

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛЬНО-ТЕНЕВОГО МЕТОДА НА МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЯХ ПРИ КОНТРОЛЕ ПРУТКОВОГО ПРОКАТА

© 2022 г. О.В. Муравьева^{1,2,*}, А.Ф. Брестер¹, В.В. Муравьев^{1,2}

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

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
Россия 426067 Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34
E-mail: *pmkk@istu.ru

Поступила в редакцию 16.06.2022; после доработки 04.07.2022
Принята к публикации 08.07.2022

Приведены результаты сравнения чувствительности к дефектам различных информативных параметров сигналов, полученных при реализации электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода на многократных отражениях. В качестве информативных параметров предложено использование статистических параметров сигналов во временной и спектральной областях. Показана однозначная связь большинства информативных параметров с обобщенной характеристикой дефекта, определяемой произведением глубины залегания дефекта на его диаметр. Показана возможность оценки обобщенной характеристики для выявленных естественных дефектов пруткового проката.

Ключевые слова: чувствительность, информативный параметр, дефект, прутковый прокат, электромагнитно-акустический преобразователь, многократный зеркально-теневого метод.

DOI: 10.31857/S0130308222080048, EDN: BQEKGO

ВВЕДЕНИЕ

Прутковый прокат широко применяется в различных сферах машиностроительных производств для изготовления ответственных деталей оборудования: болтовых и сварных конструкций, инструмента (инструментальные стали), пружин (рессорно-пружинные стали), насосных штанг, валов центробежных насосов (конструкционные углеродистые стали) и т.д. Появление различных типов дефектов пруткового проката возможно в процессе любого технологического цикла производства проката и ведет к их развитию при эксплуатации в условиях высоких нагрузок, под воздействием коррозионных сред, температурных градиентов и, как следствие, к выходу из строя оборудования [1—6].

Для выявления поверхностных дефектов проката преимущественное использование получили магнитные и вихретоковые методы, обеспеченные большим разнообразием автоматизированных установок контроля благодаря преимуществу бесконтактной работы [7—10]. Ограничения по глубине залегания выявляемых дефектов, невозможность выявления внутренних дефектов, а также влияние мешающих факторов (изменение магнитных и электрических свойств) ограничивают область использования указанных методов.

Ультразвуковые (УЗ) эхометоды, широко используемые для выявления внутренних дефектов, имеют ограничения применительно к контролю пруткового проката:

зависимость результатов дефектоскопии от качества акустического контакта с объектом контроля при использовании контактных (иммерсионных) пьезопреобразователей, особенно в случае горячекатаной поверхности объекта, а, следовательно, недостаточная воспроизводимость и достоверность контроля;

необходимость использования поступательно-вращательного движения объекта, а, следовательно, ограничение производительности контроля;

наличие мертвой зоны и сложность выявления дефектов произвольной ориентации;

невозможность контроля объектов малых диаметров в связи со сложностью обеспечения надежного акустического контакта пьезопреобразователя с цилиндрической поверхностью и необходимостью создания специализированных притертых преобразователей.

Использование эффектов волноводного распространения ультразвука [11—17] устраняет необходимость сканирования тела прутка, при этом имеются ограничения по минимальной длине прутка, обусловленные наличием мертвой зоны, недостаточная чувствительность к дефектам, протяженным вдоль всей длины прутка, низкая разрешающая способность.

Использование бесконтактных электромагнитно-акустических преобразователей [18—25] (ЭМАП) перспективно благодаря ряду преимуществ в сравнении с контактными пьезопреобразователями: возможность возбуждения—приема любых типов волн, в том числе поперечных горизонтальной поляризации; отсутствие требований по дополнительной обработке поверхностей; отсутствие износа преобразователей в процессе сканирования; возможность контроля объектов в условиях высоких температур и др.

Одним из перспективных подходов к контролю пруткового проката малого диаметра является использование зеркально-теневого метода на многократных отражениях, реализованного с использованием специализированных бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей проходного типа (для излучения—приема объемных волн) и ЭМА-преобразователей накладного типа (для излучения—приема рэлеевских волн) [26—29]. Метод позволяет отстроиться от качества акустического контакта, тем самым существенно повысить достоверность и воспроизводимость результатов контроля. Большинство традиционно используемых УЗ методов неразрушающего контроля (эхометод, зеркально-теневой и ряд других) в качестве информативного параметра используют амплитудный признак. Ввиду того, что амплитуда принятого сигнала в существенной мере зависит от стабильности акустического контакта, определяемого качеством контролируемой поверхности, его ухудшение может приводить как к недобраковке при использовании эхометодов, так и к перебраковке при использовании амплитудных теневых методов. Наряду с амплитудным в качестве информативных признаков сигналов УЗ методов также используют временные параметры (при определении координат дефектов), индикатрисы рассеяния (при оценке формы дефекта), пространственные и временные огибающие сигнала (при определении условных размеров дефекта) [30], спектральные характеристики сигналов [31—33], параметры структурного шума [34—35]. Имеются сведения об использовании для анализа сигналов методов фрактального анализа [36], интеллектуальных методов обработки сигналов в мультимасштабной области [37], методы восстановления формы дефекта с применением компьютерной томографии [38], методы голографа скорости [39], методы свертки и глубокого обучения [40—42] и др.

В работе [43] показано, что при реализации ЭМА зеркально-теневого метода на многократных отражениях в качестве информативных возможно использование статистических и спектральных параметров серии многократных отражений. Ввиду большой номенклатуры пруткового проката и изделий из него по сталям и сплавам и по диаметрам требуется обоснование обобщенных информативных параметров и критериев браковки.

Цель работы: оценка сравнительной чувствительности информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода на многократных отражениях во временной и спектральной областях для искусственных дефектов различной глубины и размера, и естественных дефектов пруткового проката различных диаметров и марок стали с целью обоснования обобщенных информативных параметров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Блок-схема и фото информационно-измерительной системы для реализации ЭМА зеркально-теневого метода на многократных отражениях показаны на рис. 1. Специализированный бесконтактный ЭМА-преобразователь проходного типа обеспечивает излучение—прием поперечных волн с осевой поляризацией во всех радиальных направлениях в поперечном сечении прутка.

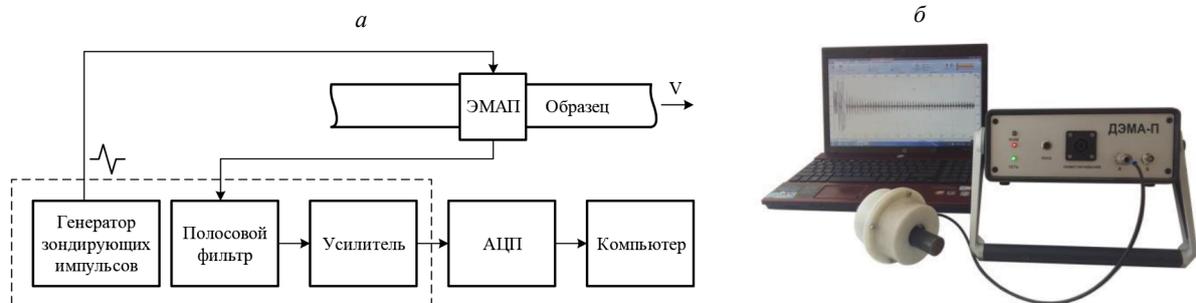


Рис. 1. Блок-схема (а) и фото (б) информационно-измерительной системы:

1 — генератор зондирующих импульсов; 2 — проходной ЭМА преобразователь; 3 — исследуемый образец прутка; 4 — полосовой фильтр; 5 — высокочастотный усилитель; 6 — аналого-цифровой преобразователь; 7 — персональный компьютер с программным обеспечением ПРИНЦ.

Результатом измерений являются осциллограммы серии многократных отражений УЗ волны по диаметру образца. Информационно-измерительная система обеспечена специализированным программным обеспечением, позволяющим управлять настройками измерений, осуществлять фильтрацию, потенцирование, интерполяцию регистрируемых сигналов, реализующим методы корреляции сигналов, пакетного анализа данных, накопление и сохранение результатов контроля в компьютере в расширениях, доступных для дальнейшей обработки, и другими функциональными возможностями. Основные характеристики информационно-измерительной системы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики информационно-измерительной системы

Характеристика	Значение
Контролируемые диаметры, мм	7—50
Погрешность измерения времени (определения диаметра и скорости)	0,05 %
Диапазон рабочих частот, МГц	0,5—5
Амплитуда зондирующего импульса, кВ	1,5
Коэффициент усиления	80 дБ
Уровень шумов в рабочей полосе частот, мкВ	50
Частота дискретизации, МГц	500
Разрядность АЦП	8-битный

В качестве настроечного образца для обоснования информативных параметров метода использован прутки из стали 03Х14Н7Б диаметром $D = 22$ мм с нанесенными искусственными дефектами в виде плоскодонных отверстий радиального направления диаметрами d , равными 1,5 и 3 мм, с различной глубиной залегания h (рис. 2).

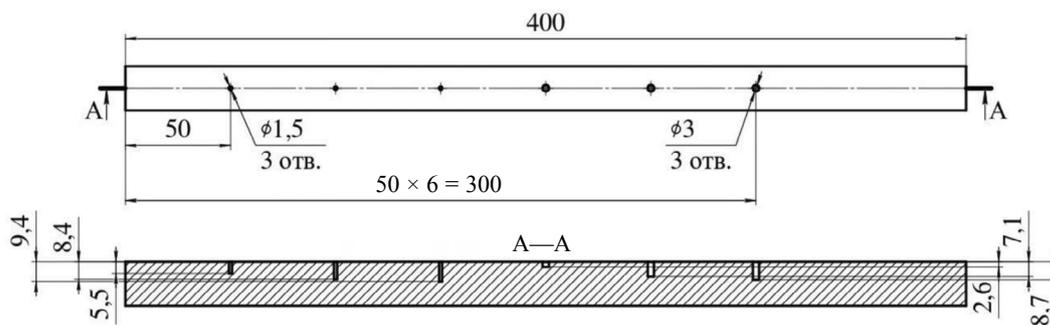


Рис. 2. Образец с плоскодонными отверстиями.

Результатом измерений являются осциллограммы серии многократных отражений волны по диаметру образца. В качестве примера на рис. 3 представлены серии импульсов сигналов, полученных при регистрации серии многократных переотражений поперечных волн для бездефектной части образца и для областей с искусственными дефектами различных диаметров и глубины залегания. Видно, что осциллограммы характеризуется резким ослаблением серии многократных отражений и сокращением времени реверберации для участков образца с дефектами. Ввиду того, что проходной ЭМА-преобразователь формирует акустические волны с фокусировкой по центру, ослабление сигнала существенно зависит не только от размера дефекта, но и от положения дефекта относительно центра цилиндрического образца (увеличивается с приближением дефекта к центру образца). Указанные эффекты характеризуют и зеркально-теневой метод контроля листов, где увеличение глубины залегания дефекта, ведет к уменьшению коэффициента выявляемости. Отметим,

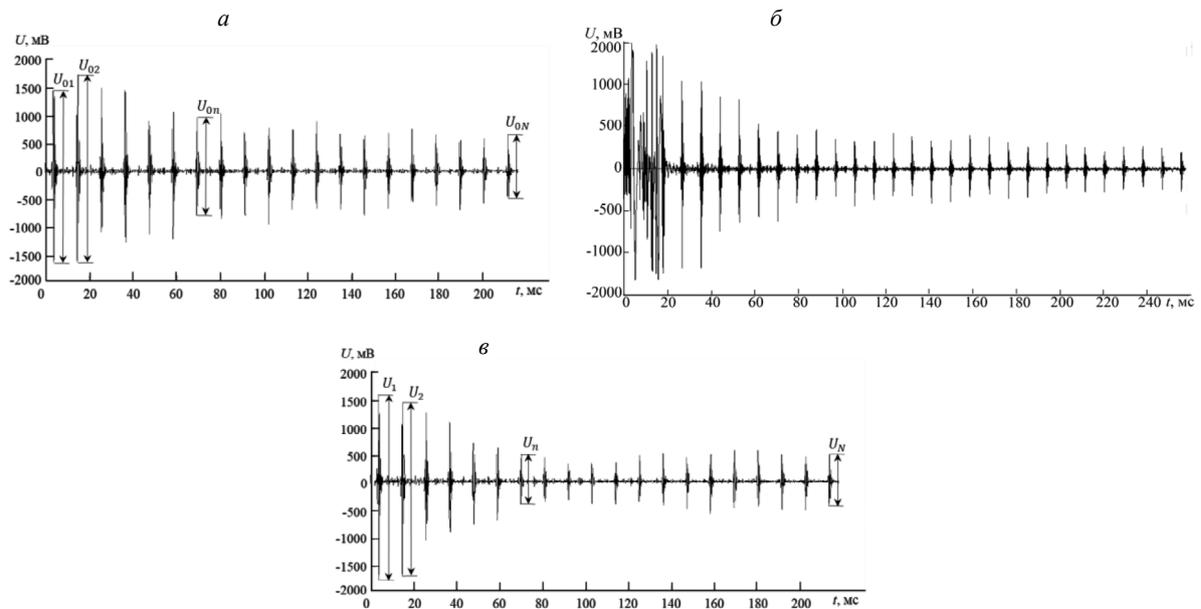


Рис. 3. Осциллограммы отраженных сигналов для бездефектного участка (а); для участка с искусственным дефектом диаметром $d = 1,5$ мм с глубиной залегания $h = 8,4$ мм (б); для участка с искусственным дефектом диаметром $d = 3$ мм с глубиной залегания $h = 8,7$ мм (в).

что для поверхностных дефектов дополнительное ослабление серии многократных отражений обусловлено также снижением эффективности ЭМА-преобразования ввиду искажения траектории вихревых токов и линий магнитного поля в области дефекта.

С целью учета совместного влияния диаметра дефекта d и глубины его залегания h на ослабление серии импульсов многократных отражений введем понятие обобщенной характеристики дефекта G , определяемой произведением dh , и безразмерной обобщенной характеристики дефекта G_n , пронормированной на квадрат радиуса объекта:

$$G = dh, \quad G_n = \frac{dh}{r^2}. \quad (1)$$

Исследованы следующие статистические характеристики осциллограмм серии многократных отражений, представляемых в виде последовательности данных в массиве x_n , определяемых диаметром объекта D и числом анализируемых отражений N : математическое ожидание M_x , дисперсия D_x , среднеквадратическое отклонение σ_x , асимметрия S_x и эксцесс E_x .

С целью возможности сравнительной оценки результатов контроля прутков различных диаметров размер анализируемого массива менялся пропорционально диаметру исследуемого прутка и включал количество отражений N , равное 20. Во избежание влияния на результаты анализа зондирующего импульса, соответствующий ему интервал времени удалялся из анализируемого массива.

Также рассчитывался многократный коэффициент выявляемости K_N во временной области (аналог коэффициента выявляемости при зеркально-теновом методе), определяемый формулой:

$$K = \sum_{n=1}^N K_n = \sum_{n=1}^N (U_{0n} - U_n) / U_{0n}, \quad (2)$$

где U_{0n} — значение амплитуды импульса при каждом n -м отражении для бездефектной области образца (опорный сигнал); U_n — значение амплитуды импульса при каждом n -ом отражении для области с дефектом; N — количество анализируемых отражений (см. рис. 3).

Величина K не может превышать значения, соответствующего общему количеству анализируемых эхоимпульсов. Величина K , принимающая значения меньше либо равные нулю, соответствует бездефектной области. Максимальное значение K соответствует наиболее дефектному участку.

С целью отстройки от эффективности ЭМА-преобразования, определяемого маркой стали, конструктивными зазорами между ЭМА-преобразователем и объектом контроля, каждая статистиче-

ская характеристика C_d для дефектной области прутка была пронормирована относительно аналогичной характеристики C_0 для бездефектного участка:

$$C_n = \frac{C_d}{C_0}, \quad (3)$$

где C_n — нормированное значение статистической характеристики.

Нормированный коэффициент выявляемости определялся с использованием формулы

$$K_n = 1 - \frac{K}{N}. \quad (4)$$

С целью увеличения отношения «сигнал—шум» в области отсутствия отраженных сигналов при недостаточной эффективности ЭМА-преобразования использована также операция возведения массива данных исходного сигнала в квадрат, что позволило уменьшить влияние на результаты анализа уровня шумов и помех (рис. 4).

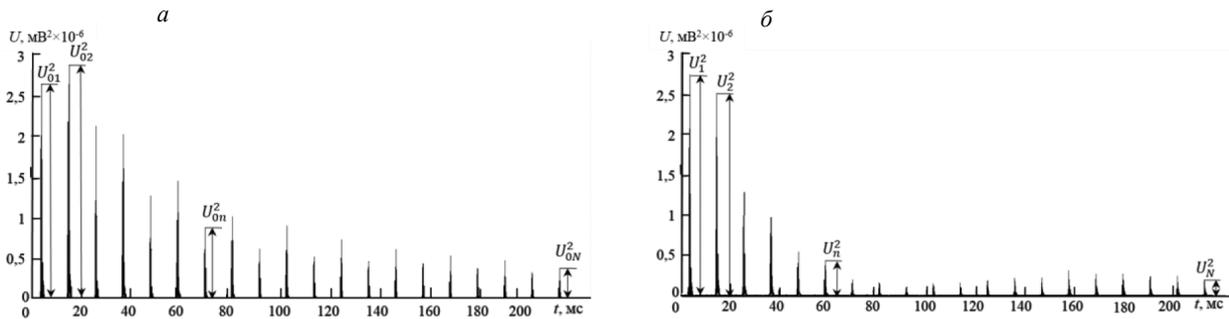


Рис. 4. Осциллограммы сигнала, возведенного в квадрат, для бездефектной области (а) и области с дефектом $d = 3$ мм, $h = 7,1$ мм (б).

Дополнительно проведен спектральный анализ полученных сигналов методом дискретного преобразования Фурье с использованием программного обеспечения WinПОС на массиве данных с количеством отсчетов, соответствующих 20 отражениям. Вид амплитудных спектров сигналов для бездефектной области и области с искусственным дефектом представлены на рис. 5.

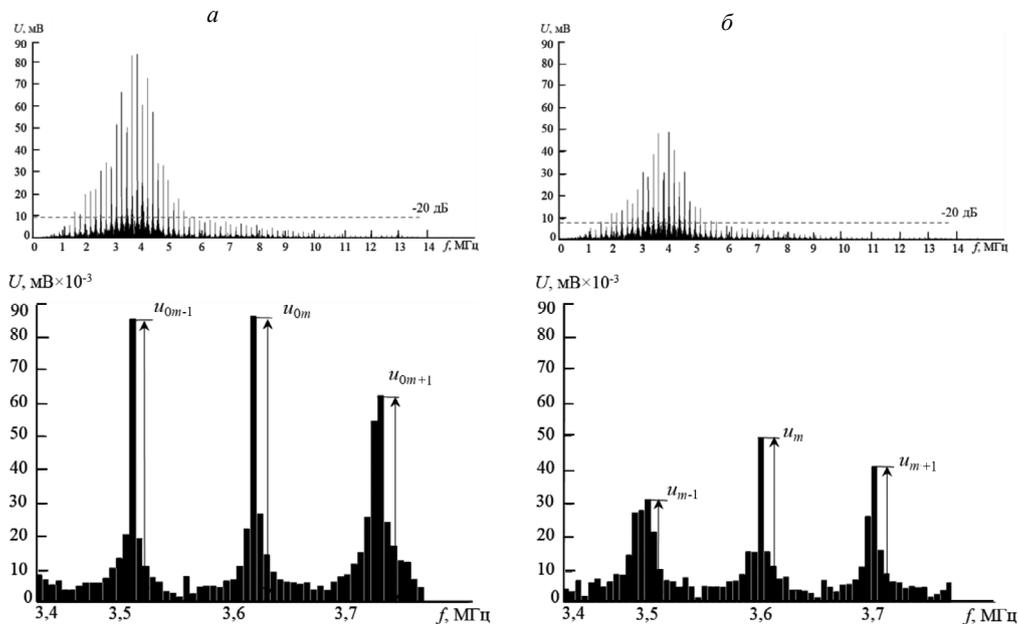


Рис. 5. Спектральная плотность исходного сигнала для бездефектной области (а) и области с дефектом $d = 3$ мм, $h = 7,1$ мм (б).

Спектр исходного сигнала представляется совокупностью отдельных гармоник, следующих с определенной периодичностью Δf , определяемой диаметром D объекта и скоростью C ультразвуковой волны:

$$C_i = D \cdot \Delta f. \quad (5)$$

Спектральной гармонике с максимальной амплитудой соответствует основная резонансная частота УЗ импульса (3,7 МГц). Бездефектная область образца характеризуется высокой амплитудой спектральной составляющей на частоте резонанса (84 мВ) и достаточно равномерным распределением по амплитуде отдельных спектральных составляющих в полосе спектра $\Delta f = 3,9$ МГц (по уровню 20 дБ). Для участка образца с дефектами наблюдается уменьшение спектральной составляющей на частоте резонанса (48 мВ), большей неравномерностью в распределении амплитуд отдельных спектральных составляющих и расширением полосы спектра ($\Delta f = 4,2$ МГц по уровню 20 дБ).

Для спектральных характеристик сигналов, представляемых в виде последовательности отсчетов по частоте f , были рассчитаны аналогичные статистические характеристики (математическое ожидание M_{ns} , дисперсия D_{ns} , среднеквадратическое отклонение σ_{ns} , асимметрия S_{ns} , и эксцесс E_{ns}). Количество спектральных линий при расчетах ограничено уровнем -20 дБ относительно максимума спектральной плотности (см. рис. 5).

Формула для многократного спектрального коэффициента выявляемости K_s аналогична формуле для коэффициента выявляемости во временной области:

$$K_s = \sum_{m=1}^M K_m = \sum_{m=1}^M (u_{0m} - u_m) / u_{0m}, \quad (6)$$

где u_{0m} — значение амплитуды m -ой спектральной линии для бездефектной области образца (опорный сигнал); u_m — значение амплитуды m -ой спектральной линии для области с дефектом; M — количество анализируемых спектральных линий (см. рис. 5).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Нормированные значения информативных параметров сигналов (статистические характеристики и коэффициент выявляемости) во временной и спектральной областях для областей образца с искусственными дефектами приведены в табл. 2. Здесь и далее информативные параметры для исходного сигнала обозначены цифрой «1», для спектра исходного сигнала — цифрой «2», для сигнала, возведенного в квадрат, и его спектра — цифрами «3» и «4» соответственно. Значения параметров упорядочены в порядке увеличения обобщенной характеристики дефекта G .

Видно, что для исходного сигнала параметры дисперсии D_n , среднеквадратического отклонения σ_n , асимметрии S_n и коэффициента выявляемости K_n характеризуются однозначной зависимостью от обобщенной характеристики дефекта G , определяемой линейными линиями тренда с высокими значениями коэффициентов достоверности аппроксимации R^2 (от 0,88 до 0,95). При этом для спектра сигнала высокие значения коэффициента R^2 имеют параметры математического ожидания M_n , дисперсии D_n и среднеквадратического отклонения σ_n . Низкими значениями коэффициента R^2 для исходного сигнала характеризуются зависимости от обобщенной характеристики дефекта G информативных параметров математического ожидания M_n и эксцесса E_n ; для спектра исходного сигнала — асимметрии S_n , эксцесса E_n и коэффициента выявляемости K_n . Следует отметить, что для сигнала, возведенного в квадрат, и для его спектра практически все зависимости параметров от обобщенной характеристики дефекта характеризуются высокими значениями достоверности аппроксимации — от 0,7 до 0,96.

Зависимости нормированных значений каждого из исследованных параметров для исходного сигнала (кривая 1), спектра исходного сигнала (кривая 2), сигнала, возведенного в квадрат (кривая 3), и спектра сигнала, возведенного в квадрат (кривая 4), от обобщенной характеристики дефекта G представлены на рис. 6. Видно, что большинство исследованных параметров с увеличением обобщенной характеристики дефекта G имеет тенденцию к уменьшению. Исключением являются зависимости коэффициента выявляемости исходного сигнала и сигнала, возведенного в квадрат, что согласуется с его определением (см. формулу (1)).

Введем понятие чувствительности γ_{C_n} к обобщенному размеру дефекта данного информативного параметра, определяемой тангенсом угла наклона линии тренда для данного информативного параметра к оси абсцисс:

Таблица 2

Нормированные значения статистических параметров сигналов при различных значениях обобщенной характеристики дефекта G , коэффициент достоверности аппроксимации R^2 , чувствительность к обобщенной характеристике

Обобщенная характеристика дефекта G_n / G , мм ²	Математическое ожидание M_n	Дисперсия D_n	Среднеквадратическое отклонение σ_n	Асимметрия S_n	Экцесс E_n	Коэффициент выявляемости
1 — Исходный сигнал						
0 (бездефектный участок)	1	1	1	1	1	1
0,064 / 7,8 ($d = 3$ мм, $h = 2,6$ мм)	1,027	0,647	0,804	-0,535	1,581	0,701
0,068 / 8,25 ($d = 1,5$ мм, $h = 5,5$ мм)	1,004	0,628	0,792	-1,894	1,531	0,717
0,104 / 12,6 ($d = 1,5$ мм, $h = 8,4$ мм)	1,019	0,571	0,756	-3,466	1,540	0,706
0,117 / 14,1 ($d = 1,5$ мм, $h = 9,4$ мм)	1,023	0,444	0,667	-5,722	1,513	0,645
0,176 / 21,3 ($d = 3$ мм, $h = 7,1$ мм)	1,023	0,399	0,632	-5,529	1,845	0,564
0,216 / 26,1 ($d = 3$ мм, $h = 8,7$ мм)	1,018	0,272	0,522	-9,074	1,622	0,496
R^2	0,30	0,91	0,95	0,92	0,60	0,88
Чувствительность γ_{C_n} , 1/мм ²	0,077	3,08	2,05	45,7	2,74	2,07
2 — Спектр исходного сигнала						
0 (бездефектный участок)	0,891	0,626	0,791	0,849	0,752	0,878
0,064 / 7,8 ($d = 3$ мм, $h = 2,6$ мм)	0,891	0,601	0,775	0,871	0,804	0,781
0,068 / 8,25 ($d = 1,5$ мм, $h = 5,5$ мм)	0,858	0,544	0,737	0,872	0,815	0,733
0,104 / 12,6 ($d = 1,5$ мм, $h = 8,4$ мм)	0,766	0,416	0,645	0,870	0,825	0,671
0,117 / 14,1 ($d = 1,5$ мм, $h = 9,4$ мм)	0,752	0,367	0,606	0,792	0,686	0,785
0,176 / 21,3 ($d = 3$ мм, $h = 7,1$ мм)	0,613	0,254	0,504	0,863	0,811	0,536
0,216 / 26,1 ($d = 3$ мм, $h = 8,7$ мм)	0,94	0,90	0,95	0,50	0,39	0,73
Чувствительность γ_{C_n} , 1/мм ²	1,68	3,16	2,14	0,610	0,829	1,74
3 — Сигнал, возведенный в квадрат						
0 (бездефектный участок)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,064 / 7,8 ($d = 3$ мм, $h = 2,6$ мм)	0,647	0,643	0,802	1,262	1,517	0,530
0,068 / 8,25 ($d = 1,5$ мм, $h = 5,5$ мм)	0,628	0,588	0,767	1,310	1,660	0,556
0,104 / 12,6 ($d = 1,5$ мм, $h = 8,4$ мм)	0,571	0,488	0,699	1,360	1,810	0,536
0,117 / 14,1 ($d = 1,5$ мм, $h = 9,4$ мм)	0,444	0,291	0,539	1,468	2,159	0,455
0,176 / 21,3 ($d = 3$ мм, $h = 7,1$ мм)	0,399	0,284	0,533	1,485	2,133	0,359
0,216 / 26,1 ($d = 3$ мм, $h = 8,7$ мм)	0,272	0,117	0,342	1,566	2,492	0,275
R^2	0,91	0,91	0,94	0,89	0,92	0,83
Чувствительность γ_{C_n} , 1/мм ²	3,08	3,87	2,90	2,445	6,51	2,91
4 — Спектр сигнала, возведенного в квадрат						
0 (бездефектный участок)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,064 / 7,8 ($d = 3$ мм, $h = 2,6$ мм)	0,865	0,645	0,803	0,819	0,645	0,647
0,068 / 8,25 ($d = 1,5$ мм, $h = 5,5$ мм)	0,842	0,590	0,768	0,796	0,616	0,640
0,104 / 12,6 ($d = 1,5$ мм, $h = 8,4$ мм)	0,788	0,489	0,700	0,771	0,583	0,623
0,117 / 14,1 ($d = 1,5$ мм, $h = 9,4$ мм)	0,627	0,291	0,539	0,724	0,521	0,451
0,176 / 21,3 ($d = 3$ мм, $h = 7,1$ мм)	0,587	0,285	0,533	0,718	0,491	0,392
0,216 / 26,1 ($d = 3$ мм, $h = 8,7$ мм)	0,382	0,117	0,342	0,701	0,489	0,263
R^2	0,95	0,91	0,94	0,78	0,72	0,92
Чувствительность γ_{C_n} , 1/мм ²	2,79	3,87	2,90	1,25	2,09	3,15

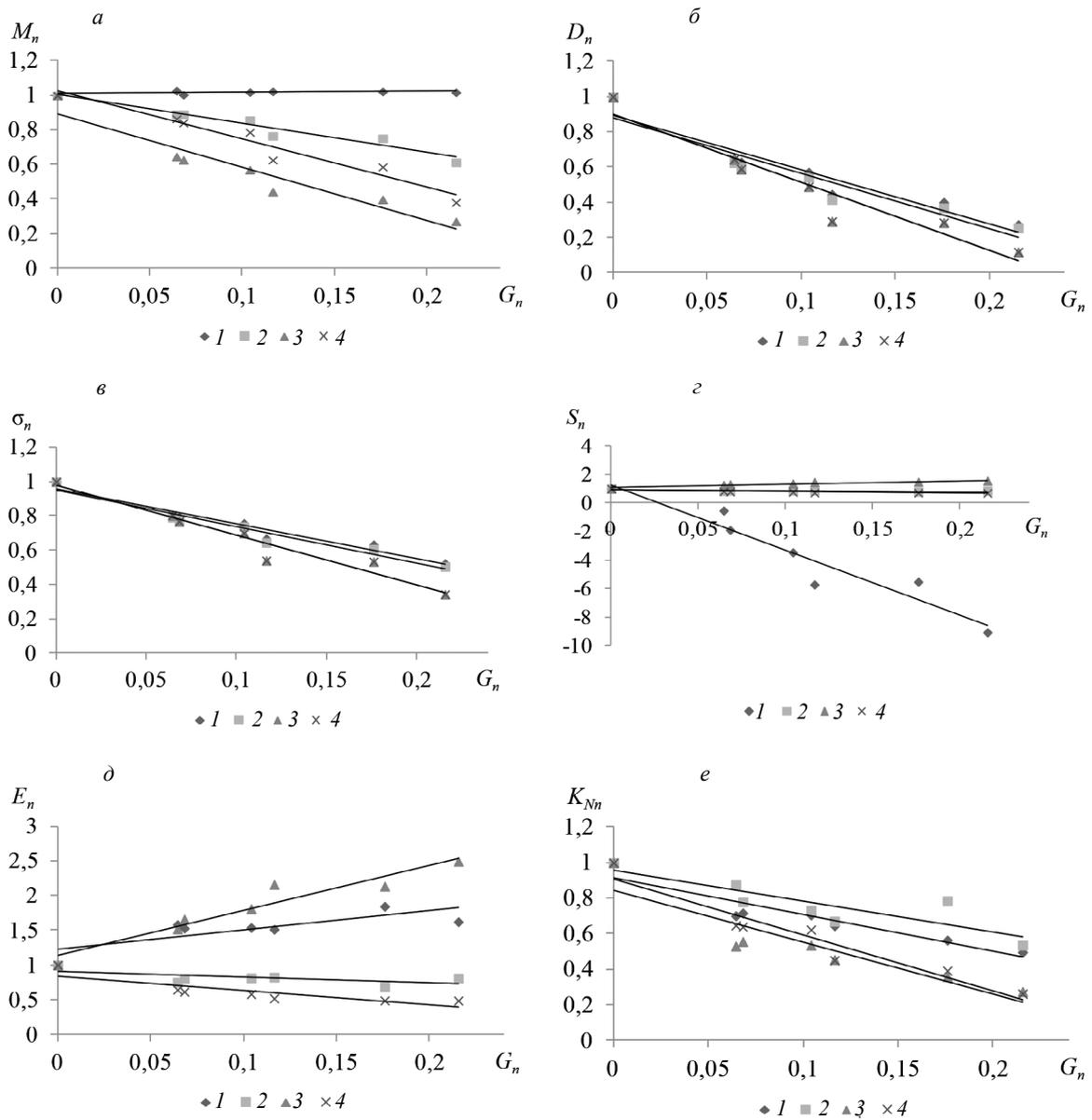


Рис. 6. Зависимости нормированных значений параметров «математическое ожидание» M_n (а), «дисперсия» D_n (б), «среднеквадратическое отклонение» σ_n (в), «асимметрия» S_n (г), «эксцесс» E_n (д), «коэффициент выявляемости» (е) от обобщенной характеристики дефекта G_n : 1— исходный сигнал; 2 — спектр исходного сигнала; 3 — сигнал, возведенный в квадрат; 4 — спектр сигнала, возведенного в квадрат.

$$\gamma_{C_n} = \frac{C_{n\max} - C_{n\min}}{G_{\max}}, \quad (7)$$

где $C_{n\max}$ и $C_{n\min}$ — максимальное и минимальное значения нормированных параметров; G_{\max} — максимальное по модулю значение обобщенной характеристики дефекта.

Рис. 7 представляет гистограммы сравнительной чувствительности к обобщенной характеристике дефекта каждого из исследованных параметров, выраженных в дБ. Видно, что наихудшей чувствительностью обладает параметр «математическое ожидание» M_n для исходного сигнала (−64 дБ), ему же соответствует минимальный коэффициент достоверности аппроксимации (0,3). В случае анализа исходного сигнала наилучшую чувствительность к обобщенной характеристике дефекта имеет параметр «асимметрия» S_n (−8 дБ), а остальные параметры находятся в диапазоне

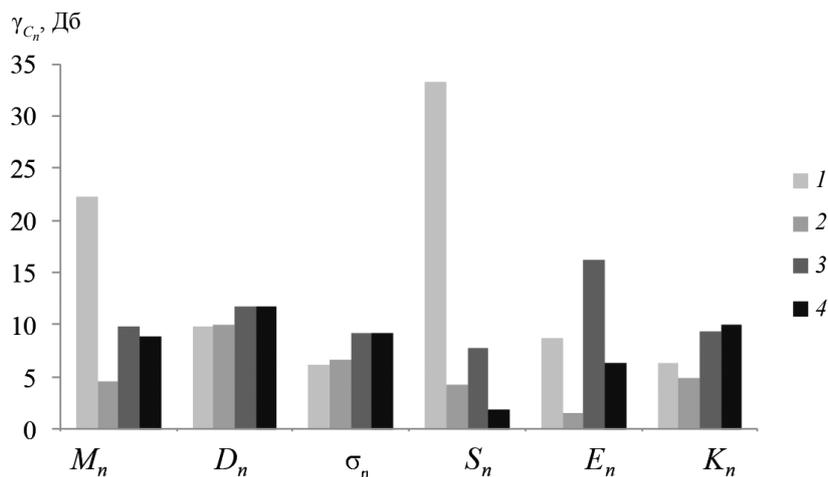


Рис. 7. Сравнительная чувствительность к обобщенной характеристике дефекта параметров сигналов: 1 — исходный сигнал; 2 — спектр исходного сигнала; 3 — сигнал, возведенный в квадрат; 4 — спектр сигнала, возведенного в квадрат.

31—35 дБ. В случае анализа сигнала, возведенного в квадрат, чувствительность для большинства характеристик соизмерима между собой и выше значений для аналогичных параметров исходного сигнала (25—33 дБ). При анализе спектральных параметров сигналов диапазон чувствительности исследованных параметров составляет 31—46 дБ для спектра исходного сигнала и 30—40 дБ для спектра сигнала, возведенного в квадрат.

Анализ информативных параметров показывает, что параметр дисперсии является наиболее устойчивым с точки зрения наиболее достоверной корреляции с обобщенной характеристикой дефекта, наиболее высокой чувствительности с наибольшей равномерностью при анализе сигналов и их спектров.

Предложенный подход использован для анализа информативных параметров и оценки обобщенных характеристик естественных дефектов, выявленных с использованием зеркально-теневого метода на многократных отражениях [44]. Исследовались прутки рессорно-пружинных сталей, используемые при производстве пружин на НПЦ «Пружина», диаметрами от 10 до 30 мм различных производителей (ОАО «Ижсталь», ЗАО «ЗМЗ», ЗАО «ОМЗ», ОАО «СеверстальМетиз») с различными видами обработки проката (горячекатаный, горячекатаный с обточенной или шлифованной поверхностью, калиброванный, прокат со специальной отделкой поверхности). Металлопрокат должен соответствовать ГОСТ 14959—79 «Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали», согласно которому «на поверхности прутков не допускаются дефекты в виде раскатанных пузырей, прокатных плен, закатов, раскатанных загрязнений, рябизны, закатанной окалины, трещин напряжения».

Выявленные в процессе сканирования участки прутков с дефектами, где наблюдалось максимальное ослабление серии отражений, были подтверждены визуально (поверхностные дефекты) и металлографическими исследованиями (внутренние дефекты). Обнаруженные дефекты классифицировались в соответствии с ГОСТ 1778—70 и ГОСТ 21014—88. Фото и результаты металлографии некоторых из выявленных дефектов представлены на рис. 8, описание образцов приведено в табл. 3.

В отличие от традиционного эхометода ультразвукового контроля, с использованием многократного зеркально-теневого метода выявляются внутренние дефекты, минимальные размеры составляют десятые доли от длины акустической волны. Высокая чувствительность объясняется меньшими потерями энергии при распространении акустической волны за счет расхождения волны только в одном направлении по образующей прутка при фокусировке в поперечном сечении.

Для сигналов, полученных в зонах обнаруженных естественных дефектов, были рассчитаны статистические параметры (см. табл. 4). С использованием расчетной чувствительности каждого из параметров для модельных дефектов в предположении линейного характера зависимости оценены обобщенные характеристики выявленных дефектов. В табл. 5 представлены результаты расчета обобщенных характеристик естественных дефектов с использованием различных информативных параметров, ранжированные в порядке их увеличения для наиболее информативного параметра

Таблица 3

Результаты металлографических исследований выявленных дефектных участков

# образца	Диаметр прутка, мм	Марка стали	Результаты металлографических исследований и визуального контроля
# 1	Ø25	60С2А	Трещина
# 2	Ø30	60С2ХФА	Неметаллические включения «оксиды точечные» округлой 0,12×0,12 мм и неправильной формы, вытянутые по направлению волокна длиной 1 мм
# 3	Ø25	60С2А	Закат
# 4	Ø21	60С2ХФА	Единичное неметаллическое включение округлой формы 0,15×0,15 мм «силикат недеформирующийся»
# 5	Ø11,75	60С2Г	Прокатная плена глубиной залегания 0,05—0,13 мм
# 6	Ø24	60С2А	Неметаллические включения мелких зерен, расположенных в виде строчек, «оксиды строчечные»
# 7	Ø25	60С2А	Раковина
# 8	Ø12	60С2А	Дефекты поверхности в виде трещин с обезуглерожеными стенками и разветвленными концами глубиной залегания 0,05—0,13 мм «раскатанный пузырь»; «закат»; «раскатанная трещина»

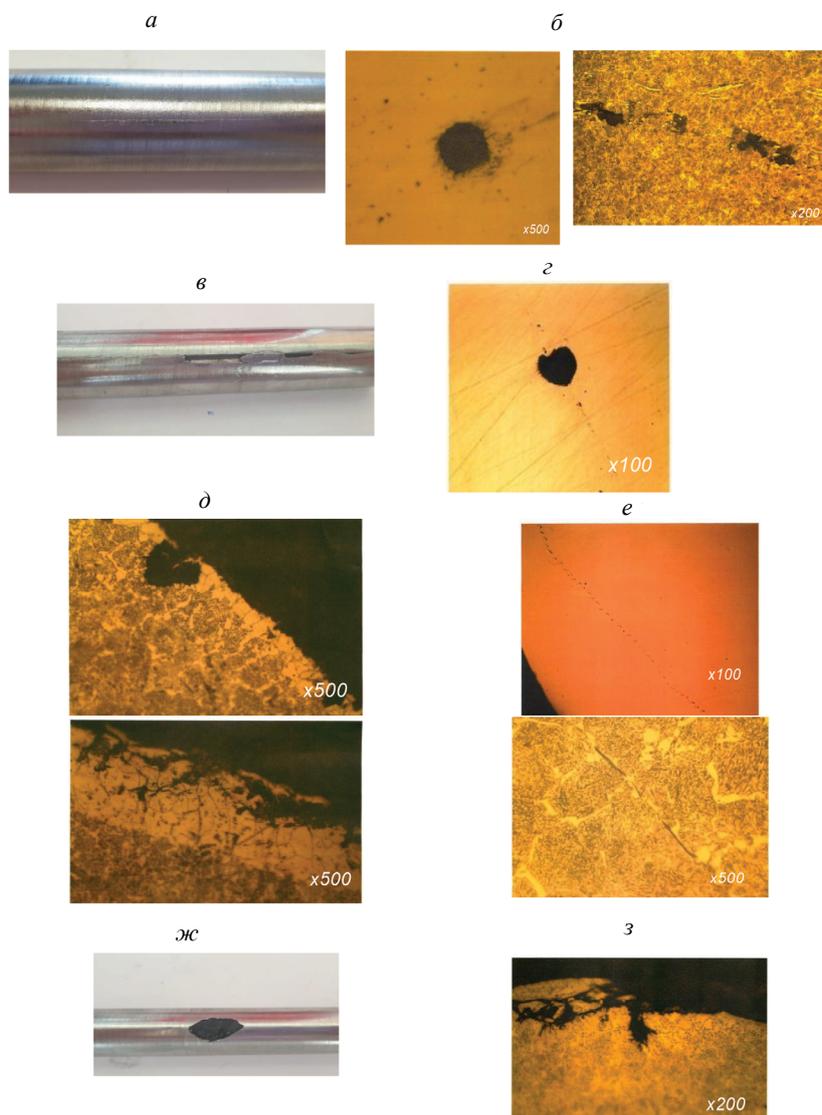


Рис. 8. Фото и результаты металлографии некоторых из выявленных дефектов:

a — образец #1; *б* — образец #2; *в* — образец #3; *г* — образец #4; *д* — образец #5; *е* — образец #6; *ж* — образец #7; *з* — образец #8.

Таблица 4

Нормированные значения статистических параметров сигналов для естественных дефектов

Тип естественного дефекта (#)	M_n	D_n	σ_n	S_n	E_n	K_n
1 — Исходный сигнал						
Трещина (# 1)	1,025	0,789	0,888	0,780	1,274	0,827
Оксиды точечные (# 2)	0,786	0,711	0,843	-0,386	1,465	0,646
Закат (# 3)	1,044	0,675	0,822	1,384	0,924	0,761
Силикат недеформирующийся (# 4)	1,299	0,651	0,807	1,323	0,809	0,581
Прокатная плена (# 5)	1,693	0,553	0,744	0,472	0,617	0,671
Оксиды строчечные (# 6)	0,787	0,436	0,660	-11,041	0,657	0,501
Раковина (# 7)	0,914	0,313	0,560	5,675	0,861	0,506
Раскатанный пузырь (# 8)	0,965	0,234	0,484	5,965	1,354	0,335
2 — Спектр исходного сигнала						
Трещина (# 1)	0,908	0,788	0,888	0,979	0,964	0,916
Оксиды точечные (# 2)	0,965	0,709	0,842	0,730	0,539	0,455
Закат (# 3)	0,858	0,675	0,822	1,019	1,021	0,777
Силикат недеформирующийся (# 4)	0,913	0,595	0,771	0,620	0,406	0,512
Прокатная плена (# 5)	0,870	0,529	0,727	0,954	1,014	0,667
Оксиды строчечные (# 6)	0,911	0,403	0,634	0,489	0,271	0,424
Раковина (# 7)	0,590	0,313	0,560	0,903	0,798	0,609
Раскатанный пузырь (# 8)	0,646	0,226	0,475	0,632	0,442	0,475
3 — Сигнал, возведенный в квадрат						
Трещина (# 1)	0,792	0,810	0,900	1,320	1,731	0,728
Оксиды точечные (# 2)	0,711	0,749	0,865	1,285	1,547	0,125
Закат (# 3)	0,682	0,419	0,648	1,061	1,174	0,585
Силикат недеформирующийся (# 4)	0,651	0,338	0,582	1,359	1,835	0,247
Прокатная плена (# 5)	0,553	0,177	0,421	0,995	1,082	0,420
Оксиды строчечные (# 6)	0,436	0,122	0,349	2,029	4,534	0,312
Раковина (# 7)	0,321	0,083	0,289	0,988	0,995	0,293
Раскатанный пузырь (# 8)	0,234	0,076	0,275	1,544	2,269	0,118
4 — Спектр сигнала, возведенного в квадрат						
Трещина (# 1)	0,918	0,810	0,900	0,974	0,945	0,938
Оксиды точечные (# 2)	0,944	0,728	0,853	0,780	0,623	0,495
Закат (# 3)	0,685	0,419	0,647	1,005	1,003	0,636
Силикат недеформирующийся (# 4)	0,659	0,307	0,554	0,560	0,346	0,455
Прокатная плена (# 5)	0,486	0,172	0,415	0,929	0,939	0,404
Оксиды строчечные (# 6)	0,368	0,060	0,245	0,446	0,324	0,154
Раковина (# 7)	0,288	0,083	0,289	0,957	0,917	0,349
Раскатанный пузырь (# 8)	0,356	0,070	0,264	0,607	0,417	0,225

Таблица 5

Результаты расчета обобщенных характеристик естественных дефектов с использованием различных информативных параметров

# естественного дефекта	$G, \text{мм}^2$					
	M_n	D_n	σ_n	S_n	E_n	K_n
1 — Исходный сигнал						
Трещина (# 1)	104	2,14	2,00	1,30	-3,12	4,60
Оксиды точечные (# 2)	-35,0	5,33	5,27	1,65	-2,64	6,25
Закат (# 3)	19,4	7,39	7,96	-3,55	-1,60	9,61
Силикат недеформирующийся (# 4)	-545	11,4	10,6	-0,19	22,0	22,9
Прокатная плена (# 5)	-981	12,2	11,5	1,91	24,60	12,8
Оксиды строчечные (# 6)	-106	15,9	14,9	-0,59	24,9	16,3
Раковина (# 7)	448	23,2	22,6	42,1	32,6	30,9
Раскатанный пузырь (# 8)	191	29,4	30,3	-15,1	20,9	30,5
2 — Спектр исходного сигнала						
Трещина (# 1)	0,822	1,95	1,82	-12,3	15,8	10,3
Оксиды точечные (# 2)	8,83	4,55	4,56	10,3	-11,9	3,44
Закат (# 3)	7,34	7,15	7,67	-17,4	19,2	9,50
Силикат недеформирующийся (# 4)	8,74	12,2	11,5	2,75	-15,2	18,2
Прокатная плена (# 5)	7,77	13,0	12,0	-75,2	86,5	36,5
Оксиды строчечные (# 6)	19,4	14,6	13,5	29,7	-32,7	23,0
Раковина (# 7)	8,59	23,6	23,1	-115	119	47,6
Раскатанный пузырь (# 8)	38,5	28,0	28,6	-9,14	19,6	31,0
3 — Сигнал, возведенный в квадрат						
Трещина (# 1)	2,14	1,40	1,39	-2,86	-2,29	8,84
Оксиды точечные (# 2)	5,18	3,64	4,18	-14,7	-14,4	5,99
Закат (# 3)	7,38	7,36	8,36	-6,42	-6,03	8,56
Силикат недеформирующийся (# 4)	12,2	20,6	21,2	4,34	0,830	15,9
Прокатная плена (# 5)	11,4	20,9	19,6	-15,8	-15,6	29,3
Оксиды строчечные (# 6)	15,5	27,9	25,6	2,73	-1,47	19,7
Раковина (# 7)	23,2	31,4	33,9	-60,2	-81,6	28,4
Раскатанный пузырь (# 8)	29,1	32,9	37,1	6,58	3,28	29,4
4 — Спектр сигнала, возведенного в квадрат						
Трещина (# 1)	1,05	1,60	1,55	-4,13	3,79	4,74
Оксиды точечные (# 2)	5,96	3,64	4,21	6,48	-7,69	-1,48
Закат (# 3)	8,27	7,41	8,50	-8,74	7,04	7,50
Силикат недеформирующийся (# 4)	21,3	20,7	21,4	0,547	-5,08	17,7
Прокатная плена (# 5)	18,8	22,1	21,0	-41,8	34,3	20,8
Оксиды строчечные (# 6)	27,4	27,9	25,7	14,9	-17,3	19,5
Раковина (# 7)	36,7	33,9	39,5	-59,7	38,8	37,5
Раскатанный пузырь (# 8)	41,2	32,9	37,1	4,27	-5,56	27,8

«дисперсия». Анализ результатов оценки обобщенных характеристик естественных дефектов показал, что параметры математического ожидания, асимметрии и эксцесса для анализируемых сигналов и их спектров дают при расчете отрицательные значения обобщенной характеристики для некоторых видов дефектов, в отличие от модельных дефектов, для которых параметры асимметрии и эксцесса имеют однозначную связь с обобщенной характеристикой. В связи с этим указанные параметры не могут рассматриваться в качестве информативных при формировании браковочных критериев и расчете обобщенной характеристики дефекта G .

Анализ параметров дисперсия и среднеквадратическое отклонение дают близкие по значениям обобщенные характеристики.

На рис. 9 в качестве примера представлены значения обобщенной характеристики дефекта G , определенной с использованием наиболее информативных параметров дисперсии и коэффициента выявляемости, как имеющих наиболее высокую чувствительность и наибольший коэффициент достоверности аппроксимации R^2 . Видно, что минимальные значения обобщенной характеристики имеют поверхностные трещины (дефекты #1, #8) и внутренние дефекты малых размеров (#2), большие значения соответствуют грубым поверхностным дефектам (дефекты #3, #7), а также скоплению металлических включений (#6). Указанные закономерности соответствуют представлениям о формировании акустического поля проходного ЭМА-преобразователя с фокусировкой по центру и уменьшением амплитуды смещений на поверхности [44].

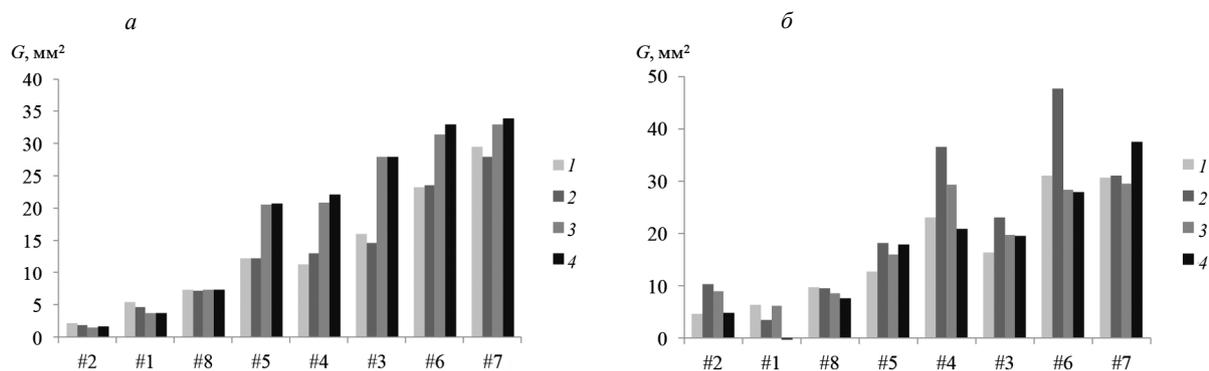


Рис. 9. Значения обобщенной характеристики дефекта G , определенной с использованием параметра дисперсии (а) и коэффициента выявляемости (б):

1 — исходный сигнал; 2 — спектр исходного сигнала; 3 — сигнал, возведенный в квадрат; 4 — спектр сигнала, возведенного в квадрат.

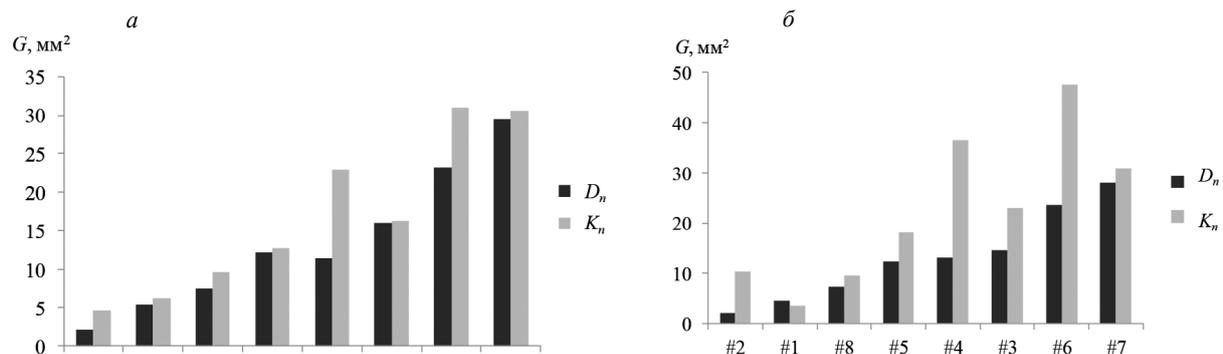


Рис. 10. Значения обобщенной характеристики дефекта G , определенной с использованием параметров дисперсии и коэффициента выявляемости:

исходный сигнал (а); спектр исходного сигнала (б).

Значения рассчитанных обобщенных характеристик выявленных естественных дефектов от 2 до 30 мм² в случае анализа дисперсии и от 5 до 50 мм² в случае анализа коэффициента выявляемости, в целом, коррелируют между собой. Обнаруженные дефекты соизмеримы по своим обобщенным характеристикам модельным дефектам со значениями G_n от 8 до 26 мм² (см. табл. 5).

В случае анализа параметра дисперсии более высокую чувствительность к дефектам с малыми значениями обобщенной характеристики имеет место при анализе исходного сигнала и его спектра. Параметр «коэффициент выявляемости» для большинства естественных дефектов дает более высокое значение обобщенной характеристики для малых дефектов и, следовательно, имеет более высокую чувствительность (рис. 10).

ВЫВОДЫ

1. Для описания искусственных дефектов прутков при реализации зеркально-теневого метода на многократных отражениях предлагается использовать обобщенную характеристику, определяемую произведением глубины залегания дефекта на его диаметр, пронормированную на квадрат радиуса объекта.

2. В качестве информативных параметров предложено использование следующих статистических параметров серии многократных переотражений: математическое ожидание, дисперсия, эксцесс, асимметрия S_n , эксцесса E_n , а также коэффициент выявляемости при анализе сигналов во временной и спектральной областях.

3. Анализ информативных параметров показывает, что нормированные параметры дисперсии и коэффициента выявляемости обладают наиболее достоверной корреляцией с обобщенной характеристикой дефекта и наиболее высокой чувствительностью при анализе сигналов и их спектров.

4. Параметр коэффициент выявляемости для большинства естественных дефектов дает более высокое значение обобщенной характеристики для дефектов с малой обобщенной характеристикой и, следовательно, имеет более высокую чувствительность.

5. Минимальные значения обобщенной характеристики имеют поверхностные трещины и внутренние дефекты малых размеров; большие значения соответствуют грубым поверхностным дефектам и также дефекту, распределенному по внутреннему периметру прутка (скопление металлических включений).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/> с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А., Нуждина Т.В., Гончарова Д.А. Подготовка перлитных сталей для холодной штамповки // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 11. С. 38—42. DOI 10.31044/1684-2561-2019-0-11-38-42
2. Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А., Матвеев Ю.И., Деев В.Б. Оценка качества стального проката для холодной объемной штамповки // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 7. С. 551—556. DOI 10.17073/0368-0797-2018-7-551-556
3. Науменко В.В., Мунтин А.В., Даниленко А.В., Баранова О.А. Исследование природы образования поверхностных дефектов горячекатаного проката в прикромочной зоне // Сталь. 2020. № 1. С. 40—45.
4. Жуков Д.В., Белов М.Л. Способы выявления специфических дефектов в сталях с высокой обрабатываемостью резанием // Сталь. 2018. № 8. С. 37—39.
5. Ding H., Zhang A. B., Qi D. T., Li H. B., Qi G. Q., Ding N., Bai Z. Q., Fan L., Ge P. L. Failure analysis of a sucker rod fracture in an oilfield // Engineering Failure Analysis. 2020. V. 109. P. 104300. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104300>
6. Khlybov O.S., Khrameshin D.V., Kabakov Z.K. Diagnostic and Automatic Adjustment Algorithms for a Non-Destructive Statistical Monitoring System for the Mechanical Properties of Hot-Rolled Metal Stock // Metallurgist. 2018. V. 62. P. 627—633. DOI 10.1007/s11015-018-0701-3
7. Буда Г.В. Неразрушающий контроль механических свойств стального проката (обзор). II. Контроль вязких свойств // Дефектоскопия. 2005. № 5. С. 54—76.
8. Duminova N.S., Kornilov V.L., Urtsev V.N., Voronkov S.N., Sidorenko N.S. Certification of Mill 5000 (PJSC «ММК») Rolled Flat Products by Non-Destructive Control Methods // Metallurgist. 2019. V. 62. № 11—12. P. 1219—1224. DOI 10.1007/s11015-019-00777-z
9. Dymkin G.Y., Shevelev A.V., Kurkov A.V., Smorodinskii Y.G. On the Sensitivity of Eddy Current Testing of Parts of Railway Rolling Stock // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. № 8. P. 610—616. DOI 10.1134/S1061830919080059

10. *Shejuan X., Mingming T., Pan X., Cuixiang P., Zhenmao C., Toshiyuki T.* A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection // *NDT & E International*. 2017. V. 86. P. 153—163. DOI:10.1016/j.ndteint.2016.12.006
11. *Zima B., Rucka M.* Guided ultrasonic waves for detection of debonding in bars partially embedded in grout // *Construction and Building Materials*. 2018. V.168. P. 124—142. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.107
12. *Saravanan T.J.* Elastic wave methods for non-destructive damage diagnosis in the axisymmetric viscoelastic cylindrical waveguide // *Measurement*. 2021. V. 177. P. 109253. DOI 10.1016/j.measurement.2021.109253
13. *Alves M., Melo M., Medeiros L. H., Novo L., Barbosa D., Coutinho M., Tarragó, V., Santos R., Neto H., Gama P.* Nondestructive Technique for Fault Locating on Anchor Rods by Reflectometry // *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. 2021. P. 1—3. DOI 10.1109/IMOC53012.2021.9624761
14. *Majhi S., Mukherjee A., George N.V., Uy B.* Corrosion detection in steel bar: A time-frequency approach // *NDT & E International*. 2019. V. 107. P. 102150. DOI 10.1016/j.ndteint.2019.102150
15. *Zhao J., Durham N., Abdel-Hadi K., McKenzie C.A., Thomson D.J.* Acoustic guided wave techniques for detecting corrosion damage of electrical grounding rods // *Measurement*. 2019. V. 147. P. 106858. DOI 10.1016/j.measurement.2019.106858
16. *Li Z., Wang Y., Zheng J., Liu N., Li M., Teng J.* Stress measurement for steel slender waveguides based on the nonlinear relation between guided wave group velocity and stress // *Measurement*. 2021. V. 179. P. 109465. DOI 10.1016/j.measurement.2021.109465
17. *Стрижак В.А., Хасанов Р.Р., Пряхин А.В.* Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2018. Т. 21. № 2. С. 159—166. DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166
18. *Hirao M., Ogi H.* *Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements Using EMATs*. Tokyo: Springer Japan, 2017. 380 p.
19. *Aleshin N.P., Krysko N.V., Kusyy A.G., Skrynnikov S.V., Mogilner L. Yu.* Investigating the Detectability of Surface Volumetric Defects in Ultrasonic Testing with the Use of Rayleigh Waves Generated by an Electromagnetic-Acoustic Transducer // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 5. P. 361—368. [Алешин Н.П., Крысько Н.В., Кусый А.Г., Скрынников С.В., Могильнер Л.Ю. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем // *Дефектоскопия*. 2021. № 5. С. 22—30. DOI 10.31857/S0130308221050031]
20. *Бабкин С.Э.* Определение скорости основных типов акустических волн в металлах приставным датчиком // *Дефектоскопия*. 2020. № 4. С. 32—39. DOI 10.31857/S0130308220040041
21. *Murav'eva O., Murav'ev V., Volkova L., Kazantseva N., Nichipuruk A., Stashkov A.* Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology // *Additive Manufacturing*. 2022. V. 51. P. 102635. DOI 10.1016/j.addma.2022.102635
22. *He C., Deng P., Lu Y., Liu X., Jiao J., Wu B.* Estimation of Surface Crack Depth using Rayleigh Waves by Electromagnetic Acoustic Transducers // *Journal of Acoustics and Vibrations*. 2017. V. 22 (4). P. 541—548. DOI 10.20855/ijav.2017.22.4501.
23. *Wang P., Zhang Y., Yao E., Mi Y., Zheng Y., Tang Ch.* Method of measuring the mechanical properties of ferromagnetic materials based on magnetostrictive EMAT characteristic parameters // *Measurement*. 2021. V. 168. P. 108187. DOI 10.1016/j.measurement.2020.108187
24. *Cong M., Wu X., Qian C.* A Longitudinal Mode Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) Based on a Permanent Magnet Chain for Pipe Inspection // *Sensors*. 2016. V. 16 (5). P. 740. DOI 10.3390/s16050740
25. *Dehui W., Jiaxin Y., Wenxiong Ch., Teng W.* An electromagnetic acoustic transducer with electromagnetic pulse restraining // *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2021. V. 63. P. 111—117. DOI 10.1784/insi.2021.63.2.111
26. *Петров, К.В., Соков М.Ю., Муравьева О.В.* Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2018. Т. 21. № 2. С. 135—146. DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146
27. *Муравьева О.В., Муравьев В.В., Башарова А.Ф., Синцов М.А., Богдан О.П.* Влияние термической обработки и структурного состояния стали 40Х пруткового сортамента на скорость ультразвуковых волн и коэффициент Пуассона // *Сталь*. 2020. № 8. С. 63—68.
28. *Муравьева О.В., Зорин В.А.* Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн // *Дефектоскопия*. 2017. № 5. С. 3—9.
29. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Будрин А.Ю., Синцов М.А., Зорин А.В.* Акустическая структуро-скопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2019. Т. 22. № 1. С. 37—44. DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-37-44
30. *Клюев В.В.* *Неразрушающий контроль. Т. 3. Ультразвуковой контроль*. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.

31. Качанов В.К., Соколов И.В., Первушин В.В., Тимофеев Д.В. Структуроскопия изделий из полимерных материалов с помощью анализа мгновенного спектра ультразвуковых сигналов // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 3—10. DOI 10.1134/S0130308219060010
32. Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Кропачек О.Ю., Плеснецов С.Ю., Билык З.В., Хорошайло Ю.Е., Ефименко С.А., Салам Б. Бесконтактный спектральный экспресс-способ обнаружения коррозионных повреждений металлоизделий // Дефектоскопия. 2020. № 1. С. 14—21. DOI 10.31857/S0130308220010029
33. Ерофеев В.И., Иляхинский А.В., Никитина Е.А., Пахомов П.А., Родюшкин В.М. Метод ультразвукового зондирования при оценке предельного состояния металлоконструкций, связанного с появлением пластических деформаций // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22. № 3. С. 65—70. DOI 10.24411/1683-805X-2019-13007
34. Хлыбов А.А., Углов А.Л. Об использовании параметров структурного шума при контроле поверхностными акустическими волнами Рэлея стали 20ГЛ в процессе упругопластического деформирования // Дефектоскопия. 2021. № 7. С. 3—10. DOI 10.31857/S0130308221070010
35. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Байтеряков А.В. Структурно-чувствительные акустические параметры конструкционных сталей. Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2020. 152 с.
36. Хлыбов А.А., Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Рябов Д.А., Шатагин Д.А., Киселев А.В. Оценка возможностей использования фрактальной размерности и информационной энтропии упругих волн для оценки поврежденности стали 20 при малоциклового усталости // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. Т. 24. № 3. С. 17—25. DOI 10.22213/2413-1172-2021-3-17-25
37. García-Gómez J., Gil-Pita R., Rosa-Zurera M., Romero-Camacho A., Jiménez-Garrido J. A., García-Benavides V. Smart sound processing for defect sizing in pipelines using EMAT actuator based multi-frequency Lamb waves // 2018. Sensors. V. 18. № 3. P. 802. DOI 10.3390/s18030802
38. Bazulin E.G., Evseev I.V. Applying Plane Wave Imaging Technology in Ultrasonic Nondestructive Testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 6. P. 423—436. [Базулин Е.Г., Евсеев И.В. Применение технологии Plane Wave Imaging в ультразвуковом неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2021. № 6. С. 3—16. DOI 10.31857/S0130308221060014
39. Потапов А.И., Кондратьев А.В., Смородинский Я.Г. Неразрушающий контроль структурно-неоднородных композиционных материалов методом годографа скорости упругих волн // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 11—19. DOI 10.1134/S0130308219060022
40. Sudheera K., Nandhitha N.M., VPaineni Bhavagna Venkat Sai, Nallamothu Vijay Kumar. Deep Learning Techniques for Flaw Characterization in Weld Pieces from Ultrasonic Signals // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 10. P. 820—830. [Судхира К., Нандхита Н.М., Пайнени Бхавагна Венкат Сай В., Налламоту В.К. Методы глубокого обучения для определения параметров дефектов в сварных швах по ультразвуковым сигналам // Дефектоскопия. 2020. № 10. С. 49—59. DOI 10.31857/S013030822010005X].
41. Gao X., Shi Y., Du K., Zhu Q., Zhang W. Sparse Blind Deconvolution with Nonconvex Optimization for Ultrasonic NDT Application // Sensors. 2020. V. 20. P. 6946. DOI 10.3390/s20236946
42. Shi Y., Xu W., Zhang J., Li X. Automated Classification of Ultrasonic Signal via a Convolutional Neural Network // Appl. Sci. 2022. V.12. P.4179. DOI 10.3390/app12094179
43. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Габбасова М.А., Булдакова И.В., Соков М.Ю. Анализ отраженных сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом // Автометрия. 2016. Т. 52. № 4. С. 62—70. DOI 10.15372/AUT20160408
44. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Стрижак В.А., Пряхин А.В., Фокеева Е.Н. Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 3—12.
45. Петров К. В., Муравьева О. В., Мышкин Ю. В., Башарова А. Ф. Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов // Дефектоскопия. 2019. № 2. С. 16—24. DOI 10.1134/S0130308219020027