

УДК 624.07:534.1

Е.В. МАРЦЕНЮК, А.И. ГАРКУША, В.С. ЧИГРИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТА ТИПА «ЗАБОИНА» НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА

Разработка методов, позволяющих с высокой достоверностью диагностировать как усталостное повреждение деталей ГТД, так и степень деградации механических свойств материала от температурно-силового воздействия в процессе эксплуатации является актуальной задачей. В представленной работе приведены результаты экспериментальных и расчетных исследований влияния повреждений типа «забойна» на частоту собственных колебаний лопатки. Рассмотрены частотные характеристики лопатки компрессора с различными повреждениями. Разработана твердотельная модель лопатки. В ходе сравнения результатов аналитического определения частотных характеристик с экспериментальными данными была проведена отладка модели. Отмечено, что существует определённая величина повреждений, при которой просматривается достаточно хорошее отклонение «ведущих» частот собственных колебаний рассматриваемых форм от частот колебаний эталонной лопатки.

Ключевые слова: частота собственных колебаний, частотная характеристика, забойна, лопатка, дефект, твердотельная модель.

Введение

Среди актуальных проблем в авиационной технике, требующих первоочередного научно-технического обеспечения, следует отметить необходимость дальнейшего совершенствования методов и средств диагностирования технического состояния систем и элементов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) как во время эксплуатации, так и при проведении технического обслуживания и восстановления.

В настоящее время эксплуатация ГТД ведется, как правило, до момента выработки им межремонтного ресурса с обязательным съемом двигателей с эксплуатации и направлением их на ремонтные предприятия для дефектации и ремонта.

Известно, что большинство отказов элементов машин вызвано их недостаточной усталостной прочностью. В связи с этим резко возрастает необходимость в способах диагностики технического состояния деталей ГТД, позволяющих с высокой достоверностью диагностировать как усталостное повреждение деталей ГТД, так и степень деградации механических характеристик материала деталей от температурно-силового воздействия в процессе эксплуатации.

Таким образом, помимо традиционных задач дефектоскопического контроля появилась необходимость в создании новых универсальных методов диагностики повреждений элементов ГТД.

Экспериментальное определение частотных характеристик рабочей лопатки компрессора

Испытания проводились на вибростенде, в состав которого входят генератор звуковых частот, усилитель, блок подмагничивания, измерительный преобразователь вибрации для регистрации уровней вибраций испытываемого образца, устройство регистрации и обработки вибросигналов (ЭВМ и специальная программа регистрации и обработки). Схема вибростенда при формировании полигармонического сигнала приведена на рис. 1.

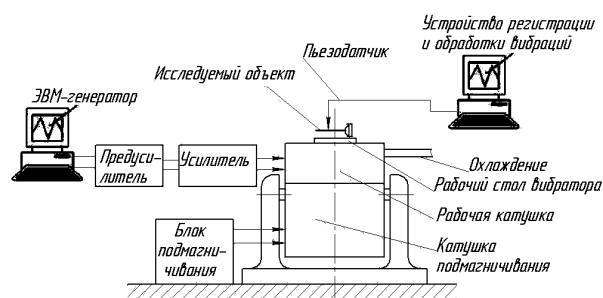


Рис. 1. Схема вибростенда с выработкой управляющих сигналов ЭВМ

При испытаниях с полигармоническим возбуждением в качестве генератора использовалась специально разработанная программа ЭВМ, формирующая переменный сигнал с несколькими заданными частотами и амплитудами, который после

усиления в преусилителе и усилителе поступает на рабочую катушку электровибродинамика ВЭД-200.

Объектом исследования была выбрана рабочая лопатка сверхзвуковой ступени компрессора.

В ходе эксперимента частоты собственных колебаний исследуемого объекта фиксировались по возникающему резонансу. Наличие резонансных явлений определялось по увеличению шума. Для более точного определения частот собственных колебаний в выделенном диапазоне был использован виброщуп. С помощью виброщупа проверялись узловые линии на пера лопатки и области с максимальной амплитудой колебаний.

Создание и верификация конечно-элементной модели

Создание твердотельной модели осуществлялось по результатам измерения координат точек профиля в характерных сечениях. По окончании построения геометрической модели исследуемой лопатки был проведен контрольный обмер детали, и внесена коррекция в эскизы профиля. Лопатка и ее твердотельная модель представлены на рис. 2.

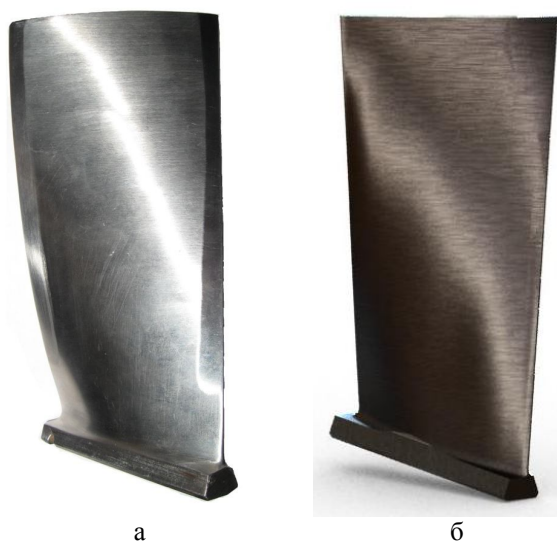


Рис. 2. Исследуемая лопатка:
а – фотография; б – твердотельная модель

Сетка расчетной модели создана на базе параболического твердотельного тетраэдрального элемента, имеющего параболическое поле перемещений в ограничиваемой им области и, соответственно, линейное распределение деформаций.

В ходе сравнения результатов аналитического определения частотных характеристик с экспериментальными данными была проведена отладка модели. Отладка проводилась в несколько этапов и заключалась в коррекции толщин отдельных участков профиля, места положения хвостовика, коррек-

ции поверхности перехода от пера лопатки к хвостовику.

Анализ полученных результатов показал, что на модели лопатки получено достаточно хорошее совпадение как по формам колебаний, так и по соответствующим частотам, что позволяет использовать модель для формирования диагностических признаков при оценке состояния лопатки. В табл. 1 приведено сравнение частот нескольких форм для исследуемой лопатки.

Таблица 1
Сравнение значений частот, экспериментальных и расчетных

Частота собственных колебаний экспериментальная, Гц	Частота собственных колебаний расчетная, Гц	Относительная погрешность, %
154,14	148,57	3,6
769,05	799,38	3,9
3689,58	3725,2	0,96
5678,82	5619,3	1,1

Некоторые расчетные частоты имеют отклонения от эксперимента более 4 %, что объясняется тем, что при установке лопатки на испытательном стенде условия ее закрепления не в полной мере совпали с условиями закрепления при моделировании. Тем не менее, закономерности отклонений частот от повреждений, выявленные моделированием, сохраняют свои тенденции.

Исследование частотных характеристик лопатки с дефектом

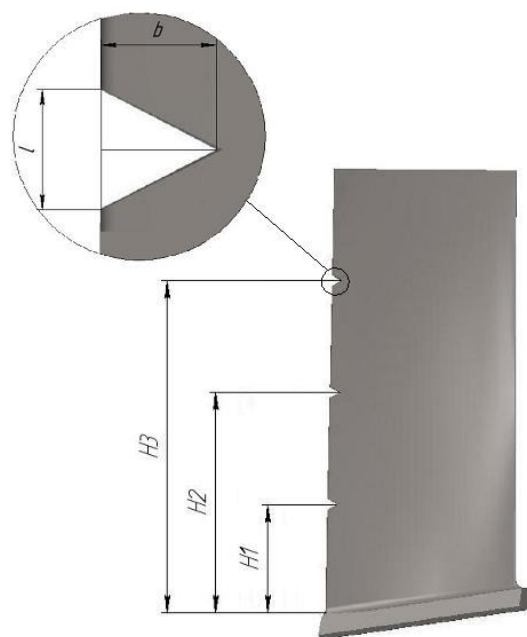


Рис. 3. Размеры и расположение дефекта

В качестве дефекта рассматривался одиночный дефект типа «забоина» глубиной b и шириной l (рис. 3), который располагался на входной кромке лопатки. Глубина и ширина забоины приняты одинаковыми, а их величина задавалась в пределах от 0,5 до 4 мм с шагом в 0,5 мм. Положение забоины по высоте лопатки также варьировалось.

Граничные условия, условия закрепления и сама расчетная модель с сеткой конечных элементов (рис. 4) строились аналогично модели эталонной (бездефектной) лопатки.

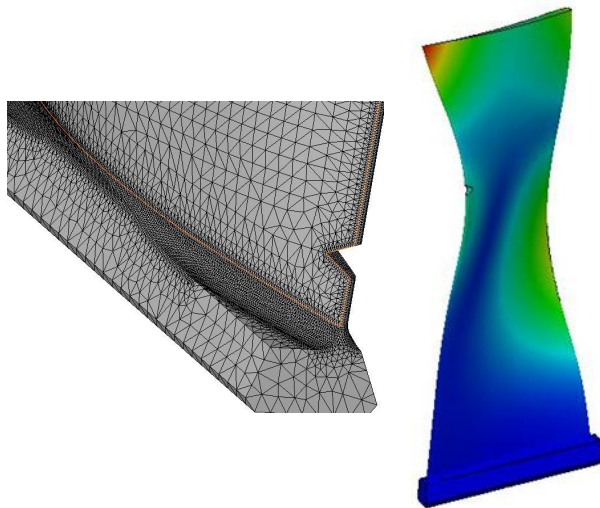


Рис. 4. Фрагмент сетки конечных элементов и 6-я форма собственных колебаний лопатки

В качестве диагностического признака была выбрана абсолютная разница частот собственных колебаний Δf эталонной и дефектной лопаток.

В результате анализа полученных данных, было выбрано несколько форм, которые лучше остальных откликаются на данный тип дефекта, а именно, 4, 6, 8, 10 формы колебаний. Для повышения точности определения места возникновения дефекта наблюдение велось одновременно за всеми обозначенными выше формами (таблица 2).

«Ведущая» форма, по которой определяется место расположения дефекта, обозначена знаком «(+)».

Так о наличии дефекта в корневой области исследуемой лопатки говорит падение частоты собственных колебаний 4-й формы, при этом, чем ближе дефект находится к хвостовику, тем интенсивнее происходит падение частоты. При удалении дефекта от хвостовика лопатки отклонение частоты 4-й формы колебаний сводится к нулю. В то же время, если отклонения частоты собственных колебаний лопатки по 4-й форме лежат в пределах от -5 до -15 Гц, то отклонения по 10-й форме должны находиться в

пределах от 0 до 5 Гц, а частота, соответствующая 6-й форме, не должна измениться более чем на -5 Гц. Другое сочетание отклонений частот выбранных форм, также характеризующее корневую область (но при большем отдалении дефекта от хвостовика) – когда по 4-й форме отклонение лежит в пределах от 0 до -5 Гц, а 10-я форма перекрывает диапазон от 5 до 15 Гц. Изменение 8-й формы в обоих случаях незначительное (от -3 до 3 Гц) либо вообще не наблюдается.

Таблица 2

Матрица знаков

Область дефекта	Диапазон отклонений	Формы колебаний			
		4	6	8	10
корневая	$(-5 \geq \Delta f \geq -15)$	(+)	-	-	-
	$0 > \Delta f > -5$	+	+	+	-
	$0 < \Delta f \leq 5$	-	-	+	+
	$5 < \Delta f \leq 15$	-	-	-	(+)
средняя	$(-5 \geq \Delta f \geq -15)$	-	-	(+)	-
	$0 > \Delta f > -5$	+	+	-	-
	$0 < \Delta f \leq 5$	+	-	-	-
	$5 < \Delta f \leq 15$	-	-	-	-
периферийная	$(-5 \geq \Delta f \geq -15)$	-	(+)	-	(+)
	$0 > \Delta f > -5$	-	+	+	-
	$0 < \Delta f \leq 5$	+	-	-	+
	$5 < \Delta f \leq 15$	-	-	-	-

Для выявления дефекта в средней области профиля наблюдения следует вести за 4-й, 6-й и 8-й формами. При этом определяющей является 8-я форма собственных колебаний. Если отклонения по ней составляют $-5 \div -15$ Гц, в 4-й форме частота ушла незначительно ($-3 \div 3$ Гц), а в 6-й изменилась не больше, чем на -5 Гц, то можно говорить о положении дефекта на среднем участке входной кромки лопатки.

Если же обнаружилось, что ярко выраженной является 6-я форма (отклонение находится в диапазоне от -5 до -15 Гц), то дефект находится в области между средним сечением и периферией. Для подтверждения такого диагноза следует обратить внимание на 4-ю и 10-ю формы частот собственных колебаний: значения отклонений по ним не должны превышать 5 Гц.

Если же в ходе проверки «ведущей» оказывается 10-я форма с уходом частоты на $-5 \div -15$ Гц, а также наблюдается незначительный уход (до -5 Гц)

по 6-й и 8-й формам, то можно утверждать, что забоина находится в периферийной части входной кромки.

После определения «ведущих» форм собственных колебаний исследуемой лопатки, которые выявлялись при фиксированном значении дефекта, был проведен более детальный частотный анализ с размером забоины от 0,5 до 4 мм с шагом в 0,5 мм. Результаты расчетов по каждой форме удобно представлять в виде поверхностей (рис. 5), которые показывают величину отклонений частот собственных колебаний дефектной лопатки в зависимости от глубины и положения забоины.

Процесс оценки состояния лопатки и определения величины и расположения повреждения относится к задачам распознавания образов. Определение величины и расположения забоин на пере лопатки с заданной вероятностью по увеличению или уменьшению собственных частот определенных форм колебаний может быть получено при использовании метода условных вероятностей Байеса или элементов нечеткой логики. Для этого при определении собственных частот лопаток перед сборкой узла двигателя информация по частотам должна заноситься в паспорт каждой лопатки.

Современные методы регистрации и обработки вибропараметров позволяют с достаточной

точностью определять сравнительно небольшие отклонения частот (использованные при испытаниях и обработке компьютерные программы при определенной настройке позволили определять частоты с абсолютной погрешностью 1 Гц). Исследования показали, что вместо абсолютных значений отклонений частот и абсолютных геометрических размеров забоин в дальнейшем целесообразно использовать отношения отклонений частот колебаний к их паспортным значениям. Аналогично размеры забоин целесообразно оценивать относительно характерного размера лопатки, например, относительно длины ее пера по передней или задней кромке.

Заключение

Анализ полученных данных показал, что выявление дефекта типа «забоина» для исследуемой лопатки можно произвести в случае, когда его размеры достигли $2,5 \div 3$ мм. При такой величине просматривается достаточно хорошее отклонение «ведущих» частот собственных колебаний обозначенных ранее форм от эталонной лопатки.

Также, для уменьшения относительной погрешности и вероятности дачи ложных показаний следует перейти к безразмерным параметрам виброакустических сигналов и размеров повреждений.

■ -15--13 ■ -13--11 ■ -11--9 ■ -9--7 ■ -7--5 ■ -5--3 ■ -3--1 ■ -1-1 ■ 1-3 ■ 3-5 ■ 5-7 ■ 7-9 ■ 9-10

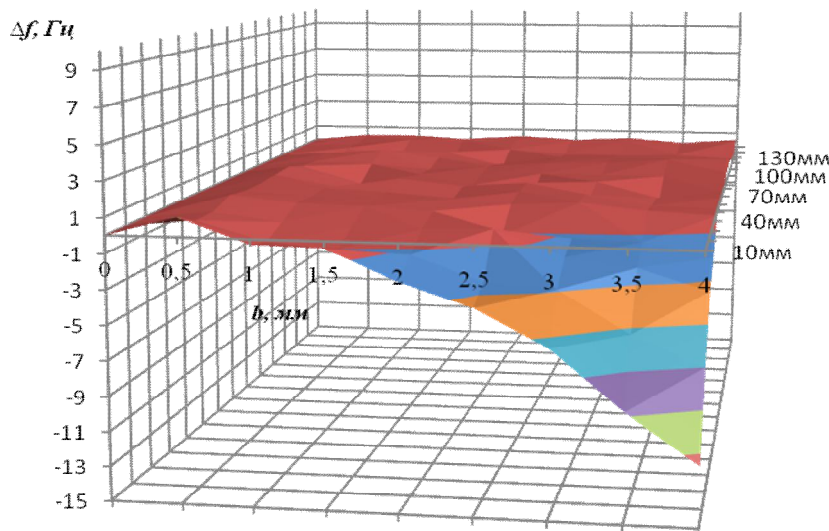


Рис. 5. Влияние забоины на 4 форму собственных колебаний лопатки

Литература

1. Багерман А.З. Формирование диагностических признаков неисправности проточной части однокомпрессорного ГТД / А.З. Багерман, И.П. Леонова, В.Н. Шитков // Газотурбинные технологии. – 2011. – Вып. 4. – С. 24-26.

2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 596 с.

3. Грицин А.В. Исследование и нормирование допустимых забоин на рабочих лопатках компрессора на примере двигателя НК-12 / А.В. Грицин, Е.П. Кочеров, А.П. Ремпель, В.А.Самойлов // Вестн. СГАУ. – 2009. – Вып. 9(13). – Ч.3. – С. 221-229.

4. Ившин И.В. Диагностика рабочих лопаток турбины ГТД новым виброакустическим способом / И.В. Ившин // Изв. вузов Авиац. техника. – 2009. – № 4. – С. 60-63.

5. Кашиковский В.В. Методика прогнозирования прочностных свойств крыла самолета / В.В. Кашиковский // Изв. вузов Авиац. техника. – 2009. – №4. – С. 15-17.

6. Крюков С.В. Вибродиагностика технического состояния деталей ГТД на основе исследования их собственных форм колебаний: автореф. дис... канд. тех. наук: 05.07.05 / Крюков Сергей Вячеславович. – Рыбинск: РГАТА, 2008. – 16 с.

7. Михайлов А.Л. Проектирование и вибродиагностика деталей ГТД на основе исследования объемного напряженно-деформированного состояния / А.Л. Михайлов. – Рыбинск: РГАТА, 2005. – 216 с.

8. Чигрин В.С. К вопросу об оценке влияния эксплуатационных повреждений рабочих лопаток компрессоров авиационных ГТД на частоты их собственных колебаний / В.С. Чигрин, Ан.В. Чигрин, Ал.В. Чигрин // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. / под. ред. В.С. Кривцова. – Х.: ХАИ, 1998. – Вып. 5. – С. 310-312.

Поступила в редакцию 30.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры А.В. Амбражевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ВПЛИВ ДЕФЕКТУ ТИПУ «ЗАБОЇНА» НА ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА

Є.В. Марценюк, О.І. Гаркуша, В.С. Чигрин

Розробка методів, що дозволяють з високою достовірністю діагностувати як втомне пошкодження деталей ГТД, так і ступінь деградації механічних властивостей матеріалу від температурно-силового впливу в процесі експлуатації є актуальним завданням. У представленій роботі наведені результати експериментальних і розрахункових досліджень впливу пошкоджень типу «забоїна» на частоту власних коливань лопатки. Розглянуто частотні характеристики лопатки компресора з різними ушкодженнями. Розроблена твердотільна модель лопатки. У ході порівняння результатів аналітичного визначення частотних характеристик з експериментальними даними було проведено відлагодження моделі. Відзначено, що існує певний розмір ушкоджень, при якому спостерігається досить гарне відхилення «повідних» частот власних коливань розглянутих форм від частот коливань еталонної лопатки.

Ключові слова: частота власних коливань, частотна характеристика, забоїна, лопатка, дефект, твердотільна модель.

THE INFLUENCE OF DEFECT, SUCH AS "NICK" ON FREQUENCY CHARACTERISTICS OF COMPRESSOR'S WORKING BLADES

E.V. Martsenyuk, A.I. Garkusha, V.S. Chigrin

Development of methods to diagnose fatigue damage of GTE parts and the degradation rate of the mechanical properties because of temperature-force influence during maintenance with high reliability is an actual problem. In this paper the results of experimental and theoretical studies of the damages influence, such as "Nick", on the blade's eigenfrequencies are presented. The frequency characteristics of compressor blade were considered with various damages. Solid model of the blade was designed. While comparing the results of analytical determination of the frequency characteristics with the experimental data debugging of the model was performed. It was noted that there is definite value of damages, which can be clearly seen in rejection of "leading" eigenfrequencies of the reference blade considered forms.

Key words: eigenfrequencies, frequency characteristic, nick, blade, defect, solid model.

Марценюк Евгений Викторович – асс. кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ev_martsen@mail.ru.

Гаркуша Александр Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: algar@vk.kharkov.ua.

Чигрин Валентин Семенович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: chigrin_vs@rambler.ru.