

УДК 620.179.162

А. О. Рыжова, аспирант  
С. А. Бехер, д-р техн. наук, проф.  
E-mail: [annalodo@yandex.ru](mailto:annalodo@yandex.ru)

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

## Оценка возможности контроля плотности посадки прессовых соединений ультразвуковым методом

*Проведены экспериментальные исследования на разработанных и изготовленных образцах натяга и осях колесных пар с надетыми внутренними кольцами подшипников эхо-методом. Экспериментально определены коэффициенты отражения продольных волн от границы деталей для различных значений натяга и в реальных условиях эксплуатации.*

**Ключевые слова:** неподвижные разъемные соединения, посадка с натягом, контроль качества соединений с натягом, неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль

### Введение

От надежности неподвижных разъемных соединений, создаваемых за счет посадки с натягом, зависит долговечность железнодорожных транспортных средств. В частности, ослабление плотности посадки внутреннего кольца подшипника приводит к отказам буксовых узлов колесных пар. При ремонте вагонов натяг колец подшипников на ось определяют до прессовой посадки по разности диаметров: шеек осей и колец. Допустимый диапазон значений натяга по РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017 (Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм) составляет 45–110 мкм. При плановых видах ремонта осей колесных пар для исключения образования задиров на их шейках в результате многократного снятия и повторного монтажа внутренних колец подшипников кольца допускается не снимать. При этом натяг должен удовлетворять требованиям нормативной и технической документации. Для повышения надежности соединения колец с осью, обеспечения безопасности движения, сокращения времени простоя подвижного состава и уменьшения расходов на внеплановый ремонт необходимо совершенствование существующих и разработка новых методов и приборов контроля натяга [1–3].

Для оценки технического состояния соединений с натягом оптимально применение акустических методов, основанных на зависимости коэффициента отражения ультразвуковых волн от границы «кольцо подшипника – шейка оси» от плотности посадки. Способ уже экспериментально опробован в [4] при контроле соединений цилиндрической формы с толщиной охватывающей детали 43 мм. Коэффициент отражения рассчитывался путем сравнения отношений амплитуд первого и второго эхо-сигналов от внутренней поверхности охватывающей детали в свободном состоянии и от границы сопрягаемых поверхностей в готовом соединении. На амплитуду регистрируемых волн существенное влияние оказывают отклонения формы реальных поверхностей от номинальных, наличие дефектов в контролируемых соединениях и непостоянство шероховатости поверхностей соединяемых деталей. Поэтому методики требуют уточнения и верификации для каждого конкретного типа соединений.

Целью работы является исследование принципов распространения акустических волн в соединении внутреннего кольца подшипника с осью при разной плотности посадки для оценки возможности контроля разъемных неподвижных цилиндрических соединений, изготавливаемых методом прессовой посадки.

### **Физическая модель прессового соединения**

Соединение с натягом представляет собой границу раздела двух сред, разделенных зазором, обусловленным шероховатостью, конусностью и овальностью сопрягаемых поверхностей. Толщина зазора  $s$  определяет акустические свойства границы раздела сред и может характеризовать натяг в контролируемом соединении.

При излучении акустических волн амплитудой  $A_0$  под прямым углом к границе раздела сред приемным преобразователем (ПЭП) фиксируется последовательность акустических импульсов, многократно отраженных от границы раздела и от поверхности ввода. В плоской модели амплитуда импульса  $A_k$  пропорциональна амплитуде импульса  $A_{k-1}$  и зависит от коэффициента затухания, коэффициента отражения от границы раздела сред  $R_1$  и коэффициента отражения от поверхности ввода  $R_2$ . В относительных логарифмических единицах (дБ) отношение амплитуд импульсов будет определяться выражением [5]:

$$N = 20 \cdot \text{Lg} \left( \frac{A_k}{A_0} \right) = \alpha \cdot k, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от коэффициента затухания, длины пути ультразвуковой волны в кольце и коэффициента

отражения от поверхности ввода:

$$\alpha = 20 \cdot \text{Lg}(R_1) + 20 \cdot \text{Lg}(R_2 \cdot e^{-\delta \cdot 2 \cdot l}). \quad (2)$$

Выражение (1) связывает коэффициент пропорциональности амплитуды  $\alpha$  и порядкового номера импульса  $k$  с коэффициентом отражения от границы раздела сред  $R_1$ , который в свою очередь зависит от толщины слоя  $s$  [6]:

$$R = \sqrt{\frac{(z_3 - z_1)^2 + \left(\frac{z_1 \cdot z_3}{z_2}\right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot s}{C}\right)}{(z_3 + z_1)^2 + \left(\frac{z_1 \cdot z_3}{z_2}\right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot h}{C}\right)}}, \quad (3)$$

где  $z_1$  – акустическое сопротивление материала первой среды, равное для стали 46 МПа·с/м;  $z_2$  – акустическое сопротивление среды зазора, принимаемое для масла равным 1,3 МПа·с/м, а для воздуха – 0,00043 МПа·с/м;  $s$  – толщина зазора, м;  $\lambda_2$  – длина акустической волны во второй среде, м.

Таким образом, экспериментально определенный коэффициент пропорциональности зависимости амплитуды эхо-импульса  $N$  от номера импульса  $k$  в выражении (2) с помощью выражения (3) позволяет оценить толщину контактного слоя соединения  $s$ .

### Описание эксперимента

Эксперименты проводились на специально разработанных образцах с известными значениями натягов. Они представляют собой соединения колец подшипников 36-42726Е2М по ГОСТ 18572–2014 и стальных валов, имитирующих оси. Кольца и валы подбирались таким образом, чтобы обеспечить минимальные, максимальные и средние натяги в эксплуатации.



Рис. 1. Схема испытания образца натяга эхо-методом

Исследования проводились эхо-методом прямым совмещенным ПЭП с рабочей частотой 5,0 МГц. Универсальным эхо-импульсным дефектоскопом генерировался сигнал, которым прозвучивались образцы продольными волнами с поверхности катания в радиальном направлении (рис. 1). Регистрировалась серия эхо-импульсов, переотраженных от границы кольца с осью и поверхности ввода.

### Результаты и их обсуждения

Зависимости амплитуд эхо-импульсов, выраженных в децибелах (дБ), от их порядкового номера удовлетворительно описываются линейной зависимостью с коэффициентом корреляции более 0,9 (рис. 2). Методом наименьших квадратов рассчитаны коэффициенты пропорциональности  $\alpha$  для различных значений натяга. Наименьший наклон зависимости наблюдается для свободного кольца подшипника – 1,9 дБ.

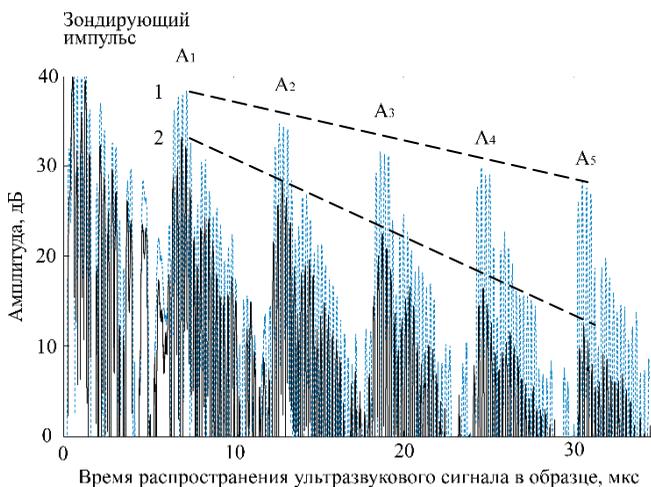


Рис. 2. Серия переотраженных импульсов при прозвучивании:  
1 – кольца в свободном состоянии, 2 – образца натяга

Наклон зависимости для кольца в свободном состоянии определяется затуханием, непрямолинейностью поверхности ввода, раскрытием ультразвукового пучка. Разность между коэффициентами пропорциональности для соединений с натягом и для свободного кольца прямо пропорциональна логарифму коэффициента отражения от границы кольца с осью  $R_1$ :

$$\text{Lg}(R_1) = \frac{\alpha_\Delta - \alpha_0}{20}, \quad (4)$$

где  $\alpha_\Delta$  и  $\alpha_0$  – коэффициенты пропорциональности (наклон) зависимости амплитуд донных сигналов от их порядкового номера для образца натяга и для свободного кольца, соответственно.

Коэффициенты отражения для границ в образцах натяга по (4) составили:  $R_1(40 \text{ мкм}) = 0,66$ ,  $R_1(80 \text{ мкм}) = 0,58$ ,  $R_1(120 \text{ мкм}) = 0,62$ .

Исходя из этого средняя расчетная толщина зазора, заполненного маслом, в исследуемых образцах составляет:  $s(40 \text{ мкм}) = 0,27$ ,  $s(80 \text{ мкм}) = 0,19$ ,  $s(120 \text{ мкм}) = 0,23$ .

Полученные значения толщины зазора с учетом притирания поверхностей соответствуют их шероховатостям  $Ra$ , которые для кольца не превышают 1,25 мкм, а для вала 0,8 мкм.

Результаты контроля в условиях вагоноремонтного депо ультразвуковым методом реальных соединений колец и осей со слабым натягом приведены на рис. 3 (поз. 2). Часть проконтролированных соединений имеет коэффициент пропорциональности близкий к коэффициенту пропорциональности для свободного кольца, что может быть связано с отличием формы оси от цилиндрической формы: конусностью и овальностью. Косвенным подтверждением этого факта является то, что при проведении серии измерений на деталях с малым натягом среднее квадратическое отклонение коэффициента пропорциональности всегда превышает аналогичную величину для соединений с более высоким натягом.

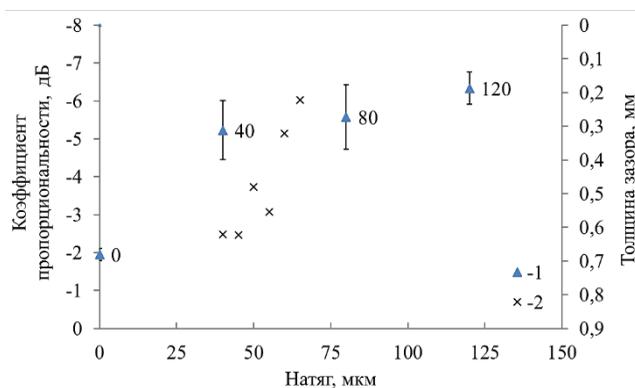


Рис. 3. График зависимости коэффициента пропорциональности и толщины зазора от значения натяга: 1 – образцов, 2 – реальных объектов

## Выводы

Предложена и реализована методика измерения коэффициента отражения от границы прессового соединения, основанная на сравнении коэффициента пропорциональности амплитуд эхо-сигналов от порядкового номера на контролируемом соединении и свободном кольце подшипника. На настроечных образцах экспериментально установлены значения коэффициентов отражения. Наибольший градиент коэффициента отражения на настроечных образцах соответствует диапазону натягов от 0 до 40 мкм. В реальных условиях производства отклонения поверхности оси от цилиндрической формы оказывают существенное влияние на толщину зазора и, следовательно, акустические характеристики соединения. Следовательно, ультразвуковой метод может быть использован для оценки плотности прилегания деталей, обнаружения превышений допустимых значений овальности и конусности.

## Список литературы

1. *Муравьев, В. В.* Оценка величины натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. – 2013. – № 9. С. 40–46.
2. *Муравьев, В. В.* Ультразвуковой контроль остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес при производстве / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, М. А. Лапченко // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 3–16.
3. *Муравьев, В. В.* Оценка остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, Е. Н. Балобанов // Дефектоскопия. – 2013. – № 7. – С. 22–28.
4. Ультразвуковой контроль качества соединений с натягом / Г. А. Буденков, В. П. Иванников, А. В. Кабакова, В. А. Стрижак // Дефектоскопия. – 2009. № 8. – С. 73–81.
5. *Муравьев, В. В.* Акустическая тензометрия и структуроскопия тонких стальных проволок : монография / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. В. Платунов. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – 108 с.
6. *Муравьев, В. В.* Расчет процесса передачи акустического сигнала через трибосопряжение внутреннего кольца подшипника и оси колесной пары / В. В. Муравьев, Т. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2007. – № 2. – С. 16–26.

A. O. Ryzhova, postgraduate student  
S. A. Bekher, DSc in engineering, professor  
E-mail: [annalodo@yandex.ru](mailto:annalodo@yandex.ru)  
Siberian Transport University STU, Novosibirsk, Russian Federation

## **Evaluation of the Possibility of Testing the Fit Density of Press Joints by Ultrasonic Method**

*Experimental studies were carried out on developed and manufactured samples of tension and axles of wheel pairs with inner rings of bearings using the echo method. The coefficients of reflection of longitudinal waves from the boundary of parts for different values of tension and under real operating conditions are determined experimentally.*

**Keywords:** fixed split joints, tight fit, tight fit quality control, non-destructive testing, ultrasonic testing.