

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРНОГО ШУМА ПРИ КОНТРОЛЕ ПОВЕРХНОСТНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ РЭЛЕЯ СТАЛИ 20ГЛ В ПРОЦЕССЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

© 2021 г. А.А. Хлыбов^{1,*}, А.Л. Углов¹

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Россия 603155 Нижний Новгород, ул. Минина, 24
*E-mail: hlybov_52@mail.ru

Поступила в редакцию 18.05.2021; после доработки 08.06.2021
Принята к публикации 11.06.2021

Рассматривается возможность подхода к задачам контроля закономерностей упругопластического деформирования стали 20ГЛ методом анализа структурных шумов при использовании поверхностных акустических волн Рэлея. Проанализированы различные алгоритмы математической обработки структурных шумов, используемые различными авторами. На основе современных радиотехнических приемов обработки сигналов предложены уточненные расчетные алгоритмы определения спектрально-энергетических параметров структурных шумов. Приведены результаты экспериментальной проверки предложенных алгоритмов на образцах широко распространенной в железнодорожном транспорте стали 20ГЛ. Показана достаточно высокая чувствительность предложенных информативных параметров структурного шума к степени пластической деформации одновременно с простотой реализации измерительной методики. Полученные результаты могут послужить основой для разработки инженерной методики оценки напряжений или степени пластической деформации материала конструкции вне зависимости от того, в каком состоянии — упругом или упругопластическом — он находится, что существенно расширяет возможности акустического метода контроля напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов по сравнению с его велосиметрическим вариантом.

Ключевые слова: ультразвук, поверхностные акустические волны Рэлея, структурный шум, упругопластическое деформирование, энергия шума.

DOI: 10.31857/S0130308221070010

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностные акустические волны Рэлея (ПАВР) традиционно используются в дефектоскопии для обнаружения поверхностных дефектов. Однако в последнее время ПАВР нашли применение также в задачах акустической структурометрии [1], при оценке напряжений и остаточных деформаций [2—4], уровня усталостных повреждений [5, 6, Патент на изобретение 2507514 С1. Опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5] и во многих других технических задачах.

Для значительного числа высоконагруженных конструкций накопление эксплуатационных повреждений происходит по механизму роста микропластических деформаций и исчерпания пластичности. В этой связи понятен повышенный интерес современных исследователей к изучению влияния пластической деформации на акустические характеристики материала, в том числе и такие нетрадиционные, как параметры структурного шума (далее — СШ). Структурный шум связан с рассеянием упругих волн на структурных неоднородностях, неметаллических включениях, зернах металла. При этом СШ присутствует как в области зондирующего импульса, так и после прохождения этого импульса.

Существуют различные радиотехнические методы обработки сигналов, содержащих «шумовые» характеристики. Можно выделить такие, как пространственно-временная обработка, оптимизация параметров сканирования [7, 8], вейвлет-фильтрация [10], радиотехнические приемы «выблевания» СШ [11] и т.д.

Следует отметить, что в современных исследованиях СШ рассматривается не только как помеха, но и как источник информация о структуре материала, по которой можно судить о ее состоянии [11—13]. Проблема состоит в разработке достоверных алгоритмов получения этой информации.

Достоверность упомянутых алгоритмов определяется, во-первых, корректностью используемых математических приемов обработки результатов акустических измерений с целью определения информативных характеристик СШ, а, во-вторых, адекватностью этих характеристик контролируемым параметрам исследуемых материалов.

В работе [14] сформулирован подход к оценке структуры металла по значению интегрального уровня акустических СШ, в качестве которого использовалась их усредненная амплитуда, а также экспериментально показано влияние величины зерна стали 45 на величину предложенной харак-

теристики СШ. Связь СШ с пористостью показана в работе [15]. В работах [16, 17] предложен метод ультразвуковой структуроскопии изделий из сложноструктурных материалов с помощью анализа статистических характеристик СШ. Авторами показано, что комплексный анализ сигнала СШ дает возможность установить связь его энергетического спектра с характером структурных неоднородностей исследуемого материала.

Анализ изменений энергетического спектра СШ в одном и том же материале позволяет реализовать мониторинг изменения его структуры в процессе эксплуатации: если при наблюдении одного и того же объекта в течение времени будет зафиксировано изменение энергетического спектра, то это будет свидетельствовать о появлении деформаций в материале [16].

Вместе с тем отмечено, что для установления устойчивых количественных связей характеристик СШ и параметров структуры конкретных изделий необходимы специальные материаловедческие исследования.

Контролю структуры на основе анализа статистических характеристик обратно рассеянного сигнала посвящены работы [18—22], а также Патент на изобретение 2589751 (С2. Оpubл. 10.07.2016, Бюл. № 19).

Следует отметить, что все шире используемые в настоящее время приемы вейвлет-обработки различных сигналов, в том числе и ультразвуковых импульсов, часто отличаются избыточностью информации, что может быть полезно, например, для нейросетевых моделей в условиях отсутствия внятных физических представлений об исследуемых явлениях. В случае анализа закономерностей упругопластического деформирования акустическим методом, когда природа СШ понятна на уровне строгих физических представлений, вряд ли целесообразно применение алгоритмов вейвлет-анализа. Действительно, энергетический спектр акустического СШ по своей природе заметно не отличается от спектра зондирующего импульса. В этой связи использование вейвлет-анализа для получения количественных характеристик СШ может привести к увеличению погрешностей оценки спектрально-энергетических характеристик, поскольку допущение квазистационарности СШ и обработка его средствами оконного быстрого преобразования Фурье (БПФ) приводит к существенно меньшим погрешностям, чем результаты вейвлет – анализа реальных осциллограмм как нестационарных процессов.

Сравнительный анализ экспериментальных результатов, полученных различными исследователями, показал, что при анализе параметров микроструктуры, микропор, микротрещин и других микроповреждений, обеспечивающих рэлеевский характер рассеяния импульсов мегагерцового диапазона, к числу наиболее информативных характеристик следует отнести параметры энергетического спектра СШ.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма количественной оценки структурного шума при использовании импульсов ПАВР, основанного на расчете его относительной энергии, а также экспериментальная проверка предложенного алгоритма при упругом и упругопластическом деформировании, широко распространенной в железнодорожном транспорте стали 20ГЛ.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ ШУМОВ

Для получения необходимых количественных спектрально-энергетических оценок нами использовалось оконное преобразование Фурье сигнала $U(t)$:

$$S(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t)W(t-\tau)e^{-i\omega t} dt, \quad (1)$$

где $S(\omega, \tau)$ — спектральная плотность, зависящая от частоты ω и временного сдвига τ ; $W(t)$ — оконная функция, выбор которой определяется особенностью решаемой задачи и требуемой точностью временного и частотного разрешения.

Дискретный аналог выражения (1) имеет вид:

$$S(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} u(n\Delta t)w(n\Delta t)e^{-j\omega_k n\Delta t}, \quad (2)$$

где ω_k — дискретные частоты; $u(n\Delta t)$ — отсчеты сигнала; N — количество эквидистантных отсчетов на интервале наблюдения сигнала T ; $w(n\Delta t)$ — отсчеты оконной функции; $w_k = \frac{2\pi}{N\Delta t}k$; $k = 0, 1, \dots, N-1$, $\Delta t = \frac{T}{N}$ — шаг дискретизации сигнала, обратный частоте дискретизации f_{Δ} .

При цифровой обработке обычно полагают $\Delta t = 1$, поэтому формулу (2) записывают как

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} u_n w_n e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}. \quad (3)$$

Главным критерием, предъявляемым к оконной функции, при обработке реализаций СШ является требование максимального подавления растекания спектра (эффект Гиббса). Для удовлетворения этому критерию необходима оптимизация следующих параметров: ширина главного лепестка по уровню -3 дБ, ширина главного лепестка по нулевому уровню, максимальный уровень боковых лепестков, коэффициент ослабления оконной функции.

К одной из лучших по перечисленным критериям относится оконная функция Хэмминга [23]:

$$w_n = \begin{cases} 0,53836 - 0,46164 \cos \frac{2\pi}{N}n, & n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, & n \geq N \end{cases}, \quad (4)$$

которую мы и будем использовать.

Одним из наиболее перспективных приемов расчета энергетического спектра СШ является его определение с помощью модифицированной периодограммы методом Уэлча [24], который, как показано в [25], обеспечивает состоятельную оценку величины плотности мощности $P_k = |S_k|^2$.

При разбиении массива значений структурного шума общей длительностью $N_{ш}$ на N_{seg} сегментов выражение для модифицированной периодограммы примет вид:

$$\Pi_k(i) = \frac{1}{U} \cdot \left| \sum_{n=0}^{N_n-1} u_n(i) w_n(i) e^{-j\frac{2\pi}{N_n}kn} \right|, \quad (5)$$

где N_n — длительность периодограммы; $i = 1, \dots, N_{seg}$; $\frac{1}{U}$ — весовой коэффициент, введенный Уэлчем:

$$U = \frac{\sum_{n=0}^{N_n-1} |w_n(i)|^2}{N_n}. \quad (6)$$

Общее число сегментов N_{seg} зависит от длительности шума $N_{ш}$, длительности периодограммы N_n и степени перекрытия сегментов t_s , %:

$$N_{seg} = \text{Int} \left[\frac{N_{ш} - N_n}{N_n \left(1 - \frac{t_s}{100}\right)} + 1 \right], \quad (7)$$

где оператор Int означает целую часть выражения в квадратных скобках.

Выражение для спектральной плотности мощности в соответствии с [30] имеет вид;

$$P_k = \frac{1}{N_{seg}} \sum_{i=1}^{N_{seg}} \Pi_k(i). \quad (8)$$

В качестве информативной количественной характеристики структурного шума будем использовать величину относительной энергии:

$$\delta E_{ш} = \frac{E_{ш}}{E_{\Sigma}}, \quad (9)$$

где $E_{ш}$ — энергия шума, которая рассчитывается по формуле:

$$E_{ш} = \frac{1}{N_n} \sum_{k=0}^{N_n-1} P_k, \quad (10)$$

P_k — рассчитывается по формуле (8).

E_{Σ} — полная энергия шума и сигнала:

$$E_{\Sigma} = E_{ш} + E_{с}, \quad (11)$$

E_c — энергия сигнала, рассчитываемая по формуле:

$$E_c = \sum_{k=0}^{N_c-1} \left| \sum_{n=0}^{N_c-1} u_n w_n e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} \right|^2 \quad (12)$$

для оконной функции Хэмминга (4).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Количественную оценку величину относительной энергии структурного шума проводили на образцах из стали 20ГЛ с пределом текучести 210 МПа. Использовали стандартные плоские образцы типа I по ГОСТ 1497 с толщиной рабочей части 5 мм. Шероховатость рабочей поверхности Ra составляла 2,5 мкм по ГОСТ 2589. Измерения повторяли для 5 одинаковых образцов. Каждое измерение повторялось 5 раз с нарушением акустического контакта.

Упругопластическое деформирование образцов осуществляли с помощью испытательной машины фирмы Tinius Ollsen Ltd, модель H100KU.

Акустические измерения проводили с помощью ИВК «АСТРОН» (№ в Государственном реестре средств измерений 67552—17), обеспечивающего возможность прецизионных измерений задержек и амплитуд ультразвуковых импульсов.

Измерения выполняли в моменты остановки верхней траверсы испытательной машины. Кривая растяжения с точками остановки траверсы представлена на рис. 1.

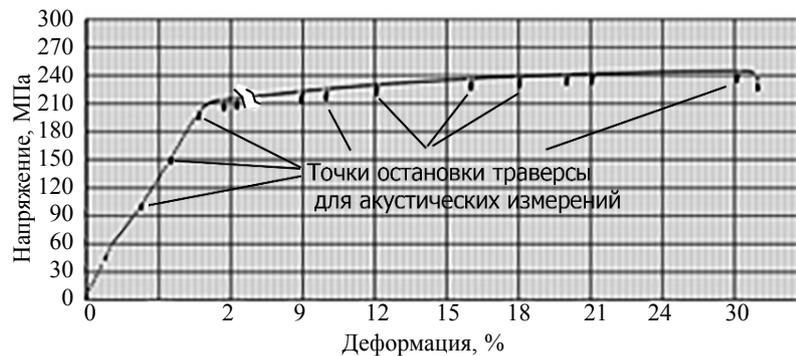


Рис. 1. Кривая растяжения, сталь 20ГЛ.

Импульсы ПАВР с частотой 3 МГц и длительностью приблизительно 2 мкс возбуждали и принимали с применением клиновидного датчика с фиксированной базой измерения (рис. 2). В качестве материала клиновидного датчика использовали органическое стекло. Угол α выбирали равным второму критическому углу. Типичная осциллограмма импульса ПАВР приведена на рис. 3.

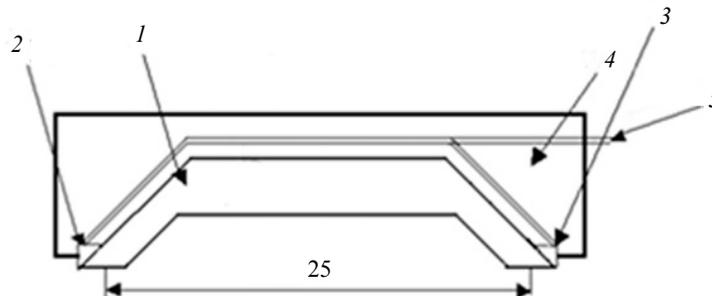


Рис. 2. Конструкция клиновидного датчика поверхностных волн:

1 — двусторонний клин из оргстекла; 2 — излучатель рэлеевских волн; 3 — приемник рэлеевских волн; 4 — корпус; 5 — высокочастотный кабель.



Рис. 3. Оциллограмма сигнала поверхностной волны.

На рис. 3 анализируемая область СШ соответствует рассеянному в направлении распространения волны импульсу.

В рамках разрабатываемого алгоритма обратное рассеяние не учитывается, поскольку его основные параметры (средняя амплитуда, энергия и др.), как показали эксперименты, характеризуются значительным разбросом, практически на порядок превышающим соответствующие величины для прямого рассеяния.

Длительность СШ определяется степенью его затухания до уровня шумов аппаратуры и вычислялась средствами программного обеспечения ИВК «АСТРОН».

Спектральная обработка проводилась с помощью БПФ с числом точек 2^{13} , что при частоте дискретизации 160 МГц соответствует разрешению по частоте 20 кГц.

На рис. 4 приведены типичные энергетические спектры.

На каждой стадии нагружения измерения повторялись 5 раз.

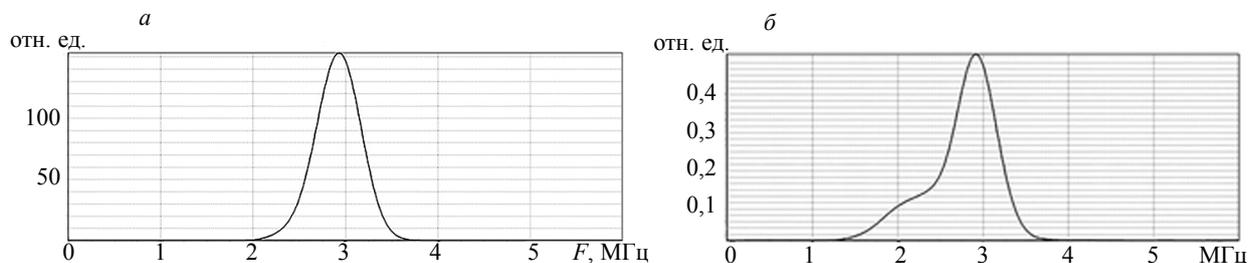


Рис. 4. Типичные энергетические спектры: импульса (а) и структурного шума (б), полученные для образцов в исходном состоянии.

Результаты измерений относительных значений структурного шума приведены в табл. 1 (упругое деформирование) и 2 (упругопластическое деформирование).

Таблица 1

Упругое деформирование

$\sigma_{\text{ист}} \approx \sigma_{\text{усл}}$, МПа	0	59	103	160
$\langle \delta E_{\text{ш}} \rangle \cdot 10^3$	2,75	2,74	2,72	2,75
$\Delta(\delta E_{\text{ш}}) \cdot 10^3$	0,03	0,08	0,04	0,06

В таблицах $\langle \delta E_{\text{ш}} \rangle$ — среднее значение относительной энергии структурного шума, $\Delta(\delta E_{\text{ш}})$ — доверительный интервал при доверительной вероятности 95 %. Результаты испытаний показали, что в области упругих деформаций (см. табл. 1) среднее значение относительной энергии структурного шума остается постоянным, в то время как в области упругопластических деформаций (см. табл. 2) относительная энергии структурного шума зависит от величины пластической дефор-

Уруголастическое деформирование

$\varepsilon_{\text{усл}}, \%$	0	6,3	7	10	12	16	18	20	21	24	27
$\varepsilon_{\text{ист}}, \%$	0	6,1	6,8	9,5	11,3	14,8	16,6	18,2	19,1	21,5	23,9
$\sigma_{\text{усл}}, \text{МПа}$	0	216	218	227	233	236	240	242	244	246	248
$\sigma_{\text{ист}}, \text{МПа}$	0	229	233	250	260	274	283	290	295	305	314
$\langle \delta E_{\text{ш}} \rangle \cdot 10^3$	2,75	2,91	2,95	3,12	3,24	3,23	3,55	4,06	4,30	5,52	6,32
$\Delta(\delta E_{\text{ш}}) \cdot 10^3$	0,03	0,07	0,08	0,05	0,09	0,02	0,04	0,04	0,04	0,13	0,04

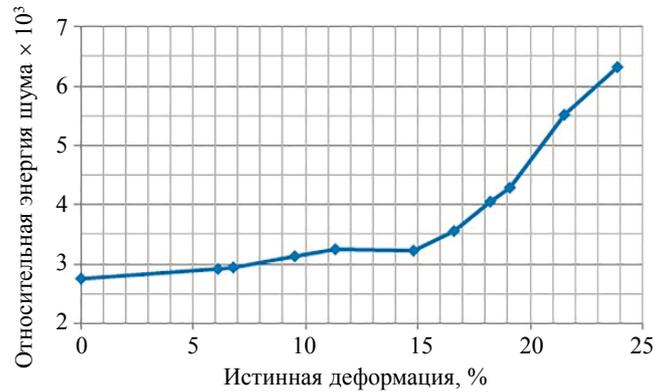


Рис. 5. Влияние пластической деформации на относительную энергию структурного шума.

мации испытываемых образцов. Соответствующий график зависимости для уруголастических деформаций приведен на рис. 5.

При построении графиков использовались истинные значения деформаций $\varepsilon_{\text{ист}}$ и напряжений $\sigma_{\text{ист}}$, которые на стадии равномерного деформирования выражаются через условные значения $\varepsilon_{\text{усл}}$ и $\sigma_{\text{усл}}$ следующим образом:

$$\varepsilon_{\text{ист}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{усл}}), \quad (13)$$

$$\sigma_{\text{ист}} = \sigma_{\text{усл}}(1 + \varepsilon_{\text{усл}}). \quad (14)$$

На рис. 6 приведена кривая зависимости относительной энергии шума от истинного напряжения для всей области уруголастического деформирования.

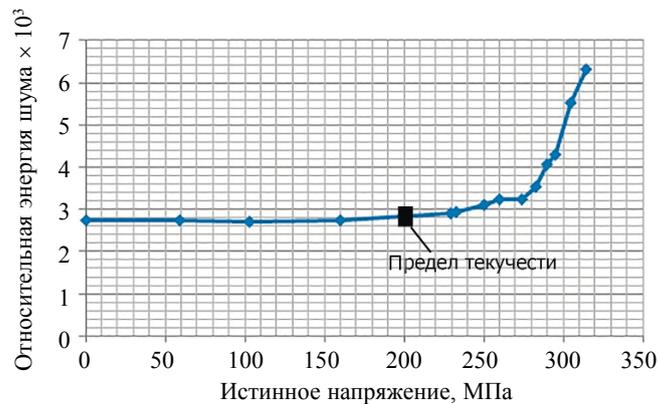


Рис. 6. Зависимость относительной энергии шума от истинного напряжения для всей диаграммы деформирования.

Кривая на рис. 6 позволяет сделать интересный вывод о характере влияния напряжения на используемый параметр $\delta E_{ш}$: вне зависимости от того, находится ли материал в области упругого или упругопластического деформирования, кривая зависимости описывается однозначной функцией:

$$\delta E_{ш} = \begin{cases} \delta E_{ш}(\text{упр}) = \text{const} & \text{для } 0 \leq \sigma_{\text{ист}} < \sigma_T \\ f_1(\sigma_{\text{ист}}) \text{ или } f_2(\varepsilon_{\text{ист}}) & \text{для } \sigma_{\text{ист}} \geq \sigma_T \end{cases}, \quad (15)$$

где σ_T — физический предел текучести, аппроксимирующие функции $f_1(\sigma_{\text{ист}})$ и $f_2(\varepsilon_{\text{ист}})$ легко подбираются методом наименьших квадратов.

При практическом использовании предлагаемого алгоритма для реального конструктивного элемента или полуфабриката из стали 20ГЛ аппроксимирующие зависимости (15) с учетом погрешностей определения предложенного информативного параметра структурного шума, приведенных в табл. 1 и 2, позволят определить параметры напряженно-деформированного состояния материала в упругопластической области, что чрезвычайно важно для решения как технологических задач, так и задач безопасной эксплуатации различных объектов.

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы современные подходы к обработке ультразвуковых сигналов, содержащих некоррелированную составляющую в виде структурного шума.
2. Предложен вариант количественной оценки структурного шума при использовании импульсов ПАВР, основанный на расчете относительной энергии структурного шума с использованием оконного преобразования Фурье и модифицированного метода периодограмм Уэлча.
3. Экспериментально показано, что упругие напряжения не влияют на величину структурного шума при использовании ПАВР, что соответствует выводам работ [26, 27].
4. Пластическая деформация оказывает существенное влияние на величину структурного шума, начиная с предела текучести, что может быть связано с известными процессами увеличения пространственной неоднородности пластически деформируемых поликристаллов на мезоуровне.
5. Полученные результаты могут послужить основой для разработки инженерной методики оценки напряжений или степени пластической деформации материала конструкции вне зависимости от того, в каком состоянии — упругом или упругопластическом — он находится, чего не позволяют сделать велосимметрические методы вследствие одновременного (разнонаправленного — в зависимости от вида напряженного состояния) влияния на скорость звука упругих и пластических деформаций.

Исследование выполнено по гранту РНФ №19-19-00332 «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешин Н.П., Григорьев М.В., Щипаков Н.А., Крысько Н.В., Краснов И.С., Прилуцкий М.А., Смородинский Я.Г. О возможности применения поверхностных и головных ультразвуковых волн при неразрушающем контроле качества изделий аддитивного производства // Дефектоскопия. 2017. № 12. С. 16—23.
2. Хлыбов А.А., Углов А.Л., Родюшкин В.М. Оценка механических напряжений в элементах конструкций с помощью поверхностных волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическими преобразователями // Вестник научно-технического развития. 2017. № 8 (120). С. 29—39.
3. Углов А.Л., Хлыбов А.А., Кувишинов М.О. О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03Н17К10В10МТ // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 22. № 4. С. 3—9. DOI 10.22213/2413-1172-2019-4-3-9
4. Eryi Hu, Yiming He, Yanming Chen Experimental Study on the surface stress measurement with Rayleigh wave technique // Applied Acoustics. 2009. V. 70. N 2. P. 356—360.
5. Антонов А.М., Ерофеев В.И., Леонтьева А.В. Влияние поврежденности материала на распространение волны Рэлея вдоль границы полупространства // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т. 12. № 3. С. 293—300.
6. Murav'ev V.V., Gushchina L.V. Evaluating Damage Accumulated in Car Wheelset Axle Journals by the Ultrasonic Method Using Rayleigh and Head Waves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 10. P. 713—722. [Муравьев В.В., Гущина Л.В., Казанцев С.В. Оценка накопленной поврежденности

шек осей колесных пар вагонов ультразвуковым методом с использованием рэлеевских и головных волн // Дефектоскопия. 2019. № 10. С. 14—23.]

7. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Туркин М.В. Проблемы выделения ультразвуковых сигналов из структурного шума при контроле изделий из сложноструктурных материалов // Дефектоскопия. 2007. № 9. С. 71—86.

8. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Воронкова Л.В., Концов Р.В., Синицын А.А. Выбор параметров пространственно-временной обработки сигналов при ультразвуковой структуроскопии чугунных изложниц, подвергшихся термциклированию // Дефектоскопия. 2016. № 6. С. 42—50.

9. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В. Структурный шум в ультразвуковой дефектоскопии. М.: Изд. дом МЭИ, 2016. 186 с.

10. Bazulin E.G., Konovalov D.A. Applying the Whitening Transformation to Echo Signals for Reducing Pattern Noise in Ultrasonic Testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 11. P. 791—802. [Базулин Е.Г. Применение процедуры «выбеливания» эхосигналов для уменьшения уровня структурного шума при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. № 11. 2019. С. 3—15.]

11. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Байтеряков А.В., Дедов А.И. Методика определения акустических структурных шумов металла // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 1. С. 143—148.

12. Артамонов В.В., Артамонов В.П. Неразрушающий контроль микроструктуры металла теплоэнергетического оборудования // Дефектоскопия. 2002. № 2. С. 34—43.

13. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль / Справочник. В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение. 2008. 864 с.

14. Муравьев В.В., Котоломов А.Ю., Байтеряков А.В., Дедов А.И. Определение размера зерна металла по акустическим структурным шумам // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 11. С. 65—69.

15. Пермикин В.С., Перов Д.В., Ринкевич А.Б. Акустические шумы в стали 12Х1МФ, содержащей микропоры // Дефектоскопия. 2004. № 2. С. 14—28.

16. Карташев В.Г., Качанов В.К., Соколов И.В., Шалимова Е.В., Концов Р.В., Воронкова Л.В. Ультразвуковая структуроскопия изделий из сложноструктурных материалов на основе анализа статистических характеристик структурного шума // Дефектоскопия. 2015. № 6. С. 41—56.

17. Карташев В.Г., Качанов В.К., Соколов И.В., Шалимова Е.В., Концов Р.В., Воронкова Л.В. Структурный шум при ультразвуковом контроле изделий из материалов со сложной структурой // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 19—32.

18. Романишин Р.И., Романишин И.М. Обработка обратно рассеянного сигнала в ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 2018. № 6. С. 11—16.

19. Романишин Р.И., Іваницький Я.Л., Кошовий В.В., Штаюра С.Т., Романишин І.М., Мокрий О.М., Семак П.М. Ультразвуковий метод оцінювання розсіяної пошкодженості матеріалу на основі зворотно розсіяного сигналу // ТДНК. 2017. № 2. С. 42—49.

20. Муравьев В.В., Байтеряков А.В. Влияние эксплуатационной грузонапряженности рельсов на акустические структурные шумы // Дефектоскопия. 2016. № 11. С. 50—58.

21. Кошевой В.В., Романишин И.М., Романишин Р.И., Шарамга Р.В. Оценка деградации материала на основе ультразвуковой томографии при регистрации рассеянного сигнала // Дефектоскопия. 2010. № 9. С. 33—49.

22. Dorval V., Jenson F., Corneloup G. Accounting for structural noise and attenuation in the modeling of the ultrasonic testing of polycrystalline materials // Review of Progress in QNDE. 2010. V. 29. P. 1309—1316.

23. Хэмминг Р.В. Цифровые фильтры. М.: Недра, 1987. 221 с.

24. Welch P. The use of the fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // IEEE Trans. Audio Electroacoust. 1967. V. 15. P. 70—73.

25. Бычков Б.И., Кудряшов Н.И., Гуренко В.В. Качественная оценка некоторых методов спектрального анализа // Радиоэлектроника. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 01. С. 34—36. DOI: 10.24108/rdopt.0117.0000094

26. Муравьев В.В., Байтеряков А.В., Дедов А.И., Муравьева О.В., Леньков С.В. Оценка уровня акустических структурных шумов при одноосном растяжении плоских образцов трубной стали 09Г2С после различной термической обработки // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 10. С. 40—46.

27. Муравьев В.В., Леньков С.В., Дедов А.И., Байтеряков А.В., Котоломов А.Ю. Влияние одноосного растяжения образцов стали 09Г2С после различной термической обработки на акустические структурные шумы // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2016. № 2. С. 118—122.