

симметрии и осей симметрии детали. Указанные факты говорят о том, что собственная акустическая анизотропия лопаток седьмой ступени обусловлена не столько структурными изменениями в материале, сколько пластической деформацией сдвига или кручения, вплоть до возникновения расслоений. Лопатки седьмой ступени возможно получили повреждения при эксплуатации, поэтому нет смысла их восстанавливать.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Величина коэффициента затухания сдвиговых волн оказалась мало чувствительным акустическим параметром, ввиду того, что в деталях сложной формы ослабление импульсов в самом материале составляет незначительную часть от результирующей величины, определяемой в основном расхождением УЗ пучка.

2. Величина акустической анизотропии может служить в качестве информативного параметра для неразрушающего контроля материала деталей сложной формы после эксплуатации в течение установленного срока и после восстановления, включающего термообработку.

3. Судя по результатам наших экспериментов, лопатки седьмой ступени получили при эксплуатации необратимые повреждения, которые не удастся исправить путем восстановительной обработки. Рекомендовано не проводить восстановительный ремонт этих лопаток.

#### Список литературы:

- [1] Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. - Новосибирск: Наука. 1996. 184 с.
- [2] Монишев 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] Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. – Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.
- [4] Мотова Е.А., Никитина Н.Е., Тарасенко Ю.П. Контроль структурного состояния материала рабочих лопаток компрессора газотурбинного двигателя ультразвуковым эхо-методом. Электронный журнал «Вестник научно-технического развития» [www.vntr.ru](http://www.vntr.ru). Национальная Технологическая группа, 2013, № 10 (74). С. 28–36.
- [5] Никитина Н.Е., Мотова Е.А. Исследование ультразвуковым эхо-методом поведения конструкционных материалов при циклическом нагружении // Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек / Труды 15 международного научно-промышл. форума «Великие реки» (Материалы научно-методической конференции проф-препод. состава, аспирантов, специалистов и студентов). Том 1. Н.Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2013. С. 374–377.

**Н.Е. Никитина**

*ФГБУН Институт проблем машиностроения РАН*

### **АКУСТОУПРУГОСТЬ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ДВУХОСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ**

Высокая эффективность современных численных методов определения напряженно-деформированного состояния (НДС), использующих ЭВМ, не устраняет необходимости применения экспериментов для прямого измерения напряжений (деформаций) в материале конструкции. Расчетные методы определения НДС промышленных конструкций основаны на использовании некоторых допущений, как правило, идеализирующих реальные условия. Несовершенство методов расчета, неполное со-

ответствие расчетных схем действительным условиям работы, неточность задания граничных условий и действующих нагрузок, как правило, изменяющихся с течением времени, дают существенные погрешности в оценке напряжений. Иногда задача по определению напряжений в действующей конструкции вообще не поддается теоретическому решению. Поэтому проблема экспериментальной оценки реального напряженного состояния детали на различных этапах изготовления, монтажа в более крупную конструкцию и дальнейшей эксплуатации весьма актуальна.

В настоящее время для неразрушающего контроля (НК) НДС деталей машин и конструкций все шире применяются акустические методы. Высокая проникающая способность ультразвуковых (УЗ) колебаний (по сравнению с методами рентгеновскими и магнитными) обусловила широкое использование ультразвука при исследовании конструкционных материалов. Акустический метод измерения напряжений в элементах конструкций основан на использовании закономерностей распространения упругих волн в предварительно напряженных телах.

Основные положения теории распространения упругих волн в напряженной твердой среде разработаны в конце первой половины XX века, а первые экспериментальные исследования явления акустоупругости проведены в конце 50–60-х годах [1, 2]. Таким образом, этот метод сравнительно молодой, но уже зарекомендовал себя как один из надежных и перспективных. Метод позволяет разделить главные напряжения не только в моделях, но и непосредственно в конструкциях без дополнительных процедур разгрузки. Применение поверхностных УЗ волн позволяет оценить напряжения в приповерхностном слое материала и сравнить результаты измерений с данными магнитных или рентгеновских методов. При использовании объемных упругих волн он позволяет проводить измерения не только поверхностных напряжений, но и напряжений, действующих внутри материала.

Если сдвиговая волна распространяется вдоль приложенного напряжения, то двойного лучепреломления не происходит. В этом случае напряжение можно определить только путем сравнения скоростей продольных или сдвиговых волн до и после приложения нагрузки. Развитие такого метода позволило определять напряжения в стержневых деталях, в том числе болтах, шпильках [3]. Сам эффект зависимости скоростей упругих волн от напряжений – нелинейный, так как в линейной теории упругости они полностью определяются модулями упругости и плотностью среды. Однако эта зависимость весьма слабая ввиду малой нелинейности твердых тел по сравнению с жидкостями или газами. Для того, чтобы определять напряжения, действующие в конструкционных материалах, с погрешностью 10 и менее процентов от предела текучести, требуется проводить прецизионные измерения скоростей ультразвуковых волн с относительной погрешностью 0,1–0,01 процента.

Для определения плоского напряженного состояния детали наиболее удобно использовать волны, распространяющиеся по нормали к плоскости действия напряжений. В изотропном материале без напряжений скорость распространения сдвиговой волны будет одна и та же при любой ориентации плоскости ее поляризации. Акустическая анизотропия напряженного материала проявляется в запрете на линейную поляризацию тех сдвиговых волн, которые на входе в среду не поляризованы вдоль направлений действия главных напряжений. Разность скоростей «разрешенных» сдвиговых волн будет пропорциональна разности главных напряжений. В отличие от многих других методов оценки НДС конструкционных материалов, где зависимости информативных параметров от напряжений (деформаций) являются феноменологическими, то есть находятся только опытным путем, здесь связь скоростей упругих волн и напряжений может быть найдена математически, в приближении пятиконстантной теории упругости. В 1953 году впервые «на кончике пера» были получены зависимости скоростей объемных волн от одноосного напряжения и давления при всестороннем сжатии [4]. Для рассматриваемого нами случая выражения Хьюза и Келли можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \frac{V_1^2}{V_{01}^2} - 1 &= 2 \left( \frac{V_1}{V_{01}} - 1 \right) = \frac{1}{3K_0} \left( \lambda + 2\mu + m + \frac{\lambda n}{\mu 4} \right) \sigma = 2k_1 \sigma, \\ \frac{V_2^2}{V_{02}^2} - 1 &= 2 \left( \frac{V_2}{V_{02}} - 1 \right) = -\frac{1}{3K_0} \left( 2\lambda - m + \frac{n}{2} + \frac{\lambda n}{\mu 2} \right) \sigma = 2k_2 \sigma, \\ \frac{V_3^2}{V_{03}^2} - 1 &= 2 \left( \frac{V_3}{V_{03}} - 1 \right) = -\frac{1}{3K_0} \left[ \frac{2\lambda}{\mu} (\lambda + 2\mu + m) - 2l \right] \sigma = 2k_3 \sigma \end{aligned} \quad (1)$$

где  $V_1, V_2$  – скорости сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек направления действия напряжения,

$V_3$  – скорость продольной волны;  $\lambda, \mu$ ,

$K_0 = \lambda + \frac{2}{3}\mu$  – модули линейной упругости;

$m, n, l$  – модули нелинейной упругости Мурнагана. Соответствующие комбинации этих констант обозначены  $k_1, k_2, k_3$ .

Одними из первых теоретические и экспериментальные исследования двухосного напряженного состояния конструкционных материалов осуществили киевские ученые под руководством А.Н. Гузя. Это были для своего времени пионерские работы, так как за границами СССР тогда мало кто из исследователей выходил за рамки измерения одноосных напряжений. На основе этих исследований была написана первая в мире монография [5], содержащая основы применения явления акустоупругости для определения двухосного (плоского) напряженного состояния изотропного материала по изменению скоростей сдвиговых волн, распространяющихся перпендикулярно плоскости действия напряжений. Коэффициенты связи скоростей и напряжений рассчитаны для трех вариантов теории начальных деформаций и представляют собой определенные комбинации констант линейной и нелинейной упругости твердого тела.

Современное состояние проблем применения ультразвукового эхо-метода для измерения двухосных напряжений в реальных конструкциях описано в книге [6]. При разработке алгоритмов вычисления напряжений здесь уделено внимание тому факту, что скорость – величина, не измеряемая непосредственно, в отличие от времени распространения волн или частоты повторения эхо-импульсов. Вследствие малости величины акустоупругого эффекта в твердом теле изменение акустического пути (толщины элемента конструкции) при деформации оказывается сравнимым с изменениями скоростей волн. Поэтому для определения двух значений напряжений по результатам измерения акустических параметров (в частности, времени распространения упругих волн) требуется не два, а три уравнения акустоупругости, описывающих изменения скоростей трех типов волн, распространяющихся в направлении нормали к плоскости действия напряжений.

Взяв за основу выражения вида (1), модифицируя их для случая двухосных напряжений и пренебрегая малостью величин, связанных с относительными изменениями скоростей волн, можно получить простые и надежные формулы для вычисления главных напряжений по данным акустических измерений [6–8]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= K_1 \left( \frac{t_3}{t_1} \frac{t_{01}}{t_{03}} - 1 \right) - K_2 \left( \frac{t_3}{t_2} \frac{t_{02}}{t_{03}} - 1 \right) \\ \sigma_2 &= K_1 \left( \frac{t_3}{t_2} \frac{t_{02}}{t_{03}} - 1 \right) - K_2 \left( \frac{t_3}{t_1} \frac{t_{01}}{t_{03}} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Где

$$K_1 = \frac{k_1 - k_3}{(k_1 - k_3)^2 - (k_2 - k_3)^2}, \quad K_2 = \frac{k_2 - k_3}{(k_1 - k_3)^2 - (k_2 - k_3)^2}$$

$K_1, K_2$  – коэффициенты упругоакустической связи материала;

$t_{01}, t_{02}, t_{03}$  – задержки импульсов сдвиговых и продольной волн до, а

$t_1, t_2, t_3$  – после приложения напряжений;

$k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты акустоупругой связи, представляющие собой комбинации упругих постоянных материала (см., например, формулы (1)). Они также могут быть найдены экспериментально при известном напряженном состоянии материала конструкции.

Таким образом, метод основан на линейных зависимостях скоростей упругих волн от напряжений, полученных в рамках пятиконстантной теории упругости, и дает сравнительно простой переход от растяжения к сжатию и от одноосного к двухосному напряженному состоянию материала.

Главным «плюсом» УЗ метода по отношению к магнитным методам является возможность его использования в любых конструкционных материалах, независимо от наличия у них ферромагнитных свойств. Упругие волны – это ведь механические колебания в твердых телах. Зависимости магнитных параметров от напряжений – эмпирические, не совсем линейные, различные для растяжения и сжатия материала. Аналитических зависимостей их от величины напряжения не существует, а ее определение основано на интуитивных и феноменологических соображениях.

В то же время расчетные алгоритмы акустического метода содержат в качестве коэффициентов комбинации модулей линейной и нелинейной упругости конструкционного материала, которые можно до опыта вычислить по значениям этих констант. Применять тарировку метода на образцах материала конструкции целесообразно только из соображений уменьшения ошибок вычисления указанных комбинаций из-за неточного знания констант упругости второго порядка даже для сталей и алюминиевых сплавов [6].

Метод акустоупругости применен, в частности, для оценки двухосных остаточных напряжений в плитах из высокопрочной стали, сваренных встык в жестком контуре [6, 8]. Исследованный стальной прокат использовался в конструкции жесткого корпуса подводной лодки. В эксперименте использована возможность отсутствия датчиков на конструкции во время проведения сварочных работ, с последующей их установкой в отмеченные точки контроля.

Одним из преимуществ метода акустоупругости для неразрушающего контроля напряжений, действующих внутри материала, по отношению к тензометрическим, рентгеновским и магнитным методам, является высокая проникающая способность ультразвуковых колебаний в упругом теле.

Рентгеновским методом измеряются поверхностные микродеформации (микронапряжения), которые не всегда интересны для крупноструктурных материалов, крупногабаритных металлоконструкций. Магнитные методы НК вполне подходят для экспресс-сканирования поверхностей элементов конструкций с целью выявления зон концентрации напряжений. УЗ методом измеряются усредненные по толщине напряжения, которые обычно находят при расчете НДС конструкций методом конечных элементов. Проводить проверку таких расчетов удобнее методом акустоупругости. Метод позволяет измерять напряжения растяжения-сжатия, усредненные по объему прозвучивания (толщина материала, умноженная на площадь датчика). Направления главных напряжений в изотропном материале легко определяются вращением преобразователя сдвиговых волн, по отсутствию их двулучепреломления. Точность измерения напряжений в акустически прозрачных материалах сравнима, а иногда и превосходит точность электротензометрии.

Для элементов конструкций из слабоанизотропных материалов возможно определение напряжений в нагруженной конструкции, при неизвестных значениях «начальных» акустических параметров. В акустике, если материал уже напряжен, можно использовать тот факт, что скорость волн есть и в ненапряженном материале. Возможность применения метода «безнулевой» акустической тензометрии экспериментально проверена на образцах высокопрочной стали, вырезанных из различных мест прокатного листа [9]. В дальнейшем выяснилось, что такая возможность существует для элементов конструкций из слабо анизотропных материалов, в которых величина собственной акустической анизотропии меньше или порядка наведенной напряжениями. Надо заметить, что даже постановка такой задачи невозможна для многих других методов НК.

Учитывая показанные здесь преимущества метода акустоупругости для определения двухосных напряжений в деталях машин и конструкций, надеюсь на более широкое его применение, в том числе и на водном транспорте.

#### Список литературы:

- [1] Benson R.W., Raelson V.J. From ultrasonics to a new stress-analysis technique. *Acoustoelasticity // Product Eng.* 1959. Vol. 30. p. 56–59.
- [2] Гуца О.И., Лебедев В.К. Влияние напряжений на скорость распространения ультразвуковых волн в металлах // *Прикл. механика.* 1968. № 2. С. 89–92.
- [3] Бобренко В.М. Исследование и разработка ультразвуковых методов и аппаратуры для определения напряжений в элементах металлических конструкций. Автореф. дисс-и ... канд. техн. наук. Одесса. ОПИ. 1974.
- [4] Hughes D.S., Kelly J.L. Second order elastic deformation of solids // *Phys. Rev.* 1953. Vol. 92. № 5. P. 1145–1149.
- [5] Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка. 1977, 152 с.
- [6] Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛИАМ, 2005. 208 с.
- [7] Быстров В.Ф., Гузовский В.В., Золотов В.Ф., Никитина Н.Е. Влияние технологической обработки высокопрочной стали на коэффициенты упруго-акустической связи // *Дефектоскопия.* 1986. N 7. С. 92–93.
- [8] Никитина Н.Е. Определение плоского напряженного состояния конструкционных материалов с помощью объемных упругих волн // *Дефектоскопия.* 1999. № 1. С. 48–54.
- [9] Гузовский В.В., Золотов В.Ф., Карзов Г.П., Конюхов Б.А., Никитина Н.Е. Повышение точности акустического метода определения остаточных напряжений в сварных конструкциях // *Судостроение.* 1988. N 5. С. 41–42.

**В.В. Огнев**

ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПЛОТНОСТИ РАБОЧИХ МЕСТ НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СБОРОЧНО-СВАРОЧНОГО ЦЕХА ВЕРФИ**

На ранних этапах подготовки производства всегда возникает вопрос о назначении размеров и массы блоков, секций. Данные параметры являются основными при построении всего графика строительства заказа. Это накладывает особую ответственность на конструктора и технолога при обосновании размеров сборочных единиц. Зачастую выбор размеров сборочных единиц сводится к принятию максимально возможным параметров по массе и габаритам, определяемых грузоподъемностью кранового оборудования, конструктивными размерами цехового пространства и вывозных