

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 620.179.16

МЕТОД ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ПРИ ОБРАБОТКЕ МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ЗЕРКАЛЬНО-ТЕНЕВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПРОКАТА

© О. В. Муравьева^{1,2}, В. А. Тененев¹, А. Ф. Брестер¹,
К. Ю. Белослудцев¹

¹Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова,
426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7

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

Приведено обоснование использования метода главных компонент для оценки обобщённой характеристики дефекта при обработке многопараметровых акустических сигналов многократного зеркально-теневого метода контроля пруткового проката. Метод позволил сократить количество параметров сигналов при формировании критериев браковки, разработать методику оценки обобщённой характеристики дефекта, сформировать комплексный критерий браковки на основе недопустимого значения обобщённой характеристики дефекта для объектов из любых марок стали и любых диаметров. Результаты апробации предложенного подхода для оценки обобщённой характеристики естественных дефектов с использованием полученной регрессионной зависимости удовлетворительно согласуются с результатами металлографических исследований.

Ключевые слова: акустический зеркально-теневого метод, статистические параметры, дефекты, метод главных компонент.

DOI: 10.15372/AUT20230501

Введение. Развитие многопараметровых методов измерений, контроля, диагностики — одно из перспективных направлений, так как позволяет получать наиболее полную и достоверную информацию об объекте. Большинство методов неразрушающего контроля при выявлении дефектов использует отдельные информативные параметры регистрируемых сигналов. Контроль по одному параметру имеет довольно ограниченные возможности и часто не позволяет получить достаточную точность и достоверность. Использование многопараметрового контроля даёт возможность, с одной стороны, обеспечить измерение одного параметра объекта независимо от других его параметров, с другой стороны, определить несколько параметров объекта одновременно.

Примерами успешного применения многопараметровых методов в неразрушающем контроле (НК) являются метод акустической эмиссии [1, 2], вихретоковые (электромагнитные) [3, 4], магнитные [5, 6], тепловые [7], радиоволновые [8] и радиационные [9] методы. Одним из подходов к анализу информации многопараметрового неразрушающего контроля является технология использования нескольких видов контроля, объединённых специальным методом комплексирования [10].

Существует множество методов машинного обучения, предназначенных для обработки многопараметровых данных, позволяющих проводить анализ, а также уменьшать их размерность. Среди различных методов обработки данных измерений, контроля и диагностики следует выделить: метод многомерной линейной регрессии [11], метод опорных

векторов [12], регрессионный анализ [13], метод главных компонент [14]. В частности, возможности использования метода множественной регрессии и опорных векторов эффективно применены для анализа результатов статистического контроля механических свойств и микроструктуры горячего проката [15] для прогнозирования содержания фосфатидов в образцах растительных масел [16]. Применение метода опорных векторов позволяет значительно улучшить процедуру распознавания дефектов стальных тросов [17]. Регрессионный анализ используется при обработке результатов магнитного контроля [18, 19]. Известны примеры применения метода главных компонент для обработки результатов вихретокового контроля [20], а также для уменьшения размерности обрабатываемых акустико-эмиссионных данных [21].

Ультразвуковые (акустические) эхо-методы НК при оценке дефекта, как правило, используют в качестве основного информативного параметра амплитуду сигнала, при этом критерием браковки является превышение амплитудой сигнала заранее заданного браковочного уровня [22]. Дополнительным параметром акустического эхо-метода является время прихода эхо-импульса от дефекта, пропорциональное глубине его залегания, информативным параметром зеркально-теневого метода акустического контроля — амплитуда сигнала, отражённого от противоположной поверхности объекта. При этом критерием браковки является уменьшение амплитуды донного сигнала, обусловленного прохождением волны через область с дефектом, характеризуемым коэффициентом выявляемости [22]. Ограничением указанного метода является невозможность определения координаты дефекта и его эквивалентной площади.

В [23–25] представлены результаты успешного применения при акустическом контроле пруткового проката зеркально-теневого метода на многократных отражениях. Показана возможность использования в качестве критериев браковки ряда информативных статистических параметров временной серии многократных переотражений и их спектральной плотности. При этом каждый из статистических параметров имеет различную чувствительность к внутренним и поверхностным дефектам, а также индивидуальную однозначную связь с эквивалентной характеристикой дефекта, позволяющей учесть влияние глубины залегания и диаметра искусственного дефекта [26].

Цель работы — сокращение количества информативных параметров при потере наименьшего количества информации по формированию критериев браковки и оценке эквивалентной характеристики дефекта с помощью метода главных компонент.

Материалы и методы. Зеркально-теневого метод НК на многократных отражениях реализован с применением специализированной информационно-измерительной системы [26]. Излучение и приём акустических поперечных волн обеспечивается проходным электромагнитно-акустическим (ЭМА) преобразователем, формирующим поперечную объёмную волну, распространяющуюся по всем диаметральным направлениям поперечного сечения объекта с фокусировкой по центру. Результатом измерений являются осциллограммы серии многократных отражений волны по диаметру образца. Наличие дефектов в поперечном сечении объекта приводит к осциллограмме, характеризующейся резким ослаблением серии многократных отражений и сокращением времени реверберации. В качестве примера на рис. 1 представлены результаты регистрации серии импульсов многократных переотражений в бездефектной части образца радиусом r и в области с искусственным дефектом типа плоскодонного отражателя (ПДО) диаметром d и глубиной залегания h .

На характер ослабления серии многократных отражений влияют как глубина залегания h , так и диаметр дефекта d . Ввиду наличия фокусировки по центру дефекты с большей глубиной залегания будут оказывать существенное влияние на ослабление серии импульсов многократных отражений. В целях учёта совместного влияния диаметра дефекта и глубины его залегания на ослабление серии импульсов многократных отражений введено

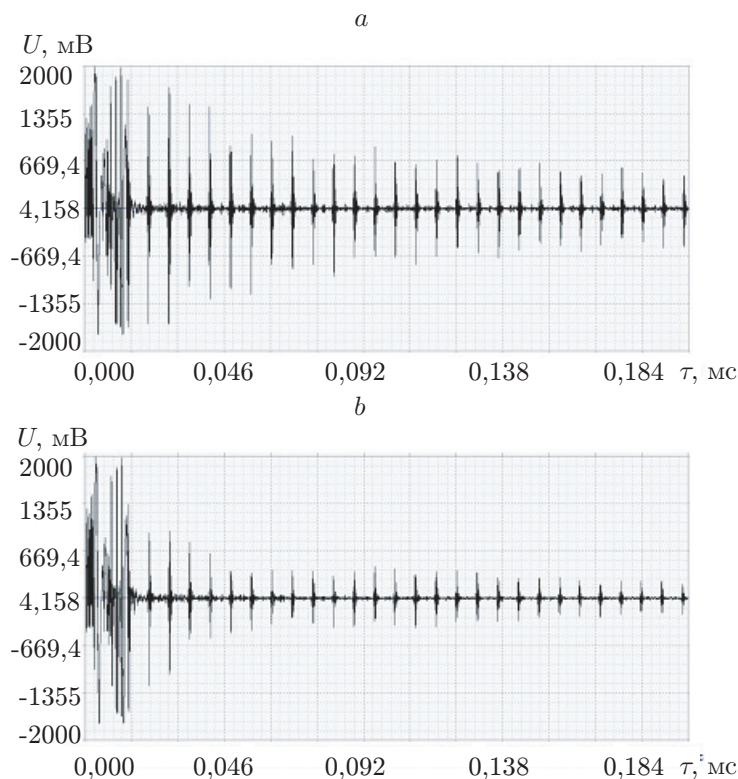


Рис. 1. Осциллограммы отражённых сигналов: для бездефектного участка (а); для участка с искусственным дефектом типа ПДО ($r = 11$ мм, $d = 3$ мм, $h = 8,7$ мм) (b)

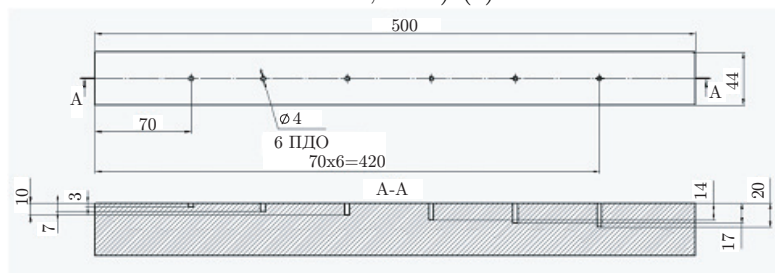


Рис. 2. Эскиз настроечного образца диаметром 44 мм с искусственными дефектами типа ПДО на различной глубине

понятие обобщённой характеристики дефекта G , определяемой произведением диаметра ПДО (d) и глубины ПДО (h):

$$G = dh. \quad (1)$$

Обобщённая характеристика дефекта G_n , пронормированная на квадрат радиуса объекта, позволяет описать объект произвольного радиуса r :

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

Для получения более представительной выборки информативных параметров зеркально-теневого метода на многократных отражениях изготовлены настроечные образцы разных диаметров из различных марок сталей с нанесёнными искусственными дефектами в виде плоскодонных отверстий радиальных направлений разных диаметров с разной глубиной залегания (рис. 2). Для каждого из настроечных образцов определены

Таблица 1

Параметры настроечных образцов с ПДО

Марка стали	Диаметр образца, мм	Диаметр ПДО, мм	Глубина ПДО, мм	Обобщённая характеристика дефекта G , мм ²	Нормированная обобщённая характеристика дефекта G_n
03X14H7Б	22	0,0	0	0	0
		5,5	1,5	8,25	0,068
		8,4		12,6	0,104
		9,4		14,1	0,117
		2,6	3	7,8	0,064
		7,1		21,3	0,176
8,7	26,1	0,216			
38ХГМ	33	0,0	0	0	0
		2,0	3	6	0,022
		4,0		12	0,044
		7,0		21	0,077
		10,0		30	0,11
		13,0		39	0,143
		16,0		48	0,176
38ХГМ	44	0,0	0	0	0
		3,0	4	12	0,025
		7,0		28	0,058
		10,0		40	0,083
		14,0		56	0,116
		17,0		68	0,14
		20,0		80	0,165

значения обобщённых характеристик дефектов. Параметры настроечных образцов с искусственными дефектами в виде ПДО представлены в табл. 1.

В целях обоснования выбора информативных параметров, обладающих наибольшей корреляцией, исследованы три типа сигналов: исходный сигнал (рис. 1, *a*), огибающая сигнала и потенцированный сигнал. Число анализируемых импульсов составило $N = 10$ и $N = 20$. В качестве информативных использованы статистические параметры осциллограмм серии многократных отражений, представляемых в виде последовательности данных в массиве, которые определяются диаметром объекта и числом анализируемых отражений N : математическое ожидание M_n , дисперсия D_n , среднеквадратическое отклонение σ_n , асимметрия S_x , E_x и коэффициент выявляемости K_n . Статистические параметры были определены в соответствии с формулами, приведёнными в [26].

С целью отстройки от эффективности ЭМА-преобразования, определяемого маркой стали, конструктивными зазорами между ЭМА-преобразователем и объектом контроля, каждый статистический параметр для дефектной области был пронормирован относительно аналогичного параметра для бездефектной области образца.

Обработка результатов производилась с использованием программного обеспечения ПРИНЦ IX [27].

Результаты и обсуждение. Результаты влияния нормированной обобщённой характеристики дефекта G_n на различные статистические параметры при разных вариантах представления импульса и разным количестве N анализируемых отражений приведены на рис. 3. Коэффициенты достоверности аппроксимации R^2 , позволяющие судить о степени

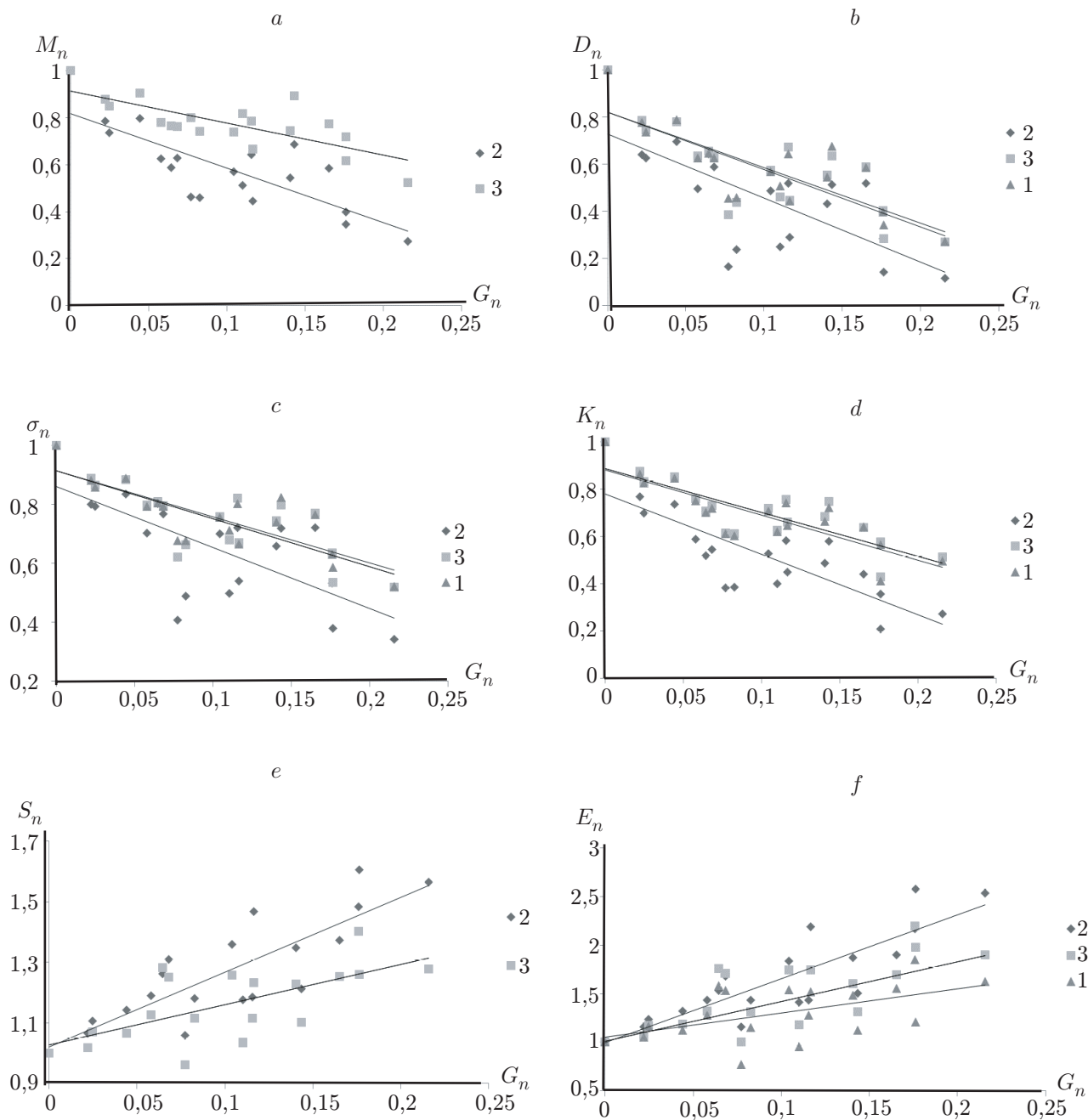


Рис. 3. Зависимости нормированных значений параметров от обобщённой характеристики дефекта G_n для $N = 20$: математическое ожидание M_n (a), дисперсия D_n (b), среднеквадратическое отклонение σ_n (c), коэффициент выявляемости K_n (d), асимметрия S_n (e), эксцесс E_n (f) (1 — исходный сигнал, 2 — потенцированный сигнал, 3 — огибающая сигнала)

Таблица 2

**Значения коэффициента достоверности аппроксимации R^2
для различных видов сигнала и его характеристик**

Вид сигнала	M_n	D_n	σ_n	K_n	S_n	E_n
$N = 10$						
Исходный	0,0006	0,57	0,57	0,62	0,18	0,27
Огибающая	0,51	0,54	0,54	0,58	0,33	0,39
Потенцированный	0,28	0,48	0,46	0,56	0,59	0,62
$N = 20$						
Исходный	0,0002	0,64	0,65	0,69	0,16	0,27
Огибающая	0,57	0,61	0,60	0,68	0,43	0,26
Потенцированный	0,62	0,50	0,48	0,65	0,705	0,75

корреляции нормированных статистических характеристик с обобщённой характеристикой дефекта при линейной аппроксимации, сведены в табл. 2.

Видно, что для исходного сигнала отсутствует корреляция параметра математического ожидания с обобщённой характеристикой дефекта G_n . Для огибающей сигнала и потенцированного сигнала большинство характеристик имеет коэффициент достоверности аппроксимации R^2 , превышающий 0,5, что говорит о значимости указанных зависимостей. При этом увеличение числа анализируемых отражений радикально увеличивает коэффициент R^2 , что соответствует физическим представлениям о повышении чувствительности к дефектам при анализе сигнала на дальних отражениях [22].

В связи с вышеуказанным метод главных компонент применялся к характеристикам всех типов анализируемых сигналов (исходный, потенцированный, огибающая) с количеством отражений $N = 20$.

Метод главных компонент. Преобразование по методу главных компонент определяет корреляцию между переменными, образующими входное множество. В качестве входного множества использованы данные статистических характеристик сигналов, выходным параметром является вектор обобщённых характеристик искусственных дефектов типа ПДО. Таким образом, данные преобразованы в систему (f_k, X_{ik}) , $i = 1, \dots, n$, $k = 1, \dots, p$, где $p = 18$ и соответствует числу анализируемых искусственных дефектов, $n = 6$ — числу анализируемых параметров сигналов. Метод главных компонент при оценке полученных результатов был реализован в специализированном программном обеспечении PrNS_PCA [28].

Результатом работы программы являются рассчитанная матрица главных компонент y_{jk} и матрица собственных векторов $W = (w_{ij})$:

$$y_{jk}, \quad j = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, p, \quad (3)$$

$$W = (w_{ij}), \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m \leq n. \quad (4)$$

При определении главных компонент для дефектов с неизвестным значением обобщённой характеристики используется выражение

$$y_{jk} = \sum_{i=1}^n w_{ij} z_{ik}, \quad j = 1, \dots, m \leq n, \quad k = 1, \dots, p, \quad (5)$$

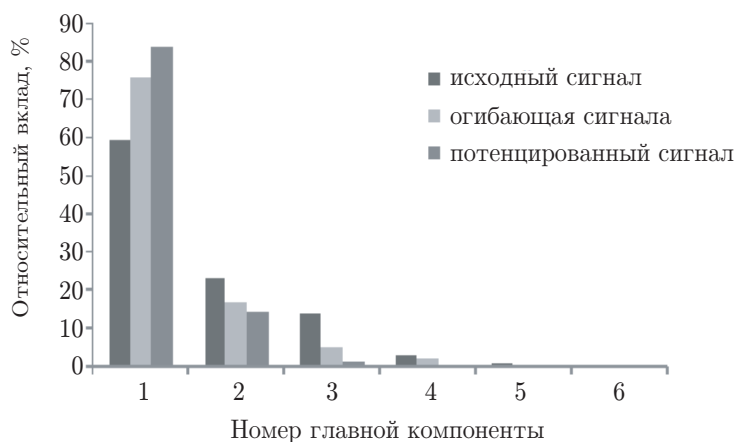


Рис. 4. Результаты влияния главных компонент

Таблица 3

Результаты регрессионной статистики

Тип сигнала	Множественный R	Стандартная ошибка	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
Исходный	0,897	0,031	0,100	-0,024	-0,016	0,002	-0,011	-0,055	0,094
Огибающая	0,886	0,033	0,100	-0,022	-0,002	-0,012	0,041	0,065	0,085
Потенцированный	0,917	0,028	0,100	0,021	0,015	-0,003	0,068	0,030	-0,323

где

$$z_{ik} = \frac{X_{ik} - \bar{x}_i}{\sigma_i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, p, \tag{6}$$

$$x_{ik} = \frac{X_{ik} - X_i^{\min}}{X_i^{\max} - X_i^{\min}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, p. \tag{7}$$

Здесь $\bar{x}_i, X_i^{\min}, X_i^{\max}, i = 1, \dots, n$ — вспомогательные переменные, рассчитываемые в программе, где X_{ik} — параметры анализируемого сигнала для дефекта с неизвестной обобщённой характеристикой.

В качестве примера на рис. 4 представлен вклад шести компонент для трёх типов анализируемых сигналов. Видно, что вклад первой компоненты составляет 59,5 % для исходного сигнала, 75,9 % для огибающей сигнала, 84 % для потенцированного сигнала. При этом первые две компоненты обеспечивают вклад около 80 % для исходного сигнала, более 90 % для огибающей сигнала и 98 % для потенцированного сигнала.

Результаты регрессионной статистики зависимостей для шести анализируемых компонент всех видов сигналов приведены в табл. 3, согласно которой множественный коэффициент корреляции имеет максимальное значение для потенцированного сигнала.

Уравнение регрессии имеет вид

$$Y_n = \alpha_0 + \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \alpha_3 F_3 + \alpha_4 F_4 + \alpha_5 F_5 + \alpha_6 F_6, \tag{8}$$

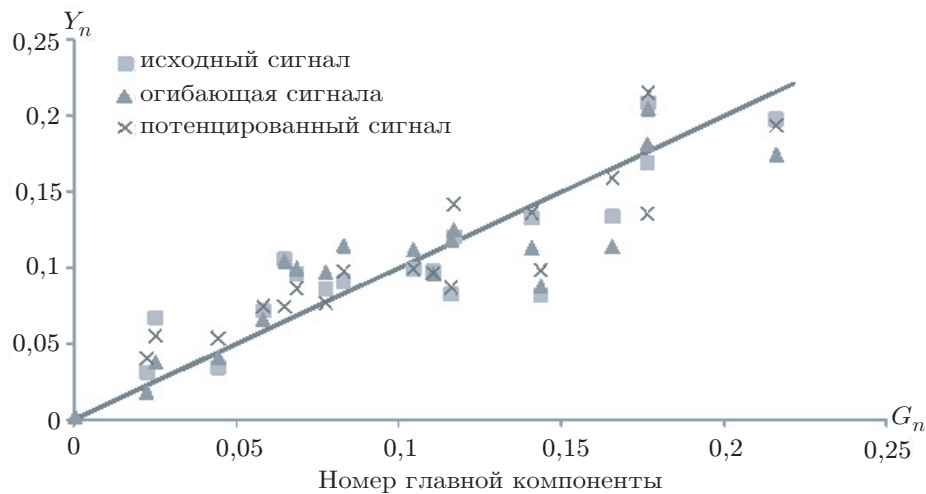


Рис. 5. Результаты зависимости параметра Y_n по методу главных компонент от обобщённой характеристики дефекта G_n

где α_0 – α_6 — коэффициенты регрессии, F_1 – F_6 — главные компоненты.

На рис. 5 представлена корреляция результата расчёта параметра Y_n дефекта по методу главных компонент и результатов прямых геометрических измерений обобщённой характеристики G_n . Рис. 5 подтверждает наличие более сильной корреляции с обобщённой характеристикой G_n при анализе потенцированного сигнала. Следует отметить, что погрешность оценки малых значений обобщённой характеристики с использованием метода главных компонент достаточно велика, это может объясняться недостаточностью количества точек в выборке в области малых значений. Искусственные дефекты в области средних и высоких значений обобщённой характеристики дефекта удовлетворительно описываются с использованием предложенного подхода. Отметим возможность использования полученной зависимости при формировании критерия браковки по параметру Y_n , соответствующему недопустимому искусственному дефекту для объектов любых марок сталей и любых диаметров.

Предложенный подход был апробирован для оценки обобщённой характеристики естественных дефектов, выявленных с использованием зеркально-теневого метода на многократных отражениях при контроле прутков из рессорно-пружинной стали различных диаметров (от 10 до 30 мм). Выявленные в процессе контроля дефекты были подтверждены визуально (поверхностные дефекты) и металлографическими исследованиями (внутренние дефекты) (рис. 6): образец 1 ($\varnothing 25$ мм, 60С2А, трещина), образец 2 ($\varnothing 30$ мм, 60С2ХФА, неметаллические включения «оксиды точечные» округлой $0,12 \times 0,12$ мм и неправильной форм, вытянутые по направлению волокна длиной 1 мм), образец 3 ($\varnothing 21$ мм, 60С2ХФА, единичное неметаллическое включение округлой формы $0,15 \times 0,15$ мм — «силикат недеформирующийся»), образец 4 ($\varnothing 11,8$ мм, 60С2Г, прокатная пленка глубиной залегания 0,05–0,13 мм), образец 5 ($\varnothing 24$ мм, 60С2А, неметаллические включения мелких зёрен, расположенных в виде строчек — «оксиды строчечные»), образец 6 ($\varnothing 12$ мм, 60С2А, дефекты поверхности в виде трещин с обезуглероженными стенками и разветвлёнными концами глубиной залегания 0,05–0,13 мм — «раскатанный пузырь»; «закат»; «раскатанная трещина»). В качестве исходных данных при расчётах были использованы нормированные статистические параметры дефектограмм, полученных при контроле для потенцирован-

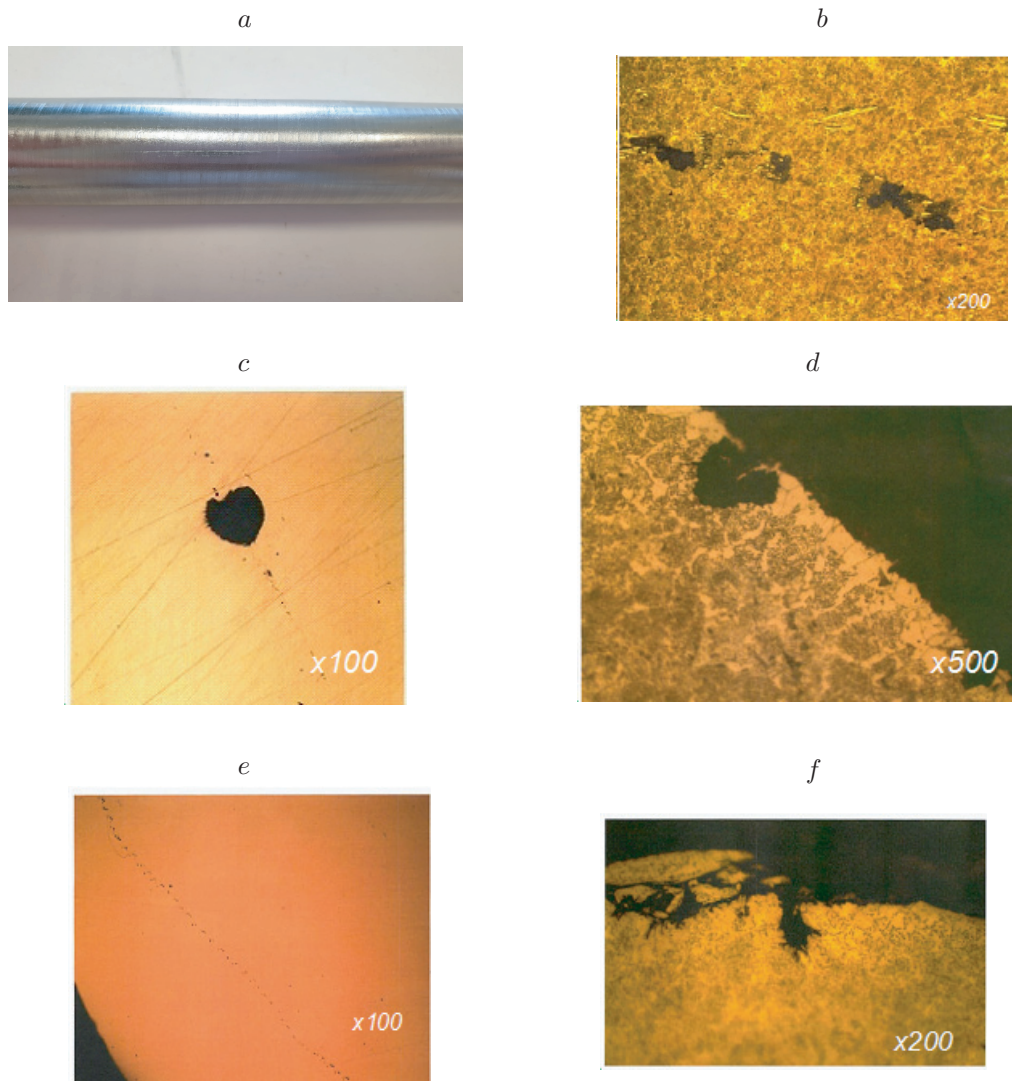


Рис. 6. Фото и результаты металлографии некоторых выявленных дефектов: *a* — образец 1, *b* — образец 2, *c* — образец 3, *d* — образец 4, *e* — образец 5, *f* — образец 6

Таблица 4
 Главные компоненты, параметр Y_n , обобщённая характеристика дефекта G

№ образца	Главные компоненты для потенцированного сигнала						Y_n	G
1	-1,159	3,513	0,737	0,058	0,022	0,050	0,114	17,8
2	-0,709	2,908	0,632	0,019	-0,029	-0,097	0,158	35,6
3	-0,376	-1,168	-0,212	0,103	0,051	-0,067	0,105	11,6
4	0,553	0,177	0,421	0,995	1,082	0,420	0,078	2,7
5	0,818	-3,310	-0,907	0,862	0,795	-0,051	0,171	24,6
6	1,939	-3,766	-1,127	0,312	0,170	-0,099	0,148	5,3

ного сигнала в области $N = 20$ переотражений.

Результаты расчёта значений главных компонент согласно формулам (3)–(7) и соответствующие значения параметра Y_n с использованием регрессионного уравнения (8) даны в табл. 4. Обобщённая характеристика дефекта G для объекта радиуса r определена согласно формуле

$$G = Y_n r^2. \quad (9)$$

Видно, что минимальные значения обобщённой характеристики имеют дефекты поверхности малой глубины № 4 и № 6 (пленá, закат), наибольшие значения соответствуют внутренним дефектам типа скопления неметаллических включений (№ 2, № 5). Указанные различия соответствуют представлениям о формировании акустического поля проходного ЭМА-преобразователя с фокусировкой по центру и уменьшением амплитуды смещений при приближении к поверхности [26].

Заключение. Использование метода главных компонент при анализе информативных параметров акустических сигналов многократного зеркально-теневого метода контроля пруткового проката позволило:

- уменьшить размерность обрабатываемых данных;
- проводить оценку обобщённой характеристики, определяемой диаметром и глубиной залегания модельного дефекта, который даёт те же значения главных компонент, что и естественный дефект;

- сформировать комплексный критерий браковки на основе недопустимого значения обобщённой характеристики дефекта для объектов из любых марок стали и любых диаметров.

Перспективным представляется применение данного подхода для отдельной оценки характеристик диаметра и глубины залегания дефекта, что существенно повысит информативность метода.

Результаты апробации предложенного подхода для оценки обобщённой характеристики естественных дефектов с использованием полученной регрессионной зависимости удовлетворительно согласуются с результатами металлографических исследований.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третьякова Т. В., Душко А. Н., Струнгарь Е. М. и др. Комплексный анализ механического поведения и процессов разрушения образцов пространственно-армированного углепластика в испытаниях на растяжение // Вестн. Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 1. С. 175–185. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.15.
2. Rishikesan V., Chaturvedi B., Arunachalam N. Characterisation of drilling-induced damage in GFRP honeycomb sandwich composites using acoustic emission // Procedia Manufacturing. 2021. **53**. P. 664–672. DOI: 10.1016/j.promfg.2021.06.066.
3. Ma Q., Tian G. Y., Gao B. et al. Lift-off suppression based on combination of bridge and transformer signal conditionings of eddy current testing // NDT & E International. 2022. **132**. 102724. DOI: 10.1016/j.ndteint.2022.102724.
4. Xie L., Gao B., Tian G. Y. et al. Coupling pulse eddy current sensor for deeper defects NDT // Sensors and Actuators A: Physical. 2019. **293**. P. 189–199. DOI: 10.1016/j.sna.2019.03.029.

5. **Sheng H., Wang P.** Evaluation of pipeline steel mechanical property distribution based on multi-micromagnetic NDT method // *IEEE Trans. Instrum. and Measur.* 2023. **72**. 6001715. DOI: 10.1109/TIM.2023.3241060.
6. **Задворкин С. М., Горулева Л. С.** Оценка остаточных напряжений в стальных изделиях магнитными методами // *Проблемы машиностроения и надёжности машин.* 2021. № 2. С. 33–51. DOI: 10.31857/S0235711921020164.
7. **Логиновский О. В., Костылева Л. Ю., Максимов А. А., Ячиков И. М.** Определение параметров дефекта расслоения биметаллической пластины посредством активного теплового неразрушающего контроля // *Вестн. Южно-Уральского государственного университета. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника.* 2021. **21**, № 4. С. 37–51. DOI: 10.14529/ctcr210404.
8. **Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В. и др.** Многопараметровые измерения эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных сверхвысокочастотных фотонных кристаллов // *Радиотехника и электроника.* 2016. **61**, № 1. С. 45. DOI: 10.7868/S0033849416010137.
9. **Kim F. H., Pintar A., Obaton A. F. et al.** Merging experiments and computer simulations in X-ray computed tomography probability of detection analysis of additive manufacturing flaws // *NDT & E International.* 2021. **119**. 102416. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102416.
10. **Анискович В. А., Будадин О. Н., Козельская С. О. и др.** Современные подходы к комплексированию информации многоканального многопараметрового неразрушающего контроля оценки качества и надёжности эксплуатации броневых преград // *Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук.* 2021. **116**, № 1. С. 149–154.
11. **Абдуракипов С. С., Бутаков Е. Б.** Сравнительный анализ алгоритмов машинного обучения для определения предотказных и аварийных состояний авиадвигателей // *Автометрия.* 2020. **56**, № 6. С. 34–48. DOI: 10.15372/AUT20200605.
12. **Борзов С. М., Потатуркин А. О., Потатуркин О. И., Федотов А. М.** Исследование эффективности классификации гиперспектральных спутниковых изображений природных и антропогенных территорий // *Автометрия.* 2016. **52**, № 1. С. 3–14. DOI: 10.15372/AUT20160101.
13. **Пустовалов Е. В., Модин Е. Б., Фролов А. М. и др.** Влияние технологических условий получения аморфных сплавов CoNiFeSiB на их структуру и свойства // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2019. № 7. С. 42–50. DOI: 10.1134/S0207352819070126.
14. **Подрезов Р. В., Райфельд М. А.** Непараметрический метод определения числа классов в задаче сегментации изображений // *Автометрия.* 2020. **56**, № 3. С. 81–90. DOI: 10.15372/AUT20200309.
15. **Хлыбов О. С., Храмешин Д. В.** Оценка предсказательной способности линейного множественного регрессионного анализа в неразрушающем статистическом контроле механических свойств и микроструктуры горячего проката // *Вестн. Череповецкого государственного университета.* 2019. **89**, № 2. С. 69–74. DOI: 10.23859/1994-0637-2019-2-89-6.
16. **Belugina R., Senchikhina A., Volkov S. et al.** Quantification of phosphatides in sunflower oils using potentiometric e-tongue // *Anal. Meth.* 2022. **14**, N 32. P. 3064–3070 DOI: 10.1039/D2AY00736C.
17. **Ли Б., Чжан Ц., Чен Ц.** Неразрушающий контроль стальных тросов с использованием оптимизированного метода опорных векторов // *Дефектоскопия.* 2021. № 11. С. 49–59. DOI: 10.31857/S0130308221110063.

18. **Вдовин К. Н., Маркевич А. В.** Отображение взаимосвязи параметров магнитного неразрушающего контроля и механических свойств автомобильной стали 08ПС с применением парного и множественного регрессионного анализа // *Технология металлов*. 2019. № 4. С. 40–46. DOI: 10.31044/1684-2499-2019-4-0-40-46.
19. **Соколов Р. А., Новиков В. Ф., Муратов К. Р., Венедиктов А. Н.** Оценка влияния дисперсности структуры стали на магнитные и механические свойства // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2021. 23, № 4. С. 93–110. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-93-110.
20. **Егоров А. В., Поляков В. В., Грачева Я. И., Кучерявский С. В.** Применение метода главных компонент при вихретоковом контроле металлических материалов с диэлектрическими покрытиями // *Изв. АлтГУ*. 2017. 96, № 4. С. 33–38. DOI: 10.14258/izvasu(2017)4-05.
21. **Дмитриев А. А., Поляков В. В., Рудер Д. Д.** Применение метода главных компонент к исследованию сигналов акустической эмиссии в алюминиевых сплавах // *Изв. АлтГУ*. 2018. 99, № 1. С. 19–23. DOI: 10.14258/izvasu(2018)1-02.
22. **Ермолов И. Н., Ланге Ю. В.** *Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 томах / Под общей ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Научно-техническое издательство «Машиностроение», 2008. 864 с.*
23. **Муравьева О. В., Муравьев В. В., Башарова А. Ф. и др.** Влияние термической обработки и структурного состояния стали 40Х пруткового сортамента на скорость ультразвуковых волн и коэффициент Пуассона // *Сталь*. 2020. № 8. С. 63–68.
24. **Муравьев В. В., Будрин А. Ю., Синцов М. А.** Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и Рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. 18, № 4. С. 4–10. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-10.
25. **Муравьева О. В., Волкова Л. В., Муравьев В. В. и др.** Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле труб нефтяного сортамента // *Дефектоскопия*. 2020. № 12. С. 48–57. DOI: 10.31857/S0130308220120052.
26. **Муравьева О. В., Брестер А. Ф., Муравьев В. В.** Сравнительная чувствительность информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода на многократных отражениях при контроле пруткового проката // *Дефектоскопия*. 2022. № 8. С. 36–51. DOI: 10.31857/S0130308222080048.
27. **Муравьев В. В., Стрижак В. А., Ефремов А. Б.** Программа для регистрации аналоговых сигналов «Принц VIII» // *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ*. Заявл. 14.08.2015. Оpubл. 18.11.2015, № 2015662211 РФ.
28. **Тененев В. А., Шаура А. С.** Применение методов снижения размерности данных к построению нечётких нейронных сетей // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. 18, № 4. С. 109–116. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-109-116.

Поступила в редакцию 05.04.2023

После доработки 26.04.2023

Принята к публикации 26.04.2023