

Л и т е р а т у р а

1. Арсаев И. Е., Быков В. Ю., Ильин Г. Н., Юрчук Э. Ф. Радиометр водяного пара – средство измерений радиояростной температуры атмосферы // Измерительная техника.

2017. № 5. С. 60–65.

2. ГОСТ 8.381-2009. ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности.

Дата принятия: 06.09.2017.

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

620.1.08

Разработка акустических методов контроля напряжённо-деформированного состояния резьбовых соединений

**М. Я. МАРУСИНА¹, А. В. ФЁДОРОВ¹, В. Е. ПРОХОРОВИЧ¹,
И. В. БЕРКУТОВ¹, В. А. БЫЧЕНОК², Н. В. ТКАЧЁВА², А. Л. МАЙОРОВ³**

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, С.-Петербург, Россия, e-mail: marusina_m@mail.ru

²Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники, С.-Петербург, Россия

³Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Показана актуальность разработки акустических методов контроля напряжённо-деформированного состояния резьбовых соединений. Представлены методы и схемы акустических измерений. Описан результат разработки и внедрения в производственный процесс специализированной оснастки, обеспечивающей повышение точности определения механических напряжений в резьбовом соединении.

Ключевые слова: резьбовое соединение, неразрушающий контроль, напряжённо-деформированное состояние, ультразвуковые методы.

The efficiency of a threaded joint is determined by a complex of factors, including a stress-strain state. The work shows the relevance of the development of acoustic methods for controlling the stress-strain state of threaded joints. The modern developments in this field with the use of acoustic methods are considered. Methods and schemes of acoustic measurements are presented. The article describes the result of development and introduction into the production process of specialized equipment ensuring an increase in the accuracy of determining the magnitude of mechanical stresses in a threaded joint.

Key words: threaded connection, non-destructive testing, stress-strain state, ultrasonic methods.

Контроль напряжённо-деформированного состояния (НДС) является одной из наиболее актуальных задач в технической диагностике изделий. Механические напряжения, возникающие в элементах конструкций не должны превышать допустимый порог, иначе может произойти полное или частичное разрушение изделий. При проектировании ответственных конструкций и изделий в подавляющем большинстве случаев значения параметров НДС, обеспечивающих работоспособность, определяются расчётными методами. Однако эти методы не позволяют контролировать реальную ситуацию – оценивать действительные (фактические) значения параметров НДС, в особенности в процессе мониторинга при эксплуатации. Неразрушающий контроль (НК) НДС и экспериментальная оценка остаточных и действующих напряжений в критических элементах конструкций приобретает всё большую значимость. В настоящее время не существует

методов, позволяющих с достаточной достоверностью определять параметры НДС контролируемых объектов.

Известны различные методы НК НДС, применяемые в производственном процессе: магнитные, рентгеновские, акустические, а также методы, основанные на дифрактометрии напряжений с использованием потока нейтронов. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, известные специалистам в области НК. В случае контроля резьбовых соединений, на взгляд авторов настоящей статьи, наиболее приемлемыми являются акустические методы, позволяющие контролировать напряжения, возникающие в объёме материала. При помощи остальных методов измеряют напряжения в приповерхностном слое. При этом аппаратура, реализующая акустический метод, достаточно компактная и мобильная, её можно применять как в условиях производства, так и в процессе контроля затяжки на ста-

ционных объектах. Кроме того, к преимуществам данного метода относятся достаточно высокая точность, доступность реализации, возможность проведения контроля в режиме реального времени. Существенным недостатком метода является необходимость учёта предыстории контролируемого изделия, так как на упругие свойства материала влияют не только напряжения, но и другие факторы, связанные с изменением внутренней структуры, например, термообработка, сварка, обработка давлением и т. д.

Акустический метод контроля внутренних напряжений основан на акустоупругом эффекте – зависимости скорости распространения упругих колебаний от действующих механических напряжений. Коэффициенты этих зависимостей рассчитываются в нелинейной теории упругости. Изменяется скорость той моды упругих волн, смещения в которых совпадают с направлением действующих напряжений. При этом изменения скорости, вызванные акустоупругим эффектом, малы, и для их фиксации требуются прецизионные измерения. Чтобы определить скорость, необходимо измерить время распространения акустической волны. Погрешности измерений временного интервала должны составлять единицы наносекунд. Для акустических измерений это очень высокая точность. Существует несколько факторов, не позволяющих достигать такой высокой точности. Первый – акустический контакт: даже небольшие различия геометрии зоны акустического контакта могут приводить к значительным погрешностям результатов измерений из-за большой разницы скоростей распространения упругих волн. Второй фактор – дисперсия. Для обеспечения достоверности результатов измерений необходимо определять фазовую скорость, но, как правило, используется импульсный метод, при котором определяется не фазовая, а групповая скорость. Применение частотной фильтрации далеко не всегда помогает решать данную проблему. Всё это может приводить к искажению формы импульса.

Для контроля НДС резьбовых соединений обычно используется продольная упругая волна, распространяющаяся вдоль оси болта или шпильки. Изменение временного интервала распространения продольной упругой волны в резьбовом соединении обусловлено как акустоупругим эффектом, напрямую связанным с внутренними напряжениями, так и удлинением болта в результате затяжки. Обычно НДС резьбового соединения определяется на основании ранее полученной на разрывной машине корреляционной зависимости времени распространения волны от механического напряжения. Этот метод применяется для болтов, размеры которых обеспечивают распространение продольных волн без трансформации в нормальные. В большинстве случаев измерения проводятся в эхо-режиме. Систематические погрешности метода могут быть связаны с различием начальных упругих свойств болтов, так как технологический процесс их изготовления связан с операциями термообработки, проката и др. Иными словами, контролировать надо изделия с разной предысторией. В этом случае корреляционная зависимость времени распространения волны от механического напряжения может не соответствовать конкретному изделию. Поиск

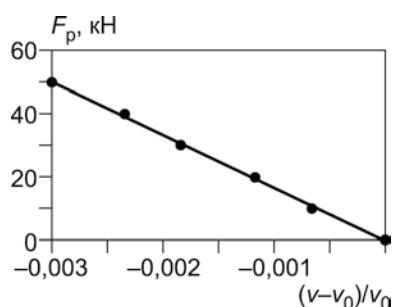
путей уменьшения подобных систематических погрешностей является одной из важнейших проблем, которые надо решить для успешного применения метода акустоупругости.

На 19 Международной конференции по неразрушающему контролю (Мюнхен, 13–17 июня 2016 г.) рассмотрено несколько интересных подходов к реализации методов контроля НДС резьбовых соединений. Авторы [1] предложили совместить процедуру затяжки гидравлическим ключом с возможностью ультразвукового (УЗ) измерения напряжения. При достижении заданного напряжения процесс затяжки прекращается. Предложенный подход позволяет избавиться от погрешностей, связанных с трением в резьбовом соединении, которые являются традиционными для динамометрических ключей. Кроме того, при этом с высокой степенью достоверности обеспечивается одинаковая затяжка всех резьбовых соединений в изделии или группе изделий. На торец болта устанавливается УЗ-преобразователь. Фиксируется изменение времени распространения сигнала преобразователя, отражённого от противоположного торца (эхо-сигнал). При расчёте нормирующего коэффициента, который определяет зависимость НДС от времени распространения сигнала, учитывается длина части болта, подверженная растяжению. Изменение времени распространения определяется как напряжениями, так и удлинением болта в результате затяжки.

Указанный коэффициент учитывает оба эффекта, его значение находят по результатам калибровки. При таком подходе перед операцией затяжки необходимо калибровать болты из используемого материала или из конкретной партии, поскольку возможны отклонения свойств разных болтов, например, после термообработки. По результатам измерений получены линейные зависимости для вычисления напряжения непосредственно в паскалях.

Калибровочный коэффициент должен оставаться постоянным для одинаковых в смысле геометрии и материала, а также относительной длины части болтов, подверженной растяжению [1]. К сожалению, в [1] отсутствуют данные по общей длине болта. Можно предположить, что, если взять одинаковые болты, но использовать их для сборки изделия с разной толщиной, то калибровочные коэффициенты будут различаться. Учёт этого обстоятельства потребует дополнительных затрат, в том числе и временных. Повысить эффективность метода можно применением соответствующего программного обеспечения и набора библиотек калибровок. Также в [1] отсутствуют сведения о частоте заполнения импульса при измерениях и способе измерения временного интервала. При этом тщательно исследованы погрешности метода, связанные с температурным фактором, перекосом болтов, и показано, что достигаемая точность является достаточной для проведения контроля в процессе затяжки. Предложенный способ является перспективным, так как позволяет автоматизировать процесс сборки изделий.

В [2] показано, что использование УЗ-метода позволяет определить предварительный натяг в болте без его разгрузки. С этой целью использованы две (продольная и поперечная) моды упругих волн. Время распространения продольной волны определяется как напряжениями, так и относи-



Зависимость растягивающего усилия, действующего на болтовое соединение М10-6х56.26.11, от относительного изменения скорости УЗ-волны (экспериментальные точки и линия регрессии)

тельным удлинением болта, а поперечной волны – только относительным удлинением. Информативным параметром служит отношение времён распространения волн указанных типов. По результатам многочисленных экспериментов получена повторяемость результатов. В то же время не указана длина части болта, подвергающейся растяжению. Можно предположить, что она одинаковая для всех опытов. Поэтому выбранный критерий обеспечивает одинаковый наклон полученных графиков. Кроме того, геометрические размеры болтов таковы, что продольная волна должна трансформироваться в нормальную. Но в рамках подхода [2] это не влияет на полученный результат, калибровка проводится не для продольной, а для нормальной волны и это соответствует всем исследованным образцам. Авторы [2] совершенно справедливо делают вывод, что главная задача дальнейших исследований – увеличение количества экспериментов с использованием различных образцов из разных материалов для выявления закономерностей УЗ-метода.

В [3] речь идёт об оценке малых изменений, возникающих в резьбовых соединениях в процессе эксплуатации, например, ослабления в результате деформации или микродефектов. Проанализирован прошедший через соединение акустический сигнал волны Лэмба. При затяжке неровности поверхности препятствуют плотному соединению материалов. По мере увеличения момента затяжки неровности деформируются, и контактная площадь увеличивается. Соответственно изменяется амплитуда прошедшего сигнала. Ограничением является возникновение пластической деформации. Известно, что амплитудные акустические измерения имеют большие погрешности. Предлагается два основных подхода к решению этой проблемы.

Первый подход основан на анализе спектра второй гармоники прошедшего через соединение сигнала. Для экспериментальных исследований собраны две установки в виде соединения с помощью болтов М6 двух пластин: алюминий–алюминий размером 245×30×2,8 мм и углепластик–углепластик размером 190×30×1 мм. Два пьезопреобразователя установлены на поверхности объекта контроля на расстоянии 40 мм друг от друга. Первый пьезопреобразователь служит для генерации волн, второй – для их приёма. Получены зависимости, связывающие амплитуду сигналов и частоту. Вероятной причиной появления в спектре гармоник высшего порядка и изменения амплитуды сигнала при прохождении сигнала в тело болта считается ослабление

усилия его затяжки. Данные результаты далеки от линейных зависимостей. Кроме того, эксперименты проводились хоть и многократно, но на одном изделии, поэтому неясно, как оценивать результаты для другого изделия, собранного по аналогичной схеме. К сожалению, не приведены сведения об истинном состоянии изучаемого соединения и характеристиках используемых пьезоэлементов (размеры, частотная постоянная и т. д.). В этой связи, на взгляд авторов настоящей статьи, рано говорить о достоверности и практическом применении такого подхода.

Второй подход базируется на методе виброакустической модуляции. Суть метода заключается в возбуждении в изделии двух колебательных процессов – вибрационного и диагностического. Для измерений в изделии ударным методом возбуждается широкополосный низкочастотный сигнал. Измерительный сигнал калибруется по белому шуму. Наличие резьбового соединения приводит к появлению максимумов в спектре со значениями частот, отличающимися от начальных. Предполагается, что амплитуды значений этих дополнительных составляющих зависят только от интенсивности модуляции сигнала и непосредственно указывают на внутренние дефекты или дефекты сборки в объекте контроля. При этом значение максимумов зависит от усилия затяжки. Как следует из представленных в [3] графиков спектральной плотности измеренного низкочастотного сигнала в алюминиевых соединениях при различной нагрузке, разница составляет единицы децибел. Это не позволяет применить данный метод для контроля реальных соединений, так как они отличаются широким диапазоном свойств даже в пределах одной конструкции.

Таким образом, из анализа [1–13] следует, что разработка средств измерений усилия затяжки остаётся актуальной задачей. Повышение достоверности результатов связано с учётом начального состояния изделия и факторами, влияющими на измерительный процесс аналогично затяжке, например, химико-термической обработке. Работы в этом направлении активно проводятся в Учреждении науки ИКЦ СЭКТ. Была поставлена задача разработки дефектоскопического оборудования, позволяющего получать приемлемые по точности и оперативности результаты НК усилий затяжки резьбовых соединений в условиях сборочного цеха или испытательного полигона. Для решения этой задачи использовали лазерно-ультразвуковой дефектоскоп УДЛ-2М и преобразователи ПЛУ-6П-02, ПЛУ-12У-01 и применяли лазерное возбуждение УЗ-волн. Этот способ возбуждения имеет следующие преимущества: благодаря широкополосности и малой длительности (вплоть до нескольких наносекунд) термооптически возбуждаемых акустических импульсов, достигается высокая точность измерения скорости распространения УЗ-волн; известен знак коэффициента отражения УЗ-волн; обладает высоким временным разрешением; оптоакустическая генерация УЗ-волн в объекте контроля позволяет использовать широкий спектр частот 2,5–10 МГц, в том числе удовлетворяющих условию $\lambda < 0,1d$ (λ – длина УЗ-волны; d – средний диаметр болта), что минимизирует влияние дисперсии, дифракции, затухания волн в материале контролируе-

мого объекта, задержки и искажения импульса в контактных слоях, искажения сигнала из-за несовершенства геометрии торцевых поверхностей образца и др. [14–16].

В ходе исследования был проведён анализ конструктивных особенностей разъёмных соединений с применением болтов М8-6х22.26.11, М10-6х56.26.11. Для стабилизации акустического контакта преобразователей ПЛУ-6П-02 и ПЛУ-12У-01 с поверхностью объекта контроля при измерениях на реальных объектах была использована специальная оснастка-держатель преобразователя. Конструкция оснастки обеспечивает требуемое усилие прижима преобразователя и парирование несоосности поверхностей излучателя и приёмника преобразователя с поверхностью объекта контроля [17–20].

Оснастка для градуировки дефектоскопического оборудования позволяет закреплять исследуемые болтовые соединения в захватах универсальной электромеханической испытательной машины Walter + Bai AG для последующего ступенчатого нагружения разъёмного соединения. Оснастка также позволяет установить на объекты контроля лазерно-ультразвуковые преобразователи ПЛУ-6П-02 и ПЛУ-12У-01, обеспечивает с помощью пружины необходимое для надежного акустического контакта усилие прижима преобразователя к объекту контроля и центрирование преобразователя относительно стержня болта.

Выполнены экспериментальные исследования лазерно-ультразвукового метода для контроля усилия затяжки разъёмных соединений. Получены регрессионные зависимости значений растягивающего усилия F_p от относительного изменения скорости распространения УЗ-волны $(v-v_0)/v_0$ (v_0 , v – скорости распространения УЗ-волны без приложения растягивающего усилия и при его приложении) для болтов М8-6х22.26.11, М10-6х56.26.11, которые применяются для определения действующих растягивающих усилий при контроле усилия затяжки разъёмного соединения (рисунок). Оценено уменьшение погрешности измерений при использовании оснастки-держателя преобразователя. С этой целью дополнительно измерены скорости распространения УЗ-волн с оснасткой и без неё.

При обработке результатов исследования применяли формулы для средней скорости v_{cp} распространения УЗ-волны в образце по N измерениям, среднего квадратического отклонения S_v и случайной погрешности измерений δ (для доверительной вероятности $P=0,95$) этой скорости, соответственно:

$$v_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$$

$$S_v = \sqrt{(v_i - v_{cp})^2 / (N-1)}$$

$$\delta = t_{p,m} S_v / \sqrt{N},$$

где $t_{p,m}=2,36$ – коэффициент Стьюдента.

Обработанные результаты исследований представлены в таблице. По итогам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что применение оснастки-держателя преобразователя позволяет снизить случайную составля-

Результаты обработки экспериментальных данных

F_p , кН	Преобразователь с оснасткой			Преобразователь без оснастки		
	v_{cp} , м/с	S_v , м/с	δ , м/с	v_{cp} , м/с	S_v , м/с	δ , м/с
0	5928	1,56	1,39	5927	1,76	1,57
5	5926	1,03	0,92	5926	1,24	1,11
10	5925	1,95	1,74	5923	2,1	1,87
15	5922	1,84	1,64	5922	2,21	1,97
20	5921	1,74	1,55	5921	1,98	1,77
30	5917	1,97	1,76	5916	2,28	2,03

щую погрешности измерений скорости распространения УЗ-волны в резьбовых соединениях на 20 %.

Закключение. При проектировании конструкций усилие затяжки резьбовых соединений учитывается далеко не всегда. Тем не менее, недостаточная (избыточная) или неравномерная затяжка соединений болтового типа является причиной возникновения внутренних напряжений в элементах конструкции и может привести к разрушению изделия. Нарушение условий сборки (избыточное или недостаточное затягивание) в 45 % случаев приводит к усталостным разрушениям. Поэтому необходимо контролировать НДС элементов соединений конструкции, например УЗ-методом.

Представленные результаты разработки оборудования (оснастки-держателя преобразователя) для получения оперативных и точных данных УЗ-сигнала с применением лазерно-ультразвукового оборудования показывают высокую точность измерений скоростей распространения УЗ-волн. Найдены регрессионные зависимости растягивающего усилия от относительного изменения скорости распространения УЗ-волны и создано необходимое оборудование для контроля усилий затяжки резьбовых соединений. Результаты выполненных исследований в дальнейшем позволят увеличить точность, чувствительность и надёжность методов определения внутренних напряжений и дефектов резьбовых соединений в различных материалах при УЗ-контроле.

Л и т е р а т у р а

1. **Belahcene F., Samson P.** Tightening control by ultrasound // Proc. 19th World Conference on Non-Destructive Testing. Munich, Germany, 2016. P. 214.
2. **Becker M., Gro N., Herzer R.** Determination of preload in bolts by ultrasound without referencing in unloaded state // Proc. 19th World Conference on Non-Destructive Testing. Munich, Germany, 2016. P. 59.
3. **Zhang Z., Liu M., Su Z., Xiao Y.** Evaluation of Bolt Loosening Using a Hybrid Approach Based on Contact Acoustic Nonlinearity // Proc. 19th World Conference on Non-Destructive

Testing. Munich, Germany, 2016. P. 37–38.

4. **Prevéy P. S.** Current Applications of X-ray Diffraction Residual Stress Measurement // *Developments in Materials Characterization Technologies* Eds. G.F. Vander Voort J. J. Friel: Am. Soc. Metals, Materials Park, OH, P. 103–110.

5. **Gnäupel-Herold T. e. a.** A comparison of neutron and ultrasonic determinations of residual stress // *Meas. Sci. Technol.* 2000. V. 11. P. 436–444.

6. **Неразрушающий контроль:** Справ. пособие / Под общ. ред. В. В. Ключева: М.: Машиностроение, 2006.

7. **Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А.** Рентгенографический и электронно-оптический анализ: М.: Металлургия, 1970.

8. **Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И.** Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка, 1977.

9. **Никитина Н. Е.** Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛПАМ, 2005.

10. **Ермолов И. Н.** Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981.

11. **Никитина Н. Е., Казачек С. В., Камышев А. В., Петров О. Е., Смирнов В. А.** Исследование двухосного напряжённого состояния трубной плети прибором «АСТРОН» // В мире неразрушающего контроля. 2005. № 1 (27). С. 33–35.

12. **Ермолов И. Н., Ланге Ю. В.** Неразрушающий контроль: Справочник в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Ключева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2006.

13. **Карабутов А. А., Жаринов А. Н., Ивочкин А. Ю., Капильный А. Г., Карабутов А. А. (мл.), Ксенофонов Д. Н., Кудинов И. А., Симонова В. А., Мальцев В. Н.** Лазерно-ультразвуковая диагностика продольных напряжений рельсовых плетей // *Управление большими системами*. 2012. Вып. 38. С.183–204.

14. **Ивочкин А. Ю., Карабутов А. А., Лямшев М. Л., Пеливанов И. М., Рохатги У., Субудхи М.** Измерение распределения скорости продольных акустических волн в сварных соединениях лазерным оптико-акустическим методом // *Акустический журнал*. 2007. Т. 53. № 4. С. 1–8.

15. **Марусина М. Я., Фёдоров А. В., Быченко В. А., Беркутов И. В.** Лазерно-ультразвуковая диагностика остаточных напряжений // *Измерительная техника*. 2014. № 10. С. 34–37.

16. **Марусина М. Я., Фёдоров А. В., Быченко В. А., Беркутов И. В.** Оценка влияния внешних факторов при ультразвуковом контроле напряжённо-деформированных состояний // *Измерительная техника*. 2016. № 11. С. 23–26.

17. **Быченко В. А., Беркутов И. В., Щерба И. Е.** Повышение точности измерения скорости распространения ультразвука при контроле напряжённо-деформированного состояния изделий // *Металлообработка*. 2013. № 5–6 (77–78). С. 48–51.

18. **Марусина М. Я., Базаров Б. А., Галайдин П. А., Силаев А. А., Марусин М. П., Закемовская Е. Ю., Гилев А. Г., Алексеев А. В.** Магнитная система на основе постоянных магнитов для расходомера многофазных текучих сред // *Измерительная техника*. 2014. № 4. С. 62–65.

19. **Марусина М. Я., Базаров Б. А., Галайдин П. А., Силаев А. А., Марусин М. П., Закемовская Е. Ю., Мустафаев Ю. Н.** Синтез градиентной системы мультифазного расходомера // *Измерительная техника*. 2014. № 5. С. 68–72.

20. **Flegontov A. V., Marusina M. J.** The Comparison Method of Physical Quantity Dimensionalities // *Lecture Notes in Computer Science*. 2009. V. 5743 LNCS. P. 81–88. DOI: 10.1007/978-3-642-04103-7_8.

Дата принятия: 03.11.2017.

