

О ВОЗМОЖНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТА

©2011 Е. А. Мотова, Н. Е. Никитина

Нижегородский филиал Учреждения Российской академии наук
Института машиноведения им. А.А. Благодрава

Приведены результаты неразрушающего контроля лопаток осевого компрессора газотурбинного двигателя газоперекачивающего агрегата. Экспериментальные исследования проведены с использованием ультразвукового эхо-метода. Продемонстрированы возможности неразрушающего акустического метода изучения структуры стали при эксплуатации лопаток.

Неразрушающие методы контроля, скорость распространения волн, коэффициент затухания, компрессорные лопатки.

Методы неразрушающего контроля, в том числе ультразвуковые, основанные на измерении характеристик упругих волн и волновых пакетов, зондирующих испытуемый материал, получают все большее и большее распространение в различных отраслях промышленности. В настоящее время они широко применяются на различных этапах изготовления, ремонта и эксплуатации деталей машин и конструкций [1]. Важнейшими информативными характеристиками ультразвукового метода являются затухание и скорость распространения акустических волн в конструкционных материалах. Для их измерения наиболее часто применяется импульсный эхо-метод [2, 3].

Ультразвуковой эхо-импульсный метод неразрушающего контроля использован нами для контроля состояния материала рабочих деталей из нержавеющей стали марки 12Х13. Объекты нашего исследования - лопатки пятой ступени осевого компрессора газотурбинного двигателя ГТК-25И газоперекачивающего агрегата - были изготовлены из этого материала. Компрессорные лопатки газотурбинных двигателей являются наиболее ответственными деталями газоперекачивающих агрегатов. При длительной эксплуатации в результате усталости металла, коррозионного и эрозионного воздействия среды изменяются структура и физико-механические свойства материала лопаток, влияющие на их работоспособность.

В работе исследованы лопатки после трех стадий эксплуатации и ремонта: до ре-

монта после 50 тысяч часов работы (5.1); непосредственно после ремонта с покрытием нитридом титана TiN (5.2); после ремонта с покрытием нитридом титана и 50 тысяч часов эксплуатации (5.3). Поскольку все лопатки, имевшиеся в нашем распоряжении, проработали как минимум 50 000 часов, то в качестве примера «неработавшей» лопатки мы взяли лопатку 4-й ступени, подвергающуюся при работе компрессора наименьшим нагрузкам. В дальнейшем, с этими оговорками, дадим ей обозначение 5.0.

Лопатки, проработавшие 50 000 часов в условиях сурового климата, были восстановлены сотрудниками ООО НПЦ «Трибоника» путем нанесения ионно-плазменного покрытия нитрида титана [4, 5]. Восстановленные лопатки проработали еще 50 000 часов.

Экспериментальные исследования выполнены ультразвуковым эхо-методом с использованием акустического стенда [6]. 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 ее 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.

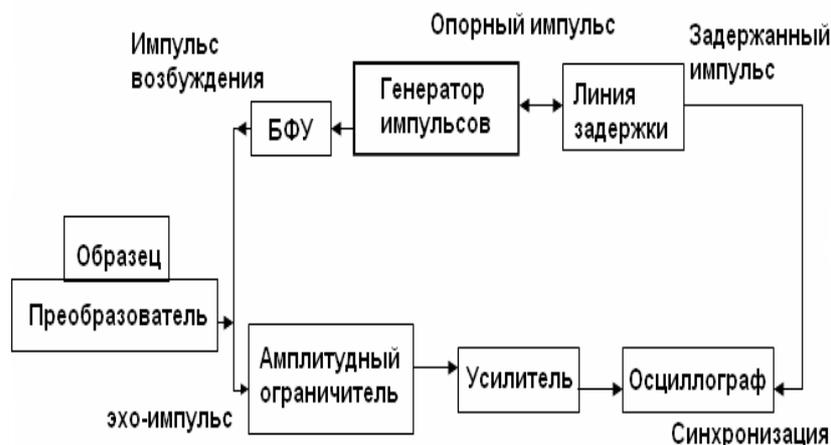


Рис. 1. Акустический стенд для реализации эхо-метода

Опорный импульс также подается с генератора электрических импульсов на вход синхронизации осциллографа для того, чтобы развертка запускалась всякий раз, когда появляется опорный импульс. При большом времени развертки на экране осциллографа видны излученный и отраженный 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 определенное время.

В состав стенда входят 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, блок 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.

Контролю подвергалась область вблизи основания пера лопатки, в средней ее части. Датчики ультразвуковых колебаний притирались к поверхности детали с помощью контактной жидкости (эпоксидная смола без отвердителя). Продольные и сдвиговые волны распространялись по нормали к поверхности лопаток. По результатам измерений вычислены значения коэффициентов затухания объемных упругих волн, скоростей волн и параметры собственной анизотропии материала в области контроля.

По результатам измерения задержек импульсов сдвиговых волн (табл. 1) были вычислены параметры акустической анизотропии (рис. 2) материала рабочих лопаток:

Таблица 1. Время распространения импульсов сдвиговых волн

№ образца	5.0	5.1	5.2	5.3
t_1 , мкс	8,39	7,37	7,53	7,125
t_2 , мкс	8,43	7,55	7,36	7,24

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

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

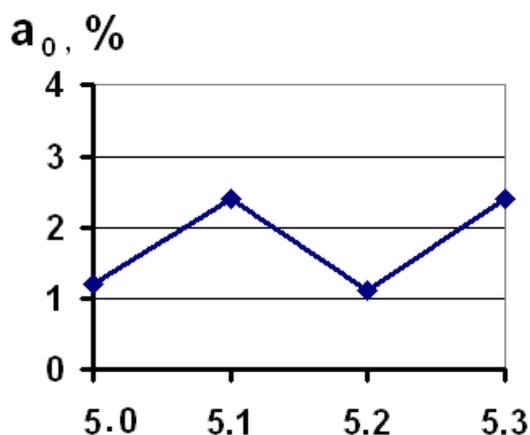


Рис. 2. Собственная акустическая анизотропия материала рабочих лопаток

На рис. 3 представлены результаты вычисления коэффициента затухания α_3 продольных волн (ромбы), коэффициента затухания α_1 сдвиговой волны параллельной оси лопатки поляризации (кружки), величины α_2 для волн перпендикулярной к направлению оси детали поляризации (квадраты).

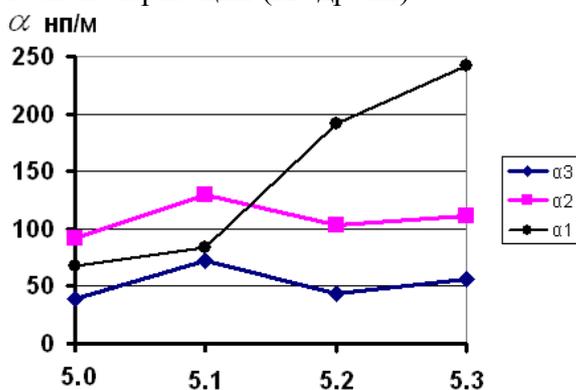


Рис. 3. Значения коэффициента затухания продольных и сдвиговых волн

Скорость распространения звука (ультразвука) также является важной информативной характеристикой акустических методов контроля и диагностики конструкционных материалов. При использовании импульсного метода возбуждения и приема акустических колебаний среды весьма заметно влияние внутренней структуры металлов и сплавов на распространение в них упругих волн мегагерцевого диапазона частот (миллиметровые волны) [7]. Микроструктура материала оказывает существенное влияние на результаты прецизионных измерений скорости ультразвука, несмотря на то, что размеры структурных составляющих обычных конструкционных материалов существенно меньше длины волны ультразвука. Тем более это заметно при возникновении пластической деформации, необратимых изменений структуры материала, обусловленных действием различных факторов при эксплуатации материала в составе конструкции (в нашем случае компрессорной лопатки газотурбинного двигателя).

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

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

где V_1, V_2 - скорости сдвиговых волн параллельной и перпендикулярной оси лопатки поляризации; V_3 - скорость продольных волн; n - номер последнего из хорошо различимых эхо-импульсов, h - толщина лопатки; t_i - разница показаний линии задержки при привязке к первому и последнему эхо-импульсу ($i=1,2,3$).

Толщина образцов исследуемых компрессорных лопаток 5.1, 5.2 и 5.3 принята равной 0,0625 м, а «неработавшей» лопатки 5.0 $h=0,0685$ м.

В табл. 2 приведены результаты определения скоростей сдвиговых волн V_1 и V_2 , а также скорости продольной волны V_3 .

Таблица 2. Результаты определения скоростей распространения объемных упругих волн

№ образца	5.0	5.1	5.2	5.3
V_1 , м/с	3361	3367	3364	3423
V_2 , м/с	3319	3306	3371	3357
V_3 , м/с	5957	6015	6073	5880

Точность определения скорости упругих волн определяется погрешностью измерения толщины материала в области контроля. Поскольку обе поверхности лопатки неплоские, мы приняли погрешность измерения толщины равной 0,001 м. Таким образом, погрешность измерения скорости объемных волн равна 0,015. Для сдвиговых волн абсолютная погрешность равна 50 м/с, а для продольных волн 90 м/с. Следовательно, все изменения скоростей упругих волн находятся в пределах погрешности измерений.

По результатам наших экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент затухания и скорость распространения продольных, а особенно сдвиговых упругих волн, весьма чувствительны к изменениям технического состояния материала в процессе его эксплуатации и ремонта.

2. Монотонное увеличение (в 3 раза) коэффициента затухания сдвиговой волны, поляризованной параллельно оси лопатки, говорит о возможности возникновения расслоений и микротрещин, ориентированных в плоскости, перпендикулярной оси лопатки.

3. Изменение параметра акустической анизотропии материала рабочих лопаток 5-й ступени указывает на возможность возникновения пластической деформации вдоль оси лопатки при ее эксплуатации.

4. В результате экспериментов выявлены перспективные возможности применения неразрушающего ультразвукового контроля для изучения процессов старения и деградации материала компрессорных лопаток газотурбинных двигателей.

Авторы статьи выражают признательность и благодарность генеральному дирек-

тору ООО НПЦ «Трибоника» канд. физ.-мат. наук Тарасенко Ю.П. и начальнику ОТК канд. физ.-мат. наук Царевой И.Н. за предоставленные для исследований компрессорные лопатки различных стадий наработки.

Работа выполнена при 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. Применение ультразвука для неразрушающего контроля напряжений в судостроительных сталях [Текст] / Н.Е. Никитина, О.В. Кулизина // Вестн. ВГАВТ, 2010. - С. 164-168.
4. 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.
5. 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, Л.А. Кривина [и др.] // Прикладная механика и технологии машиностроения. сб. науч. трудов. - Н. Новгород: Изд-во об-ва «Интелсервис», 2010. № 2(17). - С. 19-29.
6. 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.
7. Nikitina, N.Ye. On the Specifics of Measuring Attenuation and Velocity of Ultrasound in Media with Microstructure [Text] / N.Ye. Nikitina // Acoustical Physics. 2010. Vol. 56. No 6. - P. 919-923.

THE POSSIBILITY OF ULTRASONIC TESTING OF COMPRESSOR BLADES AFTER EXPLOITATION AND REPAIR

© 2011 E. A. Motova, N. Ye. Nikitina

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 gas-turbine 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

Мотова Елена Алексеевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Нижегородского филиала Учреждения Российской академии наук Института машиноведения им. А.А. Благонравова. E-mail: motik-1@mail.ru. Область научных интересов: неразрушающие методы контроля.

Никитина Надежда Евгеньевна, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Нижегородского филиала Учреждения Российской академии наук Института машиноведения им. А.А. Благонравова. E-mail: wvs-dynamo@mail.ru. Область научных интересов: волновые процессы, неразрушающие методы контроля, акустопругость.

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.

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.