

УДК 620.179.16: 539.43+539.388.1

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2015 г.

Мотова Е.А., Никитина Н.Е.

*Институт проблем машиностроения Российской академии наук,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

motik-1@mail.ru

Поступила в редакцию 29.04.2015

Изучены возможности использования эхо-метода неразрушающего контроля с применением сдвиговых волн для исследования упругопластических свойств и поврежденности конструкционного материала в процессе его усталостного разрушения. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния пластической деформации и циклического нагружения на структурное состояние и прочностные свойства стальных и дюралюминиевых образцов. В качестве информативного параметра ультразвукового контроля использована величина акустической анизотропии материала, то есть относительная разница скоростей (задержек) взаимно перпендикулярно поляризованных сдвиговых волн, распространяющихся перпендикулярно линии нагружения. Найдены экспериментальные зависимости между степенью усталости материала образца, характеризующейся увеличением пластической деформации и накоплением микротрещин, приводящих к развитию макротрещины, и его акустическими свойствами. Закономерности изменения параметра акустической анизотропии, выявленные при малоциклового усталости стальных образцов, сохраняются и для дюралюминиевых образцов при гармоническом нагружении. Таким образом, показана возможность выявления неразрушающим акустическим методом как момента начала интенсивного трещинообразования (по началу уменьшения параметра акустической анизотропии), так и момента начала интенсивного разрушения, то есть возникновения макротрещин (по прекращению уменьшения измеряемого параметра).

Ключевые слова: конструкционные материалы, пластическая деформация, циклическое нагружение, усталость, ультразвуковой метод контроля.

Введение

Усталость металла является основным видом разрушения при переменном (в том числе гармоническом) нагружении [1]. Если разрушение от усталости происходит в макроупругой области напряжений, то за него ответственно зарождение усталостных микротрещин за счет процессов микротекучести преимущественно в поверхностных слоях металла [2]. Зачастую металлы и сплавы не разрушаются идеально хрупко, то есть без предшествующей пластической деформации. Процесс разрушения происходит при напряжениях, значительно меньших, чем предел проч-

ности, часто даже ниже предела упругости. В областях, имеющих нарушения структуры, развиваются микротрещины, которые становятся концентраторами напряжений, вызывают появление новых микротрещин и затем – главной трещины, разрушающей материал.

Усталость металла охватывает две области циклического нагружения и деформирования, которые в значительной степени отличаются друг от друга [3]. В первой области, называемой малоциклового усталостью, при циклическом нагружении с большой амплитудой и с числом циклов от $5 \cdot 10^4$ до 10^5 в материале возникают существенные пластические деформации. В области многоциклового усталости (с количеством циклов от 10^6 до 10^7) существенных пластических деформаций возникать не должно.

Ультразвуковые методы неразрушающего контроля получают все большее распространение при оценке технического состояния конструкционных материалов и конструкций при их изготовлении, эксплуатации и ремонте [4, 5]. Важнейшими информативными характеристиками акустических методов контроля и диагностики конструкционных материалов являются скорость распространения и затухание ультразвука. Наиболее распространенный способ неразрушающего контроля изделий различного назначения – эхо-импульсный метод (около 90% объектов, контролируемых акустическим методом, проверяют эхо-методом [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 величина акустической анизотропии материала a , которая определялась экспериментально по результатам прецизионного измерения времени распространения импульсов сдвиговых волн:

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

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, $V_{cp} = (V_1 + V_2)/2$, $t_{cp} = (t_1 + t_2)/2$.

Как было отмечено ранее (см., например, [6]), пластическая деформация вдоль направления нагружения увеличивает параметр акустической анизотропии материала. В частности, было обнаружено, что материалу компрессорных лопаток, прошедших длительную эксплуатацию в течение 50000 часов, свойственны довольно существенные параметры акустической анизотропии (по-видимому связанные с процессами ползучести материала под действием инерционных нагрузок). После восстановительной термической обработки величина акустической анизотропии материала лопаток значительно снижается [6]. В то же время скорость сдвиговых волн гораздо более чувствительна к несплошностям, расслоениям, микротрещинам, поперечным к направлению ее поляризации, чем к расположенным в том же направлении. Вследствие этого при возникновении поперечных микротрещин, расслоений, дефектов указанный параметр должен уменьшаться.

Целью работы является экспериментальное исследование поведения параметра акустической анизотропии при действии циклического нагружения на конструкционные материалы (сталь 38ХНЗМА и дюралюминиевый сплав Д16).

Аппаратура для проведения ультразвуковых измерений

Экспериментальные исследования образцов конструкционных материалов, подвергнутых различным силовым воздействиям, выполнены ультразвуковым эхо-методом с использованием лабораторного акустического стенда [7, 8], блок-схема которого показана на рис. 1.

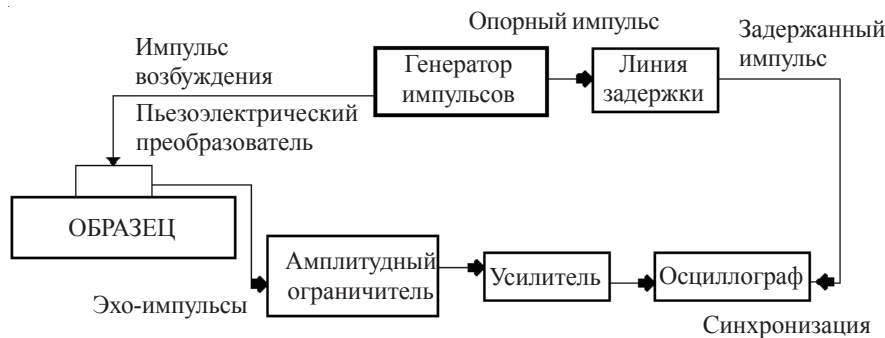


Рис. 1

В экспериментах использован измерительный стенд в составе измерителя временных интервалов И2-26, блока формирования и усиления импульсов (БФУ) и пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) для возбуждения в материале продольных и сдвиговых волн (БФУ и ПЭП – оригинальной конструкции). Были использованы ПЭП сдвиговых колебаний на частоте 4 МГц. Функции генератора опорного импульса и калиброванной линии задержки выполняет источник временных сдвигов (ИВС) прибора И2-26. Блок индикатора прибора И2-26 служит в качестве осциллографа. Устройство БФУ формирует мощный импульс возбуждения пьезодатчика из слабого сигнала ИВС, усиливает слабые эхо-импульсы и выполняет роль ограничителя амплитуды мощного «ударного» импульса на экране осциллографа. Электропитание устройства осуществляется стандартным блоком питания.

Приемно-передающий, или совмещенный ПЭП, состоящий из пьезопластины с демпфером, как возбуждает упругие высокочастотные колебания в материале, так и принимает отраженные эхо-сигналы. Электрические сигналы, соответствующие ультразвуковым импульсам, поступают на вход осциллографа. Опорный импульс с генератора электрических импульсов также подается на линию задержки и затем на вход синхронизации осциллографа для того, чтобы развертка запускалась всякий раз, когда появляется задержанный опорный импульс.

Таким образом, на экране видеоконтрольного устройства появляются излученный и отраженные импульсы. Изменяя скорость развертки индикатора и показания линии задержки, можно не только наблюдать всю картину отраженных импульсов, но и «рассматривать» отдельные эхо-импульсы, задержавшиеся в материале точно на то же время, что и опорный импульс в линии задержки. Более того, по показаниям ее шкалы можно с высокой точностью измерять временные интервалы между синфазными точками эхо-импульсов и фазовые и частотные искажения внутри импульса, прошедшего тот или иной путь в исследуемом материале.

Поскольку изменения скоростей упругих волн в широком спектре различных структурных состояний и технологических обработок конструкционных материалов обычно не превышают долей процента, в редких случаях нескольких процентов [9], для их применения в качестве информативных параметров неразрушающе-

го контроля требуется адекватная точность измерения временных интервалов, характеризующих распространение и искажение ультразвуковых импульсов в материале. Требуемую точность обеспечивает применение прецизионной ультразвуковой аппаратуры, квалифицированное проведение акустических измерений и правильная интерпретация их результатов.

Ультразвуковые исследования стальных образцов

Акустическим исследованиям подвергались образцы №1 и №2 из конструкционной легированной стали 38ХНЗМА. Параметры акустической анизотропии вычислены на основании прецизионных измерений временных интервалов между синфазными точками ультразвуковых импульсов, отраженных 1, 2, 3 и 4 раза от поверхности образца. ПЭП устанавливались в пяти точках каждого образца по 3 раза. Расположение контрольных точек на рабочей части образца показано на рис. 2.

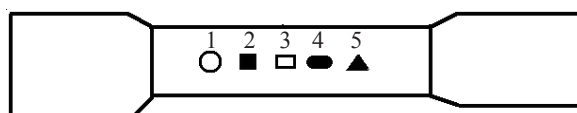


Рис. 2

Образец № 1 был подвергнут статическому нагружению до возникновения пластической деформации $\epsilon = 0,2\%$ и $\epsilon = 1,2\%$. На рис. 3 представлены результаты исследования влияния пластической деформации образца №1 на величину акустической анизотропии материала.

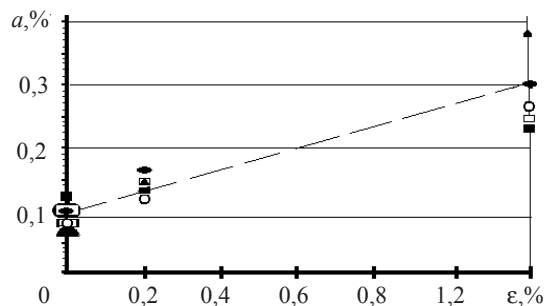


Рис. 3

Оказалось, что величина параметра акустической анизотропии растет при увеличении пластической деформации образца. Этот факт подтверждают экспериментальные результаты, приведенные в [6].

Исследовано влияние циклического режима нагружения материала образца №2 при симметричном цикле с амплитудой деформации $\epsilon_a = 0,5\%$ и числом циклов $N = 0, 1000, 2000, 3000$. После 3017 циклов нагружения образец №2 разрушился.

После каждой ступени нагружения, включая образец до испытаний, проведены акустические измерения времени распространения импульсов сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек линии нагружения и распространяющихся по нормали к поверхности образца. Как это принято в ультразвуковом контроле, величина задержки отсчитывалась от первого отраженного импульса. На экране осциллографа хорошо видны четыре импульса. Время задержки четвертого импульса относи-

тельно первого составило около 51 мкс. Погрешность измерения задержки импульсов упругих волн в материале 0,01 мкс при базе измерения 50 мкс. Таким образом, погрешность определения величины акустической анизотропии материала по формуле (1) составила 0,04%.

На рис. 4 приведена зависимость параметра акустической анизотропии материала от числа циклов нагружения.

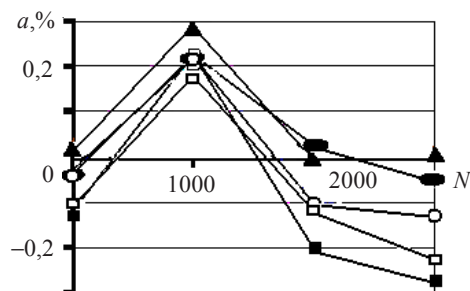


Рис. 4

Как видно из рис. 4, на начальном этапе испытаний при увеличении числа циклов нагружения параметр акустической анизотропии материала увеличивается в соответствии, по-видимому, с увеличением пластической деформации. В районе 1000 циклов он начинает резко уменьшаться, затем это уменьшение замедляется.

Полученную немонотонность зависимости информативного акустического параметра от степени усталости конструкционного материала можно объяснить наличием трех конкурирующих физических механизмов, влияющих на величину акустической анизотропии, а именно:

а) увеличением степени пластической деформации – рост величины анизотропии;

б) зарождением микротрещин (микродефектов), расположенных перпендикулярно линии нагружения и уменьшающих скорость волн, поляризованных вдоль линии нагружения, – уменьшение параметра анизотропии;

в) образованием макротрещин, ведущих к разрушению (при $N = 3017$ циклов образец разрушился). Одна или несколько макротрещин гораздо меньше влияют на скорость волны, чем множество микротрещин. Поэтому уменьшение параметра анизотропии замедляется.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что первый из указанных факторов наиболее важен на начальном этапе малоциклового нагружения, второй – на следующем, а третий – на конечном его этапе.

Ультразвуковые исследования дюралюминиевых образцов

Влияние многоциклового нагружения 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.

Дюралюминиевые образцы №1 и №2 подвергали гармоническому нагружению при синусоидальном цикле нагружения с частотой 30 Гц и амплитудой $\sigma_a = 3$ МПа ступенями по 30000 периодов. Через каждые 30000 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 при 210 000 циклах.

Результаты испытаний представлены на рис. 5. Рисунок демонстрирует связь между количеством циклов нагружения дюралюминиевых образцов и их акустической анизотропией.

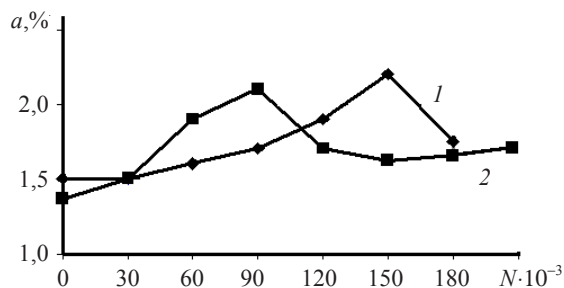


Рис. 5

Результаты эксперимента, приведенные на рис. 5, отображают влияние переменного нагружения на относительную разницу времени распространения импульсов сдвиговых волн взаимно перпендикулярной поляризации с частотой 4 МГц в материале образца.

В области многоциклового усталости при малой амплитуде нагрузки деформация во время каждого цикла в значительной степени упруга [3], и пластические деформации не накапливаются. В рассматриваемом случае материал находится на границе между малоциклового и многоциклового усталостью. Однако рост параметра акустической анизотропии и здесь наблюдается; значит, пластическая деформация образцов при гармоническом нагружении с частотой в десятки герц все же происходит.

Проведенные эксперименты показали наличие связи между степенью усталости материала образца, характеризующейся увеличением пластической деформации и накоплением микротрещин, приводящих к развитию макротрещины, и его акустическими свойствами. Закономерности изменения параметра акустической анизотропии, выявленные при малоциклового усталости стальных образцов, сохраняются и для дюралюминиевых образцов, подвергнутых гармоническому нагружению.

Выводы

1. Показана возможность использования эхо-метода неразрушающего контроля с применением сдвиговых волн для исследования процесса усталости стали и дюралюминия при циклическом нагружении.

2. На основании полученных экспериментальных данных показано, что относительная разница скоростей (задержек) взаимно перпендикулярно поляризованных сдвиговых волн весьма чувствительна к изменениям упругопластических свойств и поврежденности материала в процессе его разрушения.

3. Обнаружена немонотонность зависимости величины акустического параметра от степени усталости конструкционного материала при циклическом нагружении. Это означает, что нельзя только по величине параметра собственной акустической анизотропии конструкционного материала однозначно судить о степени его уста-

лости. Однако при лабораторных испытаниях образцов материала ультразвуковые измерения могут дать дополнительную информацию о его техническом состоянии на том или ином этапе испытаний.

4. Показана возможность выявления неразрушающим акустическим методом как момента начала интенсивного трещинообразования (по началу уменьшения параметра акустической анизотропии), так и момента начала интенсивного разрушения (возникновения макротрещин) по прекращению уменьшения измеряемого параметра.

Список литературы

1. Качанов Л.М. *Основы механики разрушения*. М.: Наука, 1974. 312 с.
2. Терентьев В.Ф. *Усталостная прочность металлов и сплавов*. М.: Интермет инжиниринг, 2002. 287 с.
3. Терентьев В.Ф., Петухов А.Н. *Усталость высокопрочных металлических материалов*. М.: ИМЕТ РАН-ЦИАМ, 2013. 515 с.
4. Ботаки А.А., Ульянов В.Л., Шарко А.В. *Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов*. М.: Машиностроение, 1983. 80 с.
5. *Неразрушающий контроль и диагностика*: Справочник. Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
6. Никитина Н.Е. *Акустопругость. Опыт практического применения*. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.
7. Никитина Н.Е., Мотова Е.А. Контроль состояния компрессорных лопаток газотурбинных двигателей ультразвуковым методом. *Контроль. Диагностика*. 2013. №3. С. 38–42.
8. Мотова Е.А., Никитина Н.Е., Тарасенко Ю.П. О возможности диагностики компрессорных лопаток по параметрам затухания и скорости ультразвука. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2013. №4. С. 88–95.
9. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. *Скорость звука и структура сталей и сплавов*. Новосибирск: Наука, 1996. 184 с.

References

1. Kachanov L.M. *Osnovy mekhaniki razrusheniya*. M.: Nauka, 1974. 312 s.
2. Terent'yev V.F. *Ustalostnaya prochnost' metallov i splavov*. M.: Intermet inzhiniring, 2002. 287 s.
3. Terent'yev V.F., Petukhov A.N. *Ustalost' vysokoprochnykh metallicheskih materialov*. M.: IMET RAN-TsIAM, 2013. 515 s.
4. Botaki A.A., Ul'yanov V.L., Sharko A.V. *Ul'trazvukovoy kontrol' prochnostnykh svoystv konstruksionnykh materialov*. M.: Mashinostroenie, 1983. 80 s.
5. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika*: Spravochnik. Pod red. V.V. Klyueva. M.: Mashinostroenie, 2003. 656 s.
6. Nikitina N.E. *Akustouprugost'. Opyt prakticheskogo primeneniya*. N. Novgorod: TALAM, 2005. 208 s.
7. Nikitina N.E., Motova E.A. Kontrol' sostoyaniya kompressornykh lopatok gazoturbinykh dvigateley ul'trazvukovym metodom. *Kontrol'. Diagnostika*. 2013. №3. S. 38–42.
8. Motova E.A., Nikitina N.E., Tarasenko Yu.P. O vozmozhnosti diagnostiki kompressornykh lopatok po parametram zatukhaniya i skorosti ul'trazvuka. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2013. №4. S. 88–95.
9. Murav'yev V.V., Zuev L.B., Komarov K.L. *Skorost' zvuka i struktura staley i splavov*. Novosibirsk: Nauka, 1996. 184 s.

ULTRASONIC INVESTIGATION OF ENGINEERING MATERIALS BEHAVIOR UNDER THE CYCLIC LOADING

Motova Ye.A., Nikitina N.Ye.

*Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

The abilities to use echo-method of nondestructive testing, by means of shear waves, for the study of elastic-plastic properties and damage of engineering material in the process of fatigue failure, is studied here. The results of experimental investigations of the influence of plastic deformation and cyclic loading on the structural state and strength properties of samples of steel and duralumin are given. The value of the acoustic anisotropy of the material, that is, the relative difference of velocities (delays) mutually perpendicular polarized shear waves propagating perpendicular to the line of loading, was used as an informative parameter of ultrasonic testing. Experiments have shown a relation between the degree of fatigue of the material of sample, characterized by an increase of plastic deformation and an accumulation of micro-cracks, which lead to the development of macro-crack, and its acoustic properties. Laws of change of acoustic anisotropy parameter which were revealed at low-cycle fatigue of steel specimens are conserved for duralumin specimens under harmonic loading. So, the possibility of revealing by non-destructive acoustic method as the moment of beginning of an intense failure (the beginning of decreasing of acoustic anisotropy parameter) so and the start of intensive destruction, that is, occurrence of macro-cracks (the ending of decreasing of the measuring parameter), is proved.

Keywords: engineering materials, plastic deformation, cyclic loading, fatigue, testing by ultrasonic method.