

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ И ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

© 2019

- А. В. Зинин** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Сопротивление материалов, динамика и прочность машин»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); allzin@yandex.ru
- А. Н. Архипов** кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); arkhipov.48@list.ru
- Д. П. Холобцев** начальник научно-исследовательского отдела; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); nio203_mai@mai.ru
- Ю. А. Равикович** доктор технических наук, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Конструкция и проектирование двигателей»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); yurav2@yandex.ru
- А. О. Шевяков** инженер научно-исследовательского отдела; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); shevyakov13@yandex.ru
- М. А. Холманова** инженер-конструктор; ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск; marinakholmanova@gmail.com

Представлены результаты конечно-элементного моделирования и экспериментальной оценки динамических характеристик (форм и частот колебаний) композитного элемента конструкций силовых установок авиационной техники с целью разработки эффективных конструкторско-технологических схем реализации тонкостенных композитных деталей сложной геометрии, наиболее полно учитывающих особенности механического поведения полимерных композиционных материалов. Разработана методика определения параметров собственных колебаний композитных деталей в свободном состоянии с помощью пинг-теста, позволяющая исключить влияние условий закрепления и получить частотные характеристики, зависящие только от локальных характеристик материала, которые, в первую очередь, определяются технологией изготовления. По результатам измерений амплитудно-частотных параметров динамического отклика получены спектральные диаграммы затухающих колебаний, пиковые значения которых соответствуют экспериментальной оценке частот собственных колебаний композитной детали. По результатам пинг-теста проведена верификация расчётной модели и предложен способ оценки качества технологических процессов производства тонкостенных углепластиковых конструкций.

Авиационный двигатель; композитные детали; динамические испытания; пинг-тест; расчётная модель; собственные колебания; модальный анализ; верификация модели; технология.

Цитирование: Зинин А.В., Архипов А.Н., Холобцев Д.П., Равикович Ю.А., Шевяков А.О., Холманова М.А. Верификация расчётной модели и оценка технологии изготовления композитных деталей авиационных двигателей на основе динамических испытаний // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 4. С. 52-63. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-52-63

Задачи обеспечения прочности, долговечности и надёжности при динамических нагрузках являются важнейшими при проектировании и экспериментальной отработке новой авиационной техники и служат основой достижения высоких лётно-технических и ресурсных характеристик летательных аппаратов [1-3]. Особое значение учёт динамических процессов имеет при проектировании вращающихся агрегатов авиационной техники – двигателей, турбин, центробежных и осевых компрессоров, которые подвергаются воздействию интенсивных функциональных и инерционных нагрузок, вызывающих колебания, резонансные эффекты и усталостные повреждения [1;4;5].

Повышение эффективности конструкций агрегатов современных авиационных двигателей достигается во многом за счёт внедрения в различные системы силовой установки новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) с высокими удельными эксплуатационными характеристиками. Преимущества использования композитов в условиях динамического нагружения определяются возможностями управления жесткостными и инерционными параметрами конструкции путём изменения структуры композитного материала – схемы армирования, соотношения компонентов, гибридизации и др., а также улучшением интегральных параметров динамики узлов и агрегатов за счёт снижения передаваемых инерционных и динамических нагрузок [6-9]. Эти обстоятельства повышают важность экспериментальных и теоретических исследований динамических характеристик и напряжённо-деформированного состояния композитных элементов, подверженных вибрационным и инерционным воздействиям.

В процессе создания конструкций из ПКМ, работающих в условиях вибрационных нагрузок, актуальной проблемой является определение их резонансных частот и форм колебаний с целью повышения эксплуатационных характеристик. Эффективным методом исследований динамики конструктивных элементов является модальный анализ, который позволяет выделить из процесса отдельные формы колебаний (моды) и описать динамический процесс компактным набором характеристик, который включает в себя собственные частоты, коэффициенты демпфирования и формы мод колебаний [10]. Моды процесса устанавливаются по характеру динамического отклика объекта на внешнее кратковременное или периодическое воздействие. Модальный анализ может быть реализован как экспериментально – путём определения характеристик динамического отклика на внешнее воздействие, так и численно – с использованием анализа конечно-элементной модели. Конечно-элементный динамический (модальный) анализ справедливо заслужил признание как наиболее эффективный численный метод анализа динамических процессов в связи с возможностью выполнения расчётов объектов сложной геометрии. Применение изопараметрических конечных элементов для тонкостенных конструкций позволяет создавать модели объектов с искривлённой лицевой поверхностью и неравномерным распределением напряжений по толщине, характерным для слоистых композитных материалов [11].

Экспериментальная оценка процессов колебаний композитных конструкций затрудняется необходимостью использования сложного оборудования и специальной испытательной оснастки для имитации реальных условий закрепления объекта [12]. Экспериментальные модальные испытания в большей степени используют на этапе проектирования для оценки достоверности расчётных параметров колебаний, полученных с помощью математических моделей динамического поведения исследуемой конструкции, в качестве инструмента оценки адекватности расчётных моделей по частотно-амплитудным характеристикам.

Целью данной работы является разработка расчётно-экспериментального метода достоверной оценки соответствия динамических параметров тонкостенной композитной конструкции компрессора низкого давления авиационного двигателя критериям

отсутствия резонанса по основным гармоникам при эксплуатации в составе силовой установки.

Конечно-элементное моделирование динамического отклика упругой конструкции в общем случае основано на решении дифференциального уравнения колебаний механической системы

$$[M]\{\ddot{W}\} + [D]\{\dot{W}\} + [K]\{W\} = P(t), \quad (1)$$

где $[M]$, $[D]$, $[K]$ – матрицы масс, демпфирования и жёсткости соответственно; $\{W\}$ – вектор узловых перемещений; $P(t)$ – вектор узловой нагрузки.

Задача о свободных колебаниях соответствует уравнению (1) с нулевой правой частью и $D = 0$, т.к. считается, что свободные колебания совершаются системой в условиях отсутствия внешних сил и демпфирования:

$$[M]\{\ddot{W}\} + [K]\{W\} = 0. \quad (2)$$

Подставляя в уравнение (2) решение в виде гармонической функции

$$\{W(t)\} = \{W\} \sin(\omega t + \varphi_0) = e^{i\omega t} \{W\}$$

и учитывая, что уравнение (2) должно удовлетворяться в любой момент времени, получаем обобщённую задачу на собственные значения

$$[K]\{W\} - \omega^2 [M]\{W\} = 0.$$

Математическое решение задачи сводится к поиску спектра собственных значений $\lambda_i = \omega_i^2$ как квадратов частот свободных колебаний и соответствующих им собственных векторов $\{W\}$, характеризующих формы этих колебаний.

Экспериментальное определение динамических характеристик проводят путём принудительного возбуждения собственных колебаний объекта, находящегося в состоянии покоя, импульсом силы – обычно точечным ударом. Такое испытание называют пинг-тестом.

Формально пинг-тест заключается в получении матрицы передаточных функций в виде [6]:

$$\{X\} = [H]\{F\}.$$

Здесь $\{X\}$ – вектор спектров механических колебаний по всем степеням свободы системы; $\{F\}$ – вектор спектров сил возбуждения для тех же самых степеней свободы; $[H]$ – передаточная матрица, каждый элемент H_{ij} которой представляет собой результат измерений отдельной частотной характеристики как отношения

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

где $X_i(\omega)$ – частотная функция реакции (в виде перемещения или ускорения), соответствующая степени свободы i на воздействие $F_j(\omega)$, соответствующее степени свободы j . В экспериментах чаще всего измеряются ускорения и в этих случаях матрица $[H]$ является матрицей ускорений [9]. Собственные частоты определяют по одной из

измеренных частотных характеристик $H_{ij}(\omega)$, форму колебаний – по результатам серии измерений для всех степеней свободы при фиксированной (опорной) одной из степеней.

Реализация модального анализа в теоретической и экспериментальной постановках выполнена при исследовании динамических характеристик корпусной композитной детали – разделителя потоков компрессора газотурбинного двигателя из эпоксидного углепластика, предназначенного для формирования проточной части компрессора и разделения потока воздуха на наружный и внутренний контуры (рис. 1).

Моделирование и расчёт проведены в конечно-элементном пакете Ansys APDL в 3D-постановке. Модель представляет собой тонкостенное кольцо переменного диаметра, выполненное из эпоксидного углепластика, с присоединённой деталью – носком из титанового сплава. Характеристики механических свойств материалов разделителя потоков указаны в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики механических свойств применяемых материалов

Характеристика	Эпоксидный углепластик	Титановый сплав
Плотность ρ , кг/м ³	1500	4510
Модуль упругости E_{11} , МПа	65900	114000
Модуль упругости E_{22} , МПа	65900	114000
Модуль упругости E_{33} , МПа	10000	114000
Коэффициент Пуассона μ_{12}	0,320	0,300
Коэффициент Пуассона μ_{23}	0,320	0,300
Коэффициент Пуассона μ_{31}	0,048	0,300
Модуль сдвига G_{12} , МПа	3500	41000
Модуль сдвига G_{23} , МПа	3200	41000
Модуль сдвига G_{31} , МПа	3200	41000

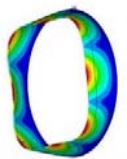
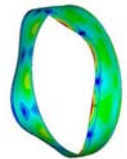
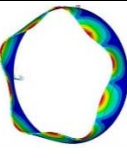


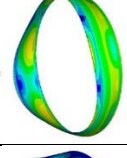
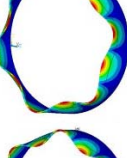
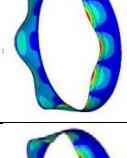
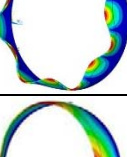
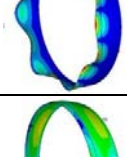
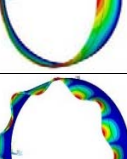
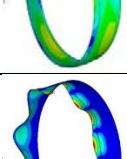
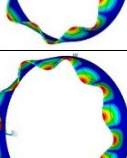
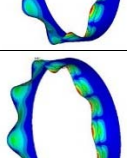
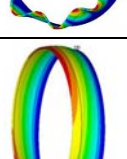
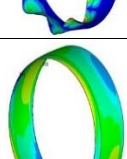
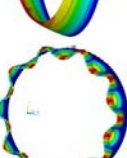
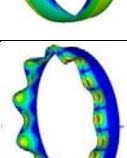

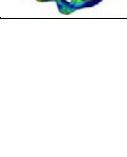


Рис. 1. Разделитель потоков и его конечно-элементная модель

Модель композитного кольца и титановой детали создана с помощью трёхмерных гексаэдральных двадцатиузловых квадратичных элементов SOLID186. Динамический расчёт форм и частот колебаний проводился при закреплении разделителя жёстко по окружности справа. Титановый «носик» насажен на ПКМ и слева свободен. Статические нагрузки не прикладывались. Способ решения – прямой, с помощью блока векторов методом Ланцоша (Block Lanczos).

Табл. 2 содержит расчётные значения первых 10 собственных частот и соответствующие формы колебаний в разделителе потоков из ПКМ.

Таблица 2. Собственные частоты и соответствующие им формы колебаний в корпусе-обтекателе

Форма колебаний		Частота, Гц		Динамические напряжения
		Расчёт	Эксперимент	Распределение
1		308,3	303,5	
2		333,4	344,6	
3		416,8	416,7	
4		448,3	459,5	
5		604,3	583,3	
6		665,1	652,0	
7		780,4	830,2	
8		965,4	981,3	
9		1120,9	1138,4	
10		1145,1	1203,2	

Верификация расчётной динамической модели производилась экспериментально на основе результатов пинг-теста разделителя потоков в свободном и закреплённом состоянии. Проведение пинг-теста детали в свободном состоянии позволяет исключить влияние условий закрепления и получить частотные характеристики, зависящие только от локальных характеристик материала, которые, в первую очередь, определяются технологией изготовления.

Сущность пинг-теста заключается в возбуждении ударом процесса вибрации конструкции и измерении характеристик динамического отклика объекта в свободном или закреплённом состоянии. Пинг-тест проводится импульсным ударным нагружением, при котором в упрощённой форме выполняется измерение подвижности объекта испытаний в соответствии с ГОСТ ИСО 7626-5-99. При проведении испытаний в свободном состоянии разделитель потоков подвешивался на эластичных жгутах, не ограничивающих свободу перемещений. Возбуждение колебательного процесса совершали ударом в определённой точке объекта испытаний специальным инструментом – молотком с мягкой поверхностью. Измерительная система для определения динамических параметров включает вибродатчик, установленный с помощью клея в расчётных точках объекта, и анализатор вибропроцесса, обеспечивающий ввод данных не менее чем по двум каналам одновременно.

Особенностью проведения пинг-теста для определения частот собственных колебаний является реализация нескольких схем измерений с различными локациями измерительного датчика и точек приложения ударного возмущения. Контрольные сечения объекта (места установки вибродатчика) и точки приложения ударного воздействия определялись до начала испытаний по расчётам конечно-элементного моделирования процесса.

При последовательном нагружении ударом различных сечений конструкции контролировали динамическое поведение объекта и фиксировали значения частот колебаний. Для каждой схемы измерений амплитудно-частотной характеристики проводилось 2...4 измерения в каждом контрольном сечении. При определении частот собственных колебаний реализовано 12 схем измерений с различным месторасположением измерительного датчика и точек приложения ударного возмущения.

Следует отметить, что на основании принципа взаимности Максвелла измеряемые частотные характеристики не зависят от того, какая точка используется для возбуждения, а какая – для измерения реакции.

По результатам измерений амплитудно-частотных параметров динамического отклика получены спектральные диаграммы затухающих колебаний, пиковые значения которых соответствуют экспериментальной оценке частот собственных колебаний композитной детали (рис. 2).

Результаты пинг-тестов двух образцов углепластикового обтекателя в свободном состоянии и экспериментальные оценки частотных характеристик разделителя потоков из углепластика достаточно точно соответствуют расчётным значениям, что свидетельствует о высокой степени адекватности модельных представлений динамических процессов (табл. 3). Наибольшее относительное отклонение от расчётных значений, равное 5...7 %, установлено для формы № 7, что соответствует известным фактам снижения точности расчётов для высоких форм колебаний. Ранее установлено [10], что наиболее точно конечно-элементная сетка описывает нижнюю часть спектра частот, у которой формы колебаний простейшие и в каждую полуволну колебаний укладывается достаточное количество конечных элементов. Такой же тренд наблюдается для результатов испытаний разделителя потоков в закреплённом состоянии. По результатам пинг-тестов, проведённых на двух экземплярах разделителей потоков в свободном и закреплённом состоянии, установлено, что экспериментальные

значения частотных характеристик разделителя соответствуют расчётным в пределах допустимых предельных отклонений.

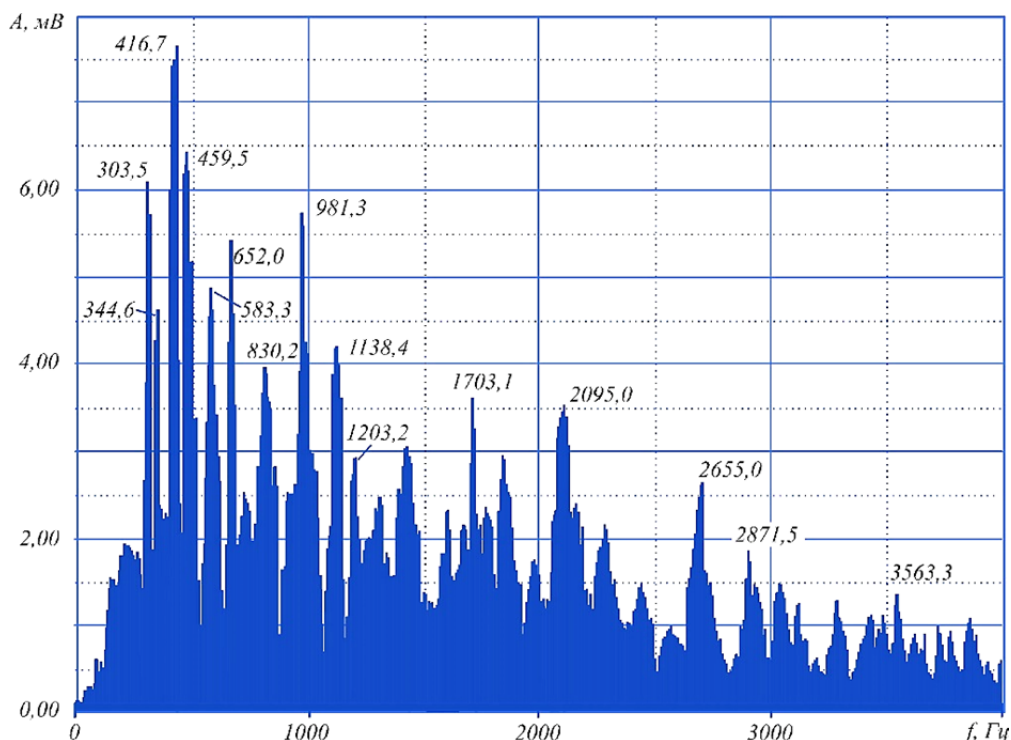


Рис. 2. Типовая диаграмма колебаний (спектрограмма) разделителя

Таблица 3. Расчётные и измеренные частоты собственных колебаний разделителей потоков в свободном состоянии

Расчёт		Измеренное значение, Гц			
Номинальное значение, Гц	Допустимое отклонение, Гц	образец 1		образец 2	
		мин	макс	мин	макс
15	±3	17	18	16	18
32	±6	38	38	36	37
39	±8	47	47	46	47
67	±13	н/н*	н/н*	н/н*	н/н*
99	±20	90	92	88	90
103	±21	116	122	113	124
134	±27	140	146	142	148
175	±35	165	177	168	175
199	±40	197	201	199	206
220	±44	217	222	215	224
270	±54	250	299	259	307
314	±63	281	338	287	343

* Частота четвёртой расчётной формы колебаний при измерениях не найдена в спектре

Таким образом, результаты расчётного и экспериментального модального анализа разделителя потоков из эпоксидного углепластика свидетельствуют о выполнении критерия годности (работоспособности) по показателю частоты собственных колебаний в свободном состоянии. Установленные экспериментально отклонения от номинальных расчётных значений частот собственных колебаний в свободном и

закреплённом состоянии не выходят за границы допустимого интервала и не являются критическими по показателям годности разделителя потоков.

В рамках практической вибродиагностики [13-15] известно, что в деформируемом теле однократным ударным воздействием возбуждаются колебания, характер которых позволяет делать заключение об особенностях внутренней структуры объекта испытаний и степени однородности конструкционного материала. Физической основой практической модальной вибродиагностики является изменение спектрограммы и характеристик процесса колебаний в конструктивных элементах при наличии в них структурной неоднородности и внутренних дефектов. Такой метод расширяет возможности контроля качества технологий изготовления и сборки вращающихся узлов и деталей и позволяет оптимизировать динамические свойства проектируемых технических систем.

При анализе данных пинг-тестов композитного разделителя потоков отмечено рассеяние значений частот собственных колебаний при выполнении пинг-теста по различным схемам измерения амплитудно-частотных характеристик. Коэффициент вариации экспериментальных значений резонансных частот, вычисленный по измерениям в 12 точках установки вибродатчика для каждой схемы ударного нагружения, достигает 6,3 %. Одной из возможных причин таких явлений может быть наличие отдельных структурных неоднородностей углепластика вследствие локальных нарушений соотношения фаз «матрица-армирующая система» [16]. Такое локальное изменение плотности приводит к неравномерности распределения инерционных нагрузок по объёму изделия, что вызывает изменения частотного спектра и появление побочных динамических явлений. Наиболее вероятно, что это связано с дефектностью материала в виде отклонений от нормативного значения объёмного содержания связующего и армирующего материала в композите, образования складок, нахлестов, свилей и др. Причинами возникновения таких дефектов могут быть отклонения от требуемых режимов подготовки или раскрытия препрегов, искажающих геометрию полуфабрикатов при выкладке слоёв и нарушающих топологические свойства тканой структуры; плохое уплотнение тканевого пакета, несоблюдение режима формования – продолжительности и величины приложенного давления и др. На этапе сборки пакета (выкладки) могут также появиться дефекты, связанные с нарушением угла выкладки, смещением зоны выкладки, искривлением структуры препрега в плоскости слоёв (искривление волокна), образованием волнистости из-за неравномерного натяжения при выкладке и изменения усилий прикатки, которое может привести к искривлению волокон в плоскости или формированию складки.

Для снижения неоднородности структуры и оптимизации процесса подформовки пакета слоёв препрега следует сначала провести дегазацию пакета и предварительное уплотнение [17] с целью отжима излишек связующего под действием атмосферного давления, после чего необходимо ступенчато увеличивать температуру, делая выдержку на каждой ступени. Кроме того, необходимо учитывать особенности кинетики химических преобразований структуры связующего, связанных с тем, что при монотонном нагреве сшиваются сначала низкомолекулярные группы полимера, а затем при отверждении на высоких температурах образуется густосетчатая структура [16;17] из сшитых ранее групп, которые при многократном повторении циклов подформовки могут вызвать дефекты сетчатой структуры полимера. Это наиболее вероятно на границе уже подформованного пакета-заготовки и выложенных вновь слоёв. Для предотвращения возникновения дефектов по этой границе рекомендуется усовершенствовать технологический процесс подформовки, снизив первоначальное давление и увеличив скорость нагрева с выдержкой на каждой ступени в соответствии с оптимальными режимами.

Таким образом, результаты предварительных испытаний опытных образцов разделителя потоков по определению собственных частот колебаний в свободном состоянии показали высокую эффективность этого вида испытаний для оценки качества и стабильности технологических операций изготовления разделителей, что даёт основание рекомендовать пинг-тест разделителя потоков в свободном состоянии как контрольную операцию для оценки качества технологического процесса производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования России по реализации комплексного проекта, код 2017-218-09-172.

Библиографический список

1. Бондарь В.С., Горячева И.Г., Матвиенко Ю.Г., Капустин С.А., Темис Ю.М., Туманов Н.В., Владимиров С.А., Горохов В.А., Абашев Д.Р., Азметов Х.Х., Петров В.К., Чурилов Ю.А. Ресурс материалов и конструкций. М.: Московский Политех, 2019. 192 с.
2. Степнов М.Н., Агамиров Л.В., Зинин А.В., Котов П.И., Махутов Н.А., Петухов А.Н., Васильев Д.В., Шаврин А.В., Гаденин М.М., Кузьмин А.Е. Научные школы. Прочность машин и конструкций при переменных нагрузках. М.: МАТИ – РГАТУ им. К.Э. Циолковского, 2001. 164 с.
3. Степнов М.Н., Зинин А.В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 392 с.
4. Рябов В.М., Ярцев Б.А. Связанные затухающие колебания композитных конструкций // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2012. № 4. С. 32-38.
5. Зинин А.В., Бычков Н.Г., Першин А.В., Авруцкий В.В., Смирнова Л.Л. Термоциклическая прочность жаропрочного сплава и кинетика накопления повреждений при наложении вибрационных нагрузок // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 2. С. 53-55.
6. Гринев М.А., Аношкин А.Н., Писарев П.В., Шипунов Г.С., Нихамкин М.Ш., Балакирев А.А., Конев И.П., Головкин А.Ю. Расчётно-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
7. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
8. Зинин А.В., Котов П.И., Сухов С.В. Практическая механика разрушения. Т. 2. М.: МАТИ, 2012. 391 с.
9. Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Шипунов Г.С., Третьяков А.А. Технологии и задачи механики композиционных материалов для создания лопатки спрямляющего аппарата авиационного двигателя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2014. № 4. С. 5-44. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.01
10. Голованов Л.И., Тюленева О.Н., Шигабутдинов Л.Ф. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций. М.: Физматлит, 2006. 392 с.
11. Иванов А.В., Леонтьев М.К. Модальный анализ динамических систем роторов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2005. № 3. С. 31-35.

12. Зиновьев П.А., Смердов А.А., Кулиш Г.Г. Экспериментальное исследование упруго-диссипативных характеристик углепластиков // Механика композитных материалов. 2003. Т. 39, № 5. С. 595-602.

13. Киселев Ю.В., Киселев Д.Ю., Тиц С.Н. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2012. 206 с.

14. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. Пермь: Вибро-Центр, 1996. 176 с.

15. Остяков Ю.А., Зинин А.В., Шевченко М.И., Феоктистова Е.С. Надёжность систем измерения эксплуатационных параметров при отработке авиационных двигателей // Материалы XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» (19-23 марта 2018 г., Вятчи). Т. 2. М.: ООО «ТРИП», 2018. С. 116-118.

16. Бабаевский П.Г., Бухаров С.В. Формирование структуры отверждающихся композиций: учеб. пособие. М.: МГАТУ, 1993. 100 с.

17. Самипур Саджад Алиасгар, Батраков В.В., Константинов Д.Ю. Разработка методики удаления пористости конструкций из композиционных материалов при ограниченном автоклавном давлении // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 3. С. 152-156.

VERIFICATION OF A DESIGN MODEL AND EVALUATION OF A TECHNIQUE OF MANUFACTURING AIRCRAFT ENGINE COMPOSITE PARTS ON THE BASIS OF DYNAMIC TESTS

© 2019

A. V. Zinin Candidate of Science (Engineering); Associate Professor of the Department of Strength of Materials, Dynamics and Strength of Machines; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; allzin@yandex.ru

A. N. Arkhipov Candidate of Science (Engineering); Senior Researcher of the Research Department; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; arkhipov.48@list.ru

D. P. Kholobtsev Head of the Research Department; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; nio203_mai@mai.ru

Yu. A. Ravikovich Doctor of Science (Engineering); Vice Rector for Research; Head of the Department of Construction and Design of Engines; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; yurav2@yandex.ru

A. O. Shevjakov Engineer of the Research Department; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; shevyakov13@yandex.ru

M. A. Kholmanova Design Engineer; Public Joint-Stock Company UEC-Saturn, Rybinsk, Russian Federation; marinakholmanova@gmail.com

The results of finite element modeling and experimental evaluation of dynamic characteristics (vibration modes and frequencies) of the composite element of aircraft power plant structures are presented. The aim of the work is to develop effective design and technological schemes for thin-walled complex-geometry composite parts, taking into account the peculiarities of mechanical behavior of polymer composite materials to the fullest extent possible. A method for determining the parameters of natural oscillations of composite parts in a free state using a ping test is developed, which allows excluding the influence of kinematic boundary conditions and obtaining frequency characteristics that depend only on the local characteristics of the material which are primarily determined by the manufacturing technology. According to the results of measurements of the amplitude-frequency parameters of the dynamic response, spectrograms of damped oscillations are obtained the peak values of which correspond to the experimental evaluation of the natural frequencies of the composite part. Verification of the design model was carried out according to the results of the ping test and a method for assessing the quality of technological processes of manufacturing thin-walled carbon fiber structures was proposed.

Aircraft engine; composite parts; dynamic tests; ping test; design model; natural oscillations; modal analysis; model verification; technology.

Citation: Zinin A.V., Arkhipov A.N., Kholobtsev D.P., Ravikovich Yu.A., Shevjakov A.O., Kholmanova M.A. Verification of a design model and evaluation of a technique of manufacturing aircraft engine composite parts on the basis of dynamic tests. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 4. P. 52-63. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-52-63

References

1. Bondar' V.S., Goryacheva I.G., Matvienko Yu.G., Kapustin S.A., Temis Yu.M., Tumanov N.V., Vladimirov S.A., Gorokhov V.A., Abashev D.R., Azmetov Kh.Kh., Petrov V.K., Churilov Yu.A. *Resurs materialov i konstruktsiy* [Service life of materials and structures]. Moscow: Moskovskiy Politekh Publ., 2019. 192 p.
2. Stepnov M.N., Agamirov L.V., Zinin A.V., Kotov P.I., Makhutov N.A., Petukhov A.N., Vasil'ev D.V., Shavrin A.V., Gadenin M.M., Kuz'min A.E. *Nauchnye shkoly. Prochnost' mashin i konstruktsiy pri peremennykh nagruzkakh* [Scientific schools. Strength of machines and structures at variable loads]. Moscow: MATI - RGATU im. K.E. Tsiolkovskogo Publ., 2001. 164 p.
3. Stepnov M.N., Zinin A.V. *Prognozirovaniye kharakteristik soprotivleniya ustalosti materialov i elementov konstruktsiy* [Forecast of fatigue characteristics of materials and structural elements]. Moscow: Innovatsionnoye Mashinostroenie Publ., 2016. 392 p.
4. Ryabov V.M., Yartsev B.A. Coupled damping vibrations of composite structures. *Vestnik St. Petersburg University: Mathematics*. 2012. V. 45, Iss. 4. P. 168-173. DOI: 10.3103/S1063454112040073
5. Zinin A.V., Bychkov N.G., Perchin A.V., Avruchsky V.V., Smirnova L.L. Thermal cyclic strength of ZhS6U superalloy and kinetics of damage accumulation under the impact of vibration loads. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2017. V. 83, no. 2. P. 53-55. (In Russ.)
6. 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. P. 106-119. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.4.07. (In Russ.)
7. Vasil'ev V.V. *Mekhanika konstruktsiy iz kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of structures made of composite materials]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 272 p.
8. Zinin A.V., Kotov P.I., Sukhov S.V. *Prakticheskaya mekhanika razrusheniya. T. 2* [Practical fracture mechanics. V. 2]. Moscow: Moscow Aviation Technological Institute Publ., 2012. 391 p.

9. Anoshkin A.N., Zuiko V.Yu., Shipunov G.S., Tretyakov A.A. Technologies and problems of composite materials mechanics for production of outlet guide vane for aircraft jet engine. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. No. 4. P. 5-44. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.01. (In Russ.)
10. Golovanov L.I., Tyuleneva O.N., Shigabutdinov L.F. *Metod konechnykh elementov v statike i dinamike tonkostennykh konstruksiy* [Finite element method in statics and dynamics of thin-walled structures]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2006. 392 p.
11. Ivanov A.V., Leontiev M.K. Modal analysis of dynamic rotor systems. *Russian Aeronautics*. 2005. V. 48, Iss. 3. P. 45-53.
12. Zinov'ev P.A., Smerdov A.A., Kulish G.G. Experimental investigation of elastodissipative characteristics of carbon-fiber-reinforced plastics. *Mechanics of Composite Materials*. 2003. V. 39, Iss. 5. P. 393-398. DOI: 10.1023/B:MOCM.0000003289.12297.84
13. Kiselev Yu.V., Kiselev D.Yu., Tits S.N. *Vibratsionnaya diagnostika sistem i konstruksiy aviatsionnoy tekhniki* [Vibration diagnostics of aircraft systems and structures]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2012. 206 p.
14. Rusov V.A. *Spektral'naya vibrodiagnostika* [Spectral vibration diagnostics]. Perm: Vibro-Center Publ., 1996. 176 p.
15. Ostyakov Yu.A., Zinin A.V., Shevchenko M.I., Feoktistova E.S. Nadezhnost' sistem izmereniya ekspluatatsionnykh parametrov pri otrabotke aviatsionnykh dvigateley. *Proceedings of the XXIV International Symposium «Dynamic and Technological Problems of a Mechanics of Constructions and Continuous Mediums» (March, 19-23, 2018, Vyatichi)*. V. 2. Moscow: OOO «TRP» Publ., 2018. P. 116-118. (In Russ.)
16. Babaevskiy P.G., Bukharov S.V. *Formirovanie struktury otverzhdayushchikhsya kompozitsiy: ucheb. posobie* [Formation of the structure of curing systems]. Moscow: Moscow State Aviation Technological University Publ., 1993. 100 p.
17. Samipour S.A., Batrakov V.V., Konstantinov D.Y. Development of a technique to reduce porosity in composite structures at the limited autoclave pressure. *Russian Aeronautics*. 2018. V. 61, Iss. 3. P. 481-486. DOI: 10.3103/S1068799818030248