



# МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ РЕШАЮЩИХ ПРАВИЛ ПРИ МНОГОПАРАМЕТРОВОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

О. А. ГИЛЕВА, В. С. ЕРЕМЕНКО

*Рассмотрены вопросы построения решающих правил для неразрушающего контроля композитных материалов. С помощью линейных методов распознавания построены разделяющие гиперплоскости, позволяющие с высокой достоверностью определять аномальные участки изделий и проводить классификацию дефектов. Рассмотрен метод выбора информативных параметров и определение их оптимального количества. Предложен алгоритм распознавания видов дефектов.*

*Article describes questions of decision rules building for nondestructive testing of composite materials. The separating hyperplanes built by linear recognizing methods, allows to high accuracy determine abnormal material areas and perform defects classification. Also article describes method of choice information parameters and their optimal quantity. Algorithm of defects recognizing offered too.*

Композиционные материалы чаще всего формируются одновременно с изделием и являются многослойными разнородными структурами, что значительно усложняет проведение их неразрушающего контроля (НК). Для таких материалов и изделий разрабатываются комплексные методы контроля, которые базируются на использовании нескольких физических методов или дополнительных информативных параметров. Это обуславливает необходимость разработки методик обоснованного выбора диагностических признаков и построения соответствующих решающих правил.

В теории распознавания образов существует несколько основных подходов к решению задачи построения решающих правил [1]. Подход, основанный на распознавании образов с помощью функций расстояния, эффективен в том случае, когда классы образов имеют тенденцию к проявлению кластеризационных свойств и неэффективен, если сравниваемые классы имеют разную дисперсию, а их законы распределения — точки пересечения. Статистический подход основан на применении отношения правдоподобия и требует априорного знания законов распределения исследуемых сигналов. Поэтому в данной работе для задач НК предлагается использовать итеративные классификаторы образов, позволяющие строить разделяющие гиперплоскости между множеством признаков, соответствующих различным состояниям объекта контроля. Решающие функции этих классификаторов строятся по заданной выборке образов с помощью «обучающих» алгоритмов. Предлагаемые алгоритмы просты в реализации и не требуют большого объема экспериментальных данных.

**Теоретические сведения.** Разделяющую функцию (или гиперплоскость) в пространстве признаков при диагностике на два состояния  $D_1$  и  $D_2$  (соответственно бездефектная зона и зона с дефектом) можно представить в виде скалярного произведения [2]

$$f(\bar{x}) = \lambda \bar{x}, \quad (1)$$

где  $\bar{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  — вектор признаков;  $\lambda$  — весовой вектор.

Вектор  $\lambda$  однозначно определяет положение разделяющей плоскости в пространстве признаков, поэтому задача построения разделяющей поверхности фактически сводится к поиску значения вектора  $\lambda$ . Если существует обучающая последовательность, т. е. эталонная совокупность образцов с известным диагнозом, то ее можно применить для построения весового вектора, а значит, и разделяющей гиперплоскости. При расчетах используется итеративный алгоритм последовательных приближений, при предоставлении нескольких образцов из обучающей совокупности образов. В общем виде эту процедуру можно представить таким образом: при предоставлении каждого образца из обучающей последовательности  $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$  происходит коррекция вектора  $\lambda$ :

$$\lambda_{(n+1)} = \lambda_{(n)} + r_{(n+1)} x_{(n+1)} \quad (2)$$

В равенстве (2)



$$r_{(n+1)} = \begin{cases} 0 & \text{для } \lambda_{(n)}x_{(n+1)} > 0 \\ 1 & \text{для } \lambda_{(n)}x_{(n+1)} < 0 \end{cases} \text{ при } x_{(n+1)} \in D_1,$$

$$r_{(n+1)} = \begin{cases} -1 & \text{для } \lambda_{(n)}x_{(n+1)} > 0 \\ 0 & \text{для } \lambda_{(n)}x_{(n+1)} < 0 \end{cases} \text{ при } x_{(n+1)} \in D_2. \quad (3)$$

Другими словами, при неправильном распознавании образов к вектору  $\lambda_{(n)}$  прибавляется значение точки, относительно которой была сделана ошибка. В соответствии с теоремой Розенבלата и Новикова [2] эта процедура последовательных приближений приводит к определению весового вектора за конечное число шагов итерации.

Условие разделения признаков для построенной гиперплоскости имеет вид

$$f(\bar{x}^*) = \lambda \bar{x}^* > 0 \text{ при } \bar{x}^* \in D_1,$$

$$f(\bar{x}^*) = \lambda \bar{x}^* < 0 \text{ при } \bar{x}^* \in D_2.$$

Для построения решающего правила по приведенному алгоритму необходимо определить критерий отбора наиболее информативных признаков. Для этого предлагается использовать информативный подход, изложенный в работе [3].

Определить количество полученной информации с увеличением количества использованных для диагностики параметров (признаков) можно по следующей формуле:

$$I = \frac{1}{2} \log \left\{ 1 + \left( (n-3) \sum_{i=1}^p \varepsilon_i^2 \right) / \left( (n-1) \left[ 4 + 8p/n \sum_{i=1}^p \varepsilon_i^2 \right] \right) \right\}, \quad (4)$$

где  $n$  — объем выборки;  $p$  — количество признаков;

$$\varepsilon_i^2 = (\mu_i^{(1)} - \mu_i^{(2)})^2 / d_i, \quad (5)$$

$\mu_i^{(1)}, \mu_i^{(2)}$  — математические ожидания классов;  $d_i$  — дисперсия признаков.

Для получения оптимального результата при построении решающего правила необходимо использовать признаки, обеспечивающие наибольший прирост информации.

**Экспериментальные исследования.** В качестве физического метода НК, который использовался для получения множества экспериментальных данных, выбрали метод низкоскоростного удара. При проведении исследований энергия ударного взаимодействия изменялась по случайному закону с равномерным распределением. Таким образом имитировалось большое количество измерений информативных параметров в бездефектной зоне и зонах с дефектами. Эксперименты проводили на образцах сотовых панелей с напол-

нителем типа ИСП-1 и обшивкой на основании стеклоткани Т42/1-76. Моделями дефектов выступали зоны с повреждениями, нанесенными точечными разрушающими ударами с энергиями 2,3; 2,8; 3,2 и 5,1 кДж [4].

Информативным признаком, по которому проводили контроль образцов, являлось изменение формы импульса силы ударного взаимодействия, которое численно может быть описано с помощью спектрального разложения по ортогональным функциям. Для построения ортогонального базиса использовали функции Хаара  $\{H(N, m, t)\}$ . Эти функции образуют периодическую, ортонормированную и полную систему функций [5]. Вид функции Хаара приведен на рис. 1. При построении базиса использовано следующее рекуррентное соотношение:

$$H(0, 0, t) = 1 \text{ при } t \in [0, 1),$$

$$H(r, m, t) = \begin{cases} 2^{r/2} & \text{при } \frac{m-1}{2^r} \leq t < \frac{m-1/2}{2^r}, \\ -2^{r/2} & \text{при } \frac{m-1/2}{2^r} \leq t < \frac{m}{2^r}, \end{cases}$$

где  $0 \leq r < \log_2 N, 1 \leq m \leq 2^r$ .

Исследования проводили по результатам измерений 250 случайных реализаций, полученных в бездефектной зоне, и по 250 реализациям, полученным в четырех зонах с различными степенями ударных повреждений. В качестве диагностических признаков выбраны первые 10 коэффициентов разложения, так как они соответствуют более чем 90 % энергии исследуемых сигналов (рис. 2).

Для построения гиперплоскости, разделяющей диагностические признаки, соответствующие бездефектной зоне и зонам со всеми рассмотренными

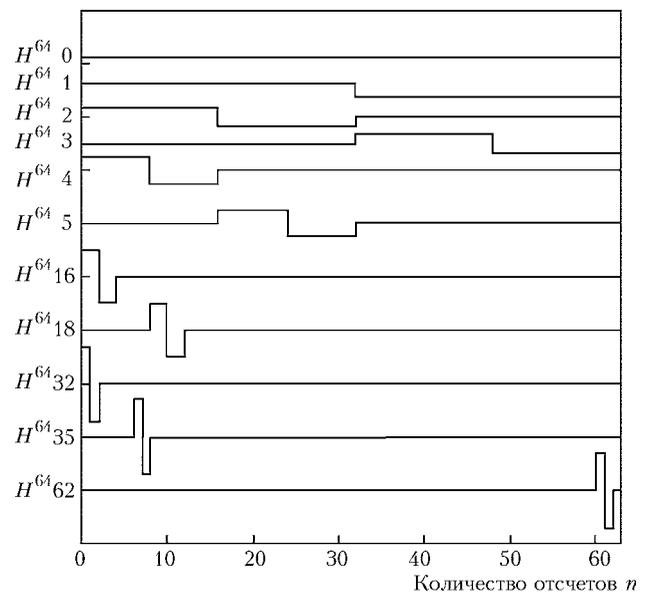


Рис. 1. Функции Хаара

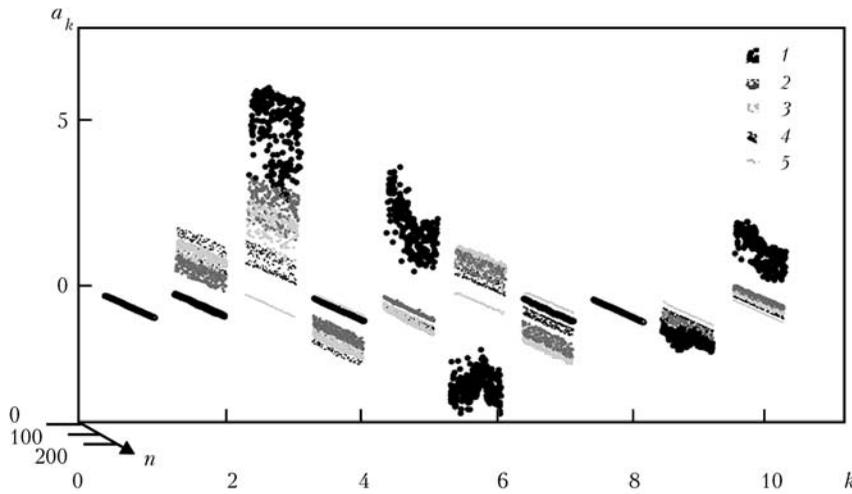


Рис. 2. Коэффициенты разложения информационных сигналов в базисе Хаара:  $n$  — номер импульса ударного взаимодействия;  $a_k$  — коэффициент разложения по базису Хаара;  $k$  — номер коэффициента разложения. Спектры сигналов: 1 — в бездефектной зоне; 2–5 — в зонах с разными разрушающими ударами А, кДж, соответственно 2,297; 2,812; 3,240; 5,109

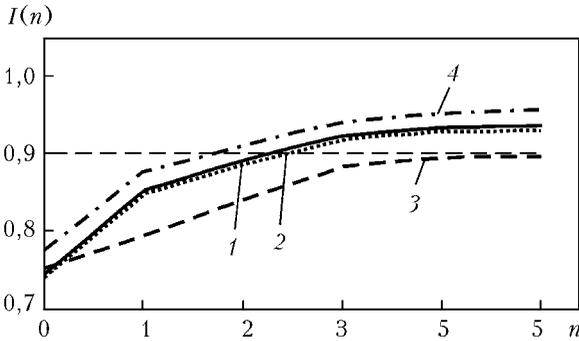


Рис. 3. Изменение информативности с увеличением количества коэффициентов разложения при сравнении сигнала в бездефектной зоне и в зонах с дефектами 1–4

видами дефектов, необходимо отобрать те коэффициенты разложения, которые во всех дефектных зонах принимают значения, лежащие по одну сторону от значений, полученных в бездефектной зоне. В противном случае построение такой гиперплоскости не представляется возможным.

На основе анализа спектрограммы, приведенной на рис. 2, были отобраны шесть спектральных коэффициентов по которым можно линейно разделить информативные признаки, соответствующие бездефектной зоне и зонам с дефектами. Это коэффициенты с номерами 1, 2, 4, 5, 8 и 9.

Таблица 1. Значение величины  $\varepsilon_i^2$  между сигналами в бездефектной зоне и зонах с дефектами

Номер зоны с дефектом/разрушающий удар А, кДж	1	2	4	5	8	9
1/2,3	80,42	12,85	39,34	120,02	5,00	37,51
2/2,8	75,76	13,82	38,85	119,95	5,27	37,95
3/3,2	26,62	14,82	39,13	125,11	5,23	38,30
4/5,1	83,91	16,01	39,30	139,88	6,03	38,50

Для ранжирования отобранных коэффициентов по чувствительности к наличию дефектов в контролируемой зоне по формуле (5) вычислено величину  $\varepsilon_i^2$ , которая фактически определяет информативность каждого коэффициента разложения (табл. 1) при линейном разделении сигналов.

По данным табл. 2 можно упорядочить спектральные коэффициенты по информативности — 5, 1, 4, 9, 2, 8. Прирост информативности распознавания с увеличением количества использованных для диагностики коэффициентов разложения определен по формуле (4) и графически представлен на рис. 3.

С использованием рассмотренного итеративного метода построены две разделяющие гиперплоскости: первая — по трем наиболее информативным коэффициентам разложения — 5, 1 и 4; вторая — по трем менее информативным — 9, 2 и 8. Полученные уравнения гиперплоскостей и необходимое для их построения количество итераций приведено в табл. 2.

Как видно из табл. 2, для разделения бездефектной зоны и зон с дефектами с помощью итеративного алгоритма удалось построить разделяющие гиперплоскости и по более информативным спектральным коэффициентам (5; 1; 4), и по тем, которые имеют меньшую информативность (9; 2; 8), однако при построении гиперплоскости по менее информативным понадобилось в 15 раз больше итераций для сходимости алгоритма.

Эффективность разделения информативных признаков с помощью построенных гиперплоскостей была экспериментально проверена по 125 реализациям, полученным при контроле бездефектной зоны и зон с различной степенью повреждения. Во всех случаях обе гиперплоскости позволили провести правильную классификацию, т. е. разделить значения диагностических признаков, соответствующих бездефектной зоне, от значений, соответствующих дефектным зонам.

Таким образом, построенные по трем диагностическим признакам (даже наименее информативным) гиперплоскости позволяют проводить эф-

Таблица 2. Уравнения разделяющих гиперплоскостей

Спектральный коэффициент	Уравнение гиперплоскости	Количество итераций
5, 1, 4	$f(x) = -2,15x_5 + 0,07x_1 + 2,2x_4$	2
9, 2, 8	$f(x) = 10,77x_9 - 1,53x_2 + 0,57x_8$	30

Таблица 3. Значения информативности коэффициентов разложения при разделении видов дефектов

Номер дефектной зоны	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1, 2, 3	2,4	9,6	2,3	10,0	51,6	0,65	2,30	7,50	0	7,7
2, 3	3,0	0,3	17,0	0,10	0,87	9,09	42,4	65,6	4,3	15,9
3, 4	27,5	4,6	57,7	93,6	10,6	46,2	89,1	19,9	22,9	66,2

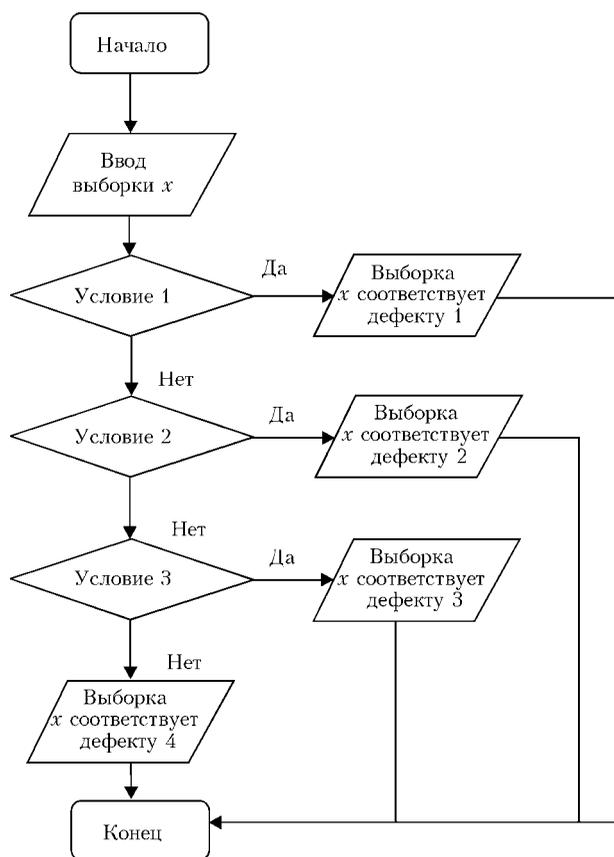


Рис. 4. Алгоритм распознавания дефектов

фективное диагностирование, т. е. различать бездефектные зоны и зоны с дефектами. Предлагаемый подход имеет смысл применить не только для определения наличия дефекта в контролируемой зоне, но и классификации типа дефекта. В этом случае сначала нужно определить, содержит ли контролируемая зона дефект 1 вида, потом 2 и т. д. Для этого необходимо построить несколько разделяющих гиперплоскостей между всеми дефектами, и если это возможно, то реализовать следующий алгоритм классификации, приведенный на рис. 4. Он будет действующим при условии, что разделяющая гиперплоскость между 1 и 2 видами дефектов есть также разделяющей гиперплоскостью между 1 и всеми остальными дефектами, а также гиперплоскость между 2 и 3 видами дефектов отделяет от 2 также 4 вид дефекта.

В приведенном алгоритме «Условие 1» — вектор информативных параметров  $X$  — отвечает 1 виду дефекта по результатам проверки по гипер-

Таблица 4. Уравнения гиперплоскостей между различными типами дефектов

Номер дефектной зоны	Номер коэффициента	Уравнение гиперплоскости	Количество итераций
1, 2	4, 3, 1	$f(x) = 2,92x_4 - 0,41x_3 + 0,05x_1$	16
2, 3	7, 6, 2	$f(x) = 0,84x_7 - 4,8x_6 + 1,36x_2$	32
3, 4	3, 6, 9	$f(x) = -1,48x_3 + 0,48x_6 + 0,17x_9$	2

плоскости между 1 и 2 видами дефектов; «Условие 2» — выборка  $X$  — 2 виду дефекта по результатам проверки по гиперплоскости между 2 и 3 видами дефектов; «Условие 3» — выборка  $X$  отвечает — 3 виду дефекта по результатам проверки по гиперплоскости между 3 и 4 видами.

Таким образом, для реализации предложенного последовательного алгоритма классификации четырех видов дефектов необходимо построить три разделяющие гиперплоскости.

Для определения оптимального количества коэффициентов разложения, необходимых для построения каждой из гиперплоскостей и ранжирования их по информативности, проведем вычисления, аналогично приведенным выше (табл. 3).

По полученным данным для каждого условия классификации отобраны три наиболее информативные спектральные коэффициенты. По ним построены разделяющие гиперплоскости, которые отвечают различным типам дефектов. Полученные уравнения гиперплоскостей и количество итераций, необходимых для их построения, приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, удалось построить все три гиперплоскости за конечное количество шагов итерации. Проверка разработанного классификатора по 125 экспериментальным реализациям, полученным в дефектных зонах с различными энергиями повреждающих ударов, показала правильность построения разделяющих гиперплоскостей, что подтверждается отсутствием ошибок распознавания.

### Выводы

Проведенные исследования показали эффективность применения линейных разделяющих функций для построения решающих правил в многопараметровой дефектоскопии. С помощью разработанного алгоритма можно не только провести



разделение контролируемых зон на дефектные и бездефектные, но и осуществить классификацию вида обнаруженного дефекта.

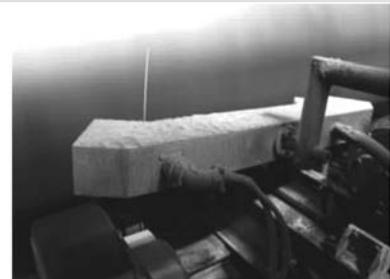
Вследствие того, что при построении разделяющих гиперплоскостей использовали диагностические параметры, наиболее чувствительные к наличию определенных видов дефектов, а также учитывали разброс их значений, вызванный неоднородностью контролируемых материалов, предложенная методика позволяет разрабатывать решающие правила, обеспечивающие более высокую достоверность контроля по сравнению с пороговыми правилами.

1. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов / Пер. с англ. // Под. ред. Ю. И. Журавлева. — М.: Мир, 1978. — 411 с.
2. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
3. Шапов П. Ф., Осина Т. Г. Оптимизация системы информационных показателей при метрологической неопределенности показателей контроля // Метрологія та вимірювальна техніка: Наук. пр. V Міжн. наук.-техн. конф. — Харків, 2006. — С. 368–371.
4. Еременко В. С., Мокийчук В. М., Овсянкин А. М. Обнаружение ударных повреждений сотовых панелей методом низкоскоростного удара // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 1. — С. 124–127.
5. Еременко В. С., Мокийчук В. М., Самойличенко О. В. Исследование характеристик импульсных сигналов на основе разложений по базису Хаара // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2006. — № 1(19). — С. 142–144.

Нац. авиационный ун-т,  
г. Киев

Поступила в редакцию  
16.02.2009

### **Система автоматического обнаружения валика усиления сварного шва и управления дозатором полимера при нанесении антикоррозийного покрытия на поверхность сварных труб**



Система предназначена для обнаружения центра валика усиления шва при вращении трубы и формирования сигналов управления дозировкой полимера для обеспечения однородной толщины полимерного покрытия на готовой трубе (увеличение дозировки в момент нанесения полимера на валик).

Система внедрена в производство на предприятии  
ОАО «Харцызский трубный завод» (Украина, 2008 г.).

**Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ**  
E-mail: office@paton.kiev.ua