УДК 620.179.16

ОЦЕНКА НАКОПЛЕННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ШЕЕК ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ВАГОНОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЭЛЕЕВСКИХ И ГОЛОВНЫХ ВОЛН

© 2019 г. В.В. Муравьев[1,2,*], Л.В. Гущина[1], С.В. Казанцев[1]

[1]Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Россия 426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7

[2]ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН,Россия 426067 Ижевск, ул. Татьяны Барамзиной, 34

[*]E-mail: pmkk@istu.ru

Поступила в редакцию 26.06.2019; после доработки 12.07.2019
Принята к публикации 15.07.2019

С целью исследования деструктуризации металла поверхностного слоя шейки оси вагонных колесных пар в результате длительной эксплуатации предложены методика и устройство для измерения скорости ультразвуковых рэлеевских и головных волн. Обнаружено различие времен прохождения поверхностных и головных волн вблизи торца и галтельного перехода в предподступичную часть шейки оси, свидетельствующее о наличии накопленной микродефектности в поверхностной области галтельного перехода шеек осей после длительной эксплуатации. Предложен критерий оценки накопленной поврежденности в зоне максимальной концентрации напряжений в поверхностном слое галтели шеек осей колесных пар вагонов.

Ключевые слова: скорость рэлеевских и головных волн, микродефектность, прутки, шейки осей колесных пар вагонов.

DOI: 10.1134/S0130308219100026

ВВЕДЕНИЕ

Безопасность движения железнодорожных вагонов определяется надежностью колесных пар, которые при движении по рельсовому пути подвергаются воздействию различных статических и динамических сил. Поэтому колесную пару можно рассматривать и как наиболее ответственный узел, составляющие элементы которого — ось и колеса, нагружены наиболее интенсивно, при этом ось колесной пары во время эксплуатации испытывает сложный вид нагружения — четырехточечный изгиб с вращением. Наибольшая нагрузка приходится на обе шейки оси колесной пары, например, при полной загрузке вагона на каждую шейку это составляет до 12 тонн в статике.

Анализ причин крушений грузовых вагонов показывает, что одной из причин аварийных сходов железнодорожных вагонов является излом шеек осей колесных пар, в которых наиболее часто возникают усталостные дефекты [1—4]. В усталостном изломе (рис. 1) можно выделить три характерные зоны развития: 1) зона медленного развития трещины. Выявляемый при фрактографии храповый узор вблизи поверхности галтельного перехода свидетельствует о многоочаговом начале формирования трещины вследствие деструктуризации поверхностного слоя. Именно на этой стадии развития дефекта еще можно средствами дефектоскопии или визуального осмотра предотвратить разрушение детали и возможные катастрофические последствия; 2) зона ускоренного развития — участок излома, где происходил ускоренный рост трещины; 3) зона долома — участок, в котором происходит мгновенное разрушение. Поверхность такого участка грубая, крупнокристаллическая.

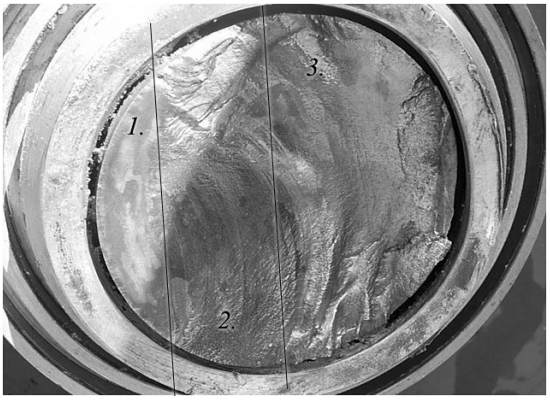

Рис. 1. Поверхность излома шейки оси колесной пары.

В процессе эксплуатации цилиндрические изделия (оси, валы), подвергающиеся различного рода статическим и динамическим нагрузкам, неравномерно накапливают повреждения по объему изделия. Наиболее ускоренный темп накопления повреждений (стадия рассеянных микроповреждений) протекает в поверхностном слое металла глубиной порядка 1-3 мм [5—8]. Структурные изменения, происходящие в зоне максимальной концентрации напряжений, являются показателем эксплуатационного состояния всего цилиндрического изделия [9], так как возникающая деструкция приповерхностного слоя свидетельствует о накопленной микродефектности, проявляющейся в виде микропор и микротрещин при высокой плотности дислокаций вследствие наклепа и циклических знакопеременных нагрузок.

Обычно при традиционном контроле осей колесных пар вводят ультразвуковые волны под разными углами с помощью пьезопреобразователей продольных, поперечных и поверхностных волн, принимают эхосигналы, по параметрам которых определяют качество оси (СТО РЖД 11.009-2012 Детали колесных пар локомотивов, моторвагонного и специального железнодорожного подвижного состава. Типовые методики ультразвукового контроля). Но при этом выявляются лишь макродефекты — поперечные усталостные трещины [7, 10]. Кроме того, не выявляются дефекты вблизи поверхности объекта контроля, поскольку интерпретации информативных параметров мешает интенсивный импульс, отраженный от поверхности.

Целью данной работы является исследование влияния деструктуризации металла в поверхностном слое шейки оси колесной пары на скорость ультразвуковых рэлеевских и головных волн в результате длительной эксплуатации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальные исследования структурных изменений в процессе циклического характера изменяющейся нагрузки выполняли на цилиндрических образцах типа прутков. За изменениями наблюдали с помощью измерений времени распространения рэлеевских волн в поверхностном слое по окружности образцов [6]. Для испытаний использовали 2 прутка из стали 40Х, близкой по химическому составу к осевой вагонной стали в состоянии поставки и после отжига. Длина прутков — 250—270 мм, плечо нагрузки — 120 мм, диаметр — 19 мм. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ для прутков из этой стали в состоянии поставки 780 МПа, предел выносливости σ_{-1} — 380 МПа, шероховатость поверхности *Rz* 4 мкм, контроль которой в процессе испытаний велся профилометром Surface Roughness Tester *Rz*: диапазон 0,1—50 мкм, с погрешностью ± 7 %.

Циклические нагружения обеспечивались консольным изгибом с вращением прутков с помощью специально разработанной установки для испытаний на усталость. Образец, закрепленный в патроне машины для испытаний, вращался со скоростью 500 оборотов в минуту. На другом конце образца установлен подшипник, через который передается поперечная сила, изгибающая образец. При вращении образца в его поверхностных и подповерхностных слоях согласно эпюре напряжений (рис. 2*а*) возникают попеременно растягивающие и сжимающие напряжения (симметричный цикл). При достижении определенного числа циклов происходят необратимые изменения в структуре образца в области максимальных напряжений вблизи зажима в патроне, что затем приводит к разрушению образца.

Информативным параметром при определении скорости акустических волн является время прихода n, $(n + m)$-го импульса $t_{n,n+m}$, при этом скорость рэлеевской C_R находится по формуле [6]

$$C_R = \frac{\pi \cdot d \cdot m}{t_{n+m} - t_n}, \qquad (1)$$

где $(t_{n+m} - t_n)$ — время между импульсами $(n+m)$ и m; n — количество переотражений на диаметре прутка; d — диаметр прутка. Использование методики многократных отражений позволило снизить погрешность в определении скорости волн до 0,02 % или менее 1 м/с.

В эксперименте представлены результаты измерений скорости рэлеевских волн с анализом времени прихода импульсов многократных отражений и с использованием корреляционной функции. Примененное нагружение характеризуется увеличением числа циклов N при постоянной нагрузке P (рис. 2*б*).

Оценку влияния числа циклических нагрузок (без изменения величины консольной силы) на скорость распространения рэлеевской волны в прутках провели при нагрузке 460 Н, в зоне максимальных напряжений на уровне $0{,}6\sigma_{0,2}$, что соответствует 560 МПа. При каждом уровне нагрузки испытывали по два прутка: в состоянии поставки и после отжига при температуре 700°С с вы-

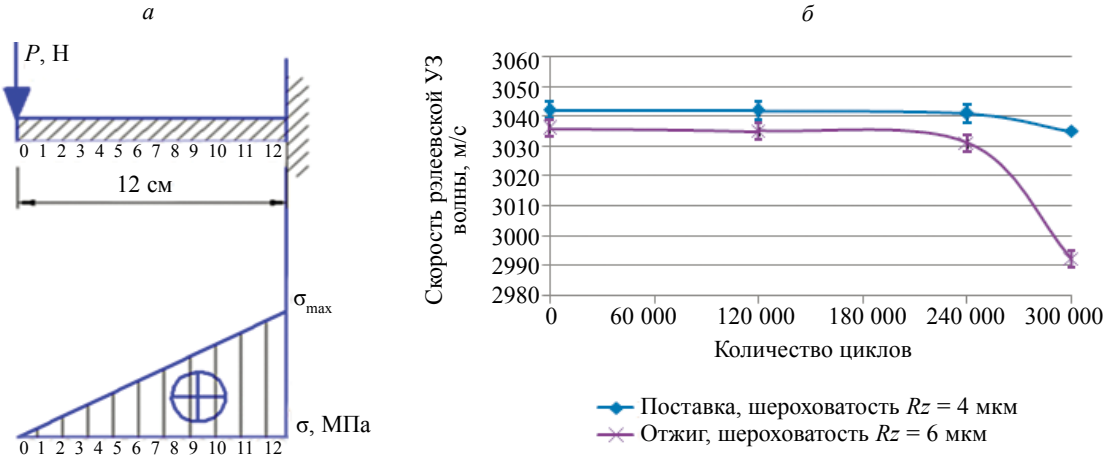

Рис. 2 Эпюра напряжений (*а*) и изменение скорости рэлеевской волны в зависимости от числа циклов в зоне максимальных напряжений (*б*).

держкой 30 мин. Скорость рэлеевских волн измерялась периодически, по мере возрастания числа наработанных циклов. Увеличение амплитуды циклических напряжений в 1,5 раза выше предела выносливости позволило уверенно обнаружить деструкцию металла. По результатам циклических испытаний наблюдается падение скорости волн после 240 000 циклов наработки, при этом для отожженных прутков скорость рэлеевской волны в зоне максимальных напряжений уменьшается на 45 м/с (см. рис. 2*б*), что свидетельствует о значительных структурных изменениях в металле прутков. Очевидно, подобный характер зависимости очень привлекателен для диагностирования состояния материала в изделиях, эксплуатируемых в условиях циклического нагружения [11].

Следует отметить, что экспериментально измеренные значения скорости рэлеевской волны по огибающей прутка имеют завышенные значения в сравнении с табличными, что обусловлено известной зависимостью скорости рэлеевской волны от радиуса кривизны поверхности, по которой она распространяется [12]. При этом относительное изменение указанных величин будет иметь одинаковый характер для образцов любых диаметров.

Измерения на прутках выполнил А.Ю. Будрин.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Шейки осей вагонных колесных пар. В качестве объекта исследований использованы шесть шеек осей колесных пар с различными периодами эксплуатации и датами изготовления. Геометрические характеристики и время эксплуатации исследуемых осей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исследуемые шейки осей

№ оси	Тип оси	Маркировка	Диаметр шейки, мм	Длина шейки, мм
1—1	РУ1	103709 II — 67 г.	130	176
1—2	РУ1	103709 II — 67 г.	130	176
2—1	РУ1Ш	029 559811 — 94 г.	130	190
2—2	РУ1Ш	029 559811 — 94 г.	130	190
3—1	РУ1Ш	029 354882 — 93 г.	130	190
4—1	РУ1	029 010959 — 87 г.	130	176

На рис. 3*а* показана ось колесной пары грузового вагона, состоящая из следующих элементов: средняя часть оси *1*, подступичная и предподступичная части *2*, *3*, шейка *4*.

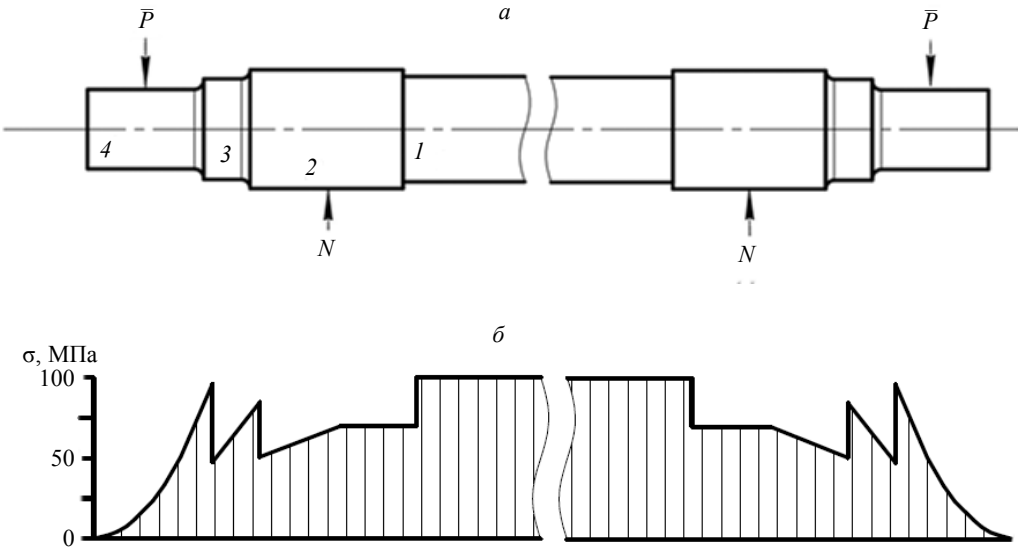

Рис. 3. Элементы оси и действующие силы (*а*), эпюра напряжений (*б*).

Вертикальная статическая нагрузка *P* от массы груза и тары вагона равномерно распределяется между шейками оси. Реакция передается через колеса на подступичную часть оси — *N*. Для исследований выбраны характерные зоны шейки оси, испытывающие различные нагрузки во время эксплуатации: вблизи торца (минимальная нагрузка) и вблизи галтельного перехода от шейки *4* к предподступичной части *3* (максимальная нагрузка) (рис. 3*б*).

Рэлеевские волны. Методика оценки накопленной поврежденности в шейках осей заключается в прозвучивании этого элемента по его огибающей рэлеевскими волнами, регистрацию амплитуд сквозных импульсов, анализ скорости волн вследствие рассеяния на элементах деструкции структуры, основанный на сравнении скорости рэлеевской волны в области, не подверженной нагрузкам, и в области, максимальной концентрации напряжений, характеризующейся накоплением структурных повреждений [6]. В эксперименте использован электромагнитно-акустический преобразователь (ЭМАП), адаптированный для возбуждения рэлеевской волны [13, 14].

В качестве дополнительного параметра использована скорость головной волны [15], распространяющейся по образующей шейки вблизи торца и галтели.

На рис. 4 представлена структурная схема устройства для оценки состояния микродефектности шейки оси, действующего следующим образом.

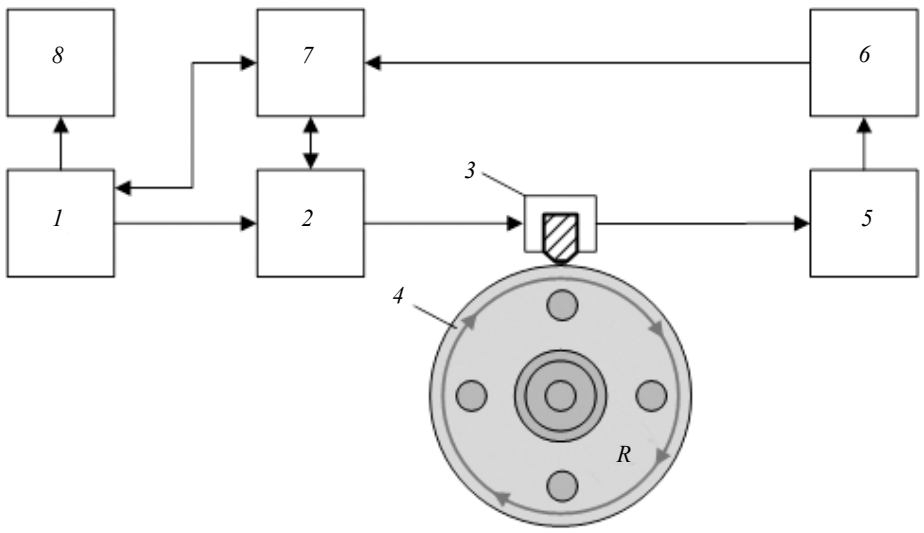

Рис. 4 Блок-схема устройства для оценки накопленной поврежденности цилиндрических изделий с помощью поверхностных волн.

После установки электромагнитно-акустического преобразователя (ЭМАП) *3* на объект контроля *4* по сигналу с блока управления *1* с помощью генератора зондирующих импульсов *2* подается электрический ток в катушку преобразователя, формируя в приповерхностном слое контролируемой шейки оси *4* магнитное поле. Одновременно на два совмещенных излучателя/приемника подаются высокочастотные импульсы, создавая область с высокой линейной плотностью вихревых токов в объекте контроля *4*, имеющих одинаковое направление в плоскости, перпендикулярной к направлению магнитного поля. Взаимодействие наведенных вихревых токов с магнитным полем приводит к генерации поверхностной волны *R* в объекте контроля *4*. Прием ультразвуковых колебаний, прошедших вдоль поверхности огибающей объекта контроля, осуществляется с помощью совмещенных излучателей/приемников ЭМАП, работающего в режиме приема, за счет обратного электромагнитно-акустического преобразования в электрические сигналы [16]. Принятые сквозные импульсы по двум каналам, усиливаются высокочастотным усилителем *5* на 80-90 дБ и регистрируются блоком регистрации *6*. Для сохранения и дальнейшей обработки сигналы через линию синхронизации с генератором зондирующих импульсов *2* поступают в блок обработки *7*, после чего результаты вычислений передаются в блок управления *1* и визуализируются с помощью блока индикации *8*.

ЭМАП (рис. 5*а*) собран на базе П-образного магнитопровода *9* с намагничивающей катушкой *10* и концентраторами магнитного поля в наконечниках *11, 12*, которые соосны с осью вращения объекта контроля *4*. С каждой стороны магнитопровода в зазоре между наконечниками магнитопровода *11*, *12* (рис. 5*б*) и объектом контроля *4* расположены совмещенные излучатели/приемники, выполненные из медной дорожки на текстолите в виде незамкнутой петли, длина которой соответствует длине концентратора магнитопровода. Расстояние между линиями соответствует половине длины поверхностной волны, возбуждаемой в объекте контроля. Резонансная частота преобразователя — 2,5 МГц.

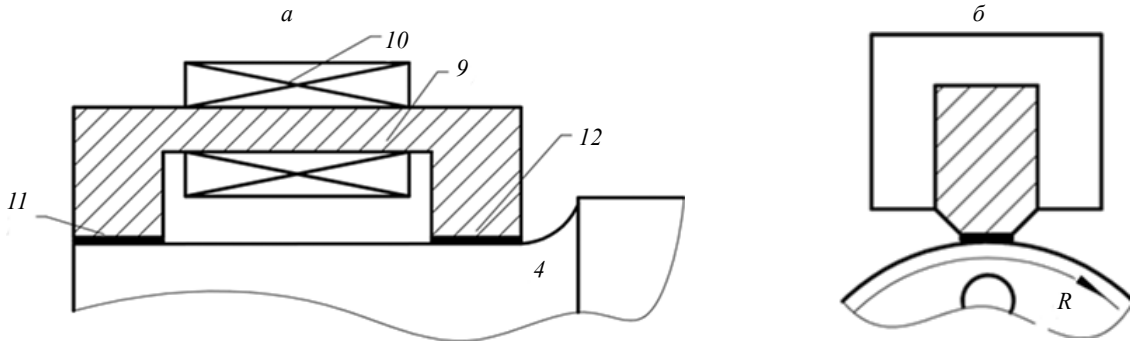

Рис. 5. Вид ЭМАП сбоку (*а*) и с торца оси (*б*).

Расчет относительного изменения скорости волны производится с помощью измерения времени прохождения волны при одновременном анализе затухания сквозного сигнала, обежавшего изделие *n* раз. Порядок расчетов относительного изменения скоростей рэлеевских волн второго пришедшего импульса $C_{\text{отн}}$ приведен ниже.

Расстояние $l_{\text{ок}}$, проходимое рэлеевской волной по огибающей оси, зависит от диаметра оси $d_{\text{оси}}$:

$$l_{\text{ок}} = \pi \cdot d_{\text{оси}}. \tag{2}$$

Зная измеренное время прохождения волны вблизи торца оси t_1 и вблизи галтельного перехода t_2, можно выразить скорость рэлеевской волны в разных сечениях оси через измеренные интервалы времен:

$$C_{\text{тор}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{оси}}}{t_1}; \tag{3}$$

$$C_{\text{гал}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{оси}}}{t_2}, \tag{4}$$

где $C_{\text{тор}}$ — скорость рэлеевской волны вблизи торца, $C_{\text{гал}}$ — скорость волны вблизи галтельного перехода.

Относительные изменения скоростей рэлеевских волн $C_{\text{отн}}$ вычисляются по формуле

$$C_{\text{отн}} = \frac{C_{\text{тор}} - C_{\text{гал}}}{C_{\text{тор}}} \cdot 100\,\% = \frac{\Delta C}{C_{\text{тор}}} \cdot 100\,\%. \qquad (5)$$

Затем, сравнивая полученные значения относительного изменения скоростей волн, судят о степени накопленной поврежденности шейки оси, при этом чем меньше скорость вблизи галтели относительно торца, тем выше поврежденность шейки.

Головные волны. Для исследования влияния деструктуризации в подповерхностном слое шейки оси колесной пары использовали головную волну [15], измерения которой выполняли с помощью разработанного блока преобразователей, изображенного на рис. 6. Угол ввода соответствует первому критическому для пары сталь — оргстекло и составляет 27°. База прозвучивания — расстояние между точками ввода и выхода луча, составляет 61,74 мм. Скорость головной волны вычислена по формуле

$$C_{\text{гол}} = \frac{b}{\dfrac{b}{C_{\text{СО-2}}} - \Delta t}, \qquad (6)$$

где $C_{\text{гол}}$, $C_{\text{СО-2}}$ — скорость головной волны в объекте контроля и в СО-2; b — база прозвучивания; Δt — разность времен распространения головной волны в СО-2 и в шейке оси колесной пары.

Скорость головной волны в шейках осей колесных пар рассчитана с помощь программы в MathCAD с использованием интерполяции и корреляции. С помощью интерполяции частота дискретизации эхограмм, снятых с помощью дефектоскопа DIO1000, изменялась с 204,8 до 1024 МГц. С помощью корреляции вычислялась временная задержка между головной волной в стандартном образце СО-2, скорость в котором принята за 5900 м/с, и волной в шейке оси колесной пары.

Каждая новая серия измерений сопровождается настройкой углов ввода и приема в блоке ПЭП головной волны (рис. 6*а*) на стандартном образце СО-2 таким образом, чтобы амплитуда головной волны была максимальна, после чего подвижная часть преобразователя фиксируется винтами и снимается опорная эхограмма. Для измерений преобразователь головной волны, помещенный в приспособление для фиксации преобразователя вдоль оси цилиндра диаметром 130 мм, устанавливается на цилиндрическую поверхность шейки оси колесной пары *4* вблизи торца оси и галтели последовательно в четырех позициях через каждые 90 град на образующей шейке (рис. 6*б*).

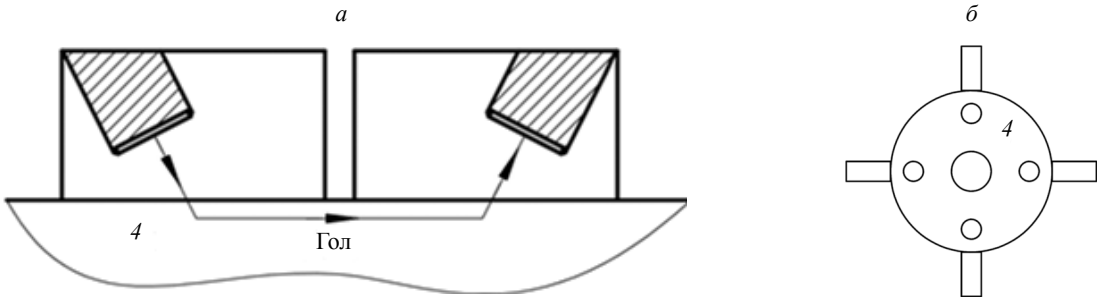

Рис. 6. Постановка блока пьезопреобразователей (ПЭП) на шейке оси колесной пары (*а*), позиции ПЭП на шейке оси с торца (*б*).

Работа преобразователя при возбуждении и приеме головной волны осуществляется следующим образом: продольная волна возбуждается пьезопластиной и распространяется через волновод до границы раздела сред призма преобразователя — объект контроля *4*, преломляется и распространяется вдоль поверхности объекта контроля в виде головной волны Гол, трансформируясь в боковую продольную и поперечную волны. Затем боковая продольная волна преломляется в продольную при переходе в призму преобразователя, проходит через тонкую пленку из контактной жидкости, попадает в призму преобразователя и принимается пьезопластиной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 7 представлена развертка цифрового осциллографа с зондирующим и приемными импульсами рэлеевской волны, созданной ЭМАП.

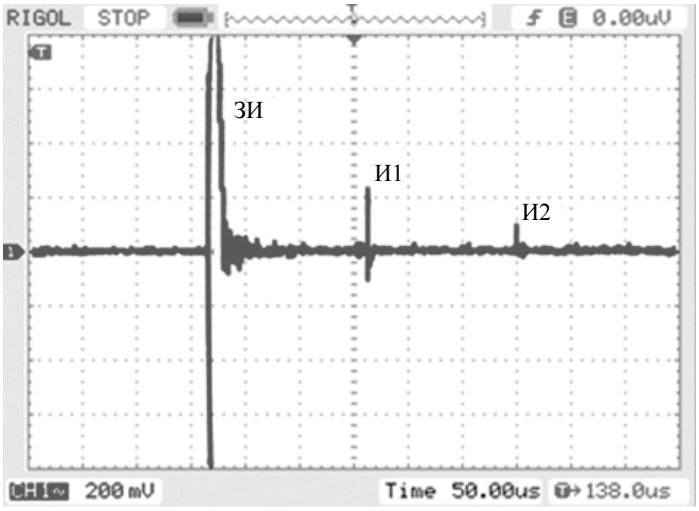

Рис. 7. Зондирующий и приемные импульсы ЭМАП.

Разница амплитуды зондирующего импульса (ЗИ), первого принятого импульса (И1) и второго принятого импульса (И2), прошедшего два расстояния длины окружности, обусловлена механизмом рассеяния на элементах структуры металла исследуемой области. Микроструктура вблизи поверхности в области торца шейки и после длительной эксплуатации вблизи галтели для оси №1—1 показана на рис. 8.

а *б*

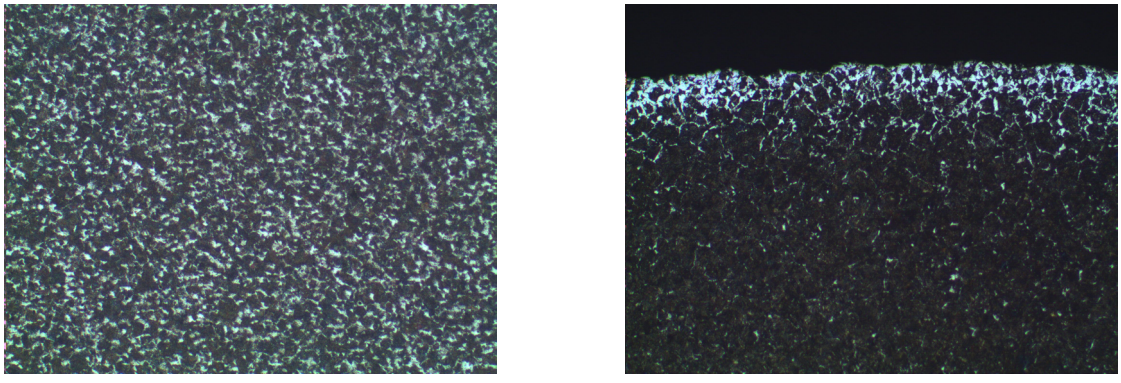

Рис. 8. Микроструктура вблизи поверхности в области торца шейки на глубине более 3 мм (*а*), и после длительной эксплуатации вблизи галтели (*б*), 100×.

Подставляя известные значения $l_{ок}$ (см. табл. 1) в формулы (2)—(4), можно выразить скорость рэлеевской волны в разных сечениях шейки оси через измеренные интервалы времен. В табл. 2 и 3 даны значения времени распространения рэлеевской волны и вычисленные по формулам (2)—(4) и (5), (6) абсолютные и относительные значения скоростей распространения рэлеевских и головных волн в двух сечениях шейки, осредненных по результатам четырех измерений по окружности с шагом 90 градусов.

Приборная погрешность определения времени распространения рэлеевской волны в шейке оси при ее диаметре 130 мм, определенная частотой дискретизации структуроскопа (400 МГц), не превышает 0,002 %.

Таблица 2

Значения скорости и времени распространения рэлеевской волны, ее изменение и погрешность измерений в шейках осей

№ оси	Скорость рэлеевской волны, м/с		Относительное изменение скорости волн, %	Время распространения рэлеевской волны, мкс		Относительная погрешность, %	
	вблизи галтели	вблизи торца		вблизи галтели	вблизи торца	вблизи галтели	вблизи торца
1—1	2981±0,9	2987±0,3	0,20	136,87±0,04	136,59±0,02	0,03	0,015
1—2	2980±0,6	2987±0,1	0,23	136,91±0,04	136,60±0,02	0,03	0,015
2—1	2985±0,6	2986±0,3	0,03	136,66±0,03	136,65±0,01	0,02	0,007
2—2	2988±0,7	2989±0,3	0,02	136,52±0,03	136,51±0,012	0,02	0,009
3—1	2987±0,4	2988±1,0	0,03	136,58±0,02	136,54±0,04	0,015	0,03
4—1	2985±0,4	2988±0,4	0,10	136,71±0,02	136,61±0,015	0,015	0,012

Приборная погрешность определения времени распространения головной волны в шейке оси при базе прозвучивания 61,74 мм, определенная частотой дискретизации дефектоскопа DIO1000 (204,8 МГц), не превышает 0,05 %, а после применения интерполяции (1024 МГц) — 0,01 %.

Случайная погрешность результатов многократных измерений времен распространения рэлеевских и головных волн в одной области приведена в табл. 2 и 3. При этом относительные изменения скоростей рэлеевских и головных волн являются значимыми.

Таблица 3

Значения скорости головной волны, ее изменение и погрешность измерений в шейках осей

№ оси	Скорость головной волны, м/с			Относительная погрешность измерения, %	
	вблизи галтели	вблизи торца	изменение, %	вблизи галтели	вблизи торца
1—1	5923±3	5933±7	0,17	0,05	0,11
1—2	5927±2	5934±4	0,12	0,03	0,07
2—1	5906±2	5908±4	0,03	0,03	0,07
2—2	5925±1	5929±6	0,05	0,02	0,10
3—1	5926±2	5929±3	0,04	0,03	0,05
4—1	5937±5	5948±2	0,19	0,08	0,03

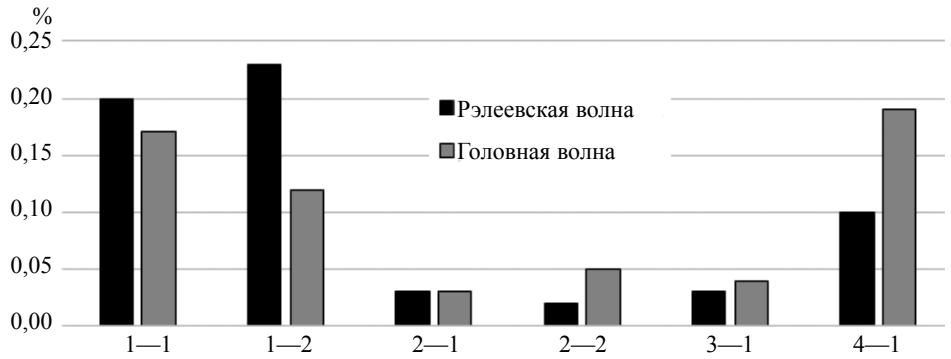

Рис. 9. Относительное изменение скорости рэлеевских и головных волн вблизи галтельного перехода относительно торца для шести шеек осей.

По результатам анализа скоростей рэлеевских и головных волн можно предложить следующие критерии:

$C_{\text{отн } R} >$ или = 0,1 % и $C_{\text{отн гол}} > 0{,}1$ % — значительное изменение структуры металла шейки оси.

$C_{\text{отн } R} < 0{,}1$ % и $C_{\text{отн гол}} < 0{,}1$ % — незначительные изменения структуры.

Различие времен прохождения рэлеевских волн в торце и вблизи галтельного перехода оси свидетельствует о наличии накопленной поврежденности (деструктуризации металла) шеек осей в области галтельного перехода, что подтверждается металлографией на рис. 8.

Рассчитанные изменения скоростей рэлеевских и головных волн вблизи торца относительно галтельного перехода даны на гистограмме рис. 9.

Как видно из рис. 9, наблюдается закономерное уменьшение скоростей рэлеевских и головных волн вблизи галтельного перехода шеек осей, связанное с временем эксплуатации колесных пар, что свидетельствует о деструктуризации поверхностного слоя металла шейки.

ВЫВОДЫ

1. Различие времен прохождения рэлеевских и головных волн в торце и вблизи галтельного перехода оси свидетельствует о наличии накопленной поврежденности (деструктуризации металла) шеек осей в области галтельного перехода. Выявленные закономерности соответствуют представлениям о том, что в металлах с накопленной поврежденностью, в виде рассеянных микродефектов, скорость ультразвуковых волн уменьшается.

2. При продолжительной эксплуатации наблюдаются значительные изменения скоростей рэлеевских и головных волн до 7 м/с или до 0,2 % в шейках осей № 1—1 и 1—2 1967 г. изготовления и оси № 4—1 1987 г. изготовления относительно других осей.

3. Предложен критерий оценки накопленной поврежденности шеек осей колесных пар вагонов относительно дальнейшей эксплуатации.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10122) с использованием УНУ «Акустический информационно-измерительный комплекс». При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» УдмФИЦ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карпов В.А., Воробьев А.А.* На основе неразрушающего контроля // Железнодорожный транспорт. 2015. № 10. 61 с.

2. *Билык Н.А.* Коэффициенты безопасности и запаса прочности механических конструкций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 5. С. 63—70.

3. *Устич П.А., Иванов А.А., Мажидов Ф.А.* Оценка остаточного срока службы деталей на основе данных об отказах // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 7. С. 196—205.

4. *Бондаренко В.В., Скурихин Д.И.* Система акустического контроля колёсных пар во время движения // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 1 (56). С. 192—197.

5. *Смирнов А.Н., Абабков Н.В., Муравьев В.В., Фольмер С.В.* Критерии оценки технического состояния длительно работающего металла оборудования ТЭС на основе акустической структуроскопии // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 44—51. [*Smirnov A.N., Ababkov N.V., Muravev V.V., Folmer S.V.* Criteria for the evaluation of the technical state of the long-lived metal of hpp equipment based on acoustic structuroscopy // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. Т. 51. № 2. С. 94—100.] DOI: 10.1134/S1061830915020084.

6. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Будрин А.Ю., Синцов М.А., Зорин А.В.* Акустическая структуроскопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 1. С. 37—44. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-37-44.

7. *Бояркин Е.В., Игнатова Э.С.* Анализ особенностей выявляемости дефектов в шейке и предподступичной части оси колесной пары грузового вагона / В сб.: Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика. Материалы междунар. науч.-практ. конф. Сибирский государственный университет путей сообщения. Новосибирск. 2018. С. 177—185.

8. *Ботвина Л.Р., Тютин М.Р., Петерсен Т.Б., Левин В.П., Солдатенков А.П., Просвирнин Д.В.* Остаточная прочность, микротвердость и акустические свойства циклически деформированной малоуглеродистой стали // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 6. С. 44—53.

9. *Дымкин Г.Я., Кадикова М.Б.* Ультразвуковой метод количественной оценки структуры металла осей колесных пар // Дефектоскопия. 2009. № 7. С. 27—36.

10. *Дымкин Г.Я., Бочарова И.В., Пудовиков С.А., Шевелев А.В.* Методические принципы и технологии приемочного ультразвукового контроля осей колесных пар // Дефектоскопия. 2006. № 3. С. 13—27.

11. *Муравьева О.В., Соков М.Ю.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2016. Т. 19. № 3. С. 46—50.

12. *Викторов И.А.* Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.

13. *Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Куликов В.А.* Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 12—20. [*Muravev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., Kulikov V.A.* An electromagnetic-acoustic method

for studying stress-strain states of rails // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. Т. 52. № 7. С. 370—376.] DOI: 10.1134/S1061830916070044.

14. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Платунов А.В., Злобин Д.В.* Исследования акустоупругих характеристик стержневой волны в термически обработанных стальных проволоках электромагнитно-акустическим методом // Дефектоскопия. 2012. № 8. С. 3—15. [*Muravev V.V., Muraveva O.V., Platunov A.V., Zlobin D.V.* Investigations of acoustoelastic characteristics of rod waves in heat-treated steel wires using the electromagnetic-acoustic method. Russian Journal of Nondestructive Testing // 2012. Т. 48. № 8. С. 447—456.] DOI: 10.1134/S1061830912080062.

15. *Разыграев Н.П.* Ультразвуковая дефектоскопия головными волнами — физические предпосылки и практическое применение // Дефектоскопия. 2004. № 9. С. 27—37.

16. *Муравьева О.В., Зорин В.А.* Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн // Дефектоскопия. 2017. № 5. С. 3—9. [*Muraveva O.V., Zorin V.A.* The multiple shadow method applied to testing cylindrical objects with rayleigh waves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. Т. 53. № 5. С. 337—342.]