

# ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

асп. М.А. ПРИЛУЦКИЙ

*Рассмотрены существующие методы определения напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций. Приведены результаты исследований влияния анизотропии материала на коэффициенты упруго-акустической связи для определения напряженно-деформированного состояния с помощью акустического метода. Представлена процедура определения акустоупругих коэффициентов для анизотропных материалов, предполагающая испытание двух групп образцов.*

*Existing methods of welded components mode of deformation evaluation are examined. Survey of anisotropy of a material influence on factors of acoustoresistive linkages for definition of the is intense-deformed condition by means of acoustic method are observed. Procedure of acoustoresistive factors definition for anisotropic materials assuming test of two groups of samples is presented.*

Оценка напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций является основной для определения их работоспособности, безопасной эксплуатации и определения остаточного ресурса. Определение напряженно-деформированного состояния может осуществляться аналитическими, экспериментальными и расчетно-экспериментальными методами.

Аналитические методы базируются на определенной идеализации объекта исследований. Они не учитывают реальных изменений его технического состояния при эксплуатации, обусловленной изменениями физических характеристик металла, перераспределением нагрузок между элементами конструкции, коррозионными процессами, изменениями в режимах и условиях эксплуатации [1]. Существующие аналитические методы не всегда точно описывают напряженно-деформированное состояние сварной конструкции в реальных условиях эксплуатации. Поэтому экспериментальные методы на сегодняшний день являются средством наиболее объективной оценки технического состояния объекта.

## СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ

Широкое применение в практике изучения напряженно-деформированных состояний нашли методы тензометрирования [2]. Они применяются для оценки физического состояния элементов ответственных сварных металлоконструкций на разных этапах их создания: при монтаже, при испытании, при вводе в эксплуатацию и в начальный период работы конструкции. Действие метода основано на изменении электрического сопротивления тензорезистора (проволочного или фольгированного датчика) при его растяжении или сжатии. Тензометрирование с использованием тензорезисторных преобразователей может применяться только для измерения так называемых динамических деформаций, изменяющихся во времени. Определить остаточные деформации конструкции без каких-либо дополнительных действий этим методом нельзя.

В последнее время при тензометрировании стал применяться метод сверления отверстий для измерения остаточных деформаций (напряжений). В его основу положено измерение меняющихся деформаций, вызванных сверлением отверстий в детали, имеющей остаточные напряжения. Зная величину и направление деформаций при сверлении, а так же размер отверстия и свойства материала, расчетным путем можно определить остаточные напряжения. Однако метод сверления отверстий не может быть успешно применен на реальных конструкциях, находящихся в эксплуатации.

Представляет интерес и новый экспериментальный метод определения напряженно-деформированных состояний упругих тел, основанный на применении лазерно-компьютерной интерферометрической системы «Лимон-ТВ» [3-4]. В этой системе реализованы идеи и обобщены методы, основанные на голографической и компьютерной интерферометрии, она обеспечивает регистрацию деформаций и напряжений в упругих телах с отображением полей распределения малых упругих перемещений и развития процесса деформации по наблюдаемой системе интерференционных полос и ее изменениям. Это позволяет решать как задачи диагностики остаточных напряжений, так и прикладные задачи: определение мест приложения и величины нагрузок, действующих на конструкцию по интерференционной картине перемещений; установление распределенных и локальных неоднородностей в структуре конструкции; обнаружение микротрещин и внутренних расслоений в металле и др. В отличие от тензометрирования, где измерения выполняются для отдельных точек, система «Лимон-ТВ» позволяет наблюдать по интерферометрическим линиям всю картину поля перемещений поверхности тела в окрестности возмущающего воздействия с главными осями деформаций и напряжений. Принцип действия системы «Лимон-ТВ» заключается в измерении малых (от 0,3 микрона) перемещений поверхности конструкции, обусловленных различными внешними и внутренними факторами. Например, исследование напряженно-деформированных состояний упругих тел под воздействием активных нагрузок или определение характера нагружения по картине интерференционных

полос; диагностика технологических процессов по уровню внутренних напряжений [5].

Между тем, лазерно-компьютерная интерферометрическая система «Лимон-ТВ» для определения напряженно-деформированного состояния имеет ряд существенных недостатков: во-первых, она сложна в юстировке; во-вторых, требует наличия достаточно большого свободного пространства над исследуемым объектом; в-третьих, измерения относятся только к поверхностному слою и не могут быть получены для всей толщины металла.

В настоящее время для экспериментального измерения напряженно-деформированного состояния применяется также метод рентгеновского тензометрирования. Идея использования одновременно двух рентгеновских лучей, направленных в точку измерения напряжений на объекте под заданным углом, используется в современных портативных рентгеновских тензомерах «ТРИМ». Неразрушающий метод рентгеновской тензометрии основан на зависимостях закона дифракции и закона Гука [6-8].

Отличительной особенностью рентгеновского метода является независимость величины измеряемых напряжений в произвольно выбранном азимутальном направлении от вида напряженного состояния на поверхности изделия. Кроме того, не требуется знания параметра кристаллической решетки в ненапряженном состоянии, то есть предыстории изделия и условий его эксплуатации. Измеряя напряжения в точке в трех азимутальных направлениях, получаем вычисление величины и направления главных напряжений в этой точке. В рентгеновском методе, так же как и в тензометрии, замер напряжений производится косвенно, путем измерения деформаций. В качестве базы измерения используется межатомное расстояние и его изменение при деформации определенных плоскостей кристаллической решетки. Рентгеновский метод применяется для измерения поверхностных напряжений на глубине 0,002-0,02мм., что, безусловно, следует отнести к основным его недостаткам.

Для исследования напряженно-деформированного состояния достаточно большое развитие получили магнитные методы. Их суть основана на свойстве ферромагнитных материалов, изменять магнитное состояние под влиянием механических напряжений. Магнитные методы при большой (до нескольких миллиметров) толщине исследуемого слоя пригодны для контроля напряжений только в ферромагнитных материалах.

Применение методов фотоупругости ограничено оптически прозрачными материалами или требует сложных модельных экспериментов и расчетов. Поэтому их широкое использование в практических целях ограничено только экспериментальными исследованиями.

Естественно, не существует универсального метода, пригодного в любых условиях, хотя их сочетание весьма часто дает эффективные результаты.

Среди всего многообразия неразрушающих методов контроля напряженно-деформированного

состояния структурных и механических характеристик металлоконструкций бесспорное лидерство принадлежит акустическому методу.

В основу акустических методов контроля напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов положено явление акустоупругого эффекта – зависимости скорости распространения упругих волн от механических напряжений в материале.

В отличие от методов контроля напряжений, основанных на других физических принципах (таких как фотоупругость, магнитоупругость и др.) и часто превосходящих методы акустоупругости по чувствительности к изменениям напряжений, результаты применения методов акустоупругости в реальных инженерных ситуациях для реальных материалов со сложной структурой показывают их значительно меньшую суммарную погрешность и значительно большую устойчивость соответствующих расчетных алгоритмов. Это связано с повышенной информативностью параметров упругих волн, обеспечивающих идентификацию структуры материала и конкретизацию используемых тарировочных кривых.

#### АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

В соответствии с классическими работами [9,10] основные уравнения акустоупругости для плоского напряженного состояния могут быть записаны следующим образом:

$$V_1 = V_1^0 (1 + k_{11} \sigma_1 + k_{12} \sigma_2), \quad (1)$$

$$V_2 = V_2^0 (1 + k_{21} \sigma_1 + k_{22} \sigma_2), \quad (2)$$

$$V_3 = V_3^0 (1 + k_{31} \sigma_1 + k_{32} \sigma_2), \quad (3)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  - главные значения напряжений,

$V_1, V_2$  - скорости распространения поперечных упругих волн, вектор поляризации которых ориентирован вдоль направления действия напряжений, а волновой вектор перпендикулярен плоскости действия напряжений.

$V_3$  - скорость распространения продольных упругих волн, распространяющихся перпендикулярно плоскости действия напряжений.

$V_1^0, V_2^0, V_3^0$  - значения соответствующих скоростей распространения в ненапряженном материале.

$k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}, k_{31}, k_{32}$  - коэффициенты упругоакустической связи.

Выразив скорости распространения упругих волн через соответствующие время и толщину материала в точке измерения уравнения (1) – (3) можно переписать следующим образом:

$$\frac{h}{t_1} = \frac{h^0}{t_1^0} (1 + k_{11} \sigma_1 + k_{12} \sigma_2), \quad (4)$$

$$\frac{h}{t_2} = \frac{h^0}{t_2^0} (1 + k_{21} \sigma_1 + k_{22} \sigma_2), \quad (5)$$

$$\frac{h}{t_3} = \frac{h^0}{t_3^0} (1 + k_{31} \sigma_1 + k_{32} \sigma_2). \quad (6)$$

Введем безразмерные переменные, обычно используемые в акустоупругих соотношениях для плоского напряженного состояния:

$$d_1 = \frac{t_1}{t_3}; d_2 = \frac{t_2}{t_3}.$$

Используя соотношения (4) – (6) с учетом малости упругоакустического эффекта легко получить следующие линеаризованные соотношения:

$$\frac{d_1}{d_1^0} - 1 = (k_{31} - k_{11}) \sigma_1 + (k_{32} - k_{12}) \sigma_2, \quad (7)$$

$$\frac{d_2}{d_2^0} - 1 = (k_{31} - k_{21}) \sigma_1 + (k_{32} - k_{22}) \sigma_2. \quad (8)$$

Переобозначив упругоакустические коэффициенты, соотношения (7), (8) можно записать следующим образом:

$$\frac{d_1 - d_1^0}{d_1^0} = \frac{\Delta d_1}{d_1^0} = k_{11} \sigma_1 + k_{12} \sigma_2, \quad (9)$$

$$\frac{d_2 - d_2^0}{d_2^0} = \frac{\Delta d_2}{d_2^0} = k_{21} \sigma_1 + k_{22} \sigma_2. \quad (10)$$

В случае изотропных материалов выполняются соотношения:

$$k_{11} = k_{22} \quad k_{21} = k_{12}. \quad (11),(12)$$

Упругоакустические коэффициенты находятся экспериментально в процессе упругого деформирования длинных плоских образцов.

Соответствующие соотношения имеют вид:

$$k_{11} = k_{22} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\Delta d_1}{d_1^0} \right) = \frac{1}{d_1^0} \frac{\partial d_1}{\partial \sigma}, \quad (13)$$

$$k_{21} = k_{12} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\Delta d_2}{d_2^0} \right) = \frac{1}{d_2^0} \frac{\partial d_2}{\partial \sigma}. \quad (14)$$

Экспериментальные исследования показали, что в случае анизотропных материалов (а таких – абсолютное большинство) соотношения (11), (12) не выполняются даже приблизительно и попытка использования упругоакустических коэффициентов, определенных по (13), (14) приводит к ошибкам в определении напряжений на трубопроводах из анизотропных сталей, достигающим 100%.

Более строгим представляется процедура определения упругоакустических коэффициентов  $k_{11}, k_{21}, k_{12}, k_{22}$ , предполагающая испытание двух групп образцов, вырезанных вдоль и поперек текстуры материала трубопровода (продольные и поперечные образцы).

В первом случае упругие напряжения обозначим  $\sigma_1$  (соответствует осевому напряжению материала трубопровода), во втором случае  $\sigma_2$  (соответствует кольцевому напряжению).

Из экспериментов по упругому нагружению поперечных образцов получим упругоакустические коэффициенты  $k_{11}, k_{21}$ :

$$k_{11} = \frac{\partial}{\partial \sigma_1} \left( \frac{\Delta d_1}{d_1^0} \right) = \frac{1}{d_1^0} \frac{\partial d_1}{\partial \sigma_1}, \quad (15)$$

$$k_{21} = \frac{\partial}{\partial \sigma_1} \left( \frac{\Delta d_2}{d_2^0} \right) = \frac{1}{d_2^0} \frac{\partial d_2}{\partial \sigma_1}. \quad (16)$$

Из экспериментов по упругому нагружению поперечных образцов получим упругоакустические коэффициенты  $k_{12}, k_{22}$ :

$$k_{12} = \frac{\partial}{\partial \sigma_2} \left( \frac{\Delta d_1}{d_1^0} \right) = \frac{1}{d_1^0} \frac{\partial d_1}{\partial \sigma_2}, \quad (17)$$

$$k_{22} = \frac{\partial}{\partial \sigma_2} \left( \frac{\Delta d_2}{d_2^0} \right) = \frac{1}{d_2^0} \frac{\partial d_2}{\partial \sigma_2}. \quad (18)$$

Используя соотношения (9), (10), запишем расчетные формулы для определения упругих напряжений анизотропного материала:

или: 
$$\sigma_1 = k_1 \left( \frac{d_1}{d_1^0} - 1 \right) - k_2 \left( \frac{d_2}{d_2^0} - 1 \right), \quad (19)$$

где: 
$$\sigma_2 = k_3 \left( \frac{d_2}{d_2^0} - 1 \right) - k_4 \left( \frac{d_1}{d_1^0} - 1 \right). \quad (20)$$

$$\sigma_1 = k_1 \frac{\Delta d_1}{d_1^0} - k_2 \frac{\Delta d_2}{d_2^0}, \quad (21)$$

$$\sigma_2 = k_3 \frac{\Delta d_2}{d_2^0} - k_4 \frac{\Delta d_1}{d_1^0}, \quad (22)$$

$$k_1 = \frac{k_{22}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}}, \quad (23)$$

$$k_2 = \frac{k_{12}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}}, \quad (24)$$

$$k_3 = \frac{k_{11}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}}, \quad (25)$$

$$k_4 = \frac{k_{21}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}}. \quad (26)$$

Ниже в таблице 1 приведены экспериментально определенные значения параметров  $k_{ij}$  для трех видов стали с регулируемой прокаткой марки X70 с различной степенью текстуры.

Характеристика текстуры оценивалась величиной параметра акустической анизотропии  $A_S$ , определяемой относительной разностью скоростей поперечных волн с поляризацией вдоль и поперек прокатки:

$$A_S = \frac{t_2}{t_1} - 1. \quad (27)$$

Таблица 1

Значения коэффициентов упругоакустической связи для сталей с различной степенью анизотропии

$A_S \times 10^{-4}$	$k_{11}$	$k_{21}$	$k_{12}$	$k_{22}$
330	1.04	0.12	0.10	0.73
525	1.53	0.27	0.14	0.92
725	1.76	0.33	0.27	0.91

Размерность коэффициентов  $k_{ij} - \left(\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}\right)^{-1} \times 10^{-4}$ .

В таблице 2 приведены рассчитанные в соответствии с формулами (23) - (26) коэффициенты

$$k_1, k_2, k_3, k_4.$$

Таблица 2

**Значения коэффициентов акустоупругой связи для сталей с различной степенью анизотропии**

$A_S \times 10^{-4}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
330	9800	1300	13900	1600
525	6700	1000	11200	2000
725	6000	1800	11600	2200

Размерность коэффициентов  $k_i - \left( \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} \right)$ .

Одной из важнейших задач в установлении физического состояния объекта является определение изменения напряжений. Это возможно сделать, используя современные средства мониторинга напряженного состояния. Однако, в этом случае датчики (соответствующей физической природы) должны быть установлены на трубопроводе еще до его укладки – сразу после изготовления трубы. Практически это невозможно. Измерить же действующие напряжения, не зная исходного состояния материала, традиционные неразрушающие методы не позволяют.

Таким образом, на рынке методов и средств неразрушающего контроля и диагностики ответственных объектов создались очевидный вакуум и вполне ощутимая потребность в аппаратуре и методологии контроля абсолютных значений напряжений, а не их приращений. Все сказанное полностью относится к сосудам давления, несущим элементам строительных конструкций, к ответственным элементам авиационной, космической техники, ядерной энергетики и др.

Следовательно, главное в методе контроля абсолютных значений напряжений – вопрос восстановления исходного состояния материала, или, как иногда говорят, вопрос “отстройки от структуры” (лучше сказать – “настройки на структуру” в зоне измерения напряжений). Сравнительный анализ возможностей неразрушающих методов контроля механических напряжений показывает, что в настоящее время лишь на базе акустических методов возможно создание подходов к решению задач по определению исходных значений скоростей непосредственно в ходе контроля напряженного состояния исследуемого объекта [11-13]. К преимуществам акустических методов относятся также сравнительная дешевизна аппаратных средств, относительная простота реализации, физическая наглядность, безвредность для обслуживающего персонала, гибкость применения на различных стадиях производства, хранения, эксплуатации и ремонта изделий и

технических объектов различного назначения. Современная аппаратура обеспечивает возможность количественного анализа поля напряжений при плоском напряженном состоянии вблизи дефектов, лимитирующих долговечность и ресурс изделий.

В последние годы поверхностные акустические волны нашли новое применение для измерения остаточных напряжений в тонких металлических пластинах. Поверхностные волны не диспергируют. Их скорость зависит только от упругих постоянных и в неявном виде от напряженного состояния. Изменение скорости распространения поверхностных волн можно использовать для измерения поверхностных напряжений. Эта методика весьма перспективна для оценки остаточных напряжений, которые обычно имеют максимальное значение вблизи поверхности. В [14] на основе анализа теоретических и экспериментальных работ, выполненных в нашей стране и за рубежом, оцениваются возможность и целесообразность применения поверхностных акустических волн (ПАВ) для контроля напряженно-деформированного состояния деталей машин.

#### **Преимущества метода ПАВ заключаются в следующем:**

- ПАВ могут быть использованы для контроля приложенных и остаточных напряжений в приповерхностном слое металла. При уменьшении базы акустических измерений возможен контроль градиентов напряжений.
- Поле напряжений принципиально может быть определено с помощью ПАВ, если известны значения двух акустоупругих констант и имеется возможность измерения времени распространения ПАВ в исследуемой детали при наличии и в отсутствие нагрузки.
- Методика использования ПАВ для контроля напряжений не отличается от известных методик, разработанных для объемных у.з. волн, что позволяет применять ту же измерительную аппаратуру (за исключением датчиков).
- Акустоупругий эффект для ПАВ выражен несколько в меньшей степени, чем для объемных волн. Минимальные значения напряжений, которые удается регистрировать на практике, составляют: в алюминиевых сплавах - от 15 до 60 МПа, в сталях - от 7 до 8 МПа. При этом абсолютная погрешность измерения времени распространения не должна превышать 0.1 нс.

#### **К недостаткам акустического метода можно отнести:**

- Негативное влияние на результаты контроля могут оказать: структурная анизотропия материала; геометрия и состояние поверхности образца; температура объекта; предыстория механической и термической обработки исследуемого изделия, а также ряд других факторов, что требует большого объема дополнительных экспериментов, в частности, уточнения значений акустоупругих констант различных материалов, создания оптимальных конструкций датчиков, а также адаптация методик контроля, разработки метрологического обеспечения и т.п.

### Выводы

1. Несмотря на большое количество публикаций, в которых отражена взаимосвязь между изменениями скорости звука и остаточным напряжением, до последнего времени остается до конца невыясненным влияние на указанную зависимость такого распространенного вида необратимого изменения состояния материала как пластическая деформация.
2. Несмотря на появление новых методов контроля НДС, перспективность использования акустических методов остается первостепенной в задачах контроля напряженного состояния материала чрезвычайно широкого класса ответственных технических объектов.
3. К числу наименее исследованных задач акустоупругости, решение которых в настоящий момент является наиболее востребованным, относятся задачи восстановления исходного состояния материала, или, как иногда говорят, вопрос отстройки от структуры.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриб В.В. Диагностика технического состояния оборудования нефтегазохимических объектов, М., 2002. -268 с.
2. ГОСТ 21616-78 Тензорезисторы. Общие технические условия. М., 1978 -28 с.
3. Чернышев Г.И., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М., 1996
4. Чернышев Г.И., Попов А.Л., Козинцев В.М. Полезные и опасные остаточные напряжения, Журнал «Природа». – 2002. - №10
5. Антонов А.А. Разработка научных основ метода определения остаточных напряжений в сварных конструкциях с применением голографической интерференции: Дисс. д.т.н: 05.03.06-М., 1984. -470 с.
6. Kraus I., Trofimov V.V. Rentgenova tenzometrie. – Praha: Academia, 1988. -248 p.
7. МР 103-83. Методические рекомендации. Расчёты и испытания на прочность. Экспериментальные методы определения напряженно-деформированного состояния элементов машин и конструкций. Определение макронапряжений рентгеновским методом. – М.: ВНИИНМАШ, 1983. -48 с.
8. РД 34.17.425-86. Методические указания по рентгенографическому определению макронапряжений в металле циркуляционных трубопроводов и корпусного оборудования электростанций. – М.: Министерство энергетики электрификации СССР. Главтехуправление. ВТИ, 1989. -32 с.
9. Гузь А.И., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка.1977. -162 с.
10. Бобренко В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н. Акустическая тензомерия. – Кишинев: Штиинца, 1991. -204 с.
11. Пикитина Н.Е. Влияние текстуры конструкционных материалов на параметры распространения упругих волн//Текстуры и рекристаллизация в металлах и сплавах/Тез.докл. Ч.2.-Уфа: Ин-т проблем сверхпластичности металлов.1987. -178 с.
12. Углов А.Л., Попцов В.М., Углова О.В. Современные акустические методы контроля качества материалов элементов машин и конструкций. – М.:ВНИИКИ, 1989, в.3, -36 с.
13. Бобренко В.М., Куценко А.Н., Рудаков А.С. Акустическая тензометрия//Контроль. Диагностика. – 2001. - №4. – С.23-39
14. Куценко А.Н., Шереметиков А.С., Анисимов В.А. Контроль напряжений с помощью поверхностных волн Рэлея. №2359-Ук 89.Деп.УкрНИИТИ.-Дефектоскопия. – 1990. - №7. - С.95-96.