

КОНТРОЛЬ НАТЯГА КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ ПОВЕРХНОСТНЫМИ ВОЛНАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА АКУСТОУПРУГОСТИ

© 2021 г. С.А. Бехер^{1,*}, Л.Н. Степанова^{1,**}, А.О. Рыжова^{1,***}, А.Л. Бобров^{1,****}

¹Сибирский государственный университет путей сообщения,
Россия 630049 Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

E-mail: *behers@mail.ru; **stepanova@stu.ru; ***annalodo@yandex.ru; ****beaver@stu.ru

Поступила в редакцию 24.11.2020; после доработки 19.01.2021

Принята к публикации 26.02.2021

Приведены результаты экспериментальных исследований метода неразрушающего контроля для оценки натяга колец подшипников на шейку оси с использованием эффекта акустоупругости, основанного на измерении характеристик упругих поверхностных волн. Разработаны и изготовлены настроечные образцы натяга с разностью посадочных диаметров в диапазоне от 38 до 119 мкм с погрешностью не более 7 мкм. Выполнена аттестация гидравлического стенда для механического нагружения колец подшипников, имитирующего их прессовую посадку на ось с натягами до 46 мкм. Для поверхностных волн в стали ШХ15 экспериментально определены акустоупругие коэффициенты $\alpha = (5,48 \pm 0,14) \text{ГПа}^{-1}$ по задержке времени регистрации импульсов, многократно (2—5 раз) обогнувших кольцо. Оптимизирован корреляционный способ определения времени задержки волны в нагруженном кольце относительно ненагруженного по условию минимизации неопределенности, связанной с изменением формы импульса. Установлены основные причины погрешностей и неопределенностей измерения абсолютного времени распространения поверхностной волны: влияние отраженных от границ волн, кривизна поверхности, затухание. Проведены измерения натяга колец подшипников на настроечных образцах натяга с использованием эффекта акустоупругости и выполнена оценка неопределенности измерения напряжений.

Ключевые слова: кольцо подшипника, пьезоэлектрический преобразователь, механические напряжения, акустоупругость, скорость звука, погрешность.

DOI: 10.31857/S0130308221040023

ВВЕДЕНИЕ

Подшипники буксовых узлов колесных пар являются важнейшими конструктивными элементами грузового вагона, от технического состояния которых зависит безопасность движения железнодорожного транспорта. Буксовый узел колесной пары осуществляет передачу на ось всех видов нагрузок: статических и динамических. Основными причинами выхода из строя подшипников являются: ослабление посадки колец подшипников на оси колесной пары, загрязненность смазки, наличие трещин, коррозии, сколов, раковин и выкрашиваний на их дорожках качения. Выход из строя подшипников может быть связан как с недостаточным смазыванием вращающихся элементов, так и с нарушениями режимов эксплуатации и технологии монтажа [1—3]. На отечественном транспорте используются подшипники, изготовленные из сталей ШХ4 и ШХ15, не обладающие достаточной пластичностью, что является причиной быстрого развития усталостных трещин.

Необходимость мониторинга подшипников ставит перед железнодорожной отраслью задачи, связанные с разработкой и внедрением современных методов и средств диагностики. Для контроля колец подшипников в железнодорожных депо уже используются магнитопорошковый и вихре-токовый методы неразрушающего контроля, комплексная диагностика буксовых узлов проводится тепловизионными и вибродиагностическими, а в отдельных депо, и акустико-эмиссионными комплексами [1, 2]. После диагностирования безотказная работа колец подшипников должна обеспечиваться в течение всего межремонтного срока.

Надежность буксовых узлов в значительной степени зависит от уровня упругих механических напряжений в кольце подшипника, которые определяют силы трения и, следовательно, надежность прессового соединения кольца подшипника с осью. Известно, что расчетные методы определения напряженно-деформированного состояния конструкций основаны на использовании ряда допущений и упрощений. Несовершенство методов расчета, неполное соответствие расчетных схем условиям работы, неточность определения уровня действующих нагрузок, как правило, изменяющихся с течением времени, вносят в расчетное значение напряжений значительные погрешности [4—6].

Контроль напряжений в материалах с использованием метода акустоупругости основан на измерении характеристик упругих волн, распространяющихся в упруго деформированной среде. Принципом контроля является зависимость основных параметров упругих волн (скорости, амплитуды и частоты) от упругих механических напряжений [4—16]. Таким образом, напряжения в материале конструкции могут быть определены по изменившимся значениям скорости распространения упругих волн [6, 7]. В практически значимых случаях эта зависимость имеет вид прямой пропорциональности и описывается уравнениями нелинейной механики твердого тела.

Для определения напряжений, действующих в конструкционных материалах, требуются прецизионные измерения скоростей распространения ультразвуковых волн с относительной погрешностью (0,01—0,1) % [8]. Основной недостаток прямого измерения скоростей распространения ультразвуковых волн связан с тем, что на результат измерения скорости оказывают влияния ряд факторов (изменение длины акустического пути, вызванное упругопластическими деформациями материала, изменение температуры исследуемой области, влияние внутренних дефектов микроструктуры на закономерности распространения ультразвуковых волн) [3]. Акустическая тензометрия основывается на связи характеристик упругих волн с возникающими в материалах напряжениями и позволяет судить о напряженно-деформированном состоянии как в упругой, так и в пластической области деформирования [4—6, 13—17].

Использовать метод акустоупругости сложно из-за малости эффекта, что не позволяет получать устойчивые результаты измерения в производственных условиях. Экспериментальные данные об акустоупругих коэффициентах материала колец подшипников в справочной литературе отсутствуют [17].

Цель работы — создание методики контроля натяга колец подшипников, установленных на шейку оси колесной пары, поверхностными волнами с использованием эффекта акустоупругости.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА АКУСТОУПРУГОСТИ

Отработку методики контроля натяга колец подшипников методом акустоупругости проводили на гидравлическом стенде. Конструктивно стенд представляет собой цилиндрический сосуд давления, обечайкой которого является кольцо подшипника. Плоские днища стянуты друг с другом болтами и плотно прилегают к кольцу подшипника через медные прокладки. Внутренняя полость сосуда через штуцер подключена к поршневому насосу — гидроцилиндру с винтовой подачей. При повышении давления P в гидросистеме в кольце возникают пропорциональные растягивающие напряжения:

$$\sigma = P \cdot \frac{\Delta}{R},$$

где Δ и R — толщина и внутренний радиус кольца, мм.

С использованием тензометрической системы «Динамика-3» (номер в Государственном реестре средств измерений № 66938-17), пределы основной допускаемой приведенной погрешности изменения сопротивления тензодатчиков которой составляют $\pm 0,1$ % [9], аттестовано нагружающее устройство для испытания колец подшипников. Устройство обеспечивает напряженно-деформированное состояние с упругими деформациями до 0,028 % (280 млн^{-1}), эквивалентными посадке с натягом от 0 до 46 мкм. При этом максимальные упругие механические напряжения в кольце подшипника составляют 59 МПа (для стали марки ШХ15 условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 1670 \text{ МПа}$).

Для исследования акустоупругих коэффициентов в диапазоне натягов от 38 до 119 мкм изготовлены образцы натяга из стали ШХ 4 и ШХ15, которые представляли собой соединения колец роликовых цилиндрических подшипников и валов с нормированными значениями натяга, определенными в процессе измерений штатными приборами в вагонном ремонтном депо Инская Западно-Сибирской железной дороги — филиала ОАО «РЖД». При этом наружный диаметр D_a вала и внутренний диаметр D_c кольца подшипника подбирались с суммарной погрешностью, не превышающей 5 мкм. Натяг определялся как разность диаметров $N = D_a - D_c$, а напряжения в кольце рассчитывались как

$$\sigma = E \cdot \frac{N}{D_c},$$

где $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ — модуль упругости стали ШХ15 [18].

Акустические импульсы в пьезоэлектрическом преобразователе (ПЭП) возбуждались дефектоскопом УД2-102 (зарегистрирован в государственном реестре средств измерений под номером 18007-06). Разработан макет генератора программируемых импульсов, обеспечивающий зондирующий сигнал произвольной формы с дискретностью по времени 0,1 мкс и амплитудой до 100 В. Дефектоскоп, как источник зондирующего импульса, воспроизводил электрические сигналы, амплитуды которых регулировались в диапазоне от 100 до 160 В на частотах (0,5—10) МГц.

Электрические сигналы регистрировались на выходе ПЭП с частотой дискретизации до 10^9 Гц цифровым запоминающим осциллографом типа TBS2104 (зарегистрирован в государственном реестре средств измерений под номером 66636-17). Сигналы оцифровывались и сохранялись на электронный носитель для последующей обработки.

Длительность оцифровки сигналов составляла 2 мс, что для скорости поверхностной волны около 3 мм/мкс соответствовало 6 м пути и обеспечивало регистрацию сигналов, вызванных волнами, несколько раз обогнувшими кольцо подшипника [17].

Экспериментальное определение коэффициентов акустоупругости проводилось с использованием поверхностных волн (рис. 1). При этом совмещенный вход дефектоскопа УД2-102 соединялся с ПЭП и одновременно с первым каналом осциллографа TBS2104. Развертка синхронизации осуществлялась по превышению зондирующим импульсом порога синхронизации. При этом все принимаемые сигналы (кроме зондирующего) не превышали установленного порога синхронизации, сохранялись в цифровой форме и обрабатывались на персональном компьютере с использованием разработанного алгоритма в программной среде Mathcad.

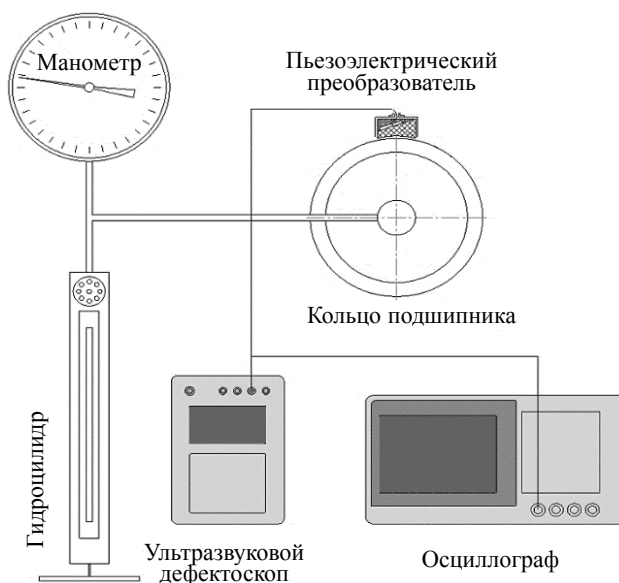


Рис. 1. Схема установки для испытания колец подшипников поверхностными волнами с использованием эффекта акустоупругости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ

Характерный вид электрического сигнала, регистрируемого ПЭП, приведен на рис. 2. В начале временной развертки наблюдаются помехи, вызванные зондирующим импульсом, а далее наблюдается серия сигналов поверхностной ультразвуковой волны, многократно прошедшей по кольцу. Между ними наблюдаются помехи, вызванные импульсом предыдущей посылки зондирующего сигнала («фантомные» сигналы). Импульс однократно прошедшей волны расположен на интервале времени от 167 до 170 мкс. Время распространения поверхностной волны, приведенное на рис. 2, соответствует скорости, равной 2,95 мм/мкс.

Изменение скорости распространения ультразвуковой волны оценивалось по задержке сигнала относительно опорного, зарегистрированного на полностью разгруженном кольце подшипника (рис. 3).

Наибольшая задержка времени распространения поверхностной волны составила 60 нс, что существенно меньше периода колебаний, который на частоте 2,5 МГц равен 400 нс. Прямой метод

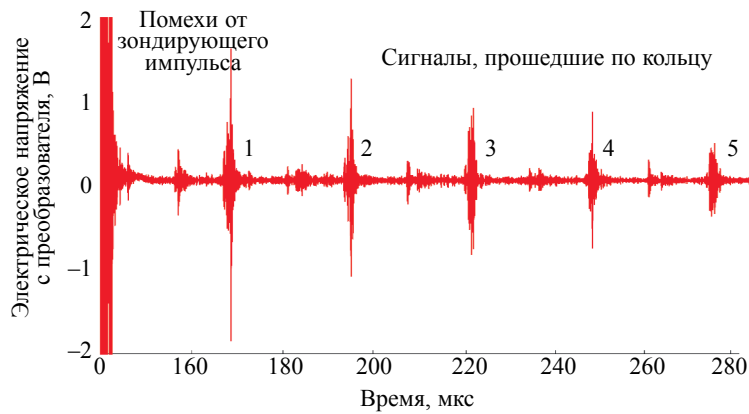


Рис. 2. Зависимость электрического напряжения на выходе ПЭП от времени распространения поверхностной волны в кольце подшипника.

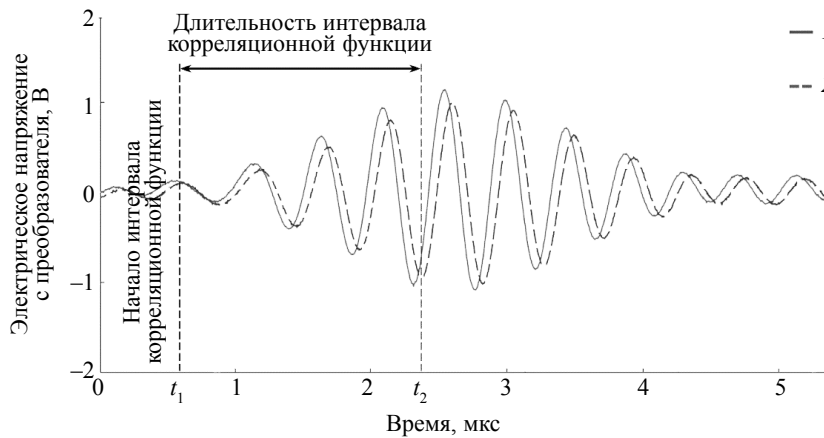


Рис. 3. Сигналы поверхностных волн, прошедшие по поверхности катания ненагруженного (1) и нагруженного (2) кольца подшипника.

измерения по задержке сигнала на заданном уровне не обеспечивает необходимую точность измерений малых (по сравнению с периодом колебания) временных интервалов. Основная составляющая погрешности вызвана вариациями амплитуды сигнала при растяжении кольца. Для повышения точности измерений времени задержки разработан способ, основанный на определении максимума дискретной корреляционной функции C_k двух сигналов $U1_j$ и $U2_j$ на временном интервале от t_1 до t_2 (см. рис. 3):

$$C_k = \frac{\langle (U1_j - \langle U1_j \rangle) \cdot (U2_{j+k} - \langle U2_{j+k} \rangle) \rangle}{\sqrt{(\langle U1_j^2 \rangle - \langle U1_j \rangle^2) \cdot (\langle U2_{j+k}^2 \rangle - \langle U2_{j+k} \rangle^2)}}, \quad (1)$$

где $U1_j$ и $U2_j$ — значения электрического напряжения регистрируемых сигналов в j -й момент времени, мВ; k — индекс сдвига дискретного сигнала $U2_j$ относительно $U1_j$; $\langle U1_j \rangle$, $\langle U2_j \rangle$ — средние значения электрического напряжения на интервале времени от t_1 до t_2 , мВ.

Временную задержку сигнала относительно опорного сигнала определяли по индексу сдвига k , при котором реализуется максимальное значение дискретной корреляционной функции (1):

$$\Delta t = \Delta_{ADC} \cdot k, \quad (2)$$

где Δ_{ADC} — временной шаг квантования аналого-цифрового преобразователя, с.

В экспериментах сигнал прошедшей волны состоял из 12 колебаний (см. рис. 3) общей длительностью около 5 мкс. В зависимости от положения интервала, на котором вычислялась корреляцион-

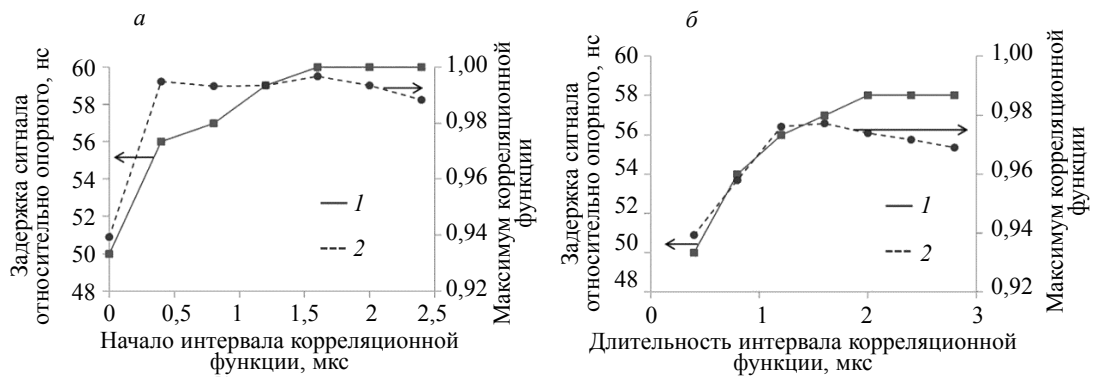


Рис. 4. Зависимость задержки (1) сигнала с нагруженного кольца подшипника и максимума корреляционной функции (2) от начала интервала вычисления корреляционной функции (а) и его длительности (б).

ная функция, на временной оси и его длительности изменялось как абсолютное значение максимума корреляционной функции, так и соответствующий индекс сдвига k . На этапе отработки способа варьировалось время начала интервала и длительность интервала $\Delta t = t_2 - t_1$ (см. рис. 3). Наибольшее значение корреляционной функции регистрируется на интервале времени, совпадающем с передним фронтом импульса, с временем начала $t_1 = 0,5$ мкс и длительностью $\Delta t = 1,2$ мкс (рис. 4). Однако на данном импульсе наблюдается максимальный градиент времени задержки сигнала относительно опорного по временным параметрам интервала (4—12) нс/мкс. Градиент напрямую определяет неопределенность измерения времени задержки, например, пропуск алгоритмом одного периода колебаний $T = 0,4$ мкс приводит к изменению времени задержки сигнала, равному (1,6—5,0) нс.

Наиболее стабильная задержка сигнала относительно опорного наблюдается при вычислении корреляционной функции на интервалах с временем начала от 1,5 до 2,5 мкс (рис. 4а) и длительностью от 2,0 до 3,0 мкс (рис. 4б). В данный интервал попадает центральная часть импульса, состоящая из пяти колебаний с амплитудой (50—100) % относительно максимальной амплитуды. Градиенты задержки сигнала относительно опорного (см. рис. 4) по времени начала и длительности интервала вычисления корреляционной функции в этом случае не превышают 1 нс/мкс, что соответствует неопределенности временной задержки сигнала не более 0,4 нс относительно опорного.

Таким образом, использование алгоритма, основанного на анализе корреляционной функции сигналов, регистрируемых с нагруженного кольца подшипника, относительно опорного сигнала, позволяет оценить временной сдвиг между ними с неопределенностью, не превышающей 1 нс. Полученное значение сдвига является интегральным параметром, который характеризует сигнал на интервале времени от 1,7 до 3,3 мкс, что соответствует четырем периодам колебаний в центральной части импульса.

Экспериментальная зависимость относительного изменения времени задержки поверхностной ультразвуковой волны, однократно прошедшей по кольцу, относительно опорного сигнала от механических напряжений в кольце подшипника показана на рис. 5.

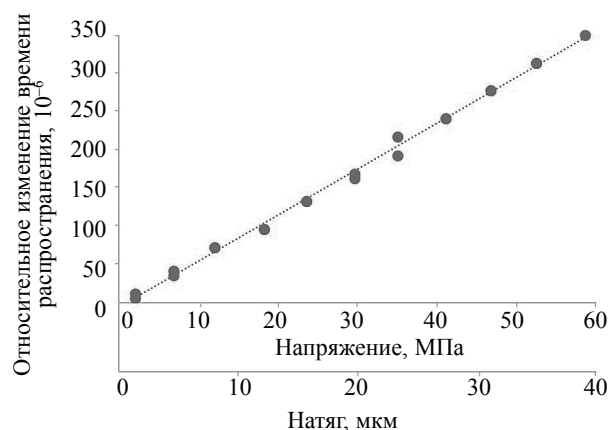


Рис. 5. Экспериментальная зависимость относительного изменения времени распространения поверхностной волны от измеренных значений натяга и механических напряжений в кольце подшипника.

Полученные данные соответствуют как режиму нагружения, так и разгрузке кольца. Отклонения экспериментальных значений относительного изменения времени распространения поверхностной волны от результата аппроксимации линейной зависимостью не превышают 1 % с коэффициентом корреляции более 0,99:

$$\delta_d = \alpha \cdot \sigma + \beta, \quad (3)$$

где $\alpha = (5,48 \pm 0,14) \text{ ТПа}^{-1}$ и $\beta = -(10 \pm 1) \cdot 10^{-6}$ — коэффициенты, полученные методом наименьших квадратов.

Экспериментальные зависимости относительного изменения времени задержки поверхностной волны, многократно прошедшей по кольцу, относительно опорного сигнала от механических напряжений в кольце подшипника позволили определить коэффициенты акустоупругости, смещения и коэффициенты корреляции, рассчитанные методом наименьших квадратов, которые представлены в табл. 1. Коэффициент акустоупругости соответствует относительному изменению времени распространения поверхностной волны Рэлея вдоль растягивающих напряжений при переменной базе прозвучивания. Справочные значения коэффициента α для углеродистых сталей варьируются в диапазоне от 6,5 до 7,1 ТПа^{-1} [17].

Таблица 1

Коэффициенты пропорциональности относительного изменения времени распространения поверхностной волны, многократно прошедшей по кольцу, от механической напряжений

Параметр	Количество проходов волны по кольцу				
	1	2	3	4	5
Коэффициент α , ТПа^{-1}	5,48	5,39	5,43	5,57	5,37
Доверительные границы погрешности, ТПа^{-1}	0,14	0,81	0,62	0,33	0,41
Коэффициент β , 10^{-6}	-10,1	-17,7	-7,4	-6,8	-7,9
Коэффициент корреляции, R	0,97	0,99	0,98	0,99	0,99

Погрешности определения времени задержки поверхностной волны относительно опорного времени связаны с акустическим трактом в объекте контроля (рис. 6). Один из основных факторов, определяющих неопределенность времени распространения, — это непостоянство акустического контакта. При изменении толщины слоя контактной жидкости на 10 мкм время задержки увеличивается более чем на 6 нс. Уменьшение влияния акустического контакта может быть достигнуто за счет измерения времени многократно прошедших по окружности кольца волн (см. рис. 2). При использовании для измерения времени задержки волны, n раз обогнувшей кольцо, погрешность, связанная с акустическим контактом, уменьшается обратно пропорционально числу n .

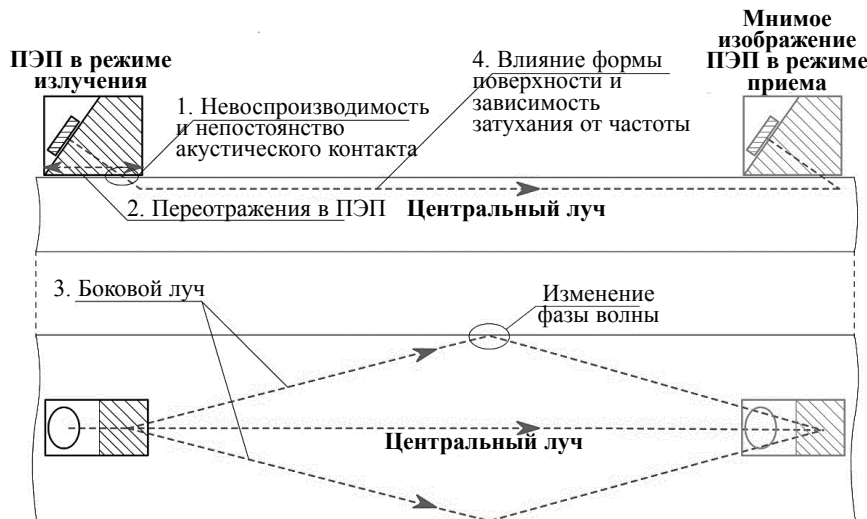


Рис. 6. Основные источники погрешностей измерений времени задержки поверхностной волны относительно опорного времени.

Регистрируемые принимающим ПЭП сигналы являются суперпозицией поверхностных волн, прошедших по окружности кольца вдоль центрального луча, и боковых волн, отраженных от границ кольца. Для n раз обогнувших кольцо волн разность длин первого бокового луча и центрального луча зависит от расстояния до границы l и диаметра кольца D :

$$\Delta L = \sqrt{(n \cdot \pi \cdot D)^2 + l^2} - n \cdot \pi \cdot D. \quad (4)$$

Для волны с $n = 1$ отраженный луч длиннее прямого луча на (3,6—6,2) мм, что на временной развертке соответствует (3—5) периодам колебаний. При этом в первом прошедшем по окружности импульсе поверхностной волны наблюдаются два максимума в моменты времени, равные 2,8 и 4,2 мкс (рис. 7а). Для волн, пять раз обогнувших кольцо $n = 5$, разность длин центрального и однократно отраженного от границы бокового луча составляет 0,7 мм (0,2 мкс). Регистрируемые импульсы накладываются друг на друга и на временной развертке не дифференцируются. Боковые отраженные от границ волны являются в методе акустоупругости мешающим фактором, так как изменяют форму регистрируемого импульса и тем самым создают неопределенность измерения времени прихода импульса на ПЭП.

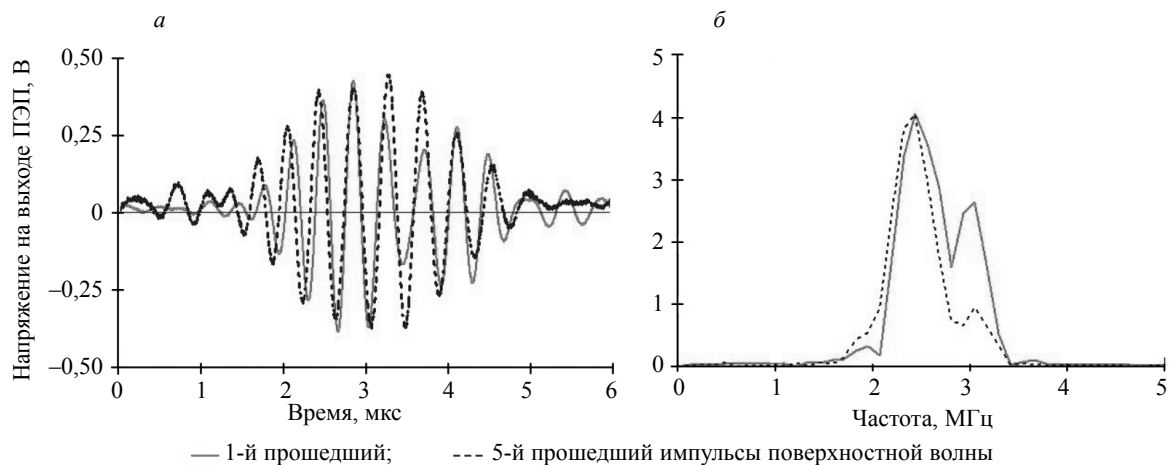


Рис. 7. Форма (а) и спектр (б) первого и пятого прошедших по окружности кольца импульсов поверхностной волны.

Изменение формы импульсов (рис. 7а) связано с несколькими факторами: суперпозицией волн, затуханием, кривизной цилиндрической поверхности объекта контроля. На амплитудно-частотном распределении первого и пятого зарегистрированных импульсов, приведенных для сопоставимости к одной амплитуде на рис. 7б, основной максимум спектральной амплитуды наблюдается на частоте $(2,4 \pm 0,1)$ МГц. Второй локальный максимум наблюдается на частоте $(3,1 \pm 0,1)$ МГц, причем его относительная спектральная амплитуда для волн с $n = 5$ в 3 раза меньше амплитуды волны с $n = 1$. Изменение спектрального состава импульсов связано с изменением их формы (см. рис. 7а), вызванным влиянием мешающих факторов, что создает дополнительные значительные неопределенности $\Delta t > 50$ нс при определении абсолютного времени распространения волны как пороговыми, так и корреляционными способами.

Абсолютные измерения времени распространения поверхностных волн выполнялись на образцах с известным натягом в четырех сечениях, расположенных под углом 90° . При этом среднее квадратическое отклонение (СКО) относительных значений времени распространения поверхностных волн в каждой точке составили от 25 до 40 млн⁻¹. Случайные составляющие неопределенности в пределах 25 % от среднего значения результатов наблюдений вызваны слабой повторяемостью параметров акустического контакта при повторных установках преобразователя на объект контроля.

ВЫВОДЫ

Разработано и аттестовано средствами тензометрии гидравлическое нагружающее устройство для испытания колец подшипников, обеспечивающее уровень упругих деформаций до 550 млн⁻¹, эквивалентных посадке с натягом 46 мкм. Методом прессовой посадки новых и бывших в эксплу-

атации колец подшипников на вал изготовлены образцы натяга в диапазоне от 38 до 119 мкм с погрешностью не более 7 мкм.

Предложен и реализован экспериментальный способ оптимизации временных параметров корреляционного метода определения малых (менее периода колебаний) времен задержки двух сигналов. Оптимальные временные параметры интервала вычисления корреляционной функции соответствуют средней части импульса с амплитудой колебаний более 50 % ее максимального значения. В экспериментах неопределенность времени задержки импульсов поверхностных волн не превышала времени дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) осциллографа, равного 1 нс.

Экспериментально определен коэффициент акустоупругости по времени распространения поверхностной волны для стали ШХ15 в кольце подшипника, который составил $a = (5,48 \pm \pm 0,14) \text{ ГПа}^{-1}$, соответствующий ему коэффициент акустоупругости по скорости распространения равен $b = - (0,74 \pm 0,14) \text{ ТПа}^{-1}$.

Проанализированы основные причины и границы неопределенностей измерения времени распространения волны по кольцу подшипника: непостоянство акустического контакта, суперпозиция прямого луча и отраженного от границы кольца, наличие дисперсии, связанной с частотно-зависимым затуханием и криволинейностью поверхности.

При акустическом контроле образцов натяга показано, что невозпроизводимость акустического контакта при повторных установках ПЭП на объект контроля возникает из-за вариации толщины контактного слоя. При повторных измерениях образцов показано, что погрешность измерения механических напряжений в кольцах подшипника акустоупругим методом достигает 50 % измеряемой величины.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90016\19.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Кабанов С.И., Тенитилов Е.С. Акустико-эмиссионный способ диагностирования колец подшипников буксового узла железнодорожного транспортного средства и устройство для его осуществления / Патент 2391656 РФ, МПК G 01N 29/15. Заявитель и патентообладатель Сибирский государственный университет путей сообщений. № 2008126353/28; заявл. 27.06.2008; опубл. 10.06.2010. Бюл. № 16. 15 с.
2. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Тенитилов Е.С. Контроль колец подшипников локомотива методом акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2009. № 9. С. 49—55.
3. Беляев А., Лобачев А.М., Модестов В.С., Пивков А.В., Полянский В.А., Семенов А.С., Третьяков Д.А., Штукин Л.В. Оценка напряженно-деформированного состояния методом акустоупругости при циклическом нагружении // Механика твердого тела. 2016. № 5. С. 124—131.
4. Бобренко В.М., Бобров В.Т., Гульшин А.В. Анализ нагруженности разъемных соединений акустическим методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. № 7. С. 60—66.
5. Никитина Н.Е., Казачек С.В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин // Вестник научно-технического развития. Национальная технологическая группа. 2010. № 4 (32). С. 18—28.
6. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Стрижак В.А. и др. Акустическая тензометрия и структуроскопия железнодорожных колес. Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2014. 180 с.
7. Степанова Л.Н., Курбатов А.Н., Тенитилов Е.С. Ультразвуковой способ определения внутренних механических напряжений / Патент 2655993 РФ, МПК G 01N 29/04. Заявитель и патентообладатель Сибирский государственный университет путей сообщений. № 201711887; заявл. 30.05.2017; опубл. 30.05.2018. Бюл. № 16. 11 с.
8. Gushchina L.V., Muraviev V.V., Zlobin D.V., Zemskov T.I. Development of the experimental equipment for measuring the velocity of ultrasonic waves with high accuracy // Journal of Physics: Conference Series, October 2019. V. 1327. Is. 1. № 12021.
9. Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Бехер С.А. Микропроцессорные многоканальные тензометрические системы для динамических испытаний конструкций // Датчики и системы. 2011. № 8. С. 29—34.
10. Abbasi Z., Ozevin D. Acoustoelastic Coefficients in Thick Steel Plates under Normal and Shear Stresses // Experimental Mechanics. 21 June 2016. V. 56. Is. 9. P. 1599—1610.
11. Gandhi N., Michaels J.E., Lee S.J. Acoustoelastic Lamb wave propagation in biaxially stressed plates // The Journal of the Acoustical Society of America. September 2012. V. 132. № 3. P. 1284—1293.
12. Yang Z., Wu Z. Acoustoelastic guided wave propagation in axial stressed arbitrary cross-section // Smart Materials and Structures. Onlinepublicationdate: 14 Mar. 2019.
13. Степанова Л.Н., Курбатов А.Н., Тенитилов Е.С. Исследование продольных напряжений в рельсах с использованием эффекта акустоупругости на действующем участке железнодорожного пути // Контроль. Диагностика. 2019. № 2. С. 14—21.

14. *Muraviev V.V., Gushchina L.V., Kazantsev S.V.* Evaluating Damage Accumulated in Car Wheelset Axle Journals by the Ultrasonic Method Using Rayleigh and Head Waves // Russian Journal of Nondestructive Testing. October 2019. V. 55. Is. 10. P. 713—722.

15. *Muraviev V.V., Tapkov K.A., Lenkov S.V.* In-Production Nondestructive Testing of Internal Stresses in Rails Using Acoustoelasticity Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. January 2019. V. 55. Is. 1. P. 8—14.

16. *Muraviev V.V., Volkova L.V.* Experimental study of residual stresses and interference of locomotive wheels by the acoustoelasticity method // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. July 2019. V. 45. Is. 4. P. 375—380.

17. *Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.* Неразрушающий контроль. Справочник. В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.

18. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. М.: 2014. 1216 с.