

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РОТОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С.Р. Игнатович, д-р техн. наук, проф.,

Национальный авиационный университет,

Н.И. Бурау, канд. техн. наук, доцент, А.Н. Тяпченко, аспирант,

Национальный технический университет Украины "КПИ", г. Киев, Украина

Одним из наиболее теоретически исследованных и широко используемых на практике методов вибрационной и акустической диагностики элементов конструкций, машин и механизмов является низкочастотный (0-25 кГц) виброакустический метод свободных колебаний (МСК), состоящий в ударном возбуждении свободно затухающих упругих колебаний объекта диагностики (ОД) и в дальнейшем анализе их параметров и характеристик [1, 2]. Метод позволяет контролировать как элементы металлических конструкций, так и изделия из неметаллических материалов с малыми модулями Юнга и является эффективным для диагностики зарождающихся усталостных повреждений, дефектов расслоения, нарушения соединений и т.п.

В настоящее время МСК активно усовершенствуется применительно к одним из наиболее напряженных элементов авиационных газотурбинных двигателей – элементам рабочих колес. В этом направлении проведены теоретические исследования влияния усталостной трещины на характеристики измеряемого акустического сигнала, разработаны алгоритмы оценивания указанного дефекта по изменению спектральной плотности мощности (СПМ) свободных колебаний объекта, проведены выбор и анализ диагностических признаков трещины, на основании чего были разработаны алгоритмы диагностирования и оценивания относительного изменения жесткости ОД, как обобщенного параметра усталостной трещины. Эффективность использования МСК для диагностики зарождающихся усталостных трещин в лопатках рабочих колес ГТД и эффективность разработанных алгоритмов выделения и оценивания трещины иссле-

дованы путем математического и имитационного моделирования [2 - 5]. Однако для практической реализации данного метода диагностики необходимо экспериментально подтвердить работоспособность разработанных алгоритмов.

Целью настоящей работы является анализ результатов экспериментальных исследований виброакустического метода свободных колебаний для диагностики элементов рабочих колес авиационных двигателей.

Для экспериментальных исследований использовались контролируемые металлические образцы прямоугольного сечения с различными упругими характеристиками при отсутствии дефекта, при наличии концентратора дефекта и при наличии усталостной трещины. Концентратор дефекта представляет собой надрез на боковой кромке образца с относительным размером в пределах 0,03...0,05 (глубина надреза постоянна для образцов с разными геометрическими размерами и составляет $2,5 \cdot 10^{-3}$ м). Образцы с нанесенным концентратором дефекта испытывались на усталость с частотой нагрузки 10,7 Гц и общим количеством циклов 10^6 на гидропульсационной машине типа МУП 20 ± 10 в отраслевой лаборатории надежности и долговечности конструкций летательных аппаратов Национального авиационного университета. Усталостные испытания периодически прерывались для замера под микроскопом длины трещины и проведения экспериментов по МСК. Всего для экспериментальных исследований было отобрано 15 образцов из стали 5, стали 65Г (ХВГ) и алюминиевого сплава Д16. В табл. 1 приведены геометрические параметры двух образцов из указанного множества.

Таблица 1

Параметры контролируемых образцов

№ п/п	Материал	Длина, м	Ширина, м	Толщина, м
1	Д16	0,213	0,08	0,00125
2	Сталь 5	0,2495	0,0508	0,004

В процессе экспериментальных исследований использовались ударное возбуждение образцов, запись акустических сигналов, излучаемых свободными колебаниями образцов с последующей их цифровой обработкой в частотной области. Для съема, преобразования, записи и обработки акустических сигналов использовалась измерительная система, состоящая из электродинамического микрофона МД 52Б-II и персонального компьютера с применением звуковой карты SB Creative PCI128, съем информации со звуковой карты производился с помощью разработанного в среде MatLab Simulink программного обеспечения. Для каждого из состояний контролируемых образцов проведено по 10 испытаний, запись каждой реализации производилась на временном интервале 10 с, частота дискретизации составляла 10 кГц и общее количество точек в каждой выборке $N = 10^5$.

Как показали результаты теоретических исследований и модельных экспериментов, наличие усталостной трещины в ОД приводит к обогащению СПМ его свободных колебаний составляющими на высших гармониках, а в качестве диагностических признаков могут использоваться отношения СПМ основной гармоники к СПМ высших четных гармоник [3, 4]. Кроме этого, влияние трещины проявляется также в изменении коэффициентов затухания узкополосных компонент измеренного акустического сигнала. В соответствии с этим для обработки полученных акустических сигналов использовались два метода – спектральная обработка с помощью быстрого преобразования Фурье и оценивание показателей затухания компонент сигнала по методу Прони [5], который состоит в аппроксимации N-точечной выборки из множества данных суммой конечного числа ком-

плексных экспонент с последующим оцениванием параметров каждой гармонической составляющей сигнала.

Результаты спектральной обработки акустических сигналов анализировались с точки зрения изменения частоты основной гармоники и наличия спектральных составляющих на второй и четвертой гармониках для определения указанных выше диагностических признаков S_1/S_2 и S_1/S_4 . В результате использования метода Прони получаем множество частотных составляющих и соответствующих им коэффициентов затухания, в качестве диагностического признака используется значение коэффициента затухания на основной гармонике α_1 .

В табл. 2 и 3 приведены усредненные результаты обработки экспериментальных данных для указанных образцов. Приведенные результаты показывают:

1. Наличие концентратора дефекта вносит изменения в характеристики измеряемого акустического сигнала, а именно, наблюдается уменьшение собственной частоты образца, увеличиваются значения спектральных составляющих на высших четных гармониках и увеличивается коэффициент затухания;
2. Появление усталостной трещины и увеличение ее размера приводят к дальнейшему уменьшению собственной частоты, возрастанию составляющих СПМ на второй и четвертой гармониках и возрастанию коэффициента демпфирования.

Таким образом, увеличение трещины в исследуемом диапазоне ее размеров приводит к уменьшению спектральных диагностических признаков по второй гармонике в 1,26 раза а по четвертой – в 1,15 раза для образца № 1 и, соответственно, в 1,9 раза и 1,48 раза – для образца № 2. Коэффициенты демпфирования при этом увеличиваются в 3,2 раза (образец № 1) и в 2,6 раза (образец № 2) по сравнению с бездефектным состоянием. Полученные результаты полностью подтверждают результаты теоретических исследований и моделирования.

Таблица 2

Результаты обработки экспериментальных данных для образца № 1

Состояние образца	Частота основной гармоники, Гц	Признак S_1/S_2	Признак S_1/S_4	Коэффициент затухания α_1, c^{-2}
Без дефекта	147	1207	43983	1,53
Концентратор	144	1194	43943	1,68
Трещина $l=3,5$ мм	139	1089	40300	2,83
Трещина $l=5,5$ мм	133	958	38234	4,91

Таблица 3

Результаты обработки экспериментальных данных для образца № 2

Состояние образца	Частота основной гармоники, Гц	Признак S_1/S_2	Признак S_1/S_4	Коэффициент затухания α_1, c^{-2}
Без дефекта	578	2150	65625	5,95
Концентратор	574	2116	64917	6,23
Трещина $l=1,2$ мм	563	1913	59341	7,12
Трещина $l=5$ мм	559	1517	51743	10,41
Трещина $l=8,5$ мм	546	1126	44259	15,46

В результате проведенных экспериментальных исследований виброакустического низкочастотного метода свободных колебаний подтверждена эффективность его использования для диагностики малых усталостных трещин в элементах рабочих колес авиационных двигателей. Данные результаты являются основанием для практической реализации МСК и разработанных алгоритмов в системе виброакустического мониторинга и диагностики зарождающихся усталостных трещин, а также для апробации разработанных алгоритмов оценивания трещин по результатам спектральной обработки импульсных откликов исследуемых объектов.

Литература

1. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
2. Бурау Н.І., Гельман Л.М. Теоретичні основи діагностичного низькочастотного акустичного методу

вільних коливань // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 1998. – № 3. – С. 107-110.

3. Бурау Н.І., Тяпченко О.М. Оцінювання втомних тріщин за зміною спектральної щільності потужності вільних коливань об’єкта // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2000. – № 6. – С. 67-75.

4. Бурау Н.І., Тяпченко О.М., Посуховський Д.В. Імітаційне моделювання процесу діагностики та оцінювання втомних тріщин за методом вільних коливань // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць. – Харків: ХАІ, 2001. – Вип. 26. Двигуни та енергоустановки. – С. 151 – 153.

5. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

Поступила в редакцию 17.04.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор С.А. Дмитриев, НАУ, г. Киев; д-р техн. наук, профессор В.В. Карачун, КПИ, г. Киев.