

УДК 621.6-7

АКУСТОУПРУГОСТЬ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Н.Е. Никитина^{1,2)}

Акустоупругость – эффект довольно «слабый» даже при напряжениях, близких к пределу текучести материала, поэтому его обнаружение и, тем более, практическое использование требует весьма прецизионных измерений. Экспериментальные и теоретические проблемы использования явления акустоупругости для неразрушающего контроля напряженного состояния материалов и промышленных конструкций изучаются автором уже более 30 лет. Основные принципы применения акустоупругого эффекта для определения двухосных напряжений с помощью объемных волн, распространяющихся по нормали к плоскости действия напряжений, рассмотрены в монографии [1].

Инженерной фирмой «ИНКОТЕС» разработан прибор для измерения механических напряжений ИН-5101А, который позволяет в автоматическом режиме определять время распространения импульсов упругих волн в конструкционных материалах с точностью, необходимой для практической реализации явления акустоупругости, и вычислять двухосные напряжения на основе расчетных алгоритмов, приведенных в монографии [1]. Возможности прибора подтверждены сертификатом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. К прибору прилагается методика выполнения измерений (МВИ) осевых и окружных напряжений в стальных трубопроводах [2], аттестованная в установленном порядке и внесенная в Федеральный Реестр МВИ, применяемых в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора. В октябре прошлого года введен в действие национальный стандарт РФ, устанавливающий общие требования неразрушающего контроля напряжений в элементах конструкций акустическим методом [3].

Эффективность разработанных метода и прибора неоднократно подтверждена при экспериментальных исследованиях напряженного состояния тонкостенных металлоконструкций, работающих под давлением. Нагружение закрытой трубы внутренним давлением – одна из тестовых задач, позволяющая сравнить данные неразрушающего контроля с результатами аналитического решения задачи, приведенного, например, в книге [4]. Согласно этому решению, впервые найденному Габриелем Ламе в позапрошлом веке, напряженное состояние тонкостенной трубы представляется локально плоским, так как радиальная составляющая напряжений мала по сравнению с осевой σ_z и окружной σ_t составляющими. Последние же вычисляются по довольно простым формулам:

$$\sigma_z \approx P \frac{R}{2h}, \quad \sigma_t \approx P \frac{R}{h}, \quad (1)$$

где P – гидростатическое давление; h – толщина стенки трубы; R – внешний радиус трубы (510 мм).

Вычисление двухосных напряжений по данным акустических измерений, проведенных в слабоанизотропном материале, проводится по формулам [1-3]:

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

где K_1 и K_2 – коэффициенты упруго-акустической связи (КУАС) материала трубы; t_{01}, t_{02}, t_{03} – времена распространения (задержки) сдвиговых и продольной волны при начальном уровне напряжений (начальные значения); t_1, t_2, t_3 – значения соответствующих задержек при текущем уровне напряжений (текущие значения).

Алгоритм расчета напряжений (2) содержит только безразмерные акустические параметры, не зависящие от изменения акустического пути при деформации материала, а в качестве «силовых» характеристик – величины, которые можно найти, зная величины констант линейной и нелинейной упругости материала, или экспериментально определить на образцах материала трубы при известном его напряженном состоянии. Все упругие волны распространяются по нормали к плоскости действия напряжений (в радиальном направлении).

Формулы (2) позволяют достоверно определять напряженное состояние материалов, не обладающих анизотропией, значительно превышающей ту, которая может быть наведена напряжениями, доходящими до предела текучести материала. Например, при измерении осевого и окружного напряжений в ходе гидроиспытаний заглушенной трубы диаметром 1020 мм и толщиной стенки 9 мм, проведенных на полигоне УАВР ООО «Газпром трансгаз Ухта», оказалось, что средняя разница значений напряжений, измеренных экспериментально и рассчитанных по формулам теории упругости, не превысила 5% от предела текучести трубной стали, равного 500 МПа [5]. При этом величина собственной акустической анизотропии импортной трубной стали шведской поставки не превышала 1,5%.

Для изготовления труб большого диаметра может использоваться отечественный листовой прокат (штрипс), в котором относительная разница величин t_{01}, t_{02} (величина собственной акустической анизотропии материала, обусловленной технологическими причинами) может достигать 8 и более процентов. В трубных сталях с параметрами собственной анизотропии, превосходящими 1,5-2%, расчет двухосного напряженного состояния рекомендуется проводить по формулам [2]:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= K_1^{\parallel} \left(\frac{t_{01}t_3}{t_{03}t_1} - 1 \right) - K_2 \left(\frac{t_{02}t_3}{t_{03}t_2} - 1 \right), \\ \sigma_t &= K_1^{\perp} \left(\frac{t_{02}t_3}{t_{03}t_2} - 1 \right) - K_2 \left(\frac{t_{01}t_3}{t_{03}t_1} - 1 \right),\end{aligned}\quad (3)$$

где $K_1^{\parallel}, K_1^{\perp}$ – коэффициенты упругоакустической связи для напряжений, действующих вдоль и поперек направления образующей трубы (направления проката материала), соответственно. Коэффициент K_2 является «поправочным», его зависимостью от направления действия напряжения по отношению к осям симметрии материала можно пренебречь.

Здесь приведены результаты измерения механических напряжений в трубной плети из двух труб длиной 11 м, при ее ступенчатом нагружении внутренним давлением.

Измерения проведены в рамках ресурсных гидравлических испытаний труб из стали Х70 диаметром 1020 мм и толщиной стенки 14 мм, вырезанных из магистральных газопроводов и содержащих стресс-коррозионные дефекты. Испытания проведены под руководством специалистов ИТЦ «Оргтехдиагностика» ОАО «Оргэнергогаз» на полигоне УАВР ООО «Газпром трансгаз Чайковский».

Величина собственной акустической анизотропии трубной стали оказалась равной 5%, поэтому расчет напряжений проводили в соответствии с формулами (3). Предварительно, в лабораторных условиях, были определены величины КУАС K_1^{\parallel} , K_1^{\perp} , K_2 стали Х70. Акустомеханические испытания проведены с использованием стандартных образцов по ГОСТ 1497, вырезанных вдоль и поперек проката материала из темплетов, предоставленных сотрудниками ИТЦ ООО «Газпром трансгаз Ухта», с последующей правкой для придания им плоской формы.

Величины КУАС определяли, растягивая образцы с помощью машины для механических испытаний Р-20, до возникновения в них напряжений, достигающих 0,7 от предела текучести стали, принятого равным 465 МПа. Результаты измерения величин КУАС оказались следующими:

$$K_1^{\parallel} = -82000 \text{ МПа}, \quad K_2^{\parallel} = -10000 \text{ МПа};$$
$$K_1^{\perp} = -126000 \text{ МПа}, \quad K_2^{\perp} = -14000 \text{ МПа}.$$

Как видим, величины КУАС, измеренные в образцах, по-разному ориентированных относительно осей симметрии конструкционного материала, различаются довольно существенно (на 30-40%).

Измерения акустических параметров проведены при нагружении трубной плети внутренним давлением 0, 10, 29, 75, 94 и 120 атм., в двух точках трубы, расположенных следующим образом:

точка 1 – на расстоянии 300 мм от продольного сварного шва;

точка 2 – на расстоянии 500 мм от продольного сварного шва.

Для каждой ступени нагружения по формулам (1) определены теоретические, а по формулам (3), где $K_2^{cp} = -12000$ МПа, экспериментальные значения осевых и окружных напряжений в стенке трубы. На рис. 1, 2 приведен пример сравнения указанных величин для точки 1.

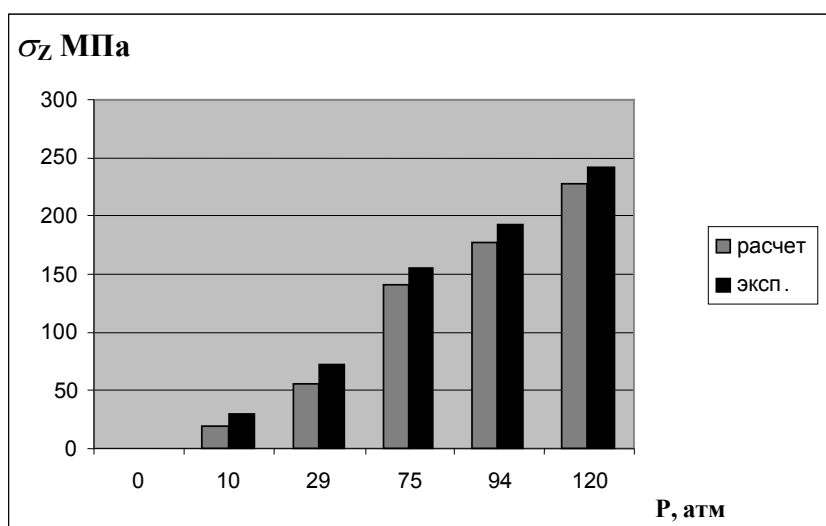


Рис. 1. Измеренные методом акустоупругости и расчетные значения осевых напряжений.

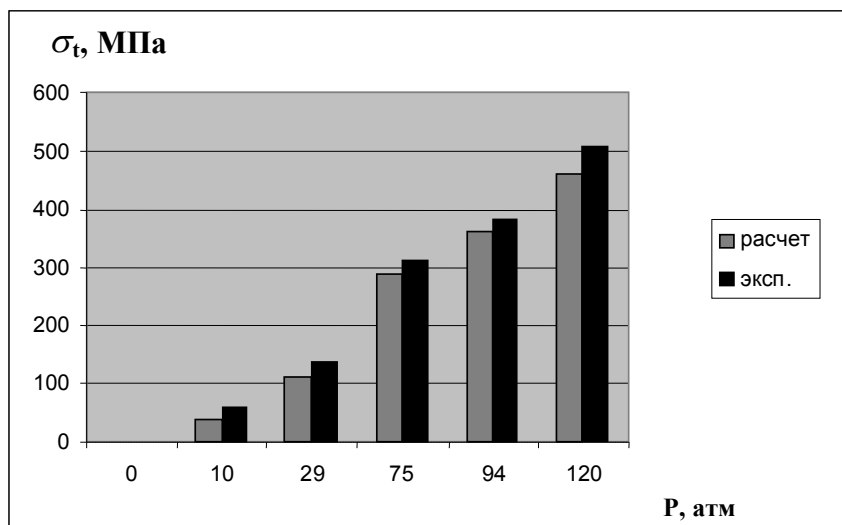


Рис. 2. То же, для окружных напряжений.

Средняя по двум точкам разница расчетных и измеренных значений составила для осевых напряжений 15 МПа, для окружных напряжений 36 МПа. Это не превышает соответственно 3% и 8% от предела текучести материала, принятого равным 465 МПа (поскольку испытывались трубы, бывшие в эксплуатации, возможны небольшие отклонения их предела текучести от стандартных значений). При этом надо учесть, что величины КУАС определялись на образцах стали X70 с параметрами собственной анизотропии 4%, а не 5%, как в материале трубы.

Таким образом, метод акустоупругости, реализованный с помощью прибора ИН-5101А, выдержал проверку арбитражным расчетным методом с неплохими результатами. Метод и прибор были использованы для измерения механических напряжений, возникающих в элементах конструкции трубопроводных обвязок (ТПО) газокompрессорных станций (ГКС) в процессе их длительной эксплуатации и после выполнения ремонтных работ. Проведены прямые измерения осевых напряжений в трубах надземной части обвязки аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа.

Геодезические измерения, проведенные до и после выполнения ремонтных работ, позволили сделать вывод о возможности подвижек опорных точек ТПО АВО газа после завершения ремонта. На основе результатов геодезических измерений проведены расчеты НДС конструкции методом конечных элементов (МКЭ). Прямые измерения напряжений, проведенные на выведенных из эксплуатации трубопроводах обвязки АВО газа, подтвердили результаты расчетов, а именно: подвижки подземных трубопроводов ТПО и фундаментов стоек АВО газа во время проведения ремонтных работ привели к появлению напряжений, не удовлетворяющих требованиям СНиП [6]. При неразрушающем контроле напряженного состояния трубопроводов использовались нормативные документы [2,3].

Анализ значений осевых напряжений, напрямую измеренных в контрольных точках методом акустоупругости и напряжений в этих же точках, полученных в результате расчета МКЭ, позволил сделать следующие выводы:

1. Напряжения в «закрепленных» точках конструкции, измеренные ультразвуковым методом, в основном растягивающие, что не противоречит данным геодезических измерений, указывающих на просадки опорной системы ТПО за время ремонта. Для расчетных величин напряжений это выполняется автоматически, так как

они и получены на основе данных об указанных просадках.

2. Измеренные значения напряжений в основном меньше расчетных. Это может свидетельствовать о наличии пластических деформаций отдельных элементов ТПО. Как упомянуто выше, при расчете материал труб предполагался упругим, в случае же пластического деформирования материала в некоторых контрольных точках соответствующие значения растягивающих напряжений будут меньше.

3. Средняя по всем АВО разница между измеренными и расчетными значениями осевых напряжений в трубопроводах на входе газа не превысила 40 МПа, на выходе – 70 МПа. Это говорит о высокой достоверности такой комплексной оценки НДС трубопроводной системы.

Для окончательного подтверждения сделанных выводов было предпринято разрезание ТПО одного из АВО на входе и на выходе газа. После разрезания вертикальной трубы входа газа края реза сместились по вертикали на 87 мм, на выходе – на 50 мм. Также присутствовали и горизонтальные смещения краев реза. Указанные смещения подтвердили результаты прочностного расчета и ультразвуковых измерений напряжений. Результаты обследования стали основанием для разработки программы ремонтных работ по снятию непроектных нагрузок.

Таким образом, метод акустоупругости может быть продуктивно использован как для непосредственного измерения напряжений в опасных сечениях изделий, так и для проверки результатов расчетов НДС многосекционных конструкций методом конечных элементов. Это позволяет надеяться на успешное внедрение этого сравнительно нового перспективного метода в практику неразрушающего контроля крупногабаритных металлоконструкций.

Выражаю глубокую благодарность специалистам ИТЦ «Оргтехдиагностика» ОАО «Оргэнергогаз», ИТЦ и УАВР ООО «Газпром трансгаз Ухта», УАВР и ГКС «Алмазная» ООО «Газпром трансгаз Чайковский» за помощь в организации и проведении экспериментов.

Литература

1. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.
2. Трубы стальные для трубопроводов. Методика выполнения измерений механических напряжений методом акустоупругости. Свидетельство об аттестации № 531/1700. Регистрационный код МВИ по Федеральному реестру ФР.1.31.2006.0283.
3. ГОСТ Р 52731-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2007.
4. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М: Наука, 1980. 712 с.
5. 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.
6. Строительные нормы и правила. Магистральные трубопроводы. СНиП 2.05.06-85. Минстрой России, 1997.

¹⁾Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благодирова РАН, Россия

²⁾ООО «ИНКОТЕС», Россия, Нижний Новгород