

УДК 620.179.16:539.319

## ПРЕИМУЩЕСТВА МЕТОДА АКУСТОУПРУГОСТИ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ МАШИН

© Н.Е. Никитина, С.В. Казачек

*Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благодирова РАН*

**Аннотация.** Рассмотрены основные методы, применимые для определения механических напряжений в деталях машин и конструкций при сборке и эксплуатации. Выявлены преимущества метода акустоупругости, реализованного с помощью объемных волн, для неразрушающего контроля одно- и двухосных напряжений в металлоконструкциях. Указанные преимущества ультразвукового метода исследования напряженного состояния конструкционных материалов подтверждают его востребованность и эффективность применения в машиностроении и на транспорте.

**Ключевые слова:** механические напряжения, неразрушающий контроль, метод акустоупругости.

Из-за сложности процесса производства деталей машин и широкого диапазона нагрузок, которым подвергаются заготовки на пути к готовому изделию в процессе резки, формовки, сварки и других операций, точный расчет напряжений, действующих в той или иной части готовой детали, не всегда представляется возможным. Высокая эффективность современных численных методов определения напряженно-деформированного состояния (НДС), использующих ЭВМ, не устраняет необходимости применения экспериментальных методов для прямого измерения напряжений (деформаций) в материале конструкции [1].

Расчетные методы определения НДС промышленных конструкций основаны на использовании некоторых допущений, как правило, идеализирующих реальные условия. несовершенство методов расчета, неполное соответствие 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 задача экспериментальной оценки реального напряженного состояния детали на различных этапах изготовления, монтажа в более крупную конструкцию и дальнейшей эксплуатации весьма актуальна [2-5].

Разнообразие прочностных задач, возникающих в технике, и необходимость их решения способствовали развитию целого ряда экспериментальных неразрушающих методов и средств определения деформаций и напряжений, использующих различные физические принципы. Однако многие из них не выходят за пределы лабораторной практики. На основе литературных источников и практических знаний нами выделены основные методы, применимые для неразрушающего контроля (НК) НДС деталей машин.

**Метод тензометрии** [6,7] получил широкое распространение в практике экспериментальных исследований НДС металлоконструкций. В настоящее время тензометрирование проводят в основном с помощью струнных и электротензометров.

Метод электротензометрии является наиболее разработанным и широко применяемым во многих отраслях промышленности. Он основан на зависимости омического сопротивления проводника от его деформации [2]. Существуют три основных вида тензорезисторов:

проволочный, фольговый, полупроводниковый. Для устранения эффекта температурного влияния в проволочных и фольговых датчиках разработаны самотермокомпенсированные тензорезисторы двух типов: одинарный, термочувствительность которого должна соответствовать термическому расширению испытуемого материала, и комбинированный, чувствительный элемент которого выполнен из двух последовательно соединенных с разными знаками коэффициента температурного расширения [3].

Принцип работы струнных тензометров основан на зависимости собственной частоты колебания струны от степени ее натяжения [2]. Струнные тензометры обеспечивают точность измерений, сравнимую с точностью тензорезисторных преобразователей, но имеют сравнительно дорогую и сложную конструкцию. Применяются, как правило, на крупногабаритных конструкциях. Преимуществом струнных датчиков является то, что измеряется собственная частота их колебаний, на точность измерения которой не влияет изменение напряжения питания и процессы в соединительных линиях. Частота колебаний является в настоящее время одной из наиболее точно измеряемых величин. Недостатками струнных тензометров являются нелинейность теоретической градуировочной характеристики и плохая динамическая характеристика при измерении переменных напряжений.

В общем случае метод тензометрии позволяет определять лишь относительные деформации, по отношению к тому значению деформации, которое соответствует моменту наклейки датчика или закрепления измерительной струны на поверхности материала конструкции. Если тензодатчики монтируются на объекты, уже находящиеся под нагрузкой, то «начальные» значения деформаций остаются неизвестными.

Определение напряжений по данным измерения деформаций проводят с использованием закона Гука. Для определения двухосного напряженного состояния необходимо применять тензометрическую розетку из трех тензорезисторов, оси которых направлены под углами  $90^\circ$  и  $45^\circ$  друг к другу. Главные напряжения на поверхности изотропного материала с их помощью находят по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2); \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1),$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  - главные деформации, определенные с помощью тензометрической розетки.

Открытие в ноябре 1895 г. рентгеновского излучения связывают с зарождением неразрушающего контроля и диагностики [8]. Основа метода определения деформаций **рентгеновским методом** состоит в изменении атомных межплоскостных расстояний в соответствии с действующим упругим напряжением [9].

Объемное напряженное состояние можно описать с помощью главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ , действующих вдоль поверхности материала и по нормали к ней. Так как измерения проводятся в тонком (порядка 10 мкм) поверхностном слое, то нормальную составляющую напряжения  $\sigma_3$  не учитывают [9], то есть считают напряженное состояние материала в области контроля плоским.

Рентгенографический метод позволяет определить величину напряжений в заданном направлении в плоскости действия напряжений, а также отдельно  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . При измерении напряжений в конструкции с неизвестной предысторией нагружения необходимо использовать эталонный образец из такого же материала (на поверхность образца наклеивают фольгу или напыляют эталонное вещество), в котором отсутствуют напряжения.

На результаты измерения рентгеновским методом могут влиять размеры зерен, глубина

проникновения луча, точность определения дифракционного угла, анизотропия и текстура материала. Рентгеновский метод широко используется в лабораторной практике для определения остаточных напряжений, обусловленных технологическими процессами термообработки, науглероживания, дробеструйной обработки, механической обработки резанием и условиями эксплуатации (например, усталостью). В отдельных случаях его применяют и в натуральных условиях [5].

Достоинство метода – высокая точность измерения микродеформаций (микронапряжений). Рентгеновский метод является самым непосредственным и позволяет проводить прямые измерения деформаций кристаллической решетки нагруженных деталей, то есть определять как остаточные, так и напряжения от действующей нагрузки.

Недостатки – высокие требования к чистоте поверхности. Измерения проводят в приповерхностном слое до 0,1 мм, длительность процедуры измерений до нескольких десятков минут на одну точку, при измерении под разными углами необходимо выдерживать точное расстояние излучателя и приемника до объекта контроля.

Несмотря на то, что по сравнению с другими методами НК рентгеновский метод обладает бесспорными преимуществами в определении остаточных напряжений, в практике натуральных исследований существуют препятствия для его широкого распространения. Объясняется это, прежде всего, громоздкостью применяемой аппаратуры (самые миниатюрные комплексы порядка 20 кг [5]), длительностью процедуры измерений и сложностью обработки их результатов.

Физической основой для разработки **магнитных методов** оценки параметров НДС является магнитоупругий эффект - изменение намагниченности тела под действием механических напряжений. При этом изменяются магнитная проницаемость, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила, величина магнитострикции и другие магнитные характеристики, которые могут быть приняты в качестве информативных при исследовании напряженного состояния ферромагнитных материалов. С помощью этих методов в принципе возможно определить в образце или детали машины одноосное напряженное состояние, разность главных напряжений и пластическую деформацию.

**Метод измерения шумов Баркгаузена** основан на связи между намагничиванием ферромагнетика и величиной механических напряжений. Эффект проявляется в перемещении стенок магнитных доменов, представляющих собой области спонтанной намагниченности, каждая из которых намагничена практически до насыщения, при приложении механического усилия к материалу. При этом изменяется намагниченность и пространственные размеры тела как целого [8]. Фиксирование процесса перемещения стенок доменов возможно при помещении катушки из электропроводящей проволоки рядом с образцом. Изменение намагниченности будет индуцировать ток в катушке.

Энергетический спектр шумов Баркгаузена находится в диапазоне частот, начинающемся от частоты внешнего намагничивающего поля и расширяющемся в большинстве материалов до 250-500 кГц. Этот шум экспоненциально затухает в зависимости от расстояния вглубь от поверхности материала. Основными факторами, определяющими глубину, на которой заметен эффект, являются электропроводность и магнитная проницаемость испытываемого материала, а также частотный диапазон, выбранный для анализа (для стали эта глубина варьируется от 0,01 до 3 мм). Интенсивность шумов Баркгаузена зависит от приложенного усилия и микроструктуры материала. Точность определения одно- и двухосных поверхностных напряжений зависит от соответствия микроструктуры калибровочного и испытываемого образцов.

Достоинства метода – оперативность и простота процедур измерений, относительно невысокие требования к подготовке поверхности области контроля. Недостатки метода – низкая чувствительность при измерениях на материалах с высокой твердостью, сильная нелинейность характеристики при деформациях сжатия, значительная погрешность при

низких уровнях напряжений.

**Метод, основанный на измерении коэрцитивной силы**, использует зависимость ее величины от механических напряжений, возникающих при нагружении ферромагнитного объекта. Приращение коэрцитивной силы при растяжении и сжатии в упругой области составляет десятки процентов от начального уровня, отсутствует гистерезис характеристик. Это позволяет использовать экспериментально полученные тарировочные зависимости для определения механических напряжений по коэрцитивной силе.

При растяжении в области упругих деформаций и последующем снятии нагрузки изменение коэрцитивной силы соответствует одной и той же зависимости от напряжений. Превышение напряжения над пределом текучести вызывает скачок значений коэрцитивной силы, а последующая разгрузка приводит к возникновению петли гистерезиса и к увеличению коэрцитивной силы в разгруженном состоянии. Непосредственное определение напряжений при двухосном нагружении во многих случаях невозможно, однако можно определить направления главных деформаций. Направление главной наибольшей деформации совпадает с направлением, в котором коэрцитивная сила минимальна, а направление главной наименьшей деформации с направлением максимальной. При двухосном сжатии наблюдается обратная зависимость [10].

**Метод магнитной анизотропии** основан на изучении анизотропии магнитных свойств, возникающей в ферромагнетике при нагружении его внешней силой. Принцип действия магнитоанізотропного преобразователя основан на эффекте поворота вектора магнитной индукции, создаваемой в зоне измерений первичной обмоткой. Предполагается, что при отсутствии напряжений изучаемые металлы изотропны в отношении магнитных свойств. Нагружение объекта создает в таком металле анизотропию, по которой судят о напряжениях, пользуясь тарировочными графиками, полученными на эталонном образце. Причем достоверная информация о напряженном состоянии объекта может быть получена при наличии тарировочных зависимостей для каждой марки стали, типоразмера и технологии изготовления деталей.

Для получения достоверных значений напряжений в изотропном материале есть два основных препятствия. Поверхностный слой (0,2 мм) материала находится в не характерном для конструкции напряженном состоянии (наклеп, азотирование, цементация, механические микроцарапины и т.д.). Другим препятствием является магнитомеханический гистерезис.

Между тем, существование у материала начальной (до нагружения) анизотропии магнитных свойств определяет основную погрешность метода, которую невозможно исключить известными приемами повышения точностных характеристик магнитных методов (введением различного рода коррекций). Эта анизотропия появляется на стадии изготовления ферромагнитного материала и вносит трудно контролируемую (иногда большую) погрешность в результаты измерений.

В последнее время широко рекламируется **метод магнитной памяти металла (МПМ)**, основанный на регистрации и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния, возникающих в изделиях и оборудовании в зонах концентрации напряжений под действием магнитоупругого эффекта. При этом собственные магнитные поля рассеяния отображают необратимое изменение намагниченности в направлении действия максимальных напряжений от рабочих нагрузок, а также структурную и технологическую наследственность деталей и сварных соединений после их изготовления и охлаждения в магнитном поле земли. В методе МПМ в качестве информативных параметров используют естественную намагниченность и последствие (остаточную намагниченность), которое проявляется в виде магнитной памяти металла к деформационным и структурным изменениям в материале изделий и оборудования [11].

Метод магнитной памяти позволяет провести оценку изменения напряжений во времени

или пространстве, но не дает количественной оценки уровня действующих статических напряжений. В некоторых случаях он позволяет (имеются критерии) при сканировании поверхности металла отличить область упругой деформации от пластической, найти зоны концентрации напряжений, где возможно зарождение усталостных трещин. Однако некоторые положения и сама возможность оценки НДС указанным методом вызывают сомнения специалистов НК как с теоретической [12] так и с практической [13] точки зрения.

Магнитные методы оценки напряжений в целом имеют следующую особенность. При использовании переменного тока, подаваемого на датчик, глубина проникновения переменного электромагнитного поля зависит от частоты тока и заключена в диапазоне от нескольких миллиметров до долей миллиметра. Следовательно, объем металла, от которого можно получить информацию о его напряженном состоянии, очень мал. По этой причине свойства поверхностного слоя металла, в котором уже из-за технологических причин происходит вариация химического состава (например, выгорание углерода), поверхностного наклепа, скорости охлаждения, изменяются и существенно сказываются на результатах определения напряжений. При больших частотах сказывается даже тонкий слой влаги на поверхности металла. По этой причине применение постоянных магнитных полей имеет очевидное преимущество [5].

Следует также отметить, что магнитные величины зависят не только от свойств материала, но и в значительной степени определяются способами и условиями измерения. Значения магнитных характеристик даже одного и того же металла, измеренные различными способами, могут существенно различаться и даже обладать различным характером поведения. Кроме того, при наличии в датчике ферромагнитного сердечника необходимо учитывать его вклад в результаты измерений.

К недостаткам большинства имеющихся магнитных приборов также относится значительное влияние на точность измерений воздушного зазора между датчиком и контролируемой поверхностью, есть ограничения при контроле криволинейных поверхностей.

**Акустические методы**, связанные с распространением упругих колебаний, широко применяются для изучения физико-механических характеристик твердых тел. Упругая волна, распространяющаяся в твердом теле, характеризуется амплитудой колебаний, их фазой и частотой, векторами распространения и поляризации. По параметрам распространения упругой волны можно судить о физических свойствах и техническом состоянии твердых тел. Высокая проникающая способность ультразвуковых колебаний (по сравнению с методами рентгеновскими и магнитными) обусловила широкое использование ультразвука при исследовании конструкционных материалов.

Акустический метод измерения напряжений в твердых телах основан на использовании закономерностей распространения упругих волн в предварительно напряженных телах. Этот метод позволяет раздельно определить главные напряжения не только в моделях, но и непосредственно в конструкциях без дополнительных процедур разгрузки. Он обладает достаточно высокой разрешающей способностью, обеспечивает оперативность контроля, позволяет проводить измерения не только поверхностных напряжений, но и напряжений, действующих внутри материала.

Основные положения теории распространения упругих волн в напряженной твердой среде разработаны в конце первой половины 20-го века, а первые экспериментальные исследования явления акустоупругости проведены в конце 50-х - 60-х годах [14, 15]. Таким образом, этот метод сравнительно молодой, но уже зарекомендовал себя как один из надежных и перспективных.

В твердых телах можно возбудить различные виды колебаний. При приложении к

изотропному материалу нагрузки вдоль определенного направления возникает слабая искусственная анизотропия его упругих свойств. При распространении в таком материале произвольной сдвиговой волны в направлении, перпендикулярном приложенному напряжению, образуются две чисто сдвиговые волны со взаимно перпендикулярными векторами поляризации (наблюдается двойное лучепреломление). При этом направление поляризации одной волны параллельно направлению приложенной нагрузки, а другой - перпендикулярно этому направлению. Распространяющиеся волны имеют разные скорости, поэтому по мере прохождения толщи материала меняется разность их фаз. Эту разность фаз, пропорциональную приложенному напряжению, можно найти, например, по виду фигур Лиссажу, появляющихся на экране осциллографа при подаче соответствующих сигналов на пластины, управляющие горизонтальным и вертикальным смещением его нулевой линии.

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 [16].

Растяжение образца иногда приводит к изменению его дислокационной структуры, которая определяет так называемое дислокационное поглощение упругих волн. Таким образом, величину растягивающей нагрузки можно оценить по изменению коэффициента затухания упругих волн. Такие эффекты действительно наблюдаются, а свое объяснение находят с помощью струнной модели дислокации Гранато-Люкке [17]. Надо заметить, что струнная модель ничего не дает для случая сжатия материала.

Таким образом, одноосное напряжение в твердом теле может быть определено: по разности фаз волн, образовавшейся в результате двойного лучепреломления; по различию скоростей распространения упругих волн в двух специально выбранных направлениях; по изменившемуся значению скорости распространения или затухания упругих волн.

Наиболее распространены методы измерения напряжений, основанные на измерении скорости ультразвука (УЗ), так как эти зависимости хорошо описаны теоретически в рамках нелинейной механики твердого тела, являются однозначными, более того, линейными. Сам эффект зависимости скорости 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 [18]. 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  $k_1, k_2, k_3$ . Картина распространения упругих волн схематически представлена на рис. 1.

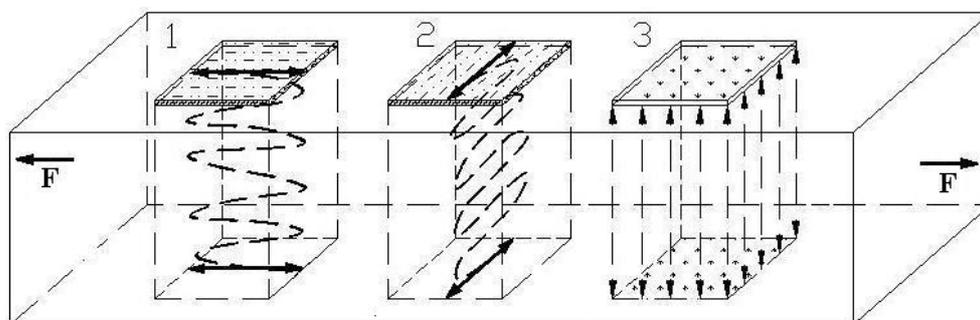


Рис. 1. Распространение упругих волн в напряженной среде.

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 [19], 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 [20]. 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 некоторых величин, связанных с относительными изменениями скоростей волн, можно получить простые и надежные формулы для вычисления главных напряжений по данным акустических измерений [20-22]:

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

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

Основное **преимущество метода акустоупругости**, на наш взгляд, состоит в сравнительной легкости перехода от измерения одноосных к измерениям двухосных напряжений. Получение алгоритмов (2) на основе соотношений акустоупругости (1) проведено путем логичных предположений о том, что коэффициент  $k_1$  определяет зависимость скорости волны от напряжения, приложенного вдоль направления ее поляризации,  $k_2$  – поперек, а скорость продольной волны одинаково зависит от обеих составляющих плоского напряженного состояния с коэффициентом  $k_3$ . Далее решается система трех уравнений, а во избежание некоторой громоздкости решения пренебрегается некоторыми величинами, связанными с малостью изменений скоростей волн под действием напряжений.

Метод позволяет измерять как одноосные, так и двухосные 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. Метод акустоупругости является логическим продолжением ультразвуковых методов дефектоскопии и толщинометрии.

Есть и другие преимущества, которые мы здесь разберем в порядке упоминания тех методов, с которыми будем проводить сравнение. Точность измерения напряжений в акустически прозрачных материалах сравнима, а иногда и превосходит точность **электротензометрии**. В режиме акустической тензометрии «начальные» акустические параметры ( $t_{01}, t_{02}, t_{03}$ ) определяют непосредственно на элементе конструкции, затем датчики могут быть удалены с поверхности материала на время проведения технологических работ (при сварке, термообработке и т. п.) и установлены снова для дальнейших измерений.

Если нет возможности определить начальные параметры непосредственно (материал уже напряжен), то существует принципиальная возможность найти эти величины косвенными способами. Эта возможность основана на очевидном факте, что скорость упругих волн в ненапряженном материале – величина физически реальная и имеет конкретное значение.

Эксперименты показали, что определение напряжений в режиме «безнулевой» акустической тензометрии [23] возможно в случае слабоанизотропных материалов, в которых величина собственной акустической анизотропии меньше или порядка наведенной напряжениями. Такой режим недоступен не только для традиционной тензометрии, но и для многих других методов НК.

**Рентгеновским методом** измеряются поверхностные микродеформации (микронапряжения), которые не всегда интересны для крупноструктурных материалов, крупногабаритных металлоконструкций. Предъявляются более жесткие требования к чистоте поверхности материала. При измерении напряжений в конструкции с неизвестной предисторией нагружения необходимо использовать эталонный образец такого же материала. Данные можно сравнивать с полученными акустическим методом в случае однородного по толщине напряженного состояния.

Ультразвуковым методом измеряются усредненные по толщине напряжения, которые обычно находят при расчете НДС крупногабаритных конструкций методом конечных элементов. Поэтому проводить практическую проверку таких расчетов удобнее методом акустоупругости.

Что касается **магнитных методов** оценки НДС деталей машин, то главным «плюсом» УЗ метода является его пригодность для измерения напряжений в любых конструкционных материалах, независимо от наличия у них ферромагнитных или каких-либо других специфических свойств, кроме упругих. Все этапы измерения и расчета проводятся в рамках нелинейной механики, без привлечения полей и волн другой природы: упругие волны – это, по существу, механические колебания, распространяющиеся в твердых телах.

Применение магнитных методов связано с использованием тарировочных зависимостей от одноосного напряжения шумов Баркгаузена, коэрцитивной силы, магнитной проницаемости и других характеристик магнитного поля материала. Зависимости измеряемых параметров от напряжений – эмпирические, не совсем линейные, различные для растяжения и сжатия материала. Магнитоанизотропным методом, на базе полученных на образцах тарировочных кривых, можно определять только одноосные или разность двухосных напряжений. Аналитических зависимостей измеряемых магнитных параметров от величины напряжения не существует, а ее определение магнитными методами основано на интуитивных и феноменологических соображениях.

Магнитные методы НК, сравнительно простые и недорогие, вполне подходят для экспресс-сканирования поверхностей элементов конструкций с целью дефектоскопии их приповерхностного слоя, выявления зон концентрации напряжений. Фактически такой метод сигнализирует: в этом месте что-то не так. Для уточнения этого «что-то» нужны более информативные методы, например, ультразвуковые.

В настоящее время не так много опубликованных результатов экспериментального определения двухосных напряжений в реальных конструкциях с использованием физических методов НК. Метод акустоупругости, реализованный в приборе ИН-5101А производства ООО Инженерная фирма «ИНКОТЕС», неоднократно проверен на задачах теории упругости, имеющих аналитическое решение, а именно, при нагружении закрытой трубы внутренним давлением [24, 25] и при одноосном растяжении пластины с вырезом [26]. Разница результатов ультразвукового и расчетного методов не превысила 5-10% от предела текучести сталей, из которых изготовлены указанные детали.

Учитывая рассмотренные здесь преимущества метода акустоупругости для определения механических напряжений в деталях машин и конструкций, надеемся на более широкое его применение в промышленности и на транспорте.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 09-08-97032-

р\_поволжье\_a).

## Литература

1. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
2. Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов и др. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Киев: Наукова думка, 1981.
3. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник. М.: Машиностроение, 1983. 248 с.
4. Экспериментальная механика / Под. ред. А. Кобаяси. В 2-х томах: Т. 1. М.: Мир, 1990. 616 с.
5. Хренов Н.Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Наземные исследования. М.: Газойл пресс, 2005. 608 с.
6. Тензометрия в машиностроении / Справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
7. Дайчик М.Л., Пригоровский Н.М., Хуршудов Г.Х. Методы и средства натурной тензометрии. М.: Машиностроение, 1989.
8. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник под. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005. 656с.
9. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. Учебное пособие для вузов. М.: МИСИС, 2002. 360 с.
10. Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.6. кн.1. М.: Машиностроение, 2004.
11. Дубов А.А., Дубов Ал.А., Колокольников С.М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля. Учебное пособие. М.: Изд-во ЗАО «Тиссо», 2006.
12. Щербинин В.Е., Мужижкий В.Ф., Кулеев В.Г. О “новых физических эффектах”, открытых А.А. Дубовым и В.Т. Власовым // Контроль. Диагностика. 2003. № 9. с. 27-29.
13. Аркулис М.Б., Барышников М.П., Мишенева Н.И., Савченко Ю.И. О проблемах применимости метода магнитной памяти металла при контроле напряженно-деформированного состояния металлоконструкций // Дефектоскопия. 2009. № 12. С. 10-12.
14. Benson R.W., Raelson V.J. From ultrasonics to a new stress-analysis technique. Acoustoelasticity // Product Eng. 1959. Vol. 30. p. 56-59.
15. Гуца О.И., Лебедев В.К. Влияние напряжений на скорость распространения ультразвуковых волн в металлах // Прикл. механика. 1968. № 2. С. 89-92.
16. 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.
17. Smith R.T. Stress-induced anisotropy in solids - the acousto-elastic effect // Ultrasonics. 1963. № 1. P. 135-147.
18. Hughes D.S., Kelly J.L. Second order elastic deformation of solids // Phys. Rev. 1953. Vol. 92. № 5. P. 1145-1149.
19. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка. 1977, 152 с.
20. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.
21. Никитина Н.Е. Акустоупругость и контроль напряжений в элементах машин. - Препринт № 21.- Гф ИМАШ АН СССР. Горький. 1980. 19 с.
22. Никитина Н.Е. Определение плоского напряженного состояния конструкционных

материалов с помощью объемных упругих волн // Дефектоскопия. 1999. № 1. С. 48-54.

23. Никитина Н.Е. Акустические методы исследования напряженного состояния структурно-неоднородных сред. Автореф. дисс-и ... канд. физ.-мат. наук. Ленинград, ЛГТУ. 1991 г.

24. Никитина Н.Е., Казачек С.В., Камышев А.В., Петров О.Е., Смирнов В.А. Исследование двухосного напряженного состояния трубной плети прибором "АСТРОН" // В мире неразрушающего контроля. № 1 (27). Март 2005 г. С. 33-35.

25. Никитина Н.Е., Камышев А.В., Смирнов В.А., Борщевский А.В., Шарыгин Ю.М. Определение осевых и окружных напряжений в стенке закрытой трубы ультразвуковым методом на основе явления акустоупругости // Дефектоскопия. 2006. № 3. С. 49-54.

26. Никитина Н.Е., Казачек С.В. Теоретическое и экспериментальное исследование концентрации напряжений при растяжении пластины с вырезом // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 1. С. 44-48.

*Поступила: 12.01.10.*