

Параметры распространения объемных упругих волн в материале лопаток

№ образца	5.0	5.1	5.2	5.3
$h, мм$	6,95	6,25	6,25	6,00
$V_3, м/сек$	6043	6035	6075	6045
$V_2, м/сек$	3296	3300	3365	3299
$V_1, м/сек$	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

работа, а хрупкое протекает практически без заметных пластических деформаций, при малых затратах энергии. Промежуточное положение между ними занимает квазихрупкое разрушение, протекающее с небольшой предшествующей пластической деформацией и с затратой существенной энергии на разрушение.

Основным видом разрушения при переменном нагружении (в том числе при вибрации) является усталость [1]. При этом металлы и сплавы не разрушаются идеально хрупко, то есть без предшествующей пластической деформации [2]. Процесс происходит при напряжениях, значительно меньших, чем предел прочности, часто даже ниже предела упругости: в местах, имеющих нарушения структуры, развиваются микротрещины, которые становятся концентраторами напряжений, вызывают появление новых микротрещин и затем – главной трещины, разрушающей материал.

Для оценки состояния конструкционных материалов все большее распространение получают ультразвуковые методы неразрушающего контроля [3]. Наиболее часто в практике используется эхо-импульсный метод, примененный нами для изучения действия циклического нагружения на образцы из стали 38ХНЗМА и сплава Д16. Пример акустического стенда, реализующего эхо-метод, описан нами в работе [4].

Большой информативностью при исследовании технического состояния конструкционных материалов обладают сдвиговые упругие волны. При возникновении напряжений или пластической деформации вдоль некоторого направления скорости сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек него, будут меняться по-разному. Параметром, характеризующим это различие, является акустическая анизотропия материала a , которую мы определяли экспериментально по результатам измерения времени распространения импульсов сдвиговых волн:

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_{cp}} = \frac{t_2 - t_1}{t_{cp}}, \quad (1)$$

где V_1, V_2 – скорости сдвиговых волн;

t_1, t_2 – задержки в материале импульсов волн, бегущих вдоль нормали к поверхности и поляризованных вдоль и поперек направления нагружения.

На рис. 1 представлены результаты исследования влияния пластической деформации ε от 0 до 1,2 % образца из стали 38ХНЗМА на величину акустической анизотропии материала. Параметр акустической анизотропии измерен нами с использованием ультразвуковых импульсов с основной частотой 4 МГц в 5 точках стального образца по 3 раза.

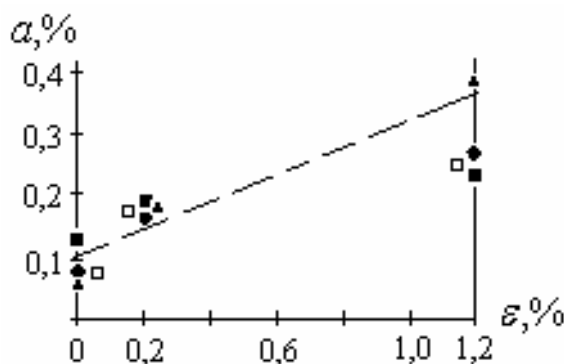


Рис. 1. Зависимость параметра акустической анизотропии от величины пластической деформации

На графике наблюдается увеличение параметра акустической анизотропии при пластической деформации образца.

Также было исследовано влияние малоциклового усталости на акустическое поведение второго стального образца. На рис. 2 приведена зависимость параметра акустической анизотропии материала образца при симметричном цикле нагружения, $N = 1000, 2000, 3000$ циклов с амплитудой деформации $\varepsilon_a = 0,5\%$.

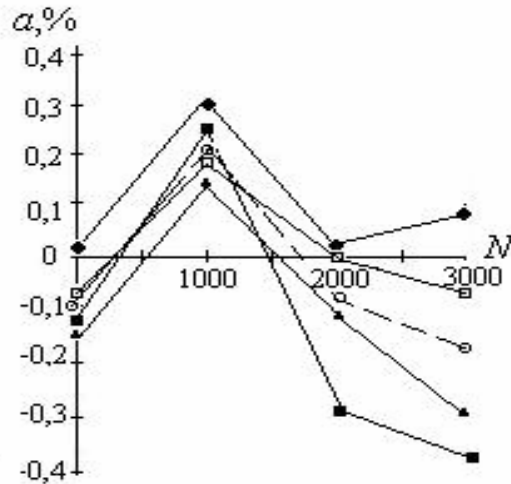


Рис. 2. Зависимость акустической анизотропии от количества циклов нагружения

Немонотонность зависимости информативного акустического параметра от степени усталости конструкционного материала (рис. 2) можно объяснить наличием двух конкурирующих физических механизмов, влияющих на величину акустической анизотропии, а именно: а) увеличение степени пластической деформации – рост величины анизотропии; б) зарождение микротрещин (микродефектов), расположенных перпендикулярно линии нагружения и уменьшающих скорость волн, поляризованных вдоль линии нагружения. Наши экспериментальные исследования показали, что первый из указанных факторов наиболее важен на начальном этапе нагружения, а второй – на конечном его этапе.

Влияние циклического нагружения при синусоидальном цикле нагружения частотой 30 Гц и амплитудой 3 МПа на акустические характеристики конструкционного материала изучено с использованием двух образцов из сплава Д16. Исследования проведены с целью установления связи между акустическими параметрами и образованием микродефектов в материале вплоть до его разрушения.

Методика испытаний заключалась в следующем.

Дюралюминиевые образцы № 1 и № 2 были подвергнуты гармоническому нагружению ступенями по 30 000 периодов нагружения. Через каждые 30 000 циклов нагрузки образцы вынимались из испытательной машины, затем проводились акустические измерения в нескольких точках каждого образца, вплоть до его разрушения. Образец № 1 выдержал 190 000 циклов нагружения, а образец № 2 разрушился после 210 000 циклов. Результаты испытаний представлены на рис. 4 (количество циклов указано в тысячах).

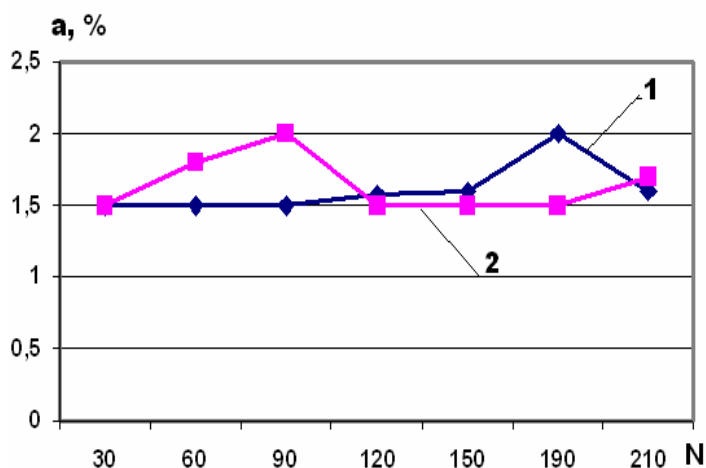


Рис. 4. Связь между количеством циклов нагружения дюралюминиевых образцов и их акустической анизотропией

Рис. 4 демонстрирует влияние переменного нагружения на относительную разницу времени распространения импульсов сдвиговых волн взаимно-перпендикулярной поляризации частотой 5 МГц в материале образца. Проведенные испытания показали наличие связи между степенью усталости материала образца, характеризующейся увеличением пластической деформации, и накоплением микротрещин, приводящих к его разрушению. Характер указанной связи для двух образцов оказался несколько различным, однако в целом аналогичен тому, который выявлен в экспериментах со стальными образцами. Закономерности изменения параметра акустической анизотропии, выявленные при нагружении стальных образцов, сохраняются и для сплава Д16.

Основным выводом по результатам экспериментов является подтверждение того, что относительная разница скоростей (задержек) взаимно перпендикулярно поляризованных сдвиговых волн весьма чувствительна к изменениям структурного состояния материала в процессе его разрушения. Параметр собственной акустической анизотропии материала может служить информативным параметром при его неразрушающем контроле.

Таким образом, показана принципиальная возможность использования эхо-метода акустической диагностики, с применением сдвиговых волн мегагерцевого диапазона частот, для исследования процесса усталости стали и дюралюминия при циклическом нагружении. Судя по результатам проведенных экспериментов, есть возможность по началу уменьшения измеряемого параметра определять момент начала интенсивного трещинообразования, а по прекращению его дальнейшего уменьшения диагностировать момент начала интенсивного разрушения (возникновения макротрещин).

Список литературы:

- [1] Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. 312 с.
- [2] Трошенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наукова думка, 1981. 344 с.
- [3] Ботаки А.А., Ульянов В.Л., Шарко А.В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1983. 80 с.
- [4] 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.