

Технологии НК

## Acoustic Tensometry – an Application to UD4-T HU-01

**V. M. Bobrenko, A. A. Pokladov, V. E. Rylsky, V. N. Sirbu,  
A. V. Sorokin, I. V. Chudnov**

The main formulas of linear theory of acoustoelasticity, that makes it possible to use it in engineering practice of acoustic tensometry within error  $\varepsilon \leq 10^{-2} \%$ , are given.

The initial data determination procedure is discussed. Technique (calculation formulas), adjustment and strain measurement in threaded components, when demountable joints assembling, with the use of multi-purpose ultrasonic device UD4-T HU-01 in the «Acoustical tensometer» mode are discussed.

# Акустическая тензометрия как приложение к УД4-Т НУ-01

Ультразвуковой контроль

49

### Об авторах

Сотрудники АО «Вотум»,  
г. Кишинев:



**Рыльский  
Виктор Евсеевич**

Заместитель начальника отдела,  
программист

**Покладов  
Александр Алексеевич**  
Технический директор



**Бобренко  
Вячеслав Михайлович**

Главный научный сотрудник, д.т.н.

**Сырбу  
Василий Николаевич**  
Начальник отдела, к.т.н.

Сотрудники Лаборатории технической диагностики ОАО «ВМЗ»,  
г. Выкса:

**Сорокин  
Ананий Вячеславович**  
Ведущий инженер

**Чуднов  
Игорь Вениаминович**  
Начальник Лаборатории

Сегодня методы акустоупругости [1, 2] вышли за пределы теоретико-экспериментальных исследований и находят все большее практическое применение в промышленности [1 – 7]. Контроль усилий (напряжений) в материалах различных объектов осуществляется методом акустической тензометрии, который представляет собой совокупность методов и средств контроля, основанных на измерении параметров ультразвуковых волн, распространяющихся в напряженно-упругой среде.

Область применения акустической тензометрии в промышленности достаточно широка – это судостроение, автомобилестроение, авиационная, аэрокосмическая и военная техника, тепловая и атомная энергетика, нефтегазовая отрасль, шельфовая нефтедобыча и другие отрасли. Вопросы применения УД4-Т для решения задач акустической тензометрии рассмотрены весьма кратко в [7]. Остановимся более подробно на методической части применительно к контролю резьбовых деталей разъемных соединений.

В 2003 – 2004 гг. по заданию НПО «Энергомаш» им. В. П. Глушко, г. Химки, специалистами компании «Вотум» в рамках программы переоснащения новой техникой была разработана специализированная программа к УД4-Т НУ-01 (далее УД4-Т) «Акустический тензометр» [3, 6, 7], отвечающая требованиям ОСТ 92-9521 и предназначенная для контроля усилия затяжки разъемных соединений жидкостно-реактивных двигателей (ЖРД). Однако наличие специфических требований, реализованных в данной программе, препятствовало ее широкому применению.

Учитывая широкий интерес различных отраслей промышленности к контролю усилий затяжки акустическим методом, была разработана универсальная методика акустической тензометрии, представленная в УД4-Т как отдельное программное приложение. Программа реализует способ акустической (ультразвуковой) тензометрии, основанный на зависимости скорости распространения ультразвуковых волн в материалах от воздействия на них механических напряжений. Использование этой зависимости осуществляется прецизионным измерением времени распространения УЗ волн в материале контролируемого изделия.

Обычно контроль усилия затяжки разъемных соединений проводится для шпилек или болтов с резьбой не менее М12 при соотношении длины к диаметру не более 7; для резьбы не менее М64 допускается это соотношение увеличить до 10, а иногда и больше при условии увеличения диаметра пьезопластины ПЭП до 20 – 25 мм. Детали могут изготавливаться из сталей, алюминиевых, титановых и других сплавов.

Особых требований к месту установки ПЭП на болт (шпильку) нет. В случае шпилек или болтов с резьбой не более М110 без центрального отверстия ПЭП устанавливается в центре. При наличии центрального отверстия, используемого при тено-термозатяжке, ПЭП устанавливается на середину кольца, в точке  $(R_{детали} + R_{отверстия})/2$ . Качество акустического контакта обеспечивается магнитной присоской (контроль статический, ручной), контактная среда обычная.

Оптимальная частота ПЭП для проведения измерений установлена экспериментально. Для резьбы М8 – М24 это 10 МГц при диаметре пьезопластины 6 мм, а начиная с М24 – 5 МГц при диаметре пьезопластины 12 – 18 мм. Согласно публикациям в иностранной печати в зарубежных приборах акустической тензометрии используются ПЭП с аналогичными параметрами.

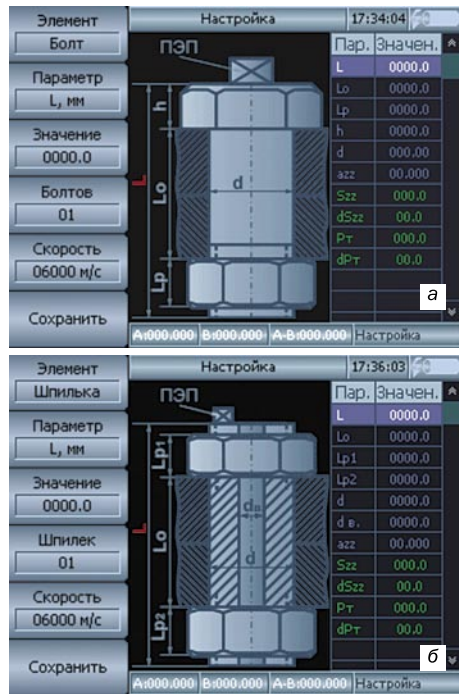


Рис. 1. Ввод параметров: а – болтов; б – шпильки

В приборе реализован прецизионный импульсный метод измерения времени в двух исполнениях: по переходу радиоимпульса через «ноль» и по выбранному уровню видеоимпульса. Для исключения влияния задержек в электронной цепи, протекторе, переходной среде и т. д. отсчет времени ведется от первого эхо-сигнала до второго, третьего и т. д.

## Физические основы и получение исходных данных

### Общие положения

В общем виде (для всех типов волн) в пределах погрешности измерений  $\varepsilon \leq 10-2\%$  зависимость «скорость–напряжение» с учетом знаков  $\beta_{ik}$  и  $\sigma_{\ell\ell}$  можно записать следующим образом [1, 2]:

$$v_{ik} \approx v_0 (1 \pm \beta_{ik} \sigma_{\ell\ell}), \quad (1)$$

где  $v_0$ ,  $v_{ik}$  – скорость распространения ультразвуковых колебаний до и после приложения механического напряжения ( $\ell$  – индекс, указывающий направление распространения волны;  $k$  – плоскость поляризации; для продольной волны  $i = k$ );  $\beta_{ik}$  – акустоупругий коэффициент скорости распростране-

ния колебаний, который зависит от типа возбуждаемой волны и упругих коэффициентов Лямэ (Ламе) –  $\lambda$  и Мурнагана –  $\ell$ ,  $m$ ,  $n$  [2] и является постоянной величиной для данной марки материала;  $\sigma_{\ell\ell}$  – величина одноосного механического напряжения, положительная при растяжении и отрицательная при сжатии.

Знак «±» в (1) объясняет поведение скорости колебаний при распространении в разных направлениях по отношению к направлению действия одноосных напряжений (увеличивается или уменьшается). Знаки акустоупругих коэффициентов также зависят от типа волн (продольные или сдвиговые) [1, 2, 5].

Однако в процессе контроля информативным (измеряемым) параметром является время распространения колебаний  $\tau_{ik}$ , а не скорость. Отличительной особенностью этого параметра является зависимость изменения его значения в процессе нагружения не только от изменения скорости распространения колебаний, но и от изменения «акустического пути», т. е. изменения размеров детали в направлении прозвучивания вследствие действия закона Гука линейной теории упругости при растяжении:

$$\ell = \ell_0 (1 + \sigma_{\ell\ell}/E), \quad (2)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\ell_0$ ,  $\ell$  – размеры детали (акустический путь) до и после приложения механического напряжения (усилия).

Рассмотрим случай одноосных напряжений при распространении ультразвуковых волн в направлении их действия. В этом случае формула (1) приобретает вид:  $v_{ik} \approx v_0 (1 - |\beta_{ik}| \sigma_{\ell\ell})$ , где  $\beta_{ik}$  – отрицательный коэффициент. Отсюда с учетом (2) получим:

$$\tau_{ik} \approx \tau_0 [1 + (1/E + |\beta_{ik}|) \sigma_{\ell\ell}] \quad (3)$$

Назовем  $(1/E + |\beta_{ik}|)$  акустоупругим коэффициентом времени распространения ультразвуковых колебаний и обозначим его через  $\alpha_{ik}$ . Используя (3), запишем:

$$(\tau_{ik} - \tau_0)/\tau_0 = \Delta\tau_{ik}/\tau_0 \approx \alpha_{ik} \sigma_{\ell\ell}. \quad (4)$$

Величина  $\alpha_{ik}$ , как и  $\beta_{ik}$ , является постоянной для данного типа металла. В общем виде выражение (4) является основным уравнением акустической (ультразвуковой) тензометрии на основе эффекта акустоупругости. Отметим, что для сдвиговых волн  $1/E > |\beta_{ik}|$ , поэтому простое выражение:  $\tau_{ik} \approx \tau_0 (1 + \sigma_{\ell\ell}/E)$ , но это приводит к занижению расчетных значений  $\sigma_{\ell\ell}$ .

## Контроль усилий затяжки резьбовых деталей (шпильки, болты)

Требуется определить усилия затяжки или растягивающих напряжений вдоль оси объекта контроля в направлении прозвучивания при сборке фланцевых (разъемных) соединений с помощью резьбовых деталей. Обозначим ось, вдоль которой действует растягивающая сила, через  $Z$ . Тогда выражение (4) в пределах погрешности порядка 0,01% для продольных волн будет:

$$(\tau_{\ell i} - \tau_{\ell 0})/\tau_{\ell 0} = \Delta\tau_{\ell i}/\tau_{\ell 0} = \alpha_{zz} \sigma_{zz}, \quad (5)$$

где  $\tau_{\ell 0}$  и  $\tau_{\ell i}$  – время распространения волн соответственно в ненагруженной и нагруженной детали. Выражение (5) рассчитано для случая, когда величина напряжения  $\sigma_{zz}$  равномерно распределена вдоль оси детали по всему пути распространения волн. Однако наличие участков с резьбой шпильки или болта, схематически представленных на рис. 1, предопределяет неравномерность распределения указанной величины вдоль оси.

Эту неравномерность можно заменить средним значением  $\sigma_{cp} = \sigma_{zz}$  на участке  $L_{раб} = 0,3 (L_{p1} + L_{p2}) + L_0$  (обозначения на рис. 1) [8]. Изменение времени распространения происходит только на участке  $L_{раб}$ , а прозвучивание производится по всей длине  $L$  шпильки, т. е. получаем как бы заниженный результат контроля во столько раз, во сколько  $L_{раб}$  меньше  $L$ . Введем поправочный геометрический коэффициент  $n = L/L_{раб}$ . Тогда

$$\sigma_{zz} = n \Delta\tau_{\ell i}/(\tau_{\ell 0} \alpha_{zz}) \quad (6)$$

Здесь значения  $n$  и  $\alpha_{zz}$  постоянны для данной детали, остается определить акустическим методом значение  $\Delta\tau_{\ell i}/\tau_{\ell 0}$ , т. е.  $\tau_{\ell 0}$  и  $\tau_{\ell i}$ .

## Получение исходных данных, тарировка

В практике акустического тензометрирования резьбовых деталей разъемных соединений существует два подхода к решению рассматриваемой задачи. Первый – определение тарировочной зависимости:

$$\Delta\tau_{тар} = k P_{тар} = k \sigma_{тар} 0,785 d^2; \quad K = \Delta\tau_{тар}/P_{тар}; \quad (7)$$

где:  $\Delta\tau_{тар} = \tau_{тар} - \tau_{\ell 0}$  – измеряемое приращение времени распространения колебаний в нагруженном образце, по сравнению с ненагруженным, мкс;  $k$  – тарировочный коэффициент, мкс/кгс (мкс/тс), подлежащий определению;  $P_{тар}$  – известная сила, кгс (тс), приложенная к образцу, подвергаемого нагружению (тарировке);

$\sigma_{\text{тар}}$  – величина одноосного механического напряжения, МПа, возникающая в образце в результате приложения силы  $P_{\text{тар}}$ ;

Для реализации данного подхода требуется проведение тарировки не только для разных материалов, но и тарировка каждого типоразмера из одного и того же материала.

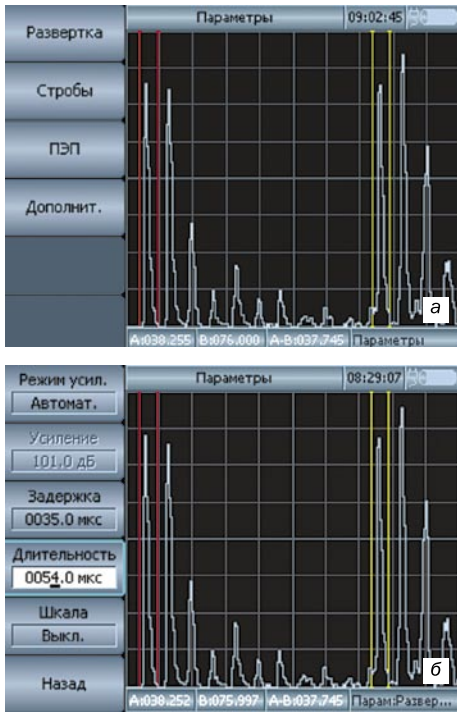


Рис. 2. Установка параметров развертки, стробов и ПЭП: а – меню «Параметры», б – подменю «Развертка»

Второй – универсальный, основанный на определении величины  $\alpha_{zz}$  – акустопругого коэффициента времени распространения волн. Учитывая, что  $P_{\text{тар}} = \sigma_{\text{тар}} 0,785 d^2$ , из (6) и (7), получаем:

$$\Delta \tau_{\text{тар}} = \alpha_{zz} \sigma_{\text{тар}} \tau_{\text{т0}} / n = \tau_{\text{т0}} \alpha_{zz} P_{\text{тар}} / (n 0,785 d^2). \quad (8)$$

Таким образом:

$$\alpha_{zz} = n \Delta \tau_{\text{тар}} 0,785 d^2 / (\tau_{\text{т0}} P_{\text{тар}}), \quad (9)$$

откуда по результатам тарировки можно определить значение  $\alpha_{zz}$ .

По этой универсальной методике тарировку можно проводить на любом образце из данного материала, соблюдая упомянутое соотношение длины к диаметру. В качестве нагружающего устройства для тарировки необходимо использовать любое стандартное оборудование по ГОСТ [12]. Нагружающее устройство должно в обязательном порядке пройти метрологическую аттестацию.

### Работа с УД4-Т в режиме «Тензометр»

Программное обеспечение для работы в этом режиме основано на единой интерфейсной концепции, применяемой в УД4-Т, что значительно облегчает процесс обучения и работы с программой «Тензометр».

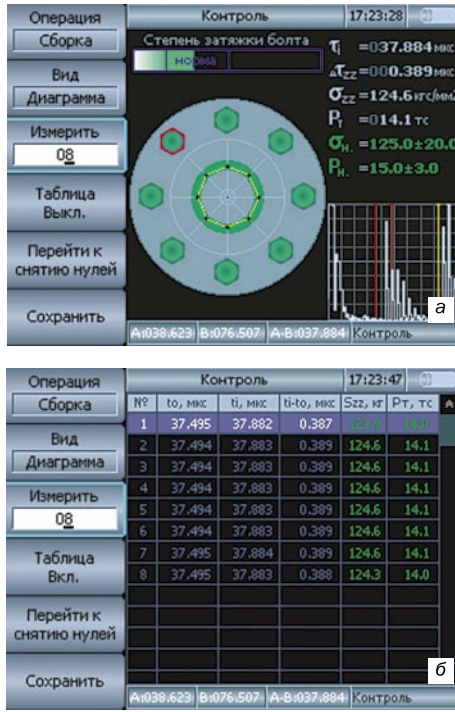


Рис. 3. Отображение результатов контроля в виде: а – диаграммы усилий; б – таблицы

Первым этапом работы является создание настроек для контроля каждого из имеющихся типов болтов и/или шпилек. В частном случае, если применяется только один тип контролируемой детали, необходимо создать всего одну настройку и сохранить ее в архиве.

В первую очередь необходимо задать параметры используемых типов болтов и/или шпилек. Для наглядности на экране дефектоскопа отображается схематическое изображение болта или шпильки с указанием на нем того параметра, значение которого вводится в данный момент (рис. 1). При этом автоматически рассчитываются параметры развертки (задержка, длительность) и стробов (начало, ширина), исходя из введенных параметров и скорости распространения продольных ультразвуковых волн в материале. Затем устанавливается частота используемого ПЭП. Следует отметить, что параметры развертки и стробов могут устанавливаться и вручную (рис. 2), если по каким-либо причинам автоматическая настройка невозможна (например, если не известна скорость распростране-

ния продольных волн в материале, из которого изготовлены болты или шпильки). Настройка на конкретный тип болта или шпильки сохраняется в памяти прибора. Всего можно создать 500 настроек.

На рис 2 приведен А-скан шпильки М14×112 мм (ПЭП типа П111-5-К12-040). На экране видны сигналы-спутники, между которыми временной интервал равен  $\Delta \tau \approx 0,263d$  мкс ([9], с. 28пр), где  $d$  – диаметр детали. Сигналы-спутники более явно

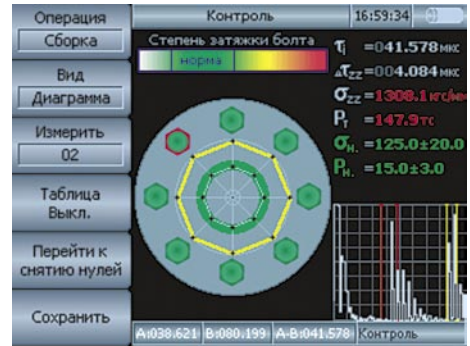


Рис. 4. Режим перепроверки

проявляются при  $d \leq M16$  с соотношением длины к диаметру не менее 7 (в примере  $L/d = 8$ ). В этом случае необходимо выбирать ПЭП типа П111-10-К6-045 и более внимательно определять номера донных эхо-сигналов по примерному значению расчетного времени распространения ультразвука (например, по рис. 4:  $\tau_{\text{з3}} = 112/3 = 37,33$  мкс, а измеренное значение 37,745 мкс). В этом примере  $L = 112$  мм – путь прозвучивания (высота образца);  $0,5 v_{\text{л}} \approx 3$  мм/мкс;  $v_{\text{л}}$  – скорость продольных волн в стали.

Вторым этапом работы с программой является непосредственно контроль усилий затяжки. Для этого необходимо загрузить из архива настройку на тип болта (шпильки), используемый в контролируемом соединении. На рис. 3 представлены варианты изображений на экране в процессе контроля. Отображение результатов контроля в виде диаграммы позволяет в наглядной форме оценить распределение напряжений по всему соединению. При помощи цветовой шкалы показана степень затяжки текущего болта (на рис. 4 показано «Превышение нормы»). Отображение результатов в виде таблицы позволяет одновременно увидеть значения времен распространения продольных волн, а также усилий и напряжений для всех болтов (шпилек).

В программе существует также режим перепроверки соединений, которые уже подвергались контролю ранее. При этом на экране отображается как текущая диаграмма усилий, так и диаграмма усилий, которая была получена при предыдущем контроле. Это позволяет следить за изменениями уровня затяжки, которые происходят в соединениях с течением времени.

После окончания процесса контроля соединения полученные результаты могут

быть сохранены в архиве прибора с целью их дальнейшей обработки на ПК. Всего можно сохранить до 500 результатов контроля различных соединений. Помимо обработки результатов контроля на ПК (просмотр, распечатка отчетов) сохраненные результаты могут быть просмотрены непосредственно на приборе. На рис. 5 представлен вид экрана дефектоскопа в режиме просмотра результатов контроля.



Рис. 5. Просмотр результатов контроля: а – параметры соединения; б – диаграмма усилий

## Результаты промышленного использования

На металлургическом заводе г. Выкса (ООО «ВМЗ») при контроле оборудования пресса П9057ТЭСК ТБД (трубо-электросварочный комплекс производства труб большого диаметра) до недавнего времени действовала методика определения затяжки шпилек, которая осуществляется с помощью накидного ключа с наваренным рычагом порядка 280 мм и меткой места, куда необходимо ударять кувалдой. Соединения в большинстве своем не имеют прокладок, и затяжка определяется по изменению звука (на слух до «звона») при ударе. Особый недостаток этой методики сборки является большая погрешность определения величины усилия «затяжки», из-за чего были случаи обрыва шпилек и болтов с потерей производства труб. Поэтому было решено применить уже опробованный в промышленности метод акустической тензометрии [1 – 6].

В настоящее время с использованием УД4-Т осуществляется мониторинг резьбовых разъемных соединений: болтов М64; шпилек М55, М64, М90, М130. Материал деталей в основном Сталь 40Х, Сталь 35 и 38 Х2МЮА.

Пример акустического тензометрирования шпилек «клапана запорного 100» с использованием рассмотрен-

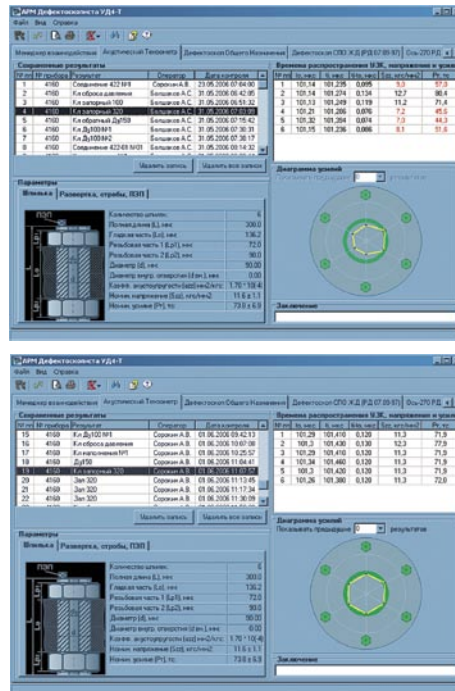


Рис. 7. Клапан запорный 320: документирование результатов на ПК (контролируемая технология сборки с использованием УД4-Т)

ной методики контроля приведен на рис. 6. Параметры шпилек: Сталь 35, шпилька М90;  $L = 300$  мм,  $L_p = 162$  мм,  $L_0 = 136$  мм,  $L_{раб} = 185$  мм;  $n = 1,62$ ;  $\sigma_{zz} = \sigma_H = 11,6$  (12) кгс/мм<sup>2</sup> (114 МПа),  $\alpha_{zz} = 1,70 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>2</sup>/кгс (10<sup>-11</sup> МПа<sup>-1</sup>).

Как видно из рис. 6, по результатам измерений неконтролируемая технология сборки приводит к достаточно большому разбросу расчетных значений  $\sigma_{zz}$ . По номиналу затянуты только шпильки №№ 2 и 3. Максимальное отклонение от номинала составило – 4,6 (5) кгс/мм<sup>2</sup> (–45 МПа), что соответствует «недотягу» шпильки № 5 на – 40 % от номинала. При таком способе сборки – результат ожидаемый [2]: обычно детали с резьбой  $\leq$  М64 «недотягиваются», а с резьбой  $\leq$  М64 «передотягиваются». После корректировки степени затяжки этого же соединения с использованием УД4-Т разброс величины  $\sigma_{zz}$  составил 3÷6 % (рис. 7).

## Заключение

Метод акустической тензометрии успешно применяется на практике и дает существенное повышение точности и, что немаловажно, равномерности степени затяжки резьбовых соединений по сравнению с другими методами оценки.

Представление полученной информации в графическом и/или табличном виде дает наглядное представление о состоянии стыка в реальном масштабе времени. Сохранение информации о состоянии объекта позволяет вести мониторинг состояния за все время эксплуатации.

Рис. 6. Клапан запорный 320: документирование результатов на ПК (неконтролируемая технология сборки)

## Литература

1. Бобренко В. М., Авербух И. И., Чичугов А. А. Ультразвуковой метод измерения напряжений в деталях разъемных соединений. – Дефектоскопия. 1974. № 1. С. 72–81.
2. Бобренко В. М., Куценко А. Н., Вангели М. С. Акустическая тензометрия (теория и практика). – Кишинев: Штинца, 1991. – 204 с.
3. Бобренко В. М., Покладов А. А., Рылский В. Е. Ультразвуковая тензометрия разъемных соединений. – В кн.: I Нац. научно-техн. конф. по НК и ТД/Материалы. – Кишинев: 2003, с. 78–80.
4. Бобренко В. М. Акустическая тензометрия и методология контроля разъемных соединений. Теория и аппаратные средства. В кн.: 3-я Межд. выставка и конф. «НК и ТД в промышленности» / Тезисы докладов. – М.: 2004, с. 153.
5. Бобренко В. М. Разработка и создание методов и средств акустической тензометрии разъемных соединений аэрокосмических аппаратов / Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. доктора техн. наук. – М., 2004.
6. Бобренко В. М., Покладов А. А., Рудаков А. С. и др. Универсальные электронные средства УЗ НК в приложении к ультразвуковой тензометрии. – Контроль. Диагностика. 2004. № 11. С. 40–44.
7. Покладов А. А., Рылский В. Е., Анточ В. Н., Габуров А. Г. УД4-Т NU-01 – новый подход к решению традиционных задач. – В мире НК. 2005. № 1(27). С. 64–67.
8. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые и фланцевые соединения. – М.: Машиностроение, 1990. – 365 с.
9. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль / Справочник // Под ред. В. В. Клюева. Т. 3: Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Ультразвуковой контроль – М: Машиностроение, 2006. – 864 с.
10. ГОСТ 7855-94 «Машины разрывные и универсальные для статических испытаний материалов».

Статья получена 7 июля 2006 г.  
в окончательной редакции – 30 июля