

Таблица 3

Сравнение расчетных случаев по Правилам РРР и расчетам динамики движения

Нагрузки	Район максимальных напряжений	Значение максимальных напряжений, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Коэффициент запаса, n
По РРР	В обшивке днища	135	141,1	1,05
	В ребрах днища	75	166,7	2,22
По расчётам динамики движения	В обшивке днища	64	141,1	2,24
	В ребрах днища	47	166,7	3,55

Список литературы:

- [1] Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания» Российского Речного Регистра Судоходства т. 2, изд. 2008 г.
 [2] Справочник по строительной механике корабля т. 1–3, под редакцией акад. Ю.А. Шиманского. Л. «Судпромгиз», 1958–1960 гг.
 [3] Войткунский Я.И., Фаддеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика, Л.: Судостроение, 1982.

Е.А. Мотова, Н.Е. Никитина
 ФГБУН Институт проблем машиностроения РАН

**УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ МАТЕРИАЛА
 КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК ЭХО-МЕТОДОМ**

Рабочие компрессорные лопатки являются наиболее ответственными деталями газотурбинного двигателя (ГТД) типа MS5142 газоперекачивающего агрегата ГТК-25И. Они работают в весьма сложных условиях, подвергаясь воздействию повышенных температур (~300 °С), изгибных и растягивающих напряжений, в условиях повышенной влажности и запыленности. В результате такой эксплуатации материал лопаток испытывает как объемные, так и поверхностные структурные изменения, приводящие к снижению прочностных характеристик, что ограничивает их дальнейшую работоспособность.

В настоящее время традиционные способы увеличения ресурса работы узлов и деталей машин, например, химико-термическая обработка, часто являются экономически невыгодными, так как требуют использования дорогостоящих и дефицитных элементов (хром, молибден, ванадий, титан, никель и др.) и высоких энергозатрат. Вследствие этого целесообразным является создание на рабочих поверхностях деталей упрочняющих и защитных покрытий с повышенными прочностными и антикоррозионными свойствами. Специалистами ООО НПЦ «Трибоника» разработаны и успешно применяются восстановительно-ремонтные технологии с применением ионно-плазменных покрытий [1] с целью продления срока службы деталей проточной части ГТД.

В настоящее время все большее применение в различных областях промышленности на различных стадиях изготовления, эксплуатации и ремонта находят акустические методы неразрушающего контроля (НК) и диагностики. Акустический метод исследования заключается, в основном, в измерении важнейших информативных характеристик – затухания и скорости распространения упругих волн в материале и

анализе экспериментально полученных зависимостей. Наиболее распространенным в практике ультразвукового (УЗ) контроля изделий различного назначения можно считать эхо-импульсный метод. Около 90% объектов, контролируемых акустическими методами, проверяют эхо-методом.

Большой информативностью при исследовании состояния твердых тел обладают сдвиговые упругие волны. В частности, при возникновении напряжений или пластической деформации вдоль данного направления скорости сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек этого направления будут различны.

Цель работы – изучение акустических свойств основного металла компрессорных лопаток для выяснения влияния на его структурное состояние восстановительной термообработки и нанесенного покрытия нитрида титана (TiN), а также длительной эксплуатации в составе ГТД.

Ультразвуковой эхо-метод неразрушающего контроля применен нами для контроля состояния материала рабочих лопаток из нержавеющей стали 12Х13. Контролю подвергались рабочие лопатки пятой ступени компрессора, а именно: до ремонта после пятидесяти тысяч часов эксплуатации (5.1); после восстановления с покрытием нитридом титана TiN (5.2) и последующей эксплуатации в течение пятидесяти тысяч часов (5.3). В качестве «эталонной» лопатки использовали новую лопатку (5.0).

Блок-схема акустического стенда для определения затухания и скорости ультразвуковых продольных и сдвиговых волн описана в работах [2, 3]. Для каждой серии испытуемых деталей проведены акустические измерения, а именно: измерения ослабления в материале амплитуды эхо-импульсов продольных и сдвиговых волн частотой 7 и 9,5 МГц соответственно; прецизионные измерения времени распространения импульсов продольных, а также сдвиговых волн взаимно-перпендикулярной поляризации. Распространение сдвиговых и продольных волны – по нормали к поверхности лопатки. Контролю подвергалась средняя часть вблизи основания пера лопатки. По результатам измерений определены: коэффициенты затухания α_1 сдвиговых волн параллельной оси лопатки поляризации, величины α_2 для волн перпендикулярной поляризации, коэффициенты затухания α_3 продольных волн; значения скоростей объемных волн, относительная разница скоростей сдвиговых волн взаимно-перпендикулярной поляризации.

Коэффициентом затухания объемных упругих волн в материале считали среднюю величину из трех возможных комбинаций амплитуд трех первых четко различимых эхо-импульсов, а именно:

$$\alpha_{m-n} = \frac{\ln A_m / A_n}{2(n-m) \cdot h}, \dots (m = 1, 2; n = 2, 3) \quad (1)$$

где A_m – величина максимальной амплитуды m -го эхо-импульса;

A_n – величина максимальной амплитуды n -го эхо-импульса;

h – толщина лопатки, в метрах.

На рис. 1 представлены результаты оценки коэффициента затухания α_1 сдвиговой волны параллельной оси лопатки поляризации, величины α_2 для волн перпендикулярной к направлению оси детали поляризации и величины α_3 для продольных волн.

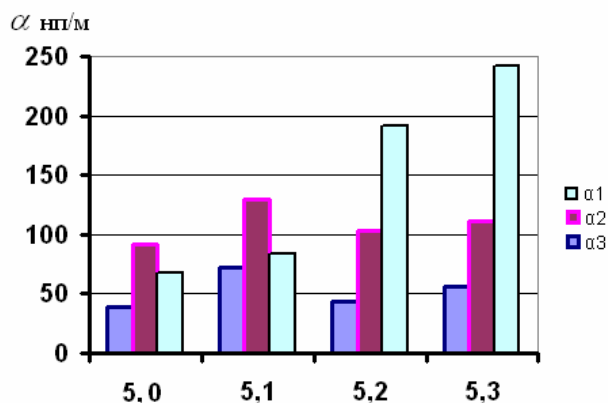


Рис. 1. Коэффициенты затухания продольных и сдвиговых волн в материале лопаток

Скорости продольных и сдвиговых волн вычисляются по результатам измерений задержки импульса в материале следующим образом:

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

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 между выбранными реперными точками в первом и последнем из хорошо различимых эхо-импульсов.

По результатам измерения задержек импульсов сдвиговых волн были вычислены параметры акустической анизотропии материала рабочих лопаток компрессора:

$$a_0 = \frac{t_2 - t_1}{t_{cp}} \times 100\%, \quad (3)$$

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

Погрешность определения величины a_0 по результатам измерения временного интервала между первым и третьим эхо-импульсами составила 0,3%. В таблице приведены результаты определения скоростей V_3, V_2, V_1 в стали 12X13, а также параметры акустической анизотропии.

Поскольку обе поверхности лопатки неплоские, мы приняли погрешность измерения толщины равной 0,05 мм, то есть 0,8% для самой тонкой лопатки. Погрешность измерения задержки импульсов упругих волн в материале составляет 0,01 мкс, при базе измерения 4–8 мкс (видно 2–3 эхо-импульса) относительная погрешность составит 0,2–0,3% – гораздо меньшую величину.

Параметры распространения объемных упругих волн в материале лопаток

№ образца	5.0	5.1	5.2	5.3
$h, \text{мм}$	6,95	6,25	6,25	6,00
$V_3, \text{м/сек}$	6043	6035	6075	6045
$V_2, \text{м/сек}$	3296	3300	3365	3299
$V_1, \text{м/сек}$	3388	3381	3387	3377
$\alpha_0, \%$	1,3	2,4	0,7	2,3

Точность определения скорости упругих волн определяется в основном погрешностью измерения толщины материала и может быть принята равной 1%, то есть для сдвиговых волн 35 м/с, а для продольных волн 60 м/с. Таблица показывает, что все значения скоростей волн фактически находятся в пределах погрешности акустических измерений. В то же время параметры акустической анизотропии материала исследованных лопаток отличаются более существенно.

Выводы:

1. Коэффициент затухания сдвиговых волн, поляризованных параллельно оси лопатки, весьма чувствителен к изменениям структурного состояния материала в процессе его эксплуатации и восстановления.
2. Параметр собственной акустической анизотропии может выступать информативным параметром при контроле состояния компрессорных лопаток
3. В результате экспериментов выявлены перспективные возможности применения неразрушающего ультразвукового контроля изменения структурного состояния материала компрессорных лопаток газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации и восстановительного ремонта с нанесением износостойкого покрытия нитрида титана.

Список литературы:

- [1] Царева И.Н., Бердник О.Б., Разов Е.Н. Разработка технологии продления ресурса турбинных лопаток из сплава ХН65ВМТЮ // Вестник Самарского государственного Аэрокосмического университета. 2011. № 3(27). Часть 2. С. 240–247.
- [2] Моничев С.А., Никитина Н.Е. Ультразвуковой эхо-метод исследования упругих свойств твердых тел. Препринт № 24-04-03/Нф ИМАШ РАН. Н. Новгород, 2004. 22 с.
- [3] Мотова Е.А., Никитина Н.Е. О возможности ультразвукового контроля компрессорных лопаток после эксплуатации и ремонта // Вестник СГАУ. 2011. Вып. 3(27). Часть 2. С. 52–56.

Н.Е. Никитина, Е.А. Мотова

ФГБУН Институт проблем машиностроения РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ЭХО-МЕТОДОМ ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

При однократном приложении большой статической нагрузки в металлах и сплавах может возникнуть вязкое, квазихрупкое и хрупкое разрушение. Вязкому разрушению предшествует большая пластическая деформация, на него затрачивается большая