхождений проводилась дополнительная проверка и уточнение собственных форм.

4. Результаты экспериментального определения собственных частот и форм колебаний лопатки спрямляющего аппарата из ПКМ

Первичными результатами экспериментального модального анализа лопатки являются амплитудно-частотные характеристики, полученные по результатам каждого отдельного эксперимента. Все результаты экспериментальных исследований усреднялись по совокупности точек сетки сканирования. На рис. 3 в качестве примера приведена экспериментально полученная АЧХ лопатки № 3. В процессе исследований проведено сравнение амплитудно-частотных характеристик по экспериментам, полученным для трех различных лопаток. Значения частот, соответствующих пикам на АЧХ, в разных экспериментах хорошо согласуются между собой.

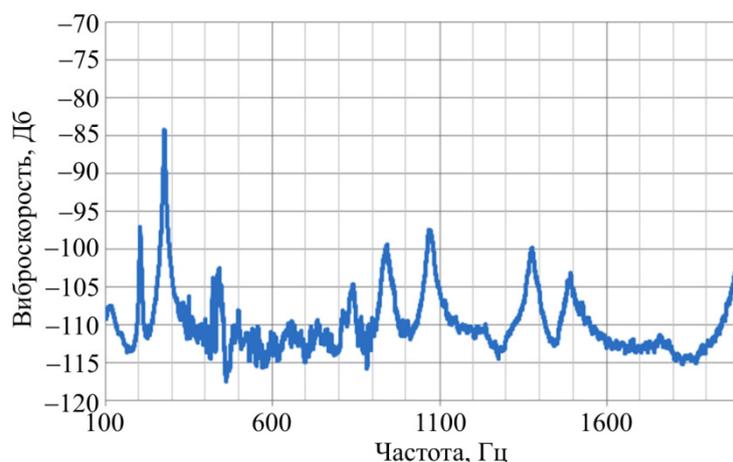


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики ЛСА
 Fig. 3. Amplitude-frequency characteristics of OGV

Формы колебаний в каждом из экспериментов определены в результате анализа анимационных картин динамического поведения лопатки в процессе колебаний. На рис. 4 представлены первые четыре формы колебаний ЛСА из ПКМ. В диапазоне частот до 6400 Гц у исследованных лопаток выявлено до 22 собственных частот колебаний. Собственные частоты приведены в табл. 1.

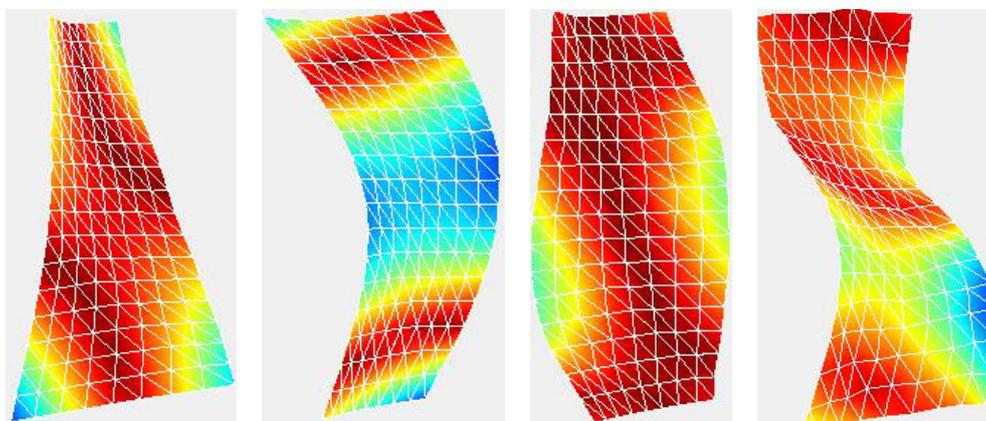


Рис. 4. Собственные формы колебаний ЛСА из ПКМ, полученные в рамках лабораторных испытаний
 Fig. 4. Experimental natural frequencies of OGV

Для оценки воспроизводимости полученных собственных частот определены коэффициенты вариации (отношение среднего квадратического отклонения к среднему значению) каждой из собственных частот (табл. 1). Рассеяние собственных частот по коэффициенту вариации достигает 0,332 % для седьмой формы колебаний ЛСА, для остальных форм колебаний не превышает 0,25 %. Таким образом, получена хорошая воспроизводимость собственных частот для данной группы экспериментов для различных лопаток.

Таблица 1

Собственные частоты для ЛСА

Table 1

Natural frequencies outlet guide vane

Номер собств. формы	Собственная частота, Гц			Среднее значение	Коэффициент вариации, %
	Номер эксперимента				
	1	2	3		
1	205,1	204,5	204,5	204,7	0,169
2	277,3	276,9	276,9	277,0	0,083
3	484,3	482,8	483,8	483,6	0,158
4	715,9	716,5	716,3	716,2	0,043
5	736,8	736,7	735,6	736,4	0,090
6	811,2	810,9	812,7	811,6	0,119
7	839,5	834,2	838,3	837,3	0,332
8	941,2	936,7	937,5	938,5	0,25
9	1072,1	1070,2	1070,3	1070,9	0,100
10	1376	1372	1372,2	1373,4	0,164
11	1490,5	1494,9	1494,9	1493,4	0,170
12	–	1760,9	1760,9	1760,9	0,000
13	–	2002,6	2003,1	2002,9	0,018
14	–	2382,2	2382,8	2382,5	0,018

5. Сравнение с результатом численного расчета собственных частот и форм колебаний лопатки спрямляющего аппарата из ПКМ

В данном разделе проводится численный модальный анализ с целью определения частот и форм (мод) собственных колебаний ЛСА из ПКМ. Для расчета собственных частот и определения форм колебаний ЛСА использовалась трехмерная модель, форма которой была построена с помощью САД-системы SolidWorks (рис. 5, а), а структура армирующих слоев задавалась в программном комплексе ANSYS Workbench.

Конструктивно в ЛСА можно выделить перо и полки, посредством которых происходит закрепление лопатки. Для крепления верхней полки к обечайке корпуса используется болтовое соединение. На входной кромке ЛСА предусмотрена выемка, в которую устанавливается титановая накладка. Лопатка состояла из слоев различной конфигурации толщиной 0,21 мм, соответствующих набору технологических выкроек эпоксидного углепрепрега, со схемой армирования $[0^\circ/\pm 45^\circ]$. Исследования по выбору материала и схемы армирования для изготовления лопатки описаны в работах [2–4]. В модели задавалась полная технологическая схема укладки слоев, каждый слой рассматривался в виде ортотропного однородного материала, главные оси симметрии которого, соответствующие локальной системе координат слоя, ориентированы под углами 0 либо $\pm 45^\circ$ относительно

глобальной системы координат конструкции лопатки. Механические свойства материала слоев, использованные в расчетах, приведены в работах [3, 4].

Математическая постановка решаемой задачи динамической теории упругости в вариационной формулировке заключается в отыскании минимума функционала Лагранжа [21] с учетом сил инерции, распределенных по объему тела. Предполагалось, что задача является линейной, все виды нелинейности – нелинейное поведение материала, контактные граничные условия, конечные перемещения – не рассматривались.

Для определения собственных частоты форм собственных колебаний рассматриваемой конструкции принималось, что внешние силы и демпфирование равны нулю. Решение поставленной задачи осуществлялось методом конечных элементов (МКЭ) с использованием многопроцессорного программного комплекса ANSYS Workbench.

Для лучшей сходимости решения и снижения погрешностей получаемых результатов генерировалась расчетная сетка МКЭ, ячейки которой имели призматическую форму, с использованием конечного элемента Solid 186. При построении и локальном измельчении сетки не допускались резкие отличия геометрических размеров соседних элементов (более чем в 2 раза). Максимальный размер элемента составлял 2 мм, минимальный – 1 мм. Общее количество конечных элементов составило порядка 500 тысяч. При этом в рамках одного элемента объединялось от четырех до восьми слоев углепластика, ориентированных различным образом. Эффективные упругие свойства материала внутри каждого конечного элемента вычислялись на основе заданных свойств отдельных слоев автоматически процедурой ANSYS Workbench, реализованной в конечном элементе Solid 186. На рис. 5, б, в представлена конечно-элементная сетка для конструкции, использованная в расчетах.

По результатам численного анализа были определены формы колебаний и собственные частоты. На рис. 6, а представлены первые четыре формы колебаний ЛСА из ПКМ, полученные в рамках численного расчета. Качественное сравнение результатов численного расчета (рис. 6) и экспериментальных данных (см. рис. 4) показало, что формы колебаний совпадают.

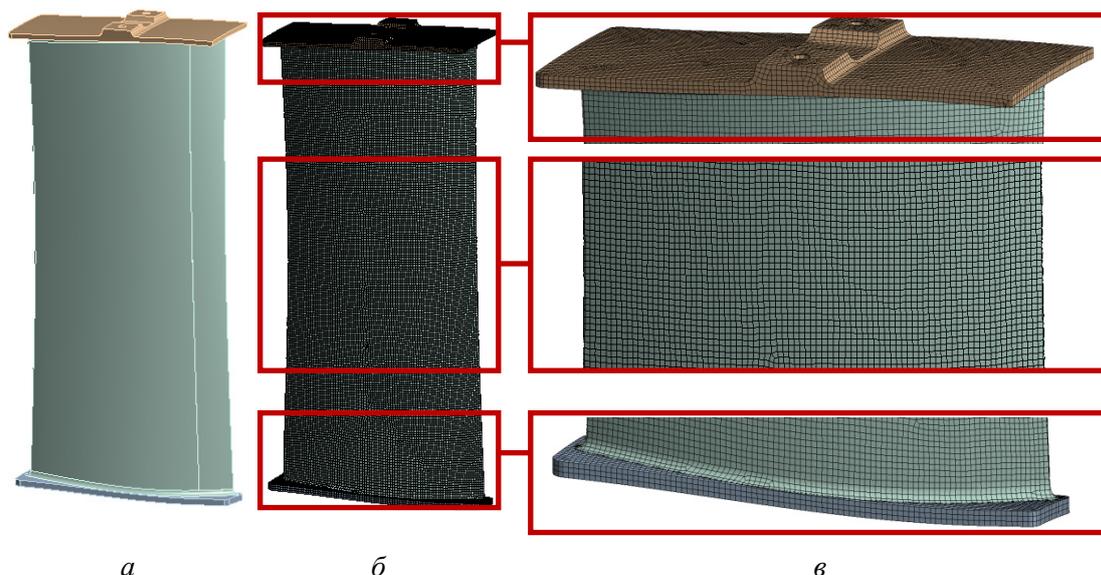


Рис. 5. Геометрическая (а) и сеточная (б, в) модель ЛСА
Fig. 5. Three-dimensional model of OGV (a) and FE mesh (b, c)

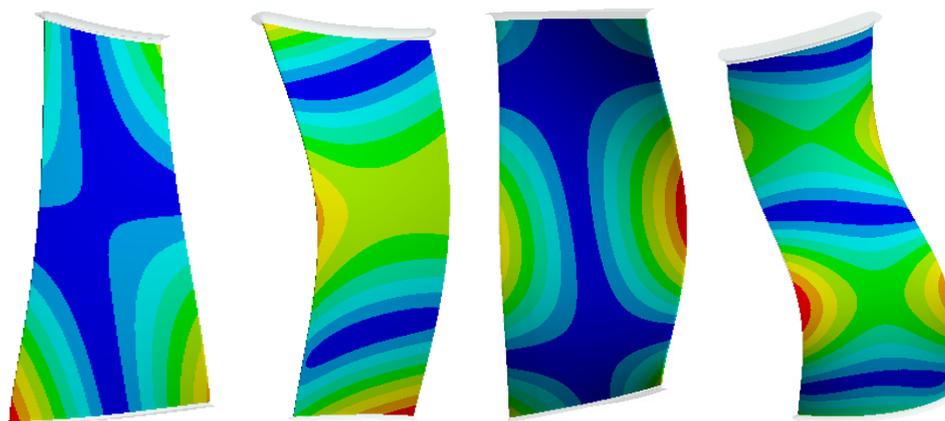


Рис. 6. Формы колебаний ЛСА из ПКМ, полученные в рамках численного расчета
 Fig. 6. Calculated mode shapes of OGV

Количественное сравнение собственных частот ЛСА из ПКМ показал, что отклонения расчетных и экспериментальных значений (табл. 2) наблюдаются в диапазоне от 1,08 % (седьмая собственная частота) до 5,64 % (первая собственная частота). При этом наибольшие значения отклонений (5,64, 5,33, 4,33 %) соответствуют первой, третьей и десятой собственным частотам, для остальных частот отклонение не превышает 2,98 %.

Таблица 2

Сравнительный анализ собственных частот ЛСА

Table 2

Comparative analysis of natural frequencies of OGV

Номер собств. формы	Собственная частота, Гц		Отличие, %
	Эксперимент	Расчет	
1	204,7	216,93	5,64
2	277,0	284,15	2,52
3	483,6	505,51	4,33
4	716,2	705,16	1,54
5	837,3	867,01	3,43
6	1070,9	1039,6	2,98
7	1373,4	1388,4	1,08
8	1493,4	1472,5	1,94
9	1760,9	1733,9	1,53
10	2002,9	1894,4	5,42

Таким образом, результаты численного моделирования, выполненного в трехмерной постановке с учетом полной технологической схемы укладки и анизотропии свойств армирующих слоев в конструкции, хорошо согласуются с результатами механических испытаний. Совпадение собственных частот и форм колебаний свидетельствует о том, что жесткость натурной ЛСА при наличии возможных отклонений и разбросов параметров технологического процесса, геометрии выкровок слоев и механических свойств материалов соответствует проектируемой, а лабораторный модальный анализ может использоваться для контроля стабильности геометрических размеров и механических свойств материала слоев.

Заключение

В результате проведенных работ предложена методика экспериментального исследования собственных частот и форм колебаний полноразмерных композитных лопаток спрямляющего аппарата, базирующаяся на трехкомпонентной сканирующей лазерной виброметрии с использованием программно-аппаратного комплекса PSV-400-3D. Методика позволяет находить собственные частоты и формы колебаний ЛСА из ПКМ в диапазоне частот до 6,4 кГц. На трех натуральных образцах ЛСА, полностью соответствующих конструктивным требованиям и изготовленных по одной технологии, проведено 15 экспериментов с различными параметрами сетки, разрешения по частоте и частотного диапазона. В результате экспериментов получены средние значения и коэффициенты вариации собственных частот ЛСА из ПКМ и проиллюстрированы основные собственные формы их колебаний. Рассеяние по коэффициенту вариации экспериментальных значений собственных частот не превышает 1,6 %.

Разработана математическая модель ЛСА из ПКМ для проведения численного модального анализа на основе трехмерной компьютерной модели, построенной с помощью САД-системы SolidWorks. Разработанная численная модель полностью описывает геометрию, схему укладки и анизотропию армирующих слоев, решение задачи модального анализа осуществлялось МКЭ в программном пакете ANSYS Workbench.

Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Максимальное отличие оценок собственных частот, полученных экспериментальными и численными методами, не превышает 5,64 %. Совпадение расчетных и экспериментальных собственных частот и форм колебаний свидетельствует о том, что жесткость натурной ЛСА при наличии возможных отклонений и разбросов параметров технологического процесса, геометрии выкровок слоев и механических свойств материалов, соответствует проектируемой.

В последующих исследованиях разработанная модель позволит оценить изменение АЧХ ЛСА при вариации её схемы армирования и конструктивных особенностей исполнения, а лабораторный экспериментальный модальный анализ может использоваться для контроля стабильности геометрических размеров и механических свойств материала слоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме «Научное обоснование конструкторско-технологических решений по созданию высоконагруженных узлов перспективных авиационных двигателей, подверженных интенсивному воздействию аэродинамических факторов, из полимерных композиционных материалов на примере лопатки спрямляющего аппарата». Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57414X0080.

Библиографический список

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.Ш., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 2. – М.: shape. © 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved. Машиностроение, 2008. – 368 с.

2. Технологии и задачи механики композиционных материалов для создания лопатки спрямляющего аппарата авиационного двигателя / А.Н. Аношкин, В.Ю. Зуйко, Г.С. Шипунов, А.А. Третьяков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 4. – С. 5–44. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.01
3. Компьютерное моделирование механического поведения композитной лопатки спрямляющего аппарата авиационного двигателя / М.А. Гринёв, А.Н. Аношкин, П.В. Писарев, В.Ю. Зуйко, Г.С. Шипунов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 3. – С. 38–51. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.04
4. Исследование НДС и оценка прочности композитной лопатки спрямляющего аппарата авиационного двигателя / М.А. Гринёв, А.Н. Аношкин, П.В. Писарев, В.Ю. Зуйко, Г.С. Шипунов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 4. – С. 293–307. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.17
5. Carsten C. Aero-mechanical optimisation of a structural fan outlet guide vane // Structural and multidisciplinary optimization. – 2011. – Vol. 44. – No. 1. – P. 125–136. DOI: 10.1007/s00158-010-0617-4
6. Mistuning Identification and Model Updating of an Industrial Blisk / D. Laxalde, F. Thouverez, J.-J. Sinou, J.-P. Lombard, S. Baumhauer // International Journal of Rotating Machinery. V.2007. Hindawi Publishing Corp. Article ID 17289. – 10 p.
7. Bently D.E. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics // Bently Pressurized Bearing Company. – 2002. – 764 p
8. Griffith D.T., Paquette J.A. Panel resonant behavior of wind turbine blades // (2010) Collection of Technical Papers – AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. – 2010. – art. no. 2010–2741.
9. Movaghghar A., Lvov G.I. A method of estimating wind turbine blade fatigue life and damage using continuum damage mechanics // International Journal of Damage Mechanics. – 2012. – Vol. 21 (6). – P. 810–821.
10. Numerical validation of a finite element thin-walled beam model of a composite wind turbine blade / D. Cárdenas, A.A. Escárpita, H. Elizalde, J.J. Aguirre, H. Ahuett, P. Marzocca, O. Probst // Wind Energy. – 2012. – Vol. 15 (2). – P. 203–223.
11. Kumar M., Khan G.S., Shakher C. Measurement of elastic and thermal properties of composite materials using digital speckle pattern interferometry // Proceedings of SPIE. – The International Society for Optical Engineering, 9660. – 2015, art. no. 966011. DOI: 10.1117/12.2196390
12. Structural Health Monitoring of composite material typical of wind turbine blades by novelty detection on vibration response / N. Dervilis, R. Barthorpe, W.J. Staszewski, K. Worden // Key Engineering Materials. – 2012. – Vol. 518. – P. 319–327. Cited 1 time. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.518.319
13. Material characterization and modal analysis of composite plates via digital image correlation / J. Chuang, C.W. Ray, R. Albertani, B.A. Batten // International SAMPE Technical Conference. – 2012. – 12 p.
14. Structural Health Monitoring of composite material typical of wind turbine blades by novelty detection on vibration response / N. Dervilis, R. Barthorpe, W.J. Staszewski, K. Worden // Key Engineering Materials. – 2012. – Vol. 518. – P. 319–327.
15. Бернс В.А., Долгополов А.В., Маринин Д.А. Модальный анализ конструкций по результатам испытаний их составных частей // Докл. Акад. наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – Vol. 1. – С. 24–42
16. Heylen W., Lamens S., Sas P. Modal Analyses. Theory and Testing. – Leven Univ. Belgium, 2003. – 325 p.
17. Ewins D.J. Modal Testing: Theory, Practice and Application // 2nd edition. Baldock, Research Studies Press LTD, 2000.
18. Собственные частоты и формы колебаний полой лопатки вентилятора ГТД / А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, И.Л. Гладкий, А.Ю. Головкин, Б.П. Болотов // Авиационная промышленность. – 2010. – № 3. – С. 8–12.

19. Методика экспериментального модального анализа лопаток и рабочих колес газотурбинных двигателей / А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, А.Б. Сенкевич, А.Ю. Головкин, Б.П. Болотов // Тяжелое машиностроение. – 2010 – № 11. – С. 2–6.
20. Абовский Н.П., Андреев Н.П., Деруга А.П. Вариационные принципы теории упругости и теории оболочек. – М.: Наука, 1978. – 287 с.

References

1. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.Sh., Sandratskii V.L. Osnovy konstruirovaniia aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok [Design principles of aircraft engines and power plants]. Moscow: Mashinostroenie, 2008, vol. 2, 368 p.
2. Anoshkin A.N., ZuikoV.Yu., Shipunov G.S., Tretyakov A.A. Tekhnologii i zadachi mekhaniki kompozitsionnykh materialov dlia sozdaniia lopatki spriam-liaushchego apparata aviatsionnogo dvigatel'ia [Technologies and problems of composite materials mechanics for production of outlet guide vane for aircraft jet engine]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2014, no. 4, pp. 5-44. DOI:10.15593/perm.mech/2014.4.01
3. Grinev M.A., Anoshkin A.N., Pisarev P.V., ZuikoV.Yu., Shipunov G.S. Komp'uternoe modelirovanie mekhanicheskogo povedeniia kompozitnoi lopatki spriam-liaushchego apparata aviatsionnogo dvigatel'ia [CAD/CAE modelling of mechanical behavior of composite outlet guide vane for aircraft jet engine]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 3, pp. 38-51. DOI:10.15593/perm.mech/2015.3.04
4. Grinev M.A., Anoshkin A.N., Pisarev P.V., ZuikoV.Yu., Shipunov G.S. Issledovanie NDS i otsenka prochnosti kompozitnoi lopatki spriamliaushchego apparata aviatsionnogo dvigatel'ia [Stress-strain analysis and strength prediction of composite outlet guide vane for aircraft jet engine]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 4, pp. 293-307, DOI:10.15593/perm.mech/2015.4.17
5. Carsten C. Aero-mechanical optimisation of a structural fan outlet guide vane. *Structural and multidisciplinary optimization*, 2011, vol. 44, no. 1, pp. 125-136, DOI: 10.1007/s00158-010-0617-4
6. Laxalde D.,1, Thouverez F., Sinou J.-J., Lombard J.-P., Baumhauer S. Mistuning identification and model updating of an industrial blisk. *International Journal of Rotating Machinery*. Hindawi Publishing Corp., 2007, vol.V, article ID 17289. 10 p.
7. Bently D.E. Fundamentals of rotating machinery diagnostics. Bently Pressurized Bearing Company, 2002, 764 p
8. Griffith, D.T., Paquette, J.A. Panel resonant behavior of wind turbine blades // (2010) Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, art. no. 2010-2741.
9. Movaghghar, A., Lvov, G.I. A method of estimating wind turbine blade fatigue life and damage using continuum damage mechanics. *International Journal of Damage Mechanics*, 2012, no. 21 (6), pp. 810-821.
10. Cárdenas, D., Escárpita, A.A., Elizalde, H., Aguirre, J.J., Ahuett, H., Marzocca, P., Probst, O. Numerical validation of a finite element thin-walled beam model of a composite wind turbine blade. *Wind Energy*, 2012, vol. 15 (2), pp. 203-223.
11. Kumar, A., Bhargava, P., Chakrabarti, A. Natural frequencies and mode shapes of laminated composite skew hypar shells with complicated boundary conditions using finite element method. *Advanced Materials Research*, 2012, no.585, pp. 44-48. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.585.44
12. Tomihashi, K., Honda, S., Narita, Y., Ewing, M. Experimental modal analysis of passive constrained layer damping plate using CFRP material. *8th Asian-Australasian Conference on Composite Materials 2012, ACCM 2012 - Composites: Enabling Tomorrow's Industry Today*, 2012, no. 2, pp. 1486-1491.
13. Dervilis, N., Barthorpe, R., Staszewski, W.J., Worden, K. Structural Health Monitoring of composite material typical of wind turbine blades by novelty detection on vibration response. *Key Engineering Materials*, 2012, no. 518, pp. 319-327. Cited 1 time. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.518.319
14. Chuang, J., Ray, C.W., Albertani, R., Batten, B.A. Material characterization and modal analysis of composite plates via digital image correlation. *International SAMPE Technical Conference*, 2012. 12 p.

15. Berns V.A., Dolgoplov A.V., Marinin D.A. Modal'nyi analiz konstruktsii po rezul'tatam ispytaniy ikh sostavnykh chastei [Modal analysis of structures on the test results of their constituents]. *Doklady Akademii Nauk vysshejshej shkoly Rossijskoj Federacii*, 2014, 1, ss 24-42 Heylen W., Lamens S., Sas P. *Modal Analyses. Theory and Testing. Leven Univ. Belgium*, 2003, 325 p.
16. Heylen W., Lamens S., Sas P. *Modal Analyses. Theory and Testing. University of Leuven*, 2003. 325 p.
17. Ewins D.J. *Modal Testing: Theory, Practice and Application. Baldock: Research Studies Press LTD*, 2000. 216 p.
18. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.Sh., Voronov L.V., Senkevich A.A., Golovkin A.Yu., Bolotov A.P., *Sobstvennyye chastoty i formy kolebaniy poloj lopatki ventilyatora GTD [The natural frequencies and mode shapes of the hollow vanes GTD fan]. Aviacionnaya promyshlennost'*, 2010, no. 3, pp. 8-12
19. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.Sh., Voronov L.V., Senkevich A.A., Golovkin A.Yu., Bolotov A.P., *Metodika eksperimental'nogo modal'nogo analiza lopatok i rabochikh koles gazoturbinykh dvigatelei [Methods of experimental modal analysis of blades and turbine engine impellers]. Tiazheloe mashinostroenie*, 2010, no. 11. pp. 2-6.
20. Abovskij N.P., Andreev N.P., Deruga A.P. *Variatsionnye printsipy teorii uprugosti i teorii obolochek [Variational principles of elasticity theory and the theory of shells]. Moskow: Nauka*, 1978. 287 p.