

УДК 620.178 : 53.082.4(045)

С.Р. ИГНАТОВИЧ¹, Н.И. БУРАУ², С.С. ЮЦКЕВИЧ¹¹*Национальный авиационный университет, Киев, Украина*²*Национальный технический университет Украины «КПИ», Украина*

ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Рассмотрена возможность использования метода свободных колебаний для виброакустической диагностики усталостной поврежденности образцов из сплава на основе алюминия. Разработаны методики периодического виброакустического контроля образцов и обработки акустических сигналов в процессе циклического нагружения. Полученные результаты по изменению безразмерных амплитудных дискриминант акустических сигналов от числа циклов нагружения.

усталость, поврежденность, виброакустическая диагностика, амплитудные дискриминанты

Введение

Эволюция процессов деградации прочности конструкций обычно моделируется с использованием функции повреждаемости – накопления повреждений, причем повреждение материала изделия во времени трактуется как отклонение его контролируемых свойств от начальных [1]. В качестве критериев поврежденности используются проявляющиеся на макроскопическом уровне и поддающиеся контролю параметры: величина остаточной пластической деформации, степень износа или коррозии, длина магистральной трещины. При этом имеется возможность проведения объективных количественных оценок текущего состояния, а прогнозирование долговечности или остаточного ресурса может быть осуществлено с достаточно высокой степенью точности.

Однако для многих реальных конструкций отклонения свойств материалов от исходных значений не всегда проявляются в макроскопических масштабах. Например, поврежденность на инкубационной стадии усталости реализуется на микроструктурном уровне и характеризуется отклонением от начальных значений определенных физико-механических свойств материала (экзоэлектронной эмиссии, позитронной аннигиляции, внутреннего

трения, удельного остаточного сопротивления и т.п.) [2]. Перспективным является также использование методов наноиндентирования и наносклерометрии для диагностики состояния поверхностного слоя материалов конструкций, работающих в условиях циклического нагружения [3, 4].

Можно констатировать, что с разработкой новых аппаратных средств контроля физико-механических свойств материалов, новых методов получения и обработки диагностической информации, проблема контроля текущего технического состояния объектов в эксплуатации по критериям исчерпания прочности приобрела еще большую актуальность и значимость. Это в полной мере относится и к использованию возможностей виброакустической диагностики.

1. Формулирование проблемы

На сегодняшний день методы акустической диагностики получили распространение при контроле конструкций из неметаллических материалов. Акустический импедансный метод, который положен в основу большинства аппаратных средств контроля, состоит в определении разности механических импедансов бездефектной и дефектной областей объекта контроля [5].

Одним из наиболее теоретически исследованных и широко используемых на практике методов вибрационной и акустической диагностики элементов конструкций является низкочастотный (0...25 кГц) виброакустический метод свободных колебаний (МСК), состоящий в ударном возбуждении свободно затухающих упругих колебаний объекта диагностики с последующим анализом их параметров и характеристик [5, 6]. Метод позволяет контролировать как элементы металлических конструкций, так и изделия из неметаллических материалов с низким модулем Юнга и является эффективным для диагностики зарождающихся усталостных повреждений, дефектов расслоения, нарушения соединений и т.п.

Повреждения, реализующиеся на субмикро- и микроструктурном размерных уровнях металлических материалов – дислокационные субструктуры, вакансии, поры, микротрещины объективно приводят к изменениям упругих и неупругих характеристик материалов при длительном воздействии нагрузок. Физическая природа эволюции таких характеристик как модуль упругости, внутреннее трение, плотность [7] будет обуславливать изменение параметров свободных колебаний объектов, в частности параметров акустических сигналов при возбуждении колебаний. Эффективность МСК для диагностики трещиноподобных повреждений миллиметрового размерного уровня в колеблющихся лопатках ГТД подтверждается соответствующими теоретическими и экспериментальными исследованиями [8].

Цель настоящей работы состоит в исследовании возможностей МСК для диагностики усталостной поврежденности сплава Д16АТ на стадии структурных изменений до формирования трещины миллиметровой длины.

2. Решение проблемы

2.1. Методика проведения эксперимента. Испытаниям на усталость подвергались плоские образцы двух видов – без концентратора и с концен-

тратором в виде центрального отверстия диаметром 4 мм. Образец без концентратора – корсетного типа. Выбор типа образцов обусловлен необходимостью исследования различных объемов повреждающегося материала. В корсетном образце максимальную нагрузку воспринимает все поперечное сечение по ширине «тали» образца. В образце с концентратором область повреждающегося материала локализована в небольшом объеме, примыкающим с двух сторон к отверстию.

Испытания проводились на сервогидравлической машине с компьютерным управлением Vi-00-202V (разработки фирмы ViSS, Бангалор, Индия) с использованием дополнительно к базовому программному обеспечению MTL7 приложения «Function Generator», поддерживающему адаптивный контроль, что позволяло уменьшить ошибку при проведении испытаний по схеме «мягкого» нагружения.

Образцы подвергались циклическому нагружению растяжением с частотой 12 Гц. Для корсетного образца максимальное напряжение цикла составляло 200 МПа, а для плоского с отверстием – 120 МПа.

Перед нагружением и периодически в процессе циклической наработки образцы проходили виброакустический контроль. Для этого использовался МСК, в соответствии с которым возмущающий элемент (ударник) кратковременно контактирует с контролируемым объектом, и после возбуждения не оказывает влияние на параметры и характеристики свободных колебаний объекта [8].

При контроле образцы снимались и консолю крепились в зажим нижней частью (рис. 1). На фиксированном расстоянии H от зажима с образцом кратковременно контактировал ударник. Звуковые волны, возбуждаемые при контакте, поступали через микрофон на звуковую карту персонального компьютера (ПК), где происходила оцифровка сигнала, и далее в ПК – последующая обработка сигнала. При каждом значении наработки производилось три измерения виброакустического сигнала.

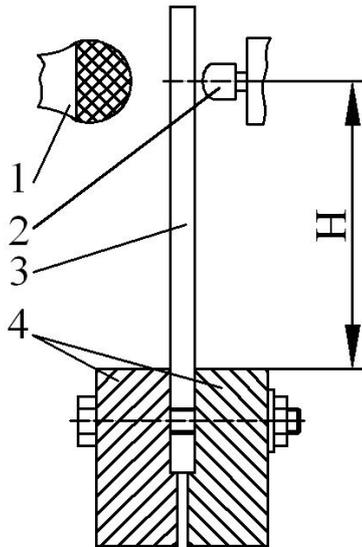


Рис. 1. Схема крепления образца при виброакустическом контроле: 1 – микрофон, 2 – ударник, 3 – образец, 4 – зажимы

2.2. Методика обработки и представления диагностической информации. Для сжатого описания диагностической информации часто используются количественные характеристики измеренных сигналов, так называемые дискриминанты [9]. В диагностических целях виброакустический процесс описывается с помощью одного числа или группы чисел. Как правило, такие параметры и характеристики виброакустических сигналов во временной и частотной областях имеют определенную размерность. При этом связь диагностической характеристики с абсолютными значениями измеряемых параметров приводит к ее неинвариантности и является крайне нежелательной. Поэтому более эффективным является использование безразмерных дискриминант виброакустических процессов, в частности, амплитудных [9].

Безразмерные амплитудные дискриминанты (БАД) определяются на основании размерных дискриминант, семейство которых для стохастического виброакустического процесса $x(t)$ с одномерной плотностью вероятности его мгновенных значений $p(t)$ имеет представление в виде некоторого сред-

него значения амплитуды процесса, которое определяется как корень n -ной степени из момента n -го порядка:

$$x_n = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} |x|^n p(x) dx \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (1)$$

Для различных значений параметра n определяются следующие размерные амплитудные дискриминанты: ординарная амплитуда $x_{орд}$ ($n = 1/2$); средняя амплитуда $x_{ср}$ ($n = 1$); средняя квадратическая амплитуда $x_{скв}$ ($n = 2$); наиболее вероятная амплитуда $\langle x \rangle$ ($n \rightarrow \infty$). Определенные таким образом амплитуды по-разному отражают свойства и характерные особенности анализируемых сигналов. Ординарная амплитуда повышает значимость составляющих с малой колебательной энергией, средняя квадратическая – составляющих с большой колебательной энергией, а средняя амплитуда равномерно представляет все составляющие. Наиболее вероятная амплитуда представляет собой усредненную меру значимости выбросов нестационарного процесса и может использоваться для характеристики локальных нестационарностей с незначительной энергетической значимостью выбросов.

БАД формируются из компонент (1) в виде отношений усредненных амплитуд:

$$\text{коэффициент формы } K = x_{скв}/x_{ср};$$

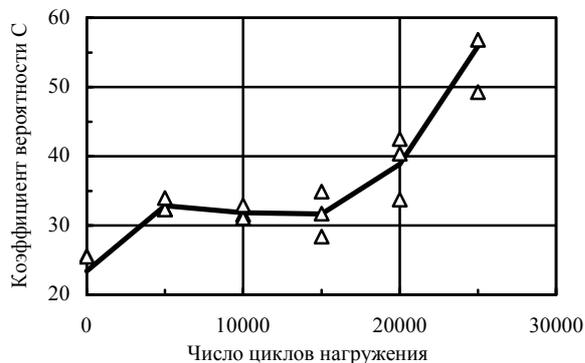
$$\text{коэффициент вероятности } C = \langle x \rangle / x_{скв};$$

$$\text{коэффициент импульсности } I = \langle x \rangle / x_{ср};$$

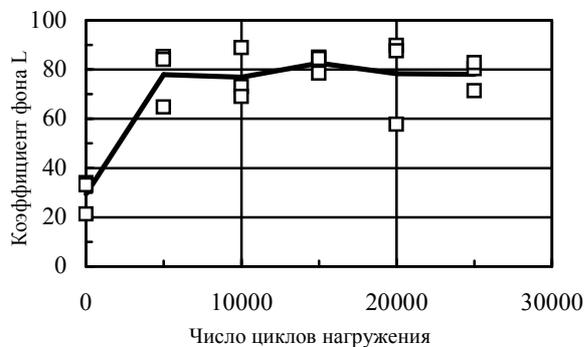
$$\text{коэффициент фона } L = \langle x \rangle / x_{орд}.$$

Определенные таким образом БАД зависят лишь от формы плотности вероятности и не зависят от значений процесса. Изменение формы плотности вероятности мгновенных значений виброакустического процесса свидетельствует об изменении состояния контролируемого объекта, например отклонением определенных физико-механических свойств материала объекта от начальных значений, что целесообразно использовать для диагностических целей.

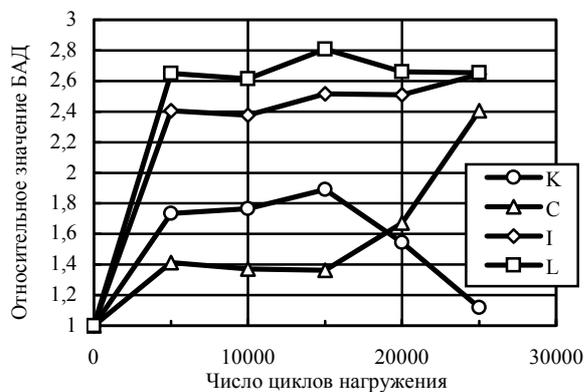
2.3. Результаты эксперимента. При испытании корсетного образца получено, что значения БАД изменяются с числом циклов нагружения (рис. 2).



а



б



в

Рис. 2. Изменение абсолютных значений коэффициентов вероятности (а), фона (б) и относительных значений БАД (в) корсетного образца от числа циклов нагружения

Зависимости средних значений исследуемых БАД от наработки, отнесенные к соответствующим значениям дискриминант, полученным до нагружения, показывают различную реакцию данных диагностических параметров на усталостное поврежде-

ние (рис. 2, в). Для всех БАД характерно изменение значений на первом этапе наработки. При этом наибольшую чувствительность к циклическому нагружению проявили коэффициенты импульсности (в 2,4 раза) и фона (2,65 раза). С увеличением числа циклов эти БАД изменяются практически одинаково, как и коэффициенты формы и вероятности до $N = 1,5 \cdot 10^4$ циклов. В дальнейшем поведение данных коэффициентов зеркально противоположно – коэффициент C увеличивается, а K уменьшается (рис. 2, в). Следует отметить, что корсетный образец не доводился до разрушения (при $N = 2 \cdot 10^4$ циклов на поверхности фиксировалось несколько микрометровых трещин), что дает основание толковать изменения БАД структурными превращениями в материале.

Для образца с концентратором характерно значительно меньшее значение повреждающегося объема материала, что отразилось в более слабой реакции на циклическое нагружение – увеличение в 1,6 раза коэффициента фона L (рис. 3). Коэффициент вероятности C вообще имел значения, меньшие исходных.

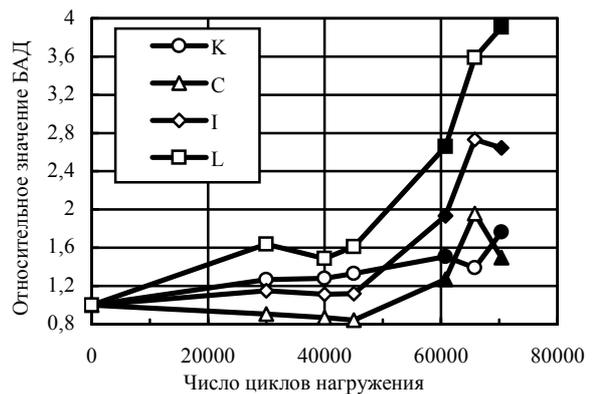


Рис. 3. Изменение относительных значений БАД образца с концентратором от числа циклов нагружения; темные точки соответствуют последовательному образованию трещин с двух сторон отверстия

Изменение БАД при увеличении циклической наработки для образца с концентратором (рис. 3) в общем случае такое же, как и зависимости, полу-

ченные на корсетном образце (рис. 2). Коэффициент фона L имеет небольшой пик при $N = 3 \cdot 10^4$ циклов (на рис. 2, в – при $N = 1,5 \cdot 10^4$ циклов), остальные коэффициенты практически не изменяются.

Характерной является реакция БАД на возникновении трещин у концентратора. Первая трещина с одной стороны отверстия образовалась при $N = 6,08 \cdot 10^4$ циклов, вторая трещина, с другой стороны отверстия – при $N = 7 \cdot 10^4$ циклов. Максимальное увеличение значения при образовании 1-й и 2-й трещин зафиксировано для коэффициента L – в 2,66 и 3,9 раза соответственно. Представляет интерес аналогичное ранее рассмотренному зеркальное изменение коэффициентов C и K в промежутке между образованием 1-й и 2-й трещин (рис. 3).

Заключение

Представленные результаты свидетельствуют о перспективности применения метода виброакустической диагностики для оценки состояния конструкционных алюминиевых сплавов при циклическом нагружении. При этом эффективным является использование безразмерных амплитудных дискриминант виброакустических процессов. Необходимы дальнейшие исследования, направленные на обоснование физической природы изменения БАД при структурной повреждаемости, их реакции на процессы микропластического деформирования и разрушения.

Литература

1. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
2. Яковлева Т.Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов. – К.: Наук. думка, 2003. – 238 с.
3. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклическом нагружении методами

наноиндентирования и наносклерометрии / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, Д.И. Борисов, В.И. Закиев // Пробл. прочности. – 2006. – № 4. – С. 132-139.

4. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Борисов Д.И. Диагностика усталостной поврежденности деталей методами вдавливания и царапания поверхности индентором // Двигатели внутреннего сгорания: Межвуз. научн.-техн. журн. – 2005. – № 2 (7). – С. 118-122 (ХПИ).

5. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.

6. Виброакустическая диагностика неметаллических элементов конструкций летательных аппаратов / С.Р. Игнатович, Н.И. Бурау, И.М. Закиев, А.Д. Коган // Авиационно-космическая техника и технология: Научн.-техн. журн. – 2006. – № 10 (36). – С. 7-10.

7. Криштал М.А., Лепин Г.Ф. Исследование повреждаемости металлов путем измерения упругих, неупругих и других физико-механических характеристик // Пробл. прочности. – 1978. – № 8. – С. 40-46.

8. Игнатович С.Р., Бурау Н.И., Тяпченко А.Н. Результаты экспериментальных исследований виброакустического метода свободных колебаний для диагностики роторных элементов авиационных двигателей // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Наук. техн. журн. – 2003. – № 5 (40). – С. 79-81.

9. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

Поступила в редакцию 1.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.В. Киндрачук, Национальный авиационный университет, Киев.