

изнашиванию. В качестве износостойких наплавов, наносимых на торец пера лопаток посредством импульсной лазерной наплавки, были выбраны порошковые жаропрочные припои (ВПр24, ВПр11-40Н, ВПр27). Были проведены исследования для подтверждения применимости данной технологии, включающие электронную микроскопию, измерение микротвёрдости и испытания на абразивное изнашивание. Выявлены зависимости и подтверждена возможность использования определённых никелевых порошковых припоев в качестве альтернативы классическим износостойким композитам.

#### Библиографический список

1. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Назаркин Р.М. [и др.]. Структура и свойства монокристаллов жаропрочного никелевого сплава,

содержащего рений и рутений. // *Металлургия машиностроения*. 2013. № 1. С. 12-18.

2. Пермиловский И.А., Гейченко В.С., Фруман И.И. Восстановление наплавкой турбинных лопаток авиационных двигателей. // *Автоматическая сварка*. 1976. №5. С. 54-56.

3. Сорокин Л.И. Аргодуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов. // *Сварочное производство*. 2004. № 7. С. 20-26.

4. Сорокин Л.И., Лукин В.И., Багдасаров Ю.С. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6. // *Сварочное производство*. 1997. № 6. С. 12-17.

5. Климов В.Г. Сравнение методов восстановления геометрии пера лопаток из жаропрочных сплавов. // *Вестник Московского авиационного института*. 2016. Т. 23, № 1. С. 86-97.

УДК 620.179.16:62-135

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ

©2016 Е.А. Мотова, Н.Е. Никитина

Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород

### STUDY OF ACOUSTIC ANISOTROPY OF STRUCTURAL MATERIALS UNDER VARIABLE LOADING

Motova E.A., Nikitina N. Ye., Tarasenko Ur. P. (Institute for problems of Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation)

*The work present results of nondestructive testing of structural materials. The experimental investigations are based on ultrasonic pulse-echo method. Has been demonstrated opportunities of the nondestructive acoustical method for the studying of the steel structure after cyclic loading.*

#### Введение

Акустические методы неразрушающего контроля получают всё большее распространение для оценки технического состояния конструкционных материалов на различных этапах изготовления, ремонта и эксплуатации [1]. Среди них наибольшее практическое применение находит эхо- импульсный метод [2]. На практике эхо-метод используется для измерения важнейших информативных характеристик ультразвукового контроля, таких как затухание и скорость распространения упругих волн в конструкционных материалах.

Большой информативностью при исследовании технического состояния конст-

рукционных 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 величина акустической анизотропии материала  $a$ , которую мы определяли экспериментально по результатам прецизионного измерения времени распространения импульсов сдвиговых волн:

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

где  $V_1, V_2$  - скорости сдвиговых волн;  $t_1, t_2$  -

задержки в материале импульсов упругих волн, бегущих вдоль нормали к его поверхности и поляризованных вдоль и поперек направления нагружения.

В докладе приведены результаты экспериментального исследования поведения параметра акустической анизотропии материала при переменном нагружении образцов из стали 38ХНЗМА и сплава Д16.

#### **Проведение исследований**

Ультразвуковые исследования образцов конструкционных материалов выполнены на акустическом стенде для прецизионного измерения временных интервалов [2]. Экспериментальная установка включает как серийные, так и оригинальные блоки, в том числе специально разработанные пьезоэлектрические преобразователи для возбуждения и приёма импульсов волн ультразвуковой частоты с плавной огибающей. Акустические измерения проведены импульсным эхо-методом с использованием преобразователя сдвиговых колебаний с частотой 4 МГц. Параметр акустической анизотропии измерен три раза в пяти точках на каждом образце.

На первом этапе проведено исследование влияния пластической деформации  $\varepsilon$  образца из стали 38ХНЗМА ( $\varepsilon$  от 0 до 1,2%) на величину акустической анизотропии материала, где наблюдали его увеличение при росте пластической деформации образца. Далее исследовали влияние малоциклового усталости на акустическое поведение второго стального образца, при симметричном цикле нагружения с амплитудой деформации  $\varepsilon_a = 0,5\%$ . Акустические измерения проведены до нагружения, затем после  $N = 1000, 2000, 3000$  циклов. Найдена немонотонная зависимость параметра акустической анизотропии материала от числа циклов нагружения.

Влияние переменного нагружения с синусоидальным циклом частотой 30 Гц и сравнительно небольшой амплитудой 3 МПа ( $\varepsilon_a = 0,004\%$ ) 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.

На втором этапе 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. Переходным от малоциклового к многоциклового усталости является число циклов  $N = 50000 - 100000$  [3], поэтому можно считать, что и в этом случае мы находимся в рамках малоциклового усталости.

Нами обнаружено, что закономерности изменения параметра акустической анизотропии, выявленные при нагружении стальных образцов, сохраняются и для сплава Д16. Если для образца № 2 зависимость параметра акустической анизотропии от числа циклов нагружения идентична найденной для стальных образцов, то у образца № 1 рост указанного параметра начинается после 90 000 циклов и продолжается почти до самого разрушения.

#### **Выводы**

Экспериментальные исследования показали, что акустическая диагностика эхо-методом с применением сдвиговых волн мегагерцевого диапазона частот может выявить как момент начала интенсивного трещинообразования (по максимуму найденных зависимостей), так и момент начала разрушения (возникновения макротрещин) (по прекращению уменьшения измеряемого параметра).

#### **Библиографический список**

1. Ботаки А.А., Ульянов В.Л., Шарко А.В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. - М.: Машиностроение, 1983. 80 с.
2. Мотова Е.А., Никитина Н.Е. О возможности ультразвукового контроля компрессорных лопаток после эксплуатации и ремонта // Вестник СГАУ. 2011. Вып. 3(27). Ч. 2. С. 52-56.
3. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. - М.: Интерметинжиниринг, 2002. 287 с.