

УДК 620.179.162

А. Г. ОТОКА, Белорусская железная дорога, г. Гомель; О. В. ХОЛОДИЛОВ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ПОДСТУПИЧНОЙ ЧАСТИ ОСИ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКЕ

Проанализирована методика ультразвукового контроля подступичной части оси с напрессованными цельнокатанными колесами дефектоскопом УД2-102 в соответствии с техническими нормативными правовыми актами. Описана проблема традиционного ультразвукового контроля подступичной части оси колесной пары при текущем и среднем ремонте. Рассчитаны углы ввода ультразвуковых колебаний, при которых вся подступичная часть оси колесной пары с напрессованными цельнокатанными колесами будет проконтролирована за один оборот преобразователем на основе фазированной решетки. Подобран преобразователь на основе фазированной решетки под рассчитанные углы ввода в объект контроля.

Обеспечение безопасности движения поездов связано с применением различных технологий и средств неразрушающего контроля (НК) на железной дороге. Для решения такого рода задач разработаны механизированные многоканальные системы и комплексы, что позволяет добиться необходимой производительности и достоверности НК для предприятий с относительно небольшими объемами выпускаемой продукции.

В настоящее время различные производители выпускают оборудование, имеющее в своем составе специализированные сканирующие устройства для механизированного НК осей, бывших в эксплуатации при среднем и текущем ремонте (СР и ТР соответственно) колесных пар. Например, в ультразвуковых (УЗ) дефектоскопах имеется возможность записи и хранения в памяти дефектоскопа результатов всего процесса сканирования в виде «B-scan», «C-scan», «D-scan» и результатов подтверждающего контроля в виде «A-scan» с привязкой к номеру и геометрии конкретного изделия и т. д. Благодаря этому влияние человеческого фактора на процесс НК сведено к минимуму.

Объектом нашего рассмотрения является подступичная часть – часть оси, на которую напрессовывают колесо [1]. В процессе изготовления, эксплуатации и ремонта осей колесных пар (КП) наиболее опасными дефектами в подступичной части являются трещины и внутренние дефекты в виде пор, шлаковых включений и других металлургических дефектов, которые впоследствии могут перерасти из концентратора напряжений в развитие трещины и привести к дальнейшему излому.

При трении происходят процессы изнашивания, химического окисления поверхности, а также развиваются электроэрозионные явления за счет возникающего при трении двух металлов термоэлектрического тока.

Всё это способствует образованию очагов усталостных трещин. Если при формировании колёсной пары ступица колеса или подступичная часть оси будут обработаны с большой конусностью или овальностью, то после напрессовки колеса усилие, удерживающее его на оси, будет распределяться неравномерно по подступичной части, что вызовет местные напряжения в оси, способствующие появлению трещин [2].

Неразрушающий контроль подступичной части оси с напрессованными цельнокатанными колесами весьма затруднителен ввиду того, что зона контроля закрыта ступицей колеса и визуально осмотреть поверхность

невозможно. Поэтому здесь можно применить только УЗ-контроль (УЗК), позволяющий находить дефекты не только на поверхности оси, но и внутри (в толще) детали. Метод обладает высокой чувствительностью с возможностью контроля при одностороннем доступе.

При текущем и среднем ремонтах КП подступичные части оси с напрессованными цельнокатанными колесами подвергаются УЗК в соответствии с рекомендациями, изложенными в РД ВНИИЖТ 27.05.01 [1].

При проведении среднего ремонта КП с частично демонтированным буксовым узлом без снятия внутренних колец выполняют УЗК подступичной части оси на отсутствие дефектов эхо-импульсным методом (рисунок 1) – ручной УЗК по комплексу 2 (для осей типа РУ1, РУ1Ш, РВ1Ш, РВ3Ш вариант метода AR1.1, AR1.3, AR3.3, AR3.2 – «обязательно») с торцов оси и цилиндрической средней части оси или механизированный УЗК по комплексу 1 с предподступичных частей оси (BR3, BR4 – «обязательно»).

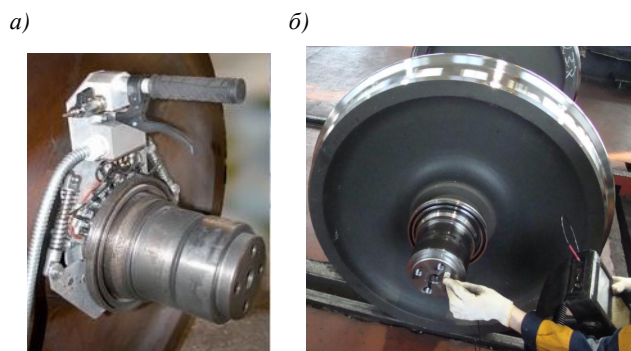


Рисунок 1 – УЗК подступичной части (СР)
а – комплекс 1; б – комплекс 2

В зависимости от типа оси, наличия внутренних колец на шейке оси, редуктора генератора, тормозных дисков в средней части оси и их размеров, а также используемых средств НК выбирается определенный вариант метода.

Характеристики вариантов методов УЗК подступичной части оси при среднем ремонте представлены в таблице 1.

При проведении СР КП с полностью демонтированным буксовым узлом и снятыми внутренними кольцами выполняют УЗК подступичной части оси на отсутствие дефектов эхо-импульсным методом с цилиндрических поверхностей шеек и средней части оси (AR3.1 – «обязательно»).

Таблица 1 – Характеристики вариантов контроля подступичной части оси при СР

Вариант метода	Тип волны	f, МГц	α, град	Границы зон контроля, мм
				РУ1, РУ1Ш
AR1.1	Продольная	2,5±0,25	0±2	1200–1950
AR1.3	То же		20–28	250–350
AR3.1	Поперечная		50±2	145–225
AR3.2	То же		40±2	340–480
BR3	Продольная		20±2	80–130
BR4	Поперечная		55±2	265–315

Примечание – Границы зон контроля для вариантов метода BR указаны относительно перехода шейки оси в предподступичную часть оси.

Текущий ремонт. При проведении ТР КП без демонтажа буксового узла выполняют УЗК подступичной части оси на отсутствие дефектов эхо-импульсным методом – механизированный УЗК по комплексу 1 с предподступичных частей оси и ручной УЗК с цилиндрической средней части (BR3, BR4, AR3.2 – «обязательно»).

При проведении ТР КП при демонтаже торцевого крепления выполняют УЗК подступичной части оси на отсутствие дефектов эхо-импульсным методом (рисунок 2) – ручной УЗК по комплексу 2 для осей типа РУ1, РУ1Ш, РВ1Ш, РВ2Ш, РВ3Ш (AR1.1, AR1.3, AR1.5, AR3.1 – «обязательно») или механизированный УЗК с предподступичных частей оси совместно с ручным УЗК с цилиндрической поверхности средней части оси по комплексу 1 (BR3, BR4, AR3.2 – «обязательно»).

Характеристики вариантов методов УЗК подступичной части оси при текущем ремонте представлены в таблице 2.

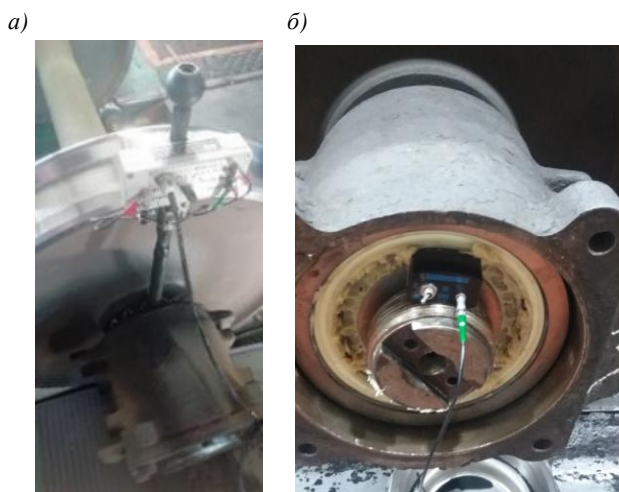


Рисунок 2 – УЗК подступичной части (ТР)
а – комплекс 1; б – комплекс 2

Таблица 2 – Характеристики вариантов контроля подступичной части оси при ТР

Вариант метода	Тип волны	f, МГц	α, град	Границы зон контроля, мм
				РУ1, РУ1Ш
AR1.1	Продольная	2,5±0,25	0±2	1200–1950
AR1.3	То же		20–28	250–350
AR3.1	Поперечная		50±2	145–225
AR3.2	То же		40±2	340–480
AR1.5	Продольная		20±2	280–380
BR3	То же		20±2	80–130
BR4	Поперечная	55±2	265–315	

Расшифровка вариантов методов УЗК подступичной части оси.

УЗК подступичной части оси КП с целью выявления внутренних и поверхностных дефектов при текущем и среднем ремонте КП выполняют по следующим вариантам метода [3]:

– AR1.1 – контроль с торца (или с резьбовой канавки) в осевом направлении продольными волнами при установке пьезоэлектрического преобразователя (далее – ПЭП) в доступные точки у края поверхности торца (сканирование ПЭП по окружности резьбовой канавки) с целью выявления в средней части и дальней подступичной части оси, кроме зоны под внешней кромкой ступицы колеса, поверхностных поперечных трещин. Данный метод представлен на рисунке 3, а);

– AR1.3 – контроль с торца (резьбовой канавки) в осевом направлении продольными волнами при установке ПЭП в доступные точки у края поверхности торца (сканировании ПЭП по окружности резьбовой канавки) с целью выявления в ближней подступичной части оси в зоне под внешней кромкой ступицы поверхностных поперечных трещин. Данный метод представлен на рисунке 3, б);

– AR1.5 – контроль с торца оси типа РВ2Ш в осевом направлении продольными волнами путем сканирования ПЭП по окружности радиусом 25 мм с центром в геометрическом центре оси с целью выявления в ближней подступичной части в зоне под внешней кромкой ступицы поверхностных поперечных трещин (рисунок 3, в);

– AR3.1 – контроль с цилиндрической поверхности оси поперечными волнами в осевом направлении путем сканирования ПЭП по поверхностям средней части и шейки, с целью выявления в средней части и зонах под внутренними и внешними ступицами колеса поверхностных поперечных трещин (рисунок 3, г);

– AR3.2 – контроль с цилиндрической поверхности оси поперечными волнами в осевом направлении путем сканирования ПЭП по поверхностям средней части (в пределах между внутренней кромкой ступицы колеса и редуктором генератора или внешней кромкой ступицы тормозного диска) с целью выявления в зоне под внутренней кромкой ступицы колеса поверхностных поперечных трещин. Данный метод представлен на рисунке 3, д);

– BR3 – контроль с цилиндрической поверхности оси продольными волнами в осевом направлении при установке ПЭП на предподступичной части и сканировании по периметру оси с целью выявления в зоне под внешней кромкой ступицы колеса поперечных трещин (рисунок 3, е);

– BR4 – контроль с цилиндрической поверхности оси поперечными волнами в осевом направлении при установке ПЭП на предподступичную часть и сканировании по периметру оси с целью выявления в зоне под внутренней кромкой ступицы колеса поперечных трещин (рисунок 3, ж).

Ультразвуковой контроль подступичной части оси КП проводится с целью обнаружения внутренних и поверхностных дефектов по условной чувствительности. К примеру, определение браковочной чувствительности при контроле AR1.3, AR1.5 по отражательной способности цилиндрического бокового искусственного отражателя (ЦБО) диаметром 6 мм в стандартном образце СО-2 или СО-3Р на глубине 44 мм с добавлением требуемой

чувствительности, вычисленной экспериментальным путем. Так, для AR1.3 необходимо добавить требуемую чувствительность +40 дБ, а для AR1.5 – чувствительность +32 дБ. При контроле AR1.1 используется определение браковочной чувствительности «донная» поверхность в СО-2 или СО-3Р, а при контроле BR3 и BR4 ЦБО 6 мм на глубине 44 мм в отраслевом стандартном образце – СОСО 32-006-2012.

Пропилы в оси используются только для подтверждения того, что оборудование настроено правильно. Они являются альтернативными и не являются браковочным критерием. Если пропилы выявляются, настройки сделаны правильно и можно проводить контроль. В противном случае необходимо перенастроить УЗ-дефектоскоп, а также убедиться в работоспособности преобразователей, соединительных кабелей и т. д. [3].

Проблемы традиционного УЗК

На железных дорогах Республики Беларусь и Российской Федерации практически во всех депо УЗК подступичной части оси проводится дефектоскопом УД2-102, УД2-102ВД или их аналогами.

На практике при УЗК оси дефектоскопом УД2-102 согласно утвержденным техническим нормативно-правовым актам (ТНПА) возникает ряд вопросов, связанных с ложными сигналами, которые превышают браковочный уровень.

Рассмотрим акустические схемы и типовые дефектограммы контроля подступичной части оси, которые приведены на рисунке 4 [4].

Недостатком ввода УЗ-колебаний с торца оси являются большие помехи, возникающие из-за конструктивных особенностей оси, которые маскируют отраженные от дефектов сигналы, а также недостаточная чувствительность, обусловленная необходимостью выявлять сигналы от дефектов малого размера, удаленных от точки ввода УЗ-колебаний на расстояние более 1700 мм (см. рисунок 4, з).

При контроле внешних подступичных частей оси при наличии на шейках колец роликов подшипников с торца оси возникают сигналы, которые не позволяют выявить и идентифицировать дефект, т. к. он скрывается в массиве ложных сигналов (см. рисунок 4, в). Как видно из рисунка 4, в, пропил в оси (в настроенном образце) глубиной 3 мм в подступичной части оси определяется только одним сигналом, который находится в массиве ложных сигналов и шумов. Поэтому данный пропил выявляется только благодаря известному расстоянию согласно ТНПА на настроенный образец.

При этом следует отметить, что контроль внешних подступичных частей оси при наличии на шейках колец роликов подшипников с торца оси весьма сомнителен. Ось колесной пары РУ-1Ш с торца оси имеет в зависимости от варианта исполнения 3 или 4 отверстия под болты М20, а также центровое и дополнительно «водильные отверстия» для обеспечения вращения оси при обработке на металлорежущих станках.

Это приводит к тому, что 100%-й контроль невозможен, ввиду того, что основная поверхность ввода УЗ-колебаний (торец оси) занята отверстиями. Рассмат-

ривая контроль подступичной части оси РУ-1Ш с торца оси, можно сказать, что если трещина находится в такой зоне подступичной части оси, при которой преобразователь попадает на отверстие, то дефект выявлен не будет. Этого нельзя сказать про УЗК оси РУ-1 с резьбовой канавки. Однако с 1993 г. оси типа РУ1 не изготавливаются, и с каждым годом их становится всё меньше [1].

Как показала практика, к недостаткам контроля осей РУ-1 (с торца оси) можно отнести (зачастую) непараллельность поверхности ввода УЗ-колебаний. Это может быть связано с ошибками при изготовлении оси или при неправильных монтажных работах, например торцевого крепления подшипников, подборе корончатой гайки и т. д. В итоге пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) не плотно прилегает к поверхности ввода (к торцу резьбовой канавки) и чувствительность контроля падает с увеличением зазора. При отсутствии контакта можно утверждать, что контроль бесполезен – дефекты выявлены не будут.

При контроле оси с предподступичной части (см. рисунок 3, е, ж) [3], при длине подступичной части оси 250 мм будет проконтролирован лишь участок 50 мм с внешней и внутренней сторон. При этом зачистку предподступичной части оси делать очень сложно, т. к. участок ввода УЗ-колебаний находится за буксовым узлом. Эта часть оси сильно подвержена загрязнению при эксплуатации колесной пары, и качественную очистку выполнить затруднительно.

При контроле дальней подступичной части оси с противоположного торца чувствительность к дефектам очень низкая т. к. пропил в контрольном образце глубиной 4 мм выявляется плохо (см. рисунок 4, з). Большое усиление дефектоскопа вызывает «шумы», которые зачастую превышают полезные сигналы.

Контроль подступичной части оси с цилиндрической поверхности средней части оси (см. рисунок 4, а) и с шейки оси (см. рисунок 4, б) затруднителен, т. к. появляются «ложные» сигналы, которые идентифицировать только по расстоянию (по координатам x и y) очень сложно.

На практике все эти «ложные» сигналы при контроле подступичной части оси (с торца и цилиндрической поверхности оси) могут быть вызваны:

- отражением УЗ-колебаний от галтельного перехода шейки в предподступичную часть;
- отражением УЗ-колебаний от галтельных переходов предподступичной и средней части в подступичную;
- переотражением УЗ-колебаний от напрессованных ступиц цельнокатаных колес;
- диффузным рассеянием УЗ-колебаний с увеличением глубины прохождения луча;
- переотражением УЗ-колебаний от напрессованных колец подшипников на шейке оси;
- наличием грубой шероховатости, неровностей, загрязнений;
- отражением УЗ-колебаний от допустимых рисок, задиров и т. д.

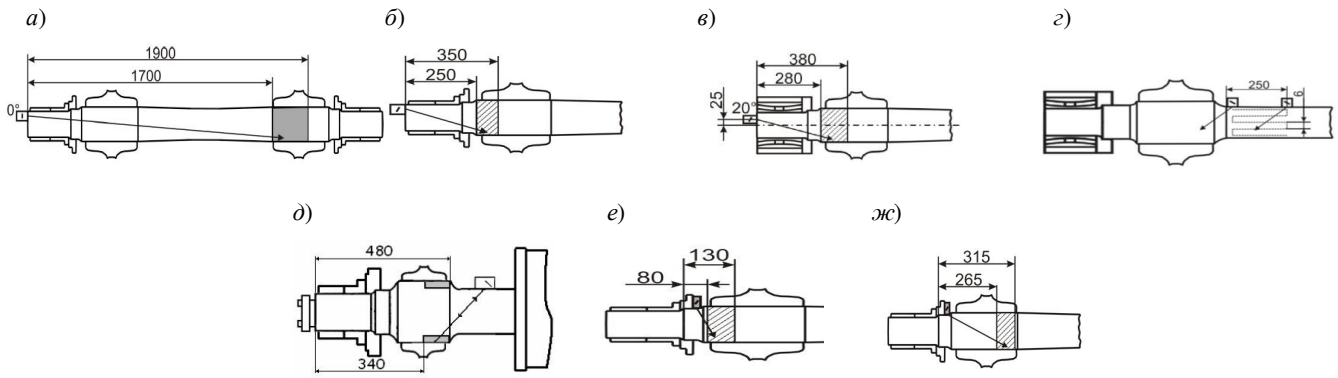


Рисунок 3 – Акустические схемы контроля подступичных частей оси при ТР и СР

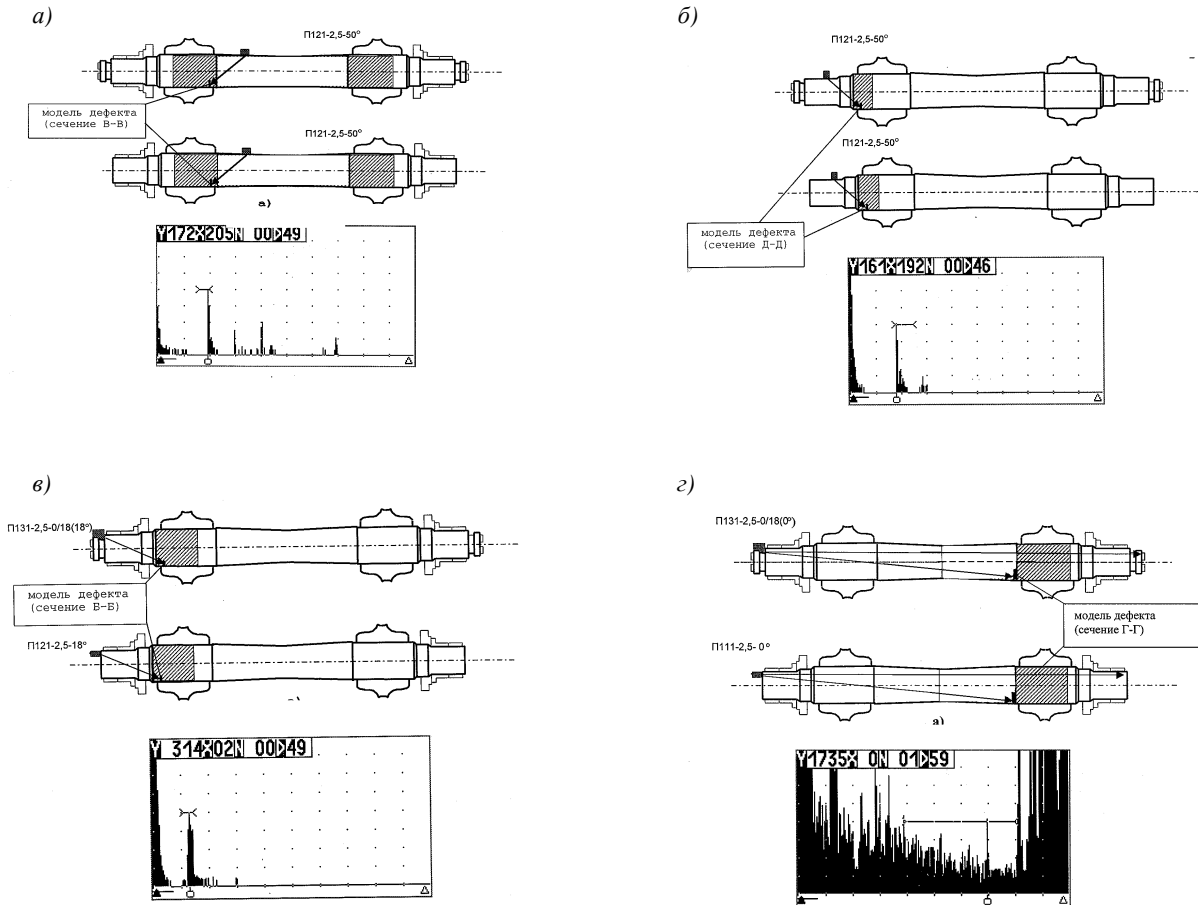


Рисунок 4 – Акустические схемы и типовая дефектограмма контроля подступичных частей оси: со средней части (а); с шейки оси при отсутствии (б) и наличии (в) колец подшипников; с противоположного торца (г)

Для идентификации ложных эхо-сигналов следует считать с экрана дефектоскопа координаты (показания глубиномера) и определить местоположение вызвавшего их отражателя. При этом, опираясь только на амплитуду сигнала на экране дефектоскопа, у дефектоскописта нет возможности оценить размеры дефекта, а также его геометрию. При проведении контроля подступичной части оси используется множество преобразователей: с углами ввода 0 ± 2 , 20 ± 2 , $50 \pm 2^\circ$ при ручном контроле и 19 ± 2 и $55 \pm 2^\circ$ в составе механизированного сканера [3]. Практика показывает, что данные методики контроля с использованием УЗ-дефектоскопов УД2-102 требуют доработок, т. к. выяв-

ление дефектов в подступичной части оси становится весьма сомнительным (по причинам, описанным выше).

В настоящее время выпускаются дефектоскопы, позволяющие не только определить глубину залегания дефекта, но и распознать дефект в виде образов, с описанием его размеров и площади сечения. Получил широкое распространение УЗК с использованием преобразователей на фазированных решетках (ФАР).

Ультразвуковой контроль с использованием ФАР имеет преимущества перед традиционным контролем. Различные углы ввода управляемого многоэлементного датчика увеличивают вероятность обнаружения дефектов.

В общем виде принцип УЗК основан на способности луча отражаться от дефекта в исследуемом материале. Результат традиционного УЗК выводится в виде *A*-скана. Метод ФАР – это получение множества *A*-сканов, количество которых зависит от числа преобразователей в фазированном датчике. В дальнейшем это множество *A*-сканов преобразуется в *S*-скан, позволяющий визуализировать структуру материала.

Метод ФАР не противоречит принятым стандартам традиционного УЗК, т. к. является одним из способов генерирования УЗ-колебаний.

Преобразователи на ФАР представляют собой объединенные на одной пьезопластине множество одноэлементных ПЭП. По функциональным возможностям и геометрии ФАР делятся на линейные (одномерные) и двумерные. Первые позволяют осуществлять электрическое сканирование в одной плоскости, вторые – в двух ортогональных плоскостях [6].

Фазированные решетки для излучения и приема наклонных к поверхности волн, как правило, располагают на призме так же, как и для наклонного ПЭП. Призма обеспечивает основное значение угла ввода, а с помощью решетки варьируют этот угол в узких пределах.

Для проведения УЗК подступичной части оси с напрессованными цельнокатанными колесами рассчитаем углы ввода УЗ-колебаний в сталь марки ОсВ. Ввод будет осуществляться со средней части оси КП с использованием преобразователя с ФАР. При этом при падении УЗ-колебаний под углом γ к поверхности на границе раздела будет происходить трансформация волн, схема которой показана на рисунке 5.

С учетом вышеизложенного, зная координату x (максимальное расстояние от точки ввода УЗ-колебаний до двугранного угла подступичной части оси колесной пары) (рисунок 6), можно рассчитать углы ввода.

Специфическим вариантом двукратного отражения является отражатель, состоящий из двух поверхностей, образующих двугранный угол. В этом случае лучи отражаются от горизонтальной, затем – от вертикальной поверхности и возвращаются к преобразователю (рисунок 6).

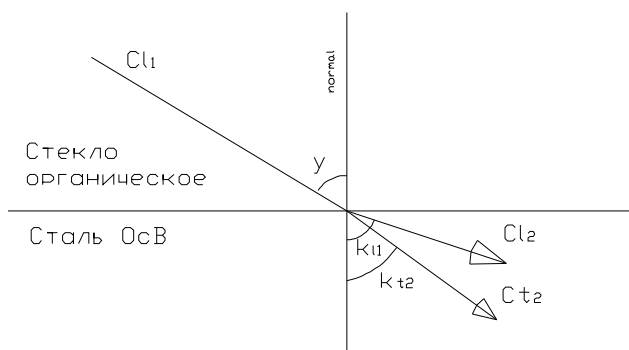


Рисунок 5 – Схема образования преломленных волн в стали ОсВ при падении УЗ-колебаний под углом γ : γ – угол падения; k – угол преломления;

Cl_1 – скорость падающей продольной волны; Cl_2 – скорость преломленной продольной волны; Ct_2 – скорость преломленной трансформированной поперечной волны

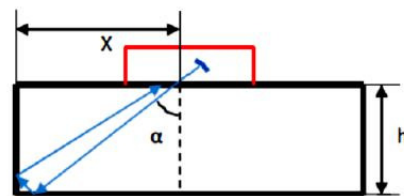


Рисунок 6 – Схема отражении УЗ-колебаний от двугранного угла

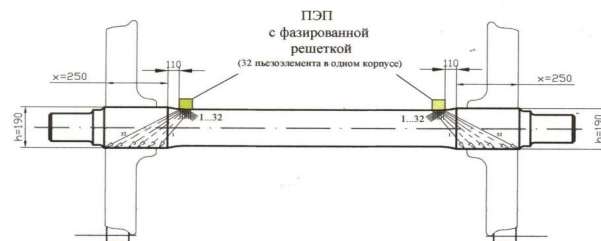


Рисунок 7 – К расчету координаты x при различных углах ввода

Расстояние, преодолеваемое УЗ-колебаниями от точки ввода ПЭП

$$x = h \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где h – диаметр подступичной части оси, мм (в расчетах принимаем 190); α – угол ввода УЗ-колебаний, град.

Из таблицы 3 видно, что подходящие углы ввода УЗ-колебаний (выделены зеленым цветом) для длины подступичной части оси в 250 мм на расстоянии 110 мм от галтельного перехода составят $29\text{--}63^\circ$ с интервалом 1.

Рассчитаем углы падения в призме ПЭП с ФАР при углах ввода 29 и 63° в соответствии с законом Снеллиуса:

$$\sin \gamma / \sin \kappa = Cl_1 / Cl_2,$$

где γ – угол падения в призме ПЭП с ФАР; κ – угол ввода; Cl_1 – скорость УЗ-колебаний в оргстекле (падающая продольная волна); Cl_2 – скорость УЗ-колебаний в стали ОсВ (преломленная продольная волна).

При угле ввода 29° в сталь ОсВ.

$$\sin \gamma / \sin 29 = 2670 / 5920.$$

Тогда $\sin \gamma = 0,22$, $\gamma = \arcsin 0,22 = 13^\circ$.

При угле ввода 63° в сталь ОсВ.

$$\sin \gamma / \sin 63 = 2670 / 5920.$$

Тогда $\sin \gamma = 0,40$, $\gamma = \arcsin 0,40 = 24^\circ$.

Согласно закону Снеллиуса при первом критическом угле 27° (угол падения в призме) и выше в стали будет отсутствовать преломленная продольная волна и существовать преломленная трансформированная поперечная [7].

В нашем случае углы падения в призме ПЭП с ФАР не превышают 27° . Это говорит о том, что в стали будут одновременно присутствовать преломленная продольная и трансформированная поперечная волны. Поэтому в данном случае можно говорить о высокой чувствительности УЗК к дефектам малого размера (раскрытия).

Расчеты показали, что в нашем случае подходит ПЭП с ФАР не менее чем с 32 элементами и с частотой преобразователя $2,25\text{--}4,00$ МГц.

Таблица 3 – Расчет координаты x при различных углах ввода УЗ-колебаний

Угол ввода α , град	Координата x (расстояние, преодолеваемое лучом от точки выхода ПЭП)	Угол ввода α , град	Координата x (расстояние, преодолеваемое лучом от точки выхода ПЭП)	Угол ввода α , град	Координата x (расстояние, преодолеваемое лучом от точки выхода ПЭП)
9	30,09	31	114,16	53	252,14
10	33,50	32	118,73	54	261,51
11	36,93	33	123,39	55	271,35
12	40,39	34	128,16	56	281,69
13	43,86	35	133,04	57	292,57
14	47,37	36	138,04	58	304,06
15	50,91	37	143,18	59	316,21
16	54,48	38	148,44	60	329,09
17	58,09	39	153,86	61	342,77
18	61,73	40	159,42	62	357,34
19	65,42	41	165,16	63	372,90
20	69,15	42	171,08	64	389,56
21	72,93	43	177,18	65	407,46
22	76,76	44	183,48	66	426,75
23	80,65	45	190,00	67	447,61
24	84,59	46	196,75	68	470,27
25	88,60	47	203,75	69	494,97
26	92,67	48	211,02	70	522,02
27	96,81	49	218,57	71	551,80
28	101,02	50	226,43	72	584,76
29	105,32	51	234,63	73	621,46
30	109,70	52	243,19	74	662,61

Примечание – Толщина (диаметр) подступичной части 190 мм.

Закключение

Предложенная методика УЗК подступичной части оси с напрессованными цельнокатанными колесами дефектоскопом с ПЭП на основе ФАР в условиях проведения среднего и текущего ремонта КП вагонов позволит в 10–100 раз повысить производительность контроля. При этом дефектоскописту не придется использовать большое количество ПЭП, выбирать нужный вариант метода в зависимости от типа оси, наличия тор-мозных дисков, редуктора генератора и т. д.

Применение ФАР для подступичной части оси колесной пары позволит, в первую очередь, повысить качество УЗК.

Список литературы

1 РД ВНИИЖТ 27.05.01. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар вагонов с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524 мм), 2017. – 242 с.

Получено 13.09.2022

A. G. Otoka, O. V. Kholodilov. Ultrasonic testing of the bearing part of the axis of the wheels pair using phased array transducers.

The article analyzes the method of ultrasonic inspection of the approach part of the axle with pressed solid-rolled wheels with a flaw detector UD2-102 in accordance with technical regulatory legal acts. The problem of traditional ultrasonic control of the approach part of the wheel set axle during current and average repairs is described. The angles of ultrasound input are calculated, at which the entire approach part of the wheel set axis with pressed solid-rolled wheels will be controlled in one revolution by a phased array converter. Converters for the flaw detector based on a phased array have been selected for the calculated angles of entry into the control object.

2 **Богданов, А. Ф.** Эксплуатация и ремонт колесных пар вагонов / А. Ф. Богданов, В. Г. Чурсин. – М. : Транспорт, 1985. – 270 с.

3 ПР НК В.2–2013. Правила неразрушающего контроля деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Специальные требования : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества от 19–20 ноября 2013 г. № 59. – Кишинев, 2013. – 88 с.

4 Инструкция по ультразвуковому контролю колесных пар вагонов программируемым дефектоскопом «ПЕЛЕНГ» УД2-102 – МПС РФ, 2004.

5 **Борисков, Ю.** Введение в технологию фазированных решеток / Ю. Борисков [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.pergam.by/press/blogs/uz-control.htm> – Дата доступа : 24.06.2022.

6 Научно-технический центр // Эксперт. Метод фазированной решетки [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ntsexpert.ru>. – Дата доступа : 24.06.2022.

7 Неразрушающий контроль : справ. : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – М. : Машиностроение, 2008. – 864 с.