

УДК 620.179.143

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЯХ МЕТОДОМ АКУСТОУПРУГОСТИ¹

© В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин²*Статья поступила 19 августа 2015 г.*

Описан ультразвуковой прибор для определения внутренних напряжений в изделиях металлургии и машиностроения из углеродистых и легированных сталей методом акустоупругости. Рассмотрен принцип возбуждения и приема сдвиговых волн электромагнитно-акустическими преобразователями. Представлена оценка погрешности измерения времени распространения акустических импульсов в металлоконструкциях. Приведены результаты измерений окружных остаточных напряжений в ободьях вагонных колес.

Ключевые слова: ультразвук; металлоконструкции; внутренние напряжения; электромагнитно-акустические преобразователи.

Необходимость контроля внутренних напряжений в различных металлоконструкциях и металлоизделиях потребовала разработки прецизионной аппаратуры

для этих целей. Внутренние напряжения оценивали методом акустоупругости с использованием зависимости скорости распространения ультразвуковых волн от механических напряжений [1, 2].

Современная цифровая регистрирующая аппаратура позволяет измерять временные интервалы распространения акустических импульсов с необходимой точностью. Поэтому в исследованиях использовали способ, который основан на измерении разности времени прохождения через исследуемый анизотропный материал двух сдвиговых волн, поляризованных в направлениях максимальных и минимальных напряжений [1, 3]. Реализация способа акустоупругости возможна при наличии преобразователей, позволяющих излучать сдвиговые волны с взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации [3]. Способ позволяет учитывать влияние неоднородности структуры металла на скорость распространения волн [4].

Аппаратно-программные средства. Конструктивные особенности преобразователя. Ввод и прием сдвиговых волн осуществляется бесконтактным электромагнитно-акустическим (ЭМА) преобразователем, схема действия которого показана на рис. 1, а. Импульсы регистрируются специально разработанным электромагнитно-акустическим прибором СЭМА (рис. 1, б), внесенным в реестр средств измерений Госстандарта (госреестр № 61957-15). Разработка ЭМА преобразователя направлена на увеличение нормальной составляющей магнитной индукции в полюсах преобразователя [5], вследствие чего повышаются его чувствительность, число отражений и точность

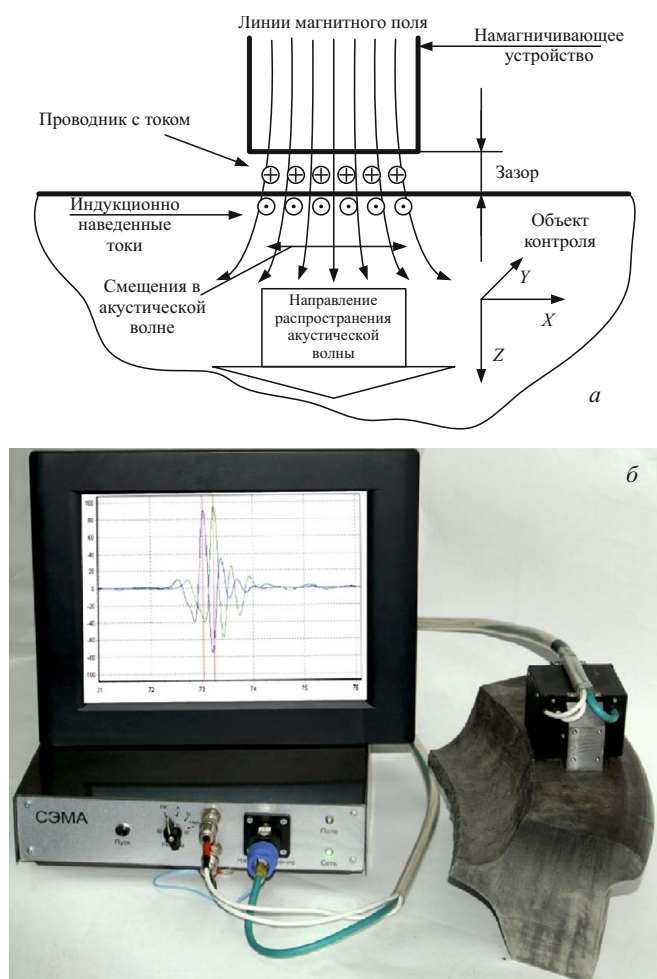


Рис. 1. Схема действия ЭМА преобразователя (а) и внешний вид прибора СЭМА (б)

¹ Работа выполнена в рамках проекта № 3.751.2014/К по госзаданию Минобрнауки РФ.

² Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия; e-mail: pmkk@istu.ru (vmuraviev@mail.ru)

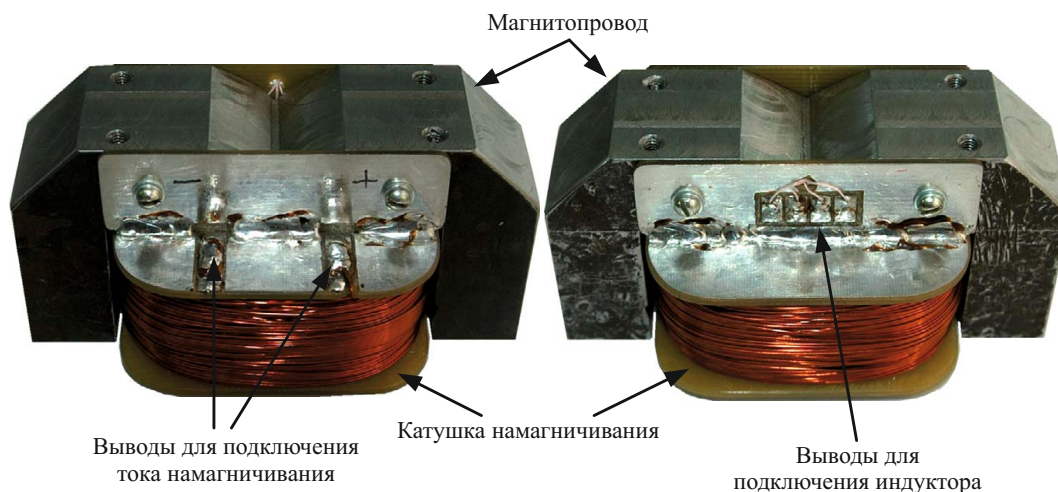


Рис. 2. Внешний вид разработанного ЭМА преобразователя

определения времени распространения ультразвука в контролируемом объекте для оценки скорости волн, по которым рассчитываются остаточные напряжения.

В основу разработанного ЭМА преобразователя легла конструкция на базе электромагнита с Ш-образной магнитной системой (рис. 2). Полученные результаты при моделировании электроакустического тракта преобразователя сдвиговых волн использованы при составлении технических требований к характеристикам структуроскопа. Так, частота зондирующих импульсов для возбуждения ЭМА преобразователя выбрана в соответствии с оптимальным значением, полученным при расчетах, и составила 2,5 МГц.

Ограничения элементной базы и конструктивные особенности при построении датчика позволили получить сигнал импульсного тока в 25 А на 20 витках индуктора. Величина электрических импульсов, регистрируемых с катушки, составила не более 1 мВ. При этом тракт усиления акустических импульсов с ЭМА преобразователя — не менее 60 дБ. Кроме того, для подавления случайных помех применены усреднение по множеству реализаций измерений и программная обработка зарегистрированных сигналов с возможностью фильтрации.

Структурная схема прибора (рис. 3) включает следующие блоки: ЭМА преобразователь с индуктивностью L ; блок генератора и усиления (БГУ); персональный компьютер (ПК) с установленной платой аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [6]. Генератор синхронно с фазой силового напряжения вырабатывает зондирующий импульс, поступающий на ЭМА излучатель. Одновременно с зондирующим импульсом вырабатывается сигнал синхронизации для запуска платы АЦП на регистрацию. ЭМА преобразователь работает в совмещенном режиме (излучение — прием). Сигнал с ЭМА преобразователя регистрируется, усиливается, фильтруется, буферизуется и поступает на плату АЦП ПК. В ЭВМ сигнал обра-

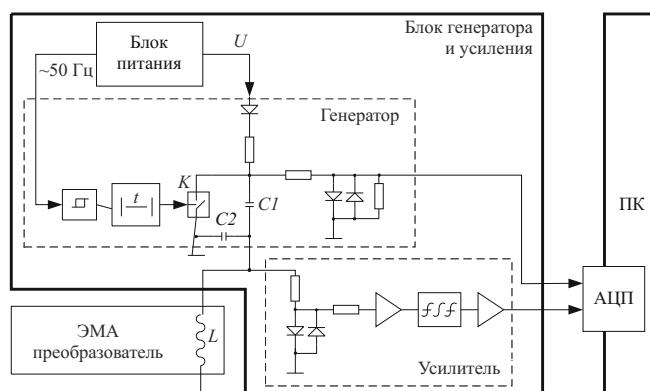


Рис. 3. Структурная схема прибора СЭМА

батывается с использованием специализированного программного обеспечения (ПО).

Прибор СЭМА имеет следующие основные технические характеристики: амплитуда генератора — 2,0 кВ; рабочая частота — 2,5 МГц; полоса пропускания усилителя — 0,6 – 6,6 МГц по уровню 6 дБ; коэффициент усиления — 66 дБ; плата АЦП — разрешение 8 бит, частота дискретизации 500 МГц.

Генератор зондирующих импульсов и усилитель. Задача эффективного приема сигнала с ЭМА преобразователя и точной локализации сигналов на временной оси с устранением влияния внешних помех решается в том числе с помощью средств синхронизации с питающим напряжением частотой 50 Гц. Это позволяет исключить локализованные на временной оси помехи из регистрируемого сигнала.

Генератор возбуждения (см. рис. 3) за время работы запускающего импульса длительностью t через силовой ключ K накачивает индуктор индуктивностью L током. До срабатывания ключа K конденсатор $C1$ находится под напряжением $U = +600$ В. В момент замыкания ключа K верхняя обкладка конденсатора соединяется с обратным проводом ЭМА преобразователя. Происходит передача энергии с конденсатора $C1$

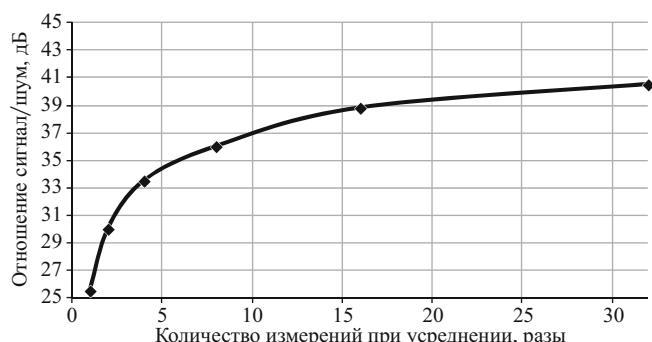


Рис. 4. Отношение сигнал/шум в канале усилителя при усреднении результатов по заданному количеству измерений

в ЭМА преобразователь индуктивностью L . По реактивному сопротивлению датчика Z в цепи протекает ток $I = U/Z$. За время t включения ключа K в ЭМА преобразователе обеспечивается запас энергии $W = tLP/2$. При размыкании ключа K конденсатор $C1$ отключается от ЭМА преобразователя и запасенная в ЭМА преобразователе энергия расходуется в колебательной системе, образованной индуктивностью ЭМА преобразователя L и емкостью $C2$. Омическое сопротивление датчика не вносит в колебательную систему существенного вклада в силу своей малости. Конденсатор $C2$ настраивается на рабочую частоту ЭМА преобразователя с учетом емкости подводящего кабеля. Запасенная в контуре $LC2$ энергия позволяет получить на ЭМА преобразователе зондирующий импульс ударного возбуждения амплитудой до 2 кВ.

Усилитель прибора СЭМА выполнен в экранированном корпусе и расположен в непосредственной близости от разъема для подключения ЭМА преобразователя в блоке генератора и усиления. Вход усилителя защищен от зондирующего импульса парой встречно включенных импульсных диодов. Фильтрация осуществляется фильтром Бесселя низких частот четвертого порядка с частотой среза 5 МГц по уровню 3 дБ. Суммарный коэффициент усиления составляет 1500 (63 дБ).

Регистрация сигнала в широкой полосе частот необходима для снижения частотных искажений регистрируемых сигналов. Крутой фронт импульса позволяет минимизировать погрешность определения времени.

Плата регистрации и программное обеспечение. В качестве платы регистрации и оцифровки сигнала использована внешняя плата АЦП фирмы ЗАО «Руднев – Шилиев». Программное обеспечение (ПО) [7] синхронизирует процесс регистрации с работой генератора зондирующих импульсов и производит первичную обработку зарегистрированных сигналов. Пользователь через оконный интерфейс программы управляет коэффициентами усиления платы АЦП и конфигурирует систему регистрации в соответствии с задачами эксперимента. Программное обеспечение предоставляет пользователю возможность подробно

рассмотреть участок сигнала, измерить амплитуду и время для выбранной точки, разницу амплитуд и расстояние по временной оси для двух выбранных точек, рассчитать коэффициент затухания по двум выбранным точкам.

В условиях низкого коэффициента преобразования ЭМА преобразователя при широкой полосе пропускания усилителя (0,6 – 6,6 МГц по уровню 6 дБ) в регистрируемом сигнале присутствует широкий спектр разнообразных электрических шумов и помех. С целью отстройки от влияния шумов и повышения разрешающей способности во временной области используются цифровая фильтрация и усреднение многократно зарегистрированного сигнала (от 1 до 32 шагов). Усреднение позволило снизить уровень шумов в четыре раза. Экспериментальная зависимость отношения сигнал/шум при разном количестве измерений приведена на рис. 4.

На рис. 5, а представлена эхограмма многократных отражений между боковыми плоскопараллельными поверхностями стандартного образца СО-2, который применяют в ультразвуковой дефектоскопии для определения условной чувствительности, мертвой зоны, погрешности глубиномера, угла ввода луча, ширины основного лепестка диаграммы направленности. Образец изготовлен из стали марки 20 по ГОСТ 1050–88 или стали марки Ст3 по ГОСТ 14637–79. Эхограмма, развернутая в виде двух сигналов сдвиговых волн с взаимно перпендикулярными поляризациями в районе третьего донного отражения с разницей времен прихода, показана на рис. 5, б.

Алгоритм корреляционной обработки акустических сигналов. Основным информативным параметром метода при оценке линейного напряженного состояния является время распространения двух сдвиговых волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях. В ободе цельнокатаного вагонного колеса одна из поляризаций совпадает с направлением действия окружных напряжений, вторая — перпендикулярна этому направлению. Связь регистрируемых временных параметров сигналов с величиной остаточных напряжений представлена выражением [8]

$$\sigma = D(a - a_0), \quad a = \frac{t_1 - t_2}{t_1}, \quad a_0 = \frac{t_{01} - t_{02}}{t_{01}}, \quad (1)$$

где $D = 145$ ГПа — коэффициент упругоакустической связи для одноосного напряженного состояния колесной стали, определенный экспериментально; a и a_0 — параметры акустической анизотропии материала после и до возникновения напряженного состояния; t_{01} и t_{02} — значения времени распространения сдвиговых волн в отсутствие напряженного состояния. Анализ формулы (1) показывает, что напряженное состояние определяется историей металла, которая характеризуется акустической анизотропией (текстурой и струк-

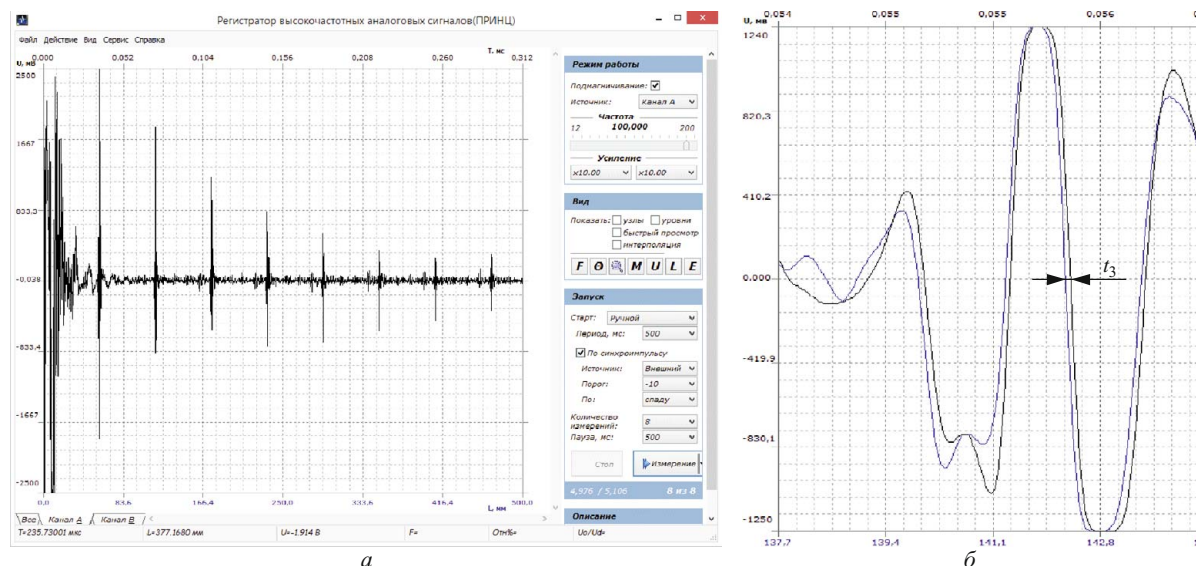


Рис. 5. Интерфейс ПО: а — зарегистрированная серия многократных отражений; б — осциллограммы сигнала, развернутые в районе третьего донного отражения

турой металла — параметр a_0), и непосредственно напряженным состоянием в изделии (параметр a). Параметр a_0 можно принять за постоянную величину и считать, что он одинаков для каждого конкретного объекта контроля.

С учетом $t_2 = t_1 \pm \Delta t$,

$$a = \frac{t_1 - t_2}{t_1} = \frac{t_1 - t_1 \pm \Delta t}{t_1} = \frac{\pm \Delta t}{t_1},$$

где t_1 и t_2 — значения измеряемых времен распространения сдвиговых волн, поляризованных в радиальном и окружном направлениях соответственно, формула (1) принимает вид

$$\sigma = D \left(\frac{\pm \Delta t}{t_1} - a_0 \right). \quad (2)$$

Применительно к оценке внутренних напряжений в ободе цельнокатаного железнодорожного колеса анализ выражения (2) показывает, что при $\Delta t = \pm 2$ нс инструментальная ошибка оценки механических напряжений составляет ± 3 МПа (при использовании серии импульсов от трех донных отражений). Погрешность определения t_1 с точностью ± 200 нс (при периоде одного колебания в импульсе 400 нс и ориентировочном времени 80 мкс) при $\Delta t = \pm 2$ нс приводит к ошибке более 0,6 % или 0,3 МПа, что значительно ниже возможной ошибки из-за неточности определения Δt .

Таким образом, для расчета величины остаточных напряжений необходимо определить с максимальной точностью временную задержку между сигналами Δt и ориентировочное время прихода t_1 одного из импульсов.

Наиболее распространенными являются следующие алгоритмы определения времени распростра-

нения сигналов: по максимуму сигнала; по переходу сигнала через ноль; по заданному уровню. При определении Δt как разницы между t_1 и t_2 по представленным алгоритмам возможны непредвиденные ошибки, приводящие к снижению точности измерений. Ошибки могут возникать в связи с искажением формы сигналов и изменением крутизны их фронтов. Перспективным решением представляется оценка времени распространения сигналов по всей выборке данных. Определение временной задержки по степени схожести формы сигналов без учета амплитудных значений получено с применением взаимной корреляционной функции (ВКФ). В этом случае точность измерений соответствует шагу дискретизации сигналов. Координата максимума ВКФ по оси абсцисс соответствует временному сдвигу одного сигнала относительно другого, при котором перекрытие площадей сигналов будет максимальным, что дает возможность однозначного определения временной разницы между импульсами сдвиговых волн с взаимно перпендикулярной поляризацией, распространяющихся в одном луче.

Использование ВКФ для попарно регистрируемых сигналов сдвиговых волн с совпадающими номерами донных отражений позволяет определять временной сдвиг между ними, а анализ отражений с номерами больше единицы увеличивает точность нахождения разницы времен распространения в соответствии с выражением

$$\Delta t_{\text{сдвига}} = 2\Delta t_{\text{инс}}/n, \quad (3)$$

где $\Delta t_{\text{инс}}$ — инструментальная ошибка при регистрации времени; n — номер донного отражения анализируемой пары сигналов. Так, если инструментальная ошибка составляет ± 2 нс (что соответствует частоте дискретизации платы АЦП), то точность определения временного сдвига для первой пары донных отраже-

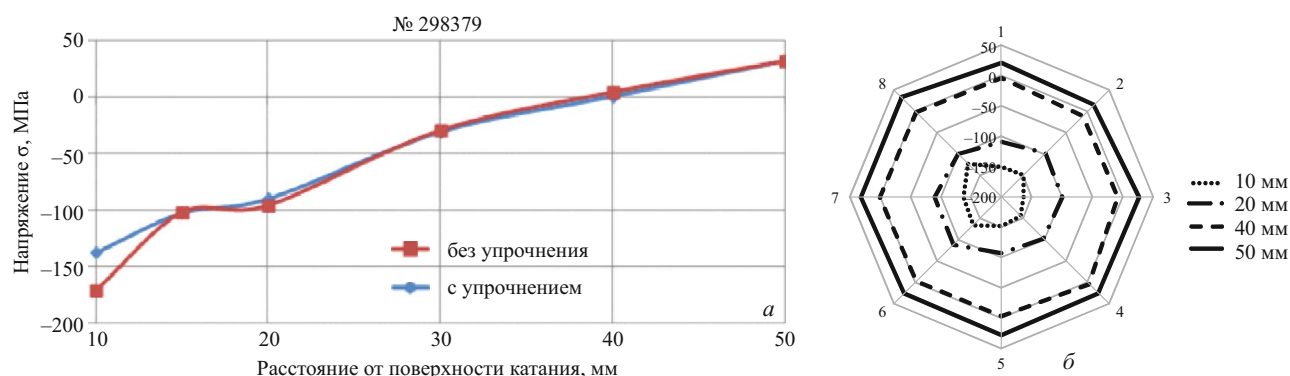


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений по толщине (а) и по окружности (б) ободьев колес

ний составит ± 4 нс, для второй пары — ± 2 нс, а для третьей — 1,3 нс, что меньше $\Delta t_{\text{инс}}$.

Применение корреляционного анализа и метода многократных отражений положено в основу программного алгоритма прецизионного определения разницы времен распространения сигнала, что позволило повысить точность и достоверность методики оценки остаточных напряжений.

В качестве опорного канала при двухканальном режиме регистрации платы АЦП выбирается тот, в котором плоскость поляризации волны перпендикулярна относительно главного направления действия напряжений. Временной сдвиг будет определяться относительно времени распространения волны, зарегистрированной в этом канале. В соответствии с полученными ранее закономерностями распространения сдвиговых волн в среде с линейным напряженным состоянием время прихода волны с поляризацией, перпендикулярной относительно главных напряжений, будет больше, чем у второй волны с параллельной поляризацией. В этом случае временной сдвиг, определяемый с помощью ВКФ, отрицателен и рассчитываемая величина остаточных напряжений имеет отрицательный знак, что соответствует принятым обозначениям сжимающих напряжений. Время прихода первого донного импульса в опорном канале учитывается в качестве t_1 в выражении (2).

Выбор рабочей пары донных отражений определяется наименьшим количеством найденных донных импульсов в любом из каналов. Анализируемые пары импульсов выделяются из эхограммы, после чего для них строятся ВКФ. С увеличением пройденного пути упругой волной в материале происходит дисперсионное расползание формы сигнала, что приводит к уменьшению коэффициентов корреляции, следовательно, к уменьшению амплитуды ВКФ. В связи с этим выбрана граница интервала достоверности получаемых значений, которая соответствует уровню 70 % от максимума ВКФ для первых донных отражений. При использовании пар донных отражений с максимумом ВКФ не менее 70 % от уровня максимума ВКФ для первой пары донных отражений стандартные отклонения результатов определения временного

сдвига не превышают инструментальную ошибку измерений.

Предложенный алгоритм обработки и выделения информативных параметров из результатов измерений при оценке остаточных напряжений обладает рядом преимуществ перед методиками проведения контроля, предложенными в работах [9 – 12]. Так, использование в выражении (2) временного сдвига между сигналами вместо времен распространения каждой из сдвиговых волн минимизирует методологическую ошибку оценки остаточных напряжений, а применение ВКФ позволяет обеспечить точность измерения временного сдвига между импульсами не ниже инструментальной ошибки регистрации платы АЦП. Таким образом, предложенный алгоритм обеспечивает инструментальную точность контроля остаточных напряжений ± 3 МПа при однократном измерении.

Результаты измерений в ободьях колес. Практическое применение разработанных подходов при контроле остаточных напряжений в ободьях нескольких партий цельнокатанных вагонных колес показало, что максимальные значения сжимающих напряжений у поверхности катания колес, как правило, не превышают допустимые и находятся в диапазоне от -100 до -160 МПа во всех исследованных сечениях (рис. 6, а), что соответствует требованиям СТО РЖД 1.11.002. Для колес, бывших в эксплуатации, сжимающие напряжения вблизи поверхности катания существенно меньше (например, для колеса из стали марки 2 они составляют от -60 до -100 МПа, а для фрагмента обода — -50 МПа).

Переход от сжимающих напряжений в растягивающие происходит на расстоянии не менее 40 мм от поверхности катания для большинства исследованных колес, что также соответствует требованиям СТО РЖД 1.11.002. В качестве примера на рис. 6, б приведены результаты распределения остаточных напряжений по окружности ободьев колеса. Неравномерность их распределения достигает 60 МПа.

Таким образом, разработан ультразвуковой прибор с прецизионным измерением разности времен распространения импульсов, предназначенный для неразрушающего контроля качества термообработки,

оценки остаточных напряжений изделий металлургии и машиностроения из углеродистых и легированных сталей. Действие структуроскопа основано на установленных корреляционных связях между измеряемой величиной времени распространения акустических импульсов в изделии и контролируемыми параметрами. Рассмотрен принцип возбуждения и приема сдвиговых волн электромагнитно-акустическими преобразователями. Представлена оценка погрешности измерения времени распространения акустических импульсов в металлоконструкциях с применением взаимной корреляционной функции для определения временной задержки по степени схожести сигналов. Инструментальная точность контроля остаточных напряжений составляет ± 3 МПа при однократном измерении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитина Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. — Н. Новгород: ТАЛАН, 2005. — 208 с.
2. Буденков Г. А., Муравьев В. В., Коробейникова О. В. Исследование напряженно-деформированного состояния ободьев цельнокатанных вагонных колес методом акустической тензометрии / Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2009. Т. 6. № 3. С. 111 – 117.
3. Муравьев В. В., Волкова Л. В. Оценка величины натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости / Дефектоскопия. 2013. № 9. С. 40 – 46.
4. 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.
5. Стрижак В. А., Пряхин А. В., Обухов С. А., Ефремов А. Б. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1. С. 243 – 250.
6. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ № 2011614594 09.06.2011. Регистратор высокочастотных аналоговых сигналов «Принц» / Стрижак В. А., Ефремов А. Б.; заявл. 21.04.2011; опубл. 09.06.2011.
7. Камышев А. В., Никитина Н. Е., Смирнов В. А. Измерение остаточных напряжений в ободьях железнодорожных колес методом акустоупругости / Дефектоскопия. 2010. № 3. С. 50 – 54.
8. Дымкин Г. Я., Краснобрыжий С. А., Шевелев А. В. Ультразвуковой метод измерения остаточных напряжений механических напряжений в ободьях цельнокатанных колес с учетом собственной анизотропии материала / Дефектоскопия. 2013. № 1. С. 12 – 19.
9. Герасимов С. И., Жилкин В. А., Власов Г. М., Остроменский П. И. Оценка точности определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций с использованием накладного голографического интерферометра / Изв. вузов. Строительство. 2013. № 10. С. 110 – 120.
10. Муравьев В. В., Муравьева О. В., Стрижак В. А., Волкова Л. В., Балобанов Е. Н. Акустическая тензометрия и структуроскопия железнодорожных колес. — Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2014. — 180 с.

REFERENCES

1. Nikitina N. E. Akoustouprugost'. Opyt prakticheskogo primeneniya [Acoustoelasticity. Practical experience]. — N. Novgorod: TALAM, 2005. — 208 p. [in Russian].
2. Budenkov G. A., Murav'ev V. V., Korobeinikova O. V. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya obod'ev tsel'nokatanykh vagonnykh koles metodom akusticheskoi tenzometrii [Investigation of stress-strain state of solid-rolled rims of the wheels by acoustic tenso-metry] / Fund. Probl. Sovr. Materialoved. 2009. Vol. 6. N 3. P. 111 – 117 [in Russian].
3. Murav'ev V. V., Volkova L. V. Evaluation of the interference value for the treads of locomotive wheels by the acoustic elasticity method / Russ. J. Nondestr. Testing. 2013. Vol. 49. Issue 9. P. 524 – 529.
4. Murav'ev 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 / Russ. J. Nondestr. Testing. 2012. Vol. 48. Issue 8. P. 447 – 456.
5. Strizhak V. A., Pryakhin A. V., Obukhov S. A., Efremov A. B. Informatsionno-izmeritel'naya sistema возбуждениya, priema, registratsii i obrabotki signalov élektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelei [Information and measuring excitation system, reception, registration and processing of signals of electromagnetic-acoustic transducers] / Intell. Sist. Proizv. 2011. N 1. P. 243 – 250 [in Russian].
6. Certificate of state registration of computer program N 2011614594 09.06.2011. Registrator vysokochastotnykh analogovykh signalov «Prints» [Registrar high frequency analog signals "Prints"] / Strizhak V. A., Efremov A. B.; appl. 21.04.2011; publ. 09.06.2011 [in Russian].
7. Kamyshev A. V., Nikitina N. E., Smirnov V. A. Measurement of the residual stresses in the treads of railway wheels by the acoustoelasticity method / Russ. J. Nondestr. Testing. 2013. Vol. 46. Issue 3. P. 189 – 193.
8. Dymkin G. Y., Krasnobryzhii S. A., Shevelev A. V. An ultrasonic method for measuring residual mechanical stresses in the rims of solid-rolled railroad wheels that considers the intrinsic anisotropy of the material / Russ. J. Nondestr. Testing. 2013. Vol. 49. Issue 1. P. 8 – 14.
9. Gerasimov S. I., Zhilkin V. A., Vlasov G. M., Ostromenskii P. I. Otsenka tochnosti opredeleniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya élementov konstruktssii s ispol'zovaniem nakladnogo golograficheskogo interferometra [Estimation of accuracy of the stress-strain state of structural condition elements with the use of surface-holographic interferometer] / Izv. Vuzov. Stroit. 2013. N 10. P. 110 – 120 [in Russian].
10. Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Strizhak V. A., Volkova L. V., Balobanov E. N. Akusticheskaya tenzometriya i strukturoskopiya zheleznodorozhnykh koles [Acoustic and strain measurement structurescopy railway wheels]. — Izhevsk: Izd. IzhGTU, 2014. — 180 p. [in Russian].