

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ РАБОЧИХ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2012 Н. Е. Никитина, Е. А. Мотова, Ю. П. Тарасенко

Нижегородский филиал Института машиноведения имени А.А. Благоднарова РАН

Приведены результаты неразрушающего контроля рабочих лопаток осевого компрессора авиационного газотурбинного двигателя. Экспериментальные исследования проведены с использованием ультразвукового эхо-метода. Продемонстрированы возможности неразрушающего акустического метода контроля материала лопаток при нанесении полифункциональных покрытий нитрида титана.

Неразрушающий контроль, скорости упругих волн, акустическая анизотропия, коэффициент затухания ультразвуковых волн, авиационные двигатели, компрессорные лопатки.

Введение

За последнее время методы неразрушающего контроля [1,2] находят большое применение в различных отраслях промышленности, в том числе и авиационной. Компрессорные лопатки являются наиболее ответственными деталями авиационного двигателя. Для обеспечения их надёжности и работоспособности на различных этапах изготовления и эксплуатации можно применить ультразвуковые методы. Важнейшими информативными характеристиками методов являются затухание и скорость распространения ультразвуковых волн в конструкционном материале. Для их оценки применяется импульсный эхо-метод [3, 4].

Ультразвуковой эхо-импульсный метод неразрушающего контроля использован для контроля структурного состояния материала рабочих компрессорных лопаток авиационного двигателя серии НК из жаропрочного сплава ЭИ 961.

Проведение исследования

Объектами исследования являются рабочие лопатки авиационного двигателя на двух стадиях изготовления и эксплуатации. На первом этапе исследованы новые лопатки без защитного покрытия, обозначенные нами как 1Н, 2Н, 3Н, и они же (1НП, 2НП; 3НП), но с нанесённым ионно-плазменным полифункциональным покрытием нитрида титана (TiN) [5, 6]. На втором этапе исследованы восстановленные лопатки после отработки гарантийного ресурса (9000 часов) (1Р, 2Р, 3Р), и они же – с покрытием TiN (1РП, 2РП; 3РП).

Экспериментальные исследования выполнены ультразвуковым эхо-методом с использованием акустического стенда [7]. Акустический стенд, представленный на рис. 1, работает следующим образом. Генератор электрических импульсов вырабатывает опорный импульс, который поступает на блок формирования и усиления импульсов (БФУ). Электрический импульс в БФУ преобразуется в видеоимпульс, усиливается до 10-20 В и поступает на пьезопластину преобразователя. В пьезопластине возникают переменные деформации с частотой, определяемой её толщиной. С применением контактной жидкости можно добиться проникновения этих колебаний в исследуемый материал. Упругие колебания, возникшие на поверхности материала, распространяются и многократно отражаются от противоположной поверхности образца. При встрече упругого импульса с поверхностью пьезопластины происходит его преобразование в электрический сигнал. Электроакустический преобразователь, состоящий из пьезопластины с демпфером, и возбуждает колебания, и принимает отраженные импульсы. Эхо-импульсы, преобразованные им в электрические сигналы, поступают на вход осциллографа. Для того, чтобы увидеть эхо-импульс на экране осциллографа, используется амплитудный ограничитель и усилитель электрических сигналов. Амплитудный ограничитель служит для уменьшения на экране осциллографа амплитуды импульса возбуждения, а усилитель - для усиления эхо-импульсов.

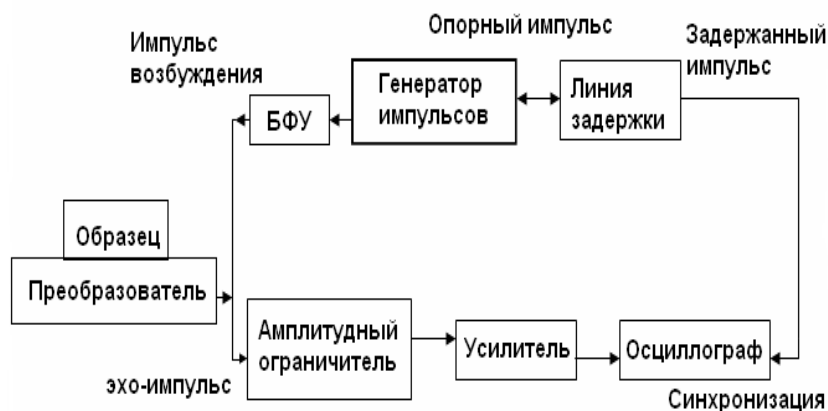


Рис. 1. Акустический стенд для реализации эхо-метода

Опорный импульс также подаётся с генератора электрических импульсов на вход синхронизации осциллографа для того, чтобы развёртка запускалась всякий раз, когда появляется опорный импульс. При большом времени развёртки на экране осциллографа видны излученный и отраженные импульсы. Для того чтобы увидеть конкретный эхо-импульс, синхронизация осуществляется от опорного импульса, задержанного в линии задержки. Линия задержки - это устройство, позволяющее разносить во времени один электрический сигнал относительно другого. В качестве первого электрического сигнала используется опорный импульс, а в качестве второго - он же, но задержанный на определённое время.

В состав стенда входит серийный прибор - измеритель временных интервалов И2-26, состоящий из блока измерителя временных сдвигов (ИВС) и блока индикатора; блока формирования и усиления импульсов (БФУ) оригинальной конструкции, блока питания БФУ.

Для каждой стадии наработки испытуемых деталей проведены акустические измерения, а именно: измерения коэффициента затухания продольных и сдвиговых волн частотой 7 и 9,5 МГц, соответственно; прецизионные измерения времени распространения (задержки в материале) импульсов продольных волн; прецизионные измерения задержек импульсов сдвиговых волн взаимно-перпендикулярной поляризации.

Для контроля лопаток применены контактные пьезопреобразователи оригинальной конструкции. Распространение

сдвиговых и продольных волны - по нормали к поверхности лопатки. Контролю подвергалась наиболее опасная с точки зрения нагружения при эксплуатации зона пера лопатки вблизи галтели.

По результатам измерений вычислены параметры собственной анизотропии материала, значения коэффициентов затухания объемных упругих волн и скоростей волн в области контроля.

Полученные результаты

По результатам измерения задержек импульсов сдвиговых волн вычислены параметры акустической анизотропии материала рабочих лопаток (табл. 1):

$$a_0 = \frac{t_2 - t_1}{t_{cp}} \times 100\%,$$

где t_1 - задержка импульса упругой сдвиговой волны, поляризованной вдоль оси лопатки; t_2 - задержка импульса упругой сдвиговой волны, поляризованной поперек оси лопатки.

На рис. 2 представлены результаты вычисления коэффициента затухания α_3 продольных волн, коэффициента затухания α_1 сдвиговой волны, параллельной оси лопатки поляризации, величины α_2 для волн, перпендикулярной к направлению оси детали поляризации.

Скорости продольных и сдвиговых волн в материале лопатки вычисляются по формуле:

$$V_i = \frac{2(n-1)h}{t_i} (i=1,2,3),$$

где V_1, V_2 - скорости сдвиговых волн параллельной и перпендикулярной оси лопатки поляризации; V_3 - скорость продольных волн; n - номер последнего из хорошо раз-

личимых эхо-импульсов, h - толщина лопатки; t_i - разница показаний линии задержки при привязке по фазе к первому и последнему из хорошо различимых эхо-импульсов.

Таблица 1. Собственная акустическая анизотропия материала рабочих лопаток

№ образца	1Н	2Н	3Н	1НП	2НП	3НП
$a_0, \%$	$0,55 \pm 0,3$	$1,35 \pm 0,15$	$0,31 \pm 0,3$	$0,4 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,3$	$0,6 \pm 0,2$
№ образца	1Р	2Р	3Р	1РП	2РП	3РП
$a_0, \%$	$-(0,75 \pm 0,3)$	$0,96 \pm 0,4$	$0,25 \pm 0,3$	$0,6 \pm 0,2$	$-(0,4 \pm 0,3)$	$-(0,4 \pm 0,3)$

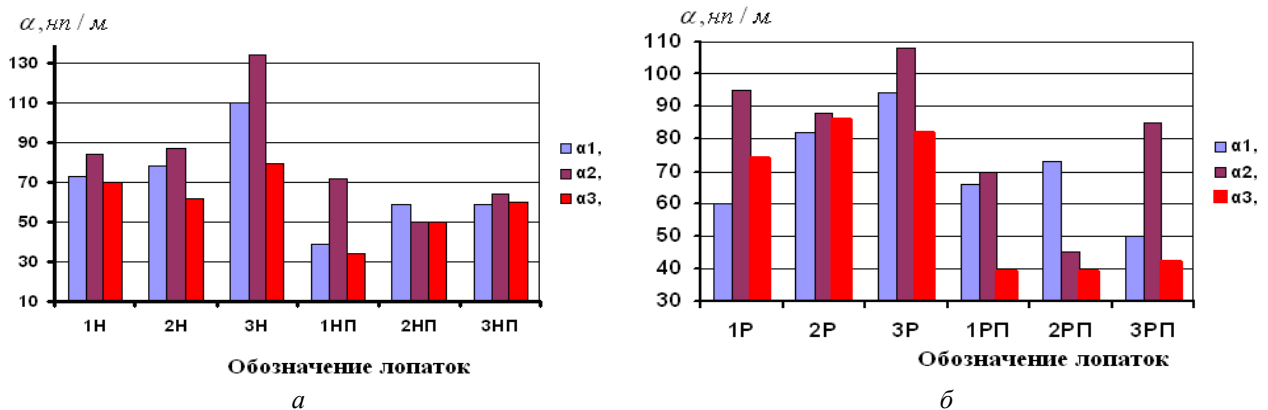


Рис.2. Коэффициент затухания сдвиговых и продольных волн в материале лопаток: а - не работавших без покрытия (1Н, 2Н, 3Н) и с покрытием (1НП, 2НП, 3НП); б - без покрытия после эксплуатации (1Р, 2Р, 3Р) и с покрытием (1РП, 2РП, 3РП)

Толщина образцов исследуемых лопаток принята равной 5,2 мм.

Точность определения скорости упругих волн определяется погрешностью измерения толщины материала в области контроля. Поскольку обе поверхности лопатки неплоские, принята погрешность измерения толщины равной 0,1 мм. Тогда относительная погрешность измерения скорости объемных упругих волн составит 0,015. Для сдвиговых волн абсолютная погрешность равна 50 м/с, а продольных волн – 90 м/с.

Скорость распространения ультразвука – акустическая характеристика, которую можно измерить на реальных изделиях, в рассматриваемом случае – на компрессорных лопатках. Она также является важной информативной характеристикой акустических методов контроля и диагностики конструкционных материалов. Результаты определения величин V_1, V_2, V_3 в исследованном сплаве ЭИ 961 на разных стадиях эксплуатации приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Скорости распространения объемных упругих волн для образцов 1Н, 2Н, 3Н и 1НП, 2НП, 3НП

Скорость, м/с	Образец					
	1Н	2Н	3Н	1НП	2НП	3НП
V_1	3380	3268	3310	3294	3299	3312
V_2	3375	3330	3335	3377	3271	3293
V_3	6140	5911	6277	6126	6013	6096

Таблица 3. Скорости распространения объёмных упругих волн для образцов 1Р, 2Р, 3Р и 1РП, 2РП, 3РП

Скорость, м/с	Образец					
	1Р	2Р	3Р	1РП	2РП	3РП
V_1	3164	3197	3225	3169	3148	3168
V_2	3199	3166	3237	3149	3161	3190
V_3	5800	5812	5901	6001	5897	5917

Результаты исследования

1. Коэффициент затухания сдвиговых волн α_1 для волн перпендикулярной направлению оси лопатки поляризации и коэффициент затухания продольных волн α_3 оказались наиболее информативными акустическими параметрами структурного состояния материала лопаток.

2. Судя по величине параметра акустической анизотропии, лопатки изготовлены штамповкой. Для таких материалов этот параметр невелик, а структурные составляющие не имеют ярко выраженной преимущественной ориентации. Например, отрицательная величина параметра акустической анизотропии новых лопаток после нанесения на них покрытия меняет знак, а для восстановленных лопаток после ремонта уменьшается.

3. Нанесение покрытия не ухудшает эксплуатационных свойств материала лопаток.

4. Выявлены перспективные возможности применения неразрушающего контроля при нанесении ионно-плазменных покрытий, а также для изучения процессов старения и деградации материала компрессорных лопаток авиационных двигателей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления №218 от 09.04.2010 г. в сотрудничестве с научными коллективами ОАО «Кузнецов» и СГАУ и частичной финансовой поддержке РФФИ (код проекта 10-08-01108-а).

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль и диагностика [Текст] / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин,

В.Н. Филиппов [и др.] - М.: Машиностроение, 1995. - 488 с.

2. Ботаки, А.А. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов [Текст] / А.А. Ботаки, В.Л. Ульянов, А.В. Шарко - М.: Машиностроение, 1983. - 80 с.

3. Никитина, Н.Е. Влияние собственной анизотропии материала на точность измерения напряжений методом акустоупругости [Текст] / Н.Е. Никитина // Дефектоскопия, 1996. - № 4. - С. 77-85.

4. Мотова, Е.А. О возможности ультразвукового контроля компрессорных лопаток после эксплуатации и ремонта [Текст] / Е.А. Мотова, Н.Е. Никитина // Вестн. СамГТУ. Технические науки – Самара: - 2011. - Вып. 3(27). – Ч. 2. - С. 52-56.

5. Исследование физико-химических и коррозионных свойств ионно-плазменных покрытий нитрида титана [Текст] / Е.А. Федорова, И.Н. Царева, Ю.П. Тарасенко [и др.] // Физика и химия обработки материалов, 2006. - № 4. - С. 42-45.

6. Ю.П. Структура и физико-механические свойства оптимизированных ионно-плазменных покрытий нитрида титана для модернизации компрессорных лопаток авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / Ю.П. Тарасенко, И.Н. Царева [и др.] // Прикладная механика и технологии машиностроения: Сб. науч. тр. - Н. Новгород: Изд-во об-ва «Интелсервис», 2010. - № 2(17). - С. 19-29.

7. Моничев, С.А. Ультразвуковой эхометод исследования упругих свойств твердых тел [Текст] / С.А. Моничев, Н.Е. Никитина // Препринт № 24-04-03/ Нф ИМАШ РАН. - Н. Новгород, 2004. - 22 с.

NONDESTRUCTIVE TESTING OF THE WORKING COMPRESSOR BLADES OF THE AVIATION ENGINE

© 2012 N. Ye. Nikitina, E. A. Motova, U. P. Tarasenko

A. A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod branch

The results of nondestructive testing of blades of axial compressor of aviation engine of gas-pumping unit are represented. The experimental investigations were based on ultrasonic pulse-echo method. The opportunities of the nondestructive acoustical method for the studying of the steel structure during the exploitation of blades are demonstrated.

Nondestructive testing, the speed of ultrasound attenuation coefficient, compressor blades.

Информация об авторах

Никитина Надежда Евгеньевна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. E-mail: wvs@dynamo.nnov.ru. Область научных интересов: волновые процессы, неразрушающие методы контроля, акустоупругость.

Мотова Елена Алексеевна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. E-mail: motik-1@mail.ru. Область научных интересов: неразрушающие методы контроля.

Тарасенко Юрий Павлович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: ионно-плазменные полифункциональные покрытия нитрида титана.

Nikitina Nadezhda Yevgenevna, Doctor of technical Sciences, Moderator Scientific Researcher, A.A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences. E-mail: wvs-dynamo@mail.ru. Area of research: wave processes, non-destructive methods of control, akustouprugost.

Motova Elena Alekseevna, Candidate of technical Sciences, Associate Professor, Senior researcher, A.A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences. E-mail: motik-1@mail.ru. Area of research: non-destructive methods of control.

Tarasenko Uriy Pavlovish, Candidate of physico-mathematical sciences, manager of the laboratory, A.A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of research: polyfunctional coating of nitride of titanium.