

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ

© 2021 г. Борис Велев^{1*}, Иван Иванов², Владимир Каменов^{3,**}

¹Институт механики, София, 1000 Болгария

²Институт национальной и мировой экономики, София, 1000 Болгария
³Софийский технический университет, София, 1000 Болгария

E-mail: * boris_velev81@abv.bg; ** vladokamenov@gmail.com

Поступила в редакцию 27.09.2020; после доработки 12.01.2021

Принято к публикации 29.01.2021

Представлены два оптимизированных модульных устройства: MULTITEST-MC010 для исследования ферромагнитных материалов методами измерения магнитного шума и магнитоакустической эмиссии эффекта Баркгаузена и MULTITEST-CD010 для исследования металлических материалов методами измерения скорости C и затухания ультразвука. Исследовано влияние структуры в конструкционной стали 40X на числовые характеристики магнитного шума и магнитоакустической эмиссии Баркгаузена — напряжения магнитного шума E_{BN} и напряжения среднеквадратичной акустической эмиссии E_{MAE} . Структура и механические свойства образцов чугуна с комплексным измерением информационных параметров E_{BN} , E_{MAE} и C были исследованы при одновременном использовании двух модульных устройств системы. Доказана возможность комплексного применения этих параметров для неразрушающего контроля конструкции после термической обработки в конструкционной стали 40X и прочности на разрыв в образцах чугуна.

Ключевые слова: комплексный неразрушающий контроль, неразрушающие информационные параметры.

DOI: 10.31857/S0130308221030027

1. ВВЕДЕНИЕ

Повышенные требования к качеству и надежности машиностроительных продуктов и сооружений вызывают необходимость исследования, разработки и внедрения в промышленность сложных систем для неразрушающего контроля физико-механических свойств, механических напряжений и структуры материалов [5, 6, 8, 10]. Комплексное исследование и оценка свойств материалов и изделий происходит через одновременное использование нескольких неразрушающих методов, что сочетают и взаимно дополняют их возможности [8, 9, 11, 12]. Для осуществления комплексного неразрушающего контроля в практических целях необходимо использовать методы статистического анализа и современные программные продукты [1]. Для этой цели разработана модульная автоматизированная система MULTITEST для неразрушающего контроля и исследования структуры, состава и физико-механические свойств материалов в лабораторных и производственных условиях. Она основана на комплексном использовании нескольких физических методов (магнитные, акустические, электрические), поэтому каждый из них можно использовать самостоятельно [2—5, 8].

2. ЦЕЛЬ

Целью данной работы является представление основных принципов и алгоритмов автоматизированной оценки данных комплексного неразрушающего контроля с помощью модульных устройств автоматизированной системы: модульным устройством для магнитного и магнитоакустического контроля ферромагнитных материалов MULTITEST-MC010 и модульным устройством MULTITEST-CD010 для комплексного контроля материалов с методами измерения скорости и затухания ультразвука [4, 8]. Для апробации системы необходимо провести исследования и разработать методики комплексного неразрушающего контроля образцов конструкционной стали и чугуна; сделать анализ результатов и выводы о применимости комплексного неразрушающего контроля.

3. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОМПЛЕКСНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Основной принцип комплексного неразрушающего контроля заключается в том, что практическая целесообразность увеличения параметров неразрушающего контроля информации опре-

деляется вероятностью правильной оценки свойств контролируемых образцов или материалов, классифицированных по одному информационному параметру, и сравнивается с вероятностью правильного оценивания материалов, классифицированных посредством двух или более информационных параметров. Логично, что при получении недостаточной информации о контролируемом материале или изделии с применением только одного метода, использование правильно выбранного второго метода увеличит вероятность правильной оценки свойств материала [7, 8]. Для оценки этой вероятности данные неразрушающего контроля подвергаются статистической обработке [1].

3.1. Автоматизированная система обработки данных и для измерений/ испытаний в комплексном неразрушающем контроле

Разработка автоматизированной системы обработки и оценки экспериментальных данных является первым шагом на пути к разработке методологий комплексного неразрушающего контроля. Он охватывает следующие шаги:

- Расчет средних значений и интервальных оценок серий измерений, выполненных по одному, двум или более неразрушающим информационным параметрам.
 - а) Однопараметрическая интервальная оценка.
 - б) Многопараметрическая интервальная оценка.
- Критерии классификации.
 - а) Система предварительного обучения с использованием сравнительных образцов.
 - б) Системы самообучения.
- Программное обеспечение для автоматической обработки данных для классификации образцов и деталей по группам с одинаковыми свойствами.

3.1.1. Алгоритмы автоматической обработки данных и классификации образцов и деталей по группам с одинаковыми механическими свойствами или структурой

Однопараметрическая оценка интервала.

Если у нас есть n измерений на контролируемом материале одного неразрушающего информационного параметра $\{x_i; i = 1, \dots, n\}$, тогда оценка в этом случае:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

интервальная оценка для вероятности P_r :

$$\bar{x} \pm c(P_r)s, \quad (2)$$

где s — стандартное отклонение:

$$s = \left[\frac{1}{n-1} \left(\sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

$c(P_r)$ — поправочный коэффициент с учетом малого размера выборки:

$$c(P_r) = \frac{1}{\sqrt{n}} (t_{q,v}); \quad n-1, \quad (4)$$

где $t_{q,v}$ — квантиль распределения Стьюдента; $q = \frac{1+P_r}{2}$; $v = n-1$.

Значения $t_{q,v}$, q и v могут быть аппроксимированы с достаточной точностью для практики:

$$t_{q,v} = \lambda_q + \sum_{i=1}^4 \frac{q_i(\lambda_q)}{v^i}; \quad \lambda_q = r - \frac{\left(\sum_{k=0}^2 c_k \cdot r^k \right)}{\left(\sum_{k=0}^3 d_k \cdot r^k \right)}; \quad r = \sqrt{l_n \frac{1}{q^2}}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} c_0 &= 2,30753; & d_0 &= 1; \\ c_1 &= 0,27061; & d_1 &= 0,99229; \\ c_2 &= 0; & d_2 &= 0,04481. \\ d_3 &= 0; \end{aligned}$$

Аппроксимация позволяет определить квантили $t_{q,v}$ и соответствующие интервальные оценки для числа измерений n и вероятности P_r .

Оценка многопараметрического интервала.

Если у нас есть измерения $x_{ij}^{(k)}$, где $1 \leq i \leq n_k$; $1 \leq j \leq \rho$; $1 \leq k \leq m$; ρ — количество параметров; n_k — количество измерений на образце; m — количество образцов, то балльная оценка в этом случае:

$$\bar{x}_j^{(k)} = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} x_{ij}^{(k)}, \quad (6)$$

интервальная оценка:

$$\bar{x}_j^{(k)} \pm c(P_r) \cdot s_j^{(k)}; \quad j = 1 \dots \rho; \quad k = 1 \dots m, \quad (7)$$

где $c(P_r)$ — поправочный коэффициент:

$$c(P_r) = \left[\frac{(n_k - 1)\rho}{(n_k - \rho)n_k} Fq_{k-2}^n \right]^{1/2}. \quad (8)$$

Аппроксимация (5) может быть принята для аппроксимации t -распределения. В интервальной оценке (7) стандартное отклонение обозначается как

$$S_j^{(k)} = \left[\frac{1}{n_k - 1} \sum_{i=1}^{n_k} (x_{ij}^{(k)} - \bar{x}_j^{(k)})^2 \right]^{1/2}. \quad (9)$$

Например, если у нас есть три параметра $j = 1, 2, 3$, то 3 — интервал для j -го параметра этой группы выборки определяется выражением:

$$v_{(r)}^{(j)} = m_k^{(j)} + 3\sigma_k^{(j)}; \quad v_{(\Delta)}^{(j)} = m_k^{(j)} - 3\sigma_k^{(j)}; \quad k=1, 2, 3, \quad (10)$$

где $v_{(r)}^{(j)}$ — верхнее предельное значение; $v_{(\Delta)}^{(j)}$ — нижнее предельное значение.

Критерии классификации.

Анализ теоретических допущений показывает, что при формировании критериев могут применяться следующие системы распознавания:

а) система предварительного обучения с использованием сравнительных образцов. Они образуют характерные области с доверительными интервалами с определенной степенью вероятности. Такая система является многопараметрической системой дисперсионного анализа, чьи однопараметрические и многопараметрические интервальные оценки представлены выше. После расчета доверительных интервалов начинается классификация незнакомых образцов или деталей по соответствующим группам сравнительных образцов. Критерием является среднее нескольких независимых измерений. На практике с помощью этой системы для материала производится 2-5 независимых измерений каждого параметра неразрушающей информации, рассчитывается среднее значение измерений и, если оно находится в пределах доверительного интервала $\bar{x} \pm 3\sigma$, материал (деталь) принадлежит соответствующей группе. Другой системой обработки данных являются надежные (робастные) интервальные оценки [1];

б) самообучающиеся системы. При классификации сравнительно небольшого числа выборок или деталей наборы данных невелики, и в этом случае нецелесообразно применять вероятностный подход к сравнительным выборкам. Методы анализа данных, основанные на сходстве измерений, являются более подходящими. Такая система самообучения является кластерным анализом [1]. Кластерный анализ особенно подходит для измерений с высоким рассеянием, таких как многие методы неразрушающего контроля.

3.1.2. Алгоритмы для автоматизированного комплексного неразрушающего контроля

Для каждого модульного прибора алгоритм настройки самостоятельный [6, 7]. Чтобы установить корреляционные зависимости между безразрушительными информационными характеристиками, структурой и механическими свойствами контролируемых материалов, а также сформировать критерий для классификации, разработаны алгоритмы и софтвер в следующей последовательности.

Алгоритм для модульного прибора MULTITEST-MC010. Это устройство, которое измеряет неразрушающие информационные параметры магнитного шума и магнитоакустической эмиссии Баркгаузена — магнитное шумовое напряжение E_{BN} и магнитоакустическое напряжение E_{MAE} . Из

них получают зависимости $E_{BN} = F(I_B)$ и $E_{MAE} = F(I_B)$ для нескольких групп сравнительных образцов контролируемого материала при произвольно выбранной величине намагничивающего тока I_B . Полученные зависимости аппроксимируются функцией вида:

$$E_{BN} = (a_k f_B^2 + b_k f_B + c_k)^{-1}. \quad (11)$$

Из зависимостей (11) определяется оптимальная частота $f_{\text{опт}}$. При этой частоте определяются зависимости шумового напряжения E_{BN} тока намагничивания $I_B = E_{NB}(I_B)$ [5]. Полученные зависимости аппроксимируются функцией:

$$E_{BN} = a_k \exp\{b_k [\exp(c_k I_B)]\}. \quad (12)$$

Эти зависимости аппроксимируются функцией по следующему алгоритму.

а) Определяется оптимальная частота и оптимальный намагничивающий ток. Зависимости (11) аппроксимируются квадратным уравнением:

$$f_B^2 + af + c = 0, \quad (13)$$

корни которого представляют оптимальную частоту $f_{\text{опт}}$ и на основе этих частоты получают зависимости $E_{BN}(I_B)$ для групп сравнительных образцов. Эти зависимости аппроксимируются нелинейным уравнением:

$$\exp[\varphi_l(I_B^{(1)})] - A \exp[\varphi_l(I_B^{(2)})] = 0. \quad (14)$$

б) Из уравнения (14) находится максимальный диапазон между величинами аппроксимированных данных и из них определяется оптимальная величина намагничивающего тока $I_{\text{опт}}$. При этом токе измеряют реальные образцы незнакомыми структурно-механическими характеристиками. Аналогичную процедуру проводят для оптимизации измерений зависимостями $E_{MAE}(f_B)$, $E_{MAE}(I_B)$, чтобы найти оптимальную частоту и оптимальный намагничивающий ток магнитоакустического напряжения E_{MAE} , при котором делается измерение реальных образцов незнакомой структуры или механическими свойствами.

Алгоритм для модульного прибора MULTITEST-C010. В этом устройстве используется метод измерения скорости и затухания ультразвука в твердых материалах с помощью одного измерения, которое одновременно определяет фактическую толщину контролируемого материала и траекторию ультразвука в нем. Обе величины обрабатываются, и скорость или затухание ультразвука в материале указывается на цифровом индикаторе [7]. Основные этапы настройки и калибровки MULTITEST-CD010:

$$d_{ye1} = d_{oe1} = d_{e1} \text{ и } d_{ye2} = d_{oe2} = d_{e2}, \quad (15)$$

где d_{e1} , d_{e2} — фактическая толщина измеренных двух секций эталона [7]; d_{oe1} , d_{oe2} — толщина тех же двух секций, измеренная с помощью оптоэлектронного датчика; d_{ye1} , d_{ye2} — относительная толщина тех же двух секций, измеренная ультразвуком. Следующая формула используется для расчета скорости ультразвука:

$$C = k(d_y / d_o) C_e. \quad (16)$$

б) Для коэффициента затухания на данной частоте δ_t используют формулу:

$$\delta_t = \frac{(A_1 - A_n) - B}{2d_0(n_1 - n_n)}, \quad (17)$$

где C_e , м/с — скорость ультразвука в эталоне изготовлен из армко-железа [3,7]; k — коэффициент пропорциональности с учетом внешних условий; d_y , мм — относительная толщина материала, измеренная ультразвуком; d_0 , мм — фактическая толщина, измеренная с помощью оптоэлектронного датчика; δ_t , дБ / мм — коэффициент затухания на частоте t ; n_1 и n_2 — номера сравниваемых эхоимпульсов; A_1 , A_n — амплитуды сравниваемых ультразвуковых эхоимпульсов. В настоящем исследовании разрушающий информационный параметр (продольная скорость ультразвука C для простоты) представляется как безразмерное отношение скоростей M в контролируемом материале и в эталонном железе. Для $k = 1$ (см. (16)) $M = C / C_e = d_y / d_e$. Отношение M позволяет только

путем измерения толщины, без расчета скорости ультразвука, регистрировать с достаточной точностью изменение скорости ультразвука в разных материалах. Этот параметр выбирается в качестве дополнительного параметра и измеряется в соответствии с программой измерений/ испытаний и методикой калибровки [4].

3.1.3. Софтвр

Для автоматизированной системы комплексного неразрушающего контроля разработана софтверная программа для сбора, анализа и оценки экспериментальных данных, а также программное обеспечение для измерения/тестирования для каждого из модульных устройств в соответствии с алгоритмами, описанными выше. Для программного обеспечения используются системы программирования: MatLab для оценки данных и измерения /тестирование компонентов системы и графической программы LabView для онлайн визуализаций результатов. Апробированы неразрушающие информационные параметры — напряжения магнитного шума E_{BN} , магнитоакустическое напряжение E_{MAE} и продольная скорость ультразвука C (или отношение скоростей M) в образцах и изделиях из машиностроительных материалов. Система апробирована данными, полученными модульным прибором MULTITEST-MC010 и MULTITEST-C010. Измерения проведены на сравнительных образцах из конструкционной стали 40X и литейного чугуна.

4. АППАРАТУРА, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДОЛОГИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Аппаратура

Автоматизированная система MULTITEST состоит из 3-х частей: персональный компьютер для автоматической обработки и оценки данных контроля и управления приспособлениями, модульные приборы для измерения безразрушительных информационных параметров и приспособлений (измерительные клещи, манипуляторы) для захвата и перемещения, а так же классификации измеряемых образцов, изделий и материалов. Модульные приборы имеют автономное питание и могут работать самостоятельно или в единой автоматизированной системе в зависимости от поставленных задач. На рис.1 показана фотография конфигурации системы с модульным прибором MULTITEST-MC010, MULTITEST-CD010 и измерительные клещи DK100.



Рис. 1. Внешний вид системы с конфигурацией — тест-клещи DK100, MULTITEST-MC010 и MULTITEST-CD010.

4.2. Материалы

Чтобы установить корреляционные зависимости между безразрушительными информационными характеристиками, структурой и механическими свойствами контролируемых материалов, необходимо сделать сравнительные образцы. Для апробации системы подобраны сравнительные образцы из конструкционной стали 40X и литейный чугун. Образцы плоскопараллельные с размерами $\Phi 30 \times 20$ мм с различной степенью термообработки, выполненной в инертной среде CO_2 , включая по 5 штук в каждой группе. Сравнительные образцы серого чугуна и высокопрочного

Механические свойства сравнительных образцов стали и чугуна

Группы образцов стали 40X		Группы образцов из чугуна ВЧ и СЧ		
№	Твердость <i>HV</i>	№	Прочность на растяжение <i>Rm</i> , МПа	
1	380—410	1	120—157	СЧ15
2	360—390	2	300—337	СЧ30
3	330—365	3	450—500	ВЧ50
4	300—310	4	590—630	ВЧ60
5	—	5	640—675	ВЧ60-2

чугуна также имеют размеры $\Phi 30 \times 20$ мм, по 5 в каждой группе и имеют различную прочность на разрыв. Принадлежность сравнительных образцов к соответствующей группе с такими же механическими свойствами была подтверждена химическим и металлографическим анализом и механическими испытаниями прочности на растяжение и прочности на разрыв. Тип термообработки и данные твердости по Бринеллю для образцов из стали 40X и предел прочности при растяжении в образцах чугуна приведены в табл. 1.

4.3. Методика для комплексного неразрушающего контроля

Для испытаний прибора и системы обработки и оценки данных была разработана специальная методика неразрушающего контроля твердости (термической обработки) образцов из конструкционной стали 40X и прочности на растяжение образцов из чугуна.

Объект комплексного неразрушающего контроля. Объектами контроля являются образцы и детали конструкционной стали 40X и чугунных колесиков размером $\Phi 30 \times 20$ мм.

Оборудование и аксессуары:

устройства MULTITEST-МС 010, MULTITEST-CD010;

аксессуары — испытательные клещи DK100. Для применения комплексного неразрушающего контроля магнито-шумовыми и ультразвуковыми методами для калибровки и измерения используются специально разработанные измерительные зажимы DK100 (см. рис. 1);

персональный компьютер (ноутбук);

магнитные шумовые преобразователи и ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи; серия сравнительных образцов с различной термообработкой и прочностью на растяжение (см. табл. 1);

необходимая документация и программное обеспечение для системы (инструкция по эксплуатации, база данных, методы калибровки и тестирования и т. д.).

Подготовка сравнительных образцов.

В каждой группе было отобрано 5 образцов с одинаковыми свойствами (см. табл. 1); подготовка последовательно включает в себя следующие операции — токарная обработка, запись, предварительная настройка и выборка. Отобранные образцы подвергаются термической обработке, пескоструйной очистке, квантово-химическому анализу, определению средней твердости *HV* из 3 независимых измерений.

Измерение параметров неразрушающей информации образцов, в соответствии с разработанным программным обеспечением и алгоритмами, описанными выше, для формирования характеристичных областей, а также с помощью программного обеспечения для измерений / испытаний в условиях комплексного неразрушающего контроля [8].

В этом случае используется только часть алгоритма, представленного в разделе 3.1.2, — только зависимости параметров неразрушающей информации от тока намагничивания $E_{BN} = F(I_B)$ и $E_{MAE} = F(I_B)$ из (14). Частота магнитного шума f_{BN} измеряется в общем диапазоне частот (1—100) кГц, а частота магнитного шума f_{MAE} — (10—200) кГц.

Для третьего дополнительного неразрушающего информационного параметра определяется продольная скорость ультразвука *C* в (16), которая для простоты представляется в виде безразмерного отношения скоростей *M* в контролируемом материале и в эталоне [4].

Определение критерия классификации. Для E_{BN} и E_{MAE} , которые являются основными информационными параметрами, в качестве критерия используется максимальное расстояние семейств

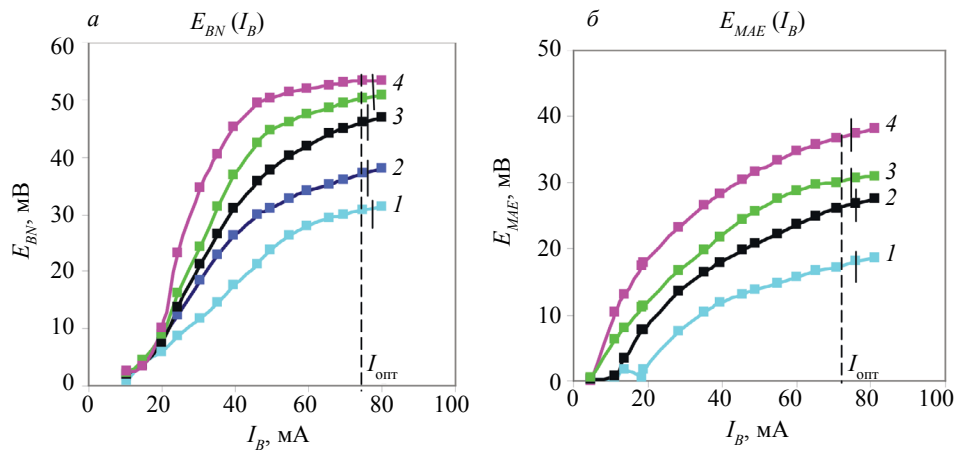


Рис. 2. Однопараметрические доверительные интервалы серий кривых $E_{BN}(I_B)$ и $E_{MAE}(I_B)$ групп сравнительных образцов из стали 40X.

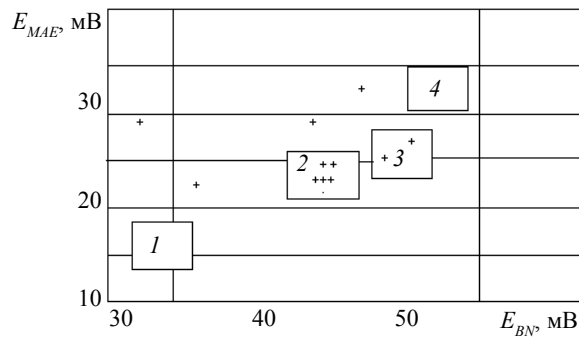


Рис. 3. Характеристические области стальных образцов. Информационные параметры — E_{BN} и E_{MAE} .

кривых от сравнительных выборок (рис. 2). Они определяют оптимальный рабочий ток $I_{\text{опт}}$ и определяются характеристические области (рис. 3). Используя информационный параметр M , формируются трехпараметрические характеристические области (рис. 5).

Графическая визуализация и запоминание характеристических областей.

Подготовка к комплексному неразрушающему контролю реальных деталей.

После определения характерных областей и критерия классификации групп сравнительных выборок начинается измерение реальных деталей. Подготовка к измерению включает в себя:

определение соответствия партии и марки деталям, подлежащим проверке, и их соответствие знаку контрольных образцов;

очистка деталей пескоструйной машины.

Метод измерения.

Для измерения E_{BN} и E_{MAE} контролируемой детали с помощью прибора DK100, показанного на рис. 1, он прижимается к преобразователю магнитного шума и пьезоэлектрическому преобразователю с постоянной силой P . Для измерения M используется то же устройство DK100 [7].

Параметры неразрушающей информации определяются на основе 3-5 независимых измерений каждой контролируемой части. Контролируемые детали классифицируются на группы с одинаковыми механическими свойствами (твёрдостью или пределом прочности) с определенной степенью вероятности.

Распечатать результаты.

Для каждого случая аналогичная методология делается для другого материала или продукта.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно методике, подготовленные сравнительные образцы из 40X подвергаются измерениям в соответствии со следующей процедурой:

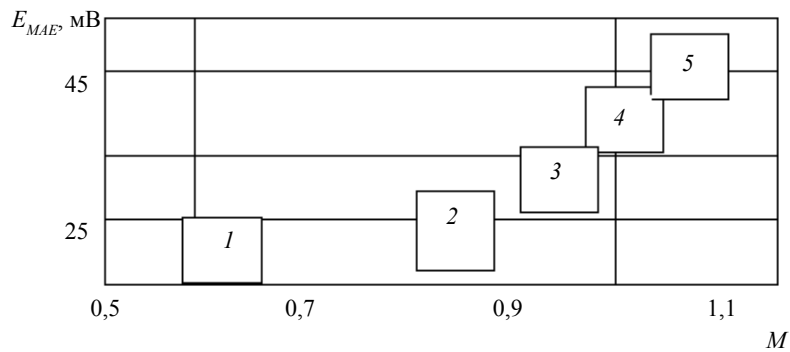


Рис. 4. Характеристичные области для двухпараметрического неразрушающего контроля чугуна. Информационные параметры — E_{BN} и M .

сканирование $E_{BN}(I_B)$ выполняется при максимальном токе намагничивания, и оптимальный ток $I_{\text{опт}} = 75$ мА автоматически определяется по кривым на рис. 2а;

одновременно сканируется и второй неразрушающий информационный параметр, магнитоакустическое напряжение $E_{MAE}(I_B)$ по кривым на рис. 2б.

Рис. 2 показывает, что значение тока намагничивания $I_{\text{опт}} = 75$ мА является достаточным для одновременного измерения обоих информационных параметров с помощью устройства DK100, показанного на рис. 1. Оптимизированный параметр $I_{\text{опт}}$ сохраняется в устройстве и выполняет k измерений для каждого сравнительного образца. Полученные данные сохраняются в памяти прибора, и можно начинать формулировку критериев классификации.

На рис. 3 показаны характеристичные области групп стандартных образцов стали 40Х, сформированные комплексным измерением параметров неразрушающей информации E_{BN} и E_{MAE} в соответствии с вышеуказанной процедурой. Перекрытие характеристичных областей является критерием неразличимости групп выборки. Аналогичные измерения были сделаны для сравнительных образцов чугуна в соответствии с процедурой, описанной выше. Результаты показаны на рис. 4 и 5.

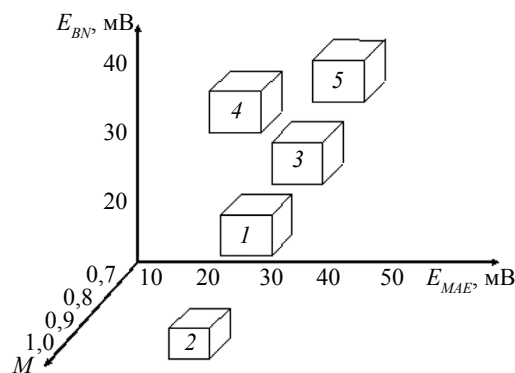


Рис. 5. Характеристичные области для трехпараметрического неразрушающего контроля чугуна. Информационные параметры — E_{BN} , E_{MAE} и M .

5.1. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 показано, что при использовании только информационного параметра E_{BN} однопараметрические доверительные интервалы групп 3 и 4 будут перекрываться и поэтому их трудно различить, а при использовании только информационного параметра E_{MAE} доверительные интервалы групп 2 и 3 перекрываются.

При комплексном использовании двух информационных параметров характеристичные области не перекрываются, (как на рис. 3), поэтому вероятность правильной классификации контролируемого материала по механическим свойствам увеличивается.

В зависимости от характеристичных областей, сформированных сравнительными образцами, проводится классификация реальных деталей или материалов в соответствии с методологи-

ей. Крестики указывают на средние значения измерений реальных образцов. Если мы выбрали группу 2 для сравнительных образцов твердости, то реальные образцы, отмеченные крестиками, которые находятся за пределами характеристичной области 2, не имеют необходимой жесткости.

Проведен сравнительный анализ результатов неразрушающего контроля групп образцов чугуна (см. табл. 1, справа). На рис. 4 показаны характеристичные области при комплексном использовании двух параметров неразрушающего контроля E_{BN} и M . Перекрывание характеристичных областей является показателем неразличимости групп, поэтому сферографические чугуны (группы 3, 4 и 5) трудно отличить по прочностным свойствам двухпараметрического неразрушающего контроля. На рис. 5 показаны характеристичные области для проведения трехпараметрического неразрушающего контроля. Анализ показывает, что при трехпараметрическом неразрушающем контроле достигается надежное разделение чугуна на группы с одинаковыми прочностными характеристиками.

6. ВЫВОДЫ

Разработанная автоматизированная система комплексного измерения информационных неразрушающих параметров: напряжения магнитного шума E_{BN} , напряжение магнитоакустической эмиссии E_{MAE} и скорости ультразвука C может быть использована для неразрушающего контроля термических и прочностных свойств образцов из конструкционной стали и литейного чугуна.

Представленные в данной работе алгоритмы позволяют разрабатывать программное обеспечение с использованием современных программных комплексов с открытым программным обеспечением — MatLab и LabView, что является необходимым условием для надежного комплексного неразрушающего контроля структуры и механических свойств машиностроительных материалов.

Работа была выполнена в рамках проекта М27/7 2018 года, финансируемого Исследовательским фондом МОН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Affi A., Azen S.* Statistical Analysis. A Computer oriented Approach. Academic Press, New York, 1982.
2. *Shibata M., Ono K.* Magnetomechanical acoustic emission — a new method for non-destructive stress measurement / Intern. Conf. of NDT, 15 May, 1981, London.
3. *Velev G., Georgiev G., Dimitrov D.* Method and device for measuring the structure of ultrasound materials / Patent RB N 85497.
4. *Velev G., Latkovski V.* A method of ultrasonic study of materials / E.J. «Technical acoustics» Sankt Peterburg, 3, 2003. <http://webcenter.ru/ejta/>
5. *Velev G., Latkovski V., Mitutsova L.* Non-destructive analysis of ferromagnetic materials by means of Barkhausen effect methods. ISBN 80-227-2076-3. Slovenska akademicka dubnica. 2004. P. 635—638.
6. *Gorkunov E., Subachev Yu., Povolotskaya A., Zadvorkin S. M.* The Influence of Elastic Deformations on the Hysteresis Properties of a Two-Layer Ferromagnet Composed of Components with Magnetostrictions of Opposite Signs // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. No. 8. P. 469—480.
7. *Kostin V., Vasilenko O., Filatenkov D., Chekasina Yu., Serbin E.* Magnetic and magnetoacoustic testing parameters of the stressed—strained state of carbon steels that were subjected to a cold plastic deformation and annealing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. V. 51. No. 8. P. 624—632.
8. *Dzudzev B., Angelov V., Zlatkov M., Kostadinov P.* Testing of Automaticized System for complex non-destructive study of metallic materials // Scientific Journal «Machines, Tehnologies, Materials». 2019. Iss. 6. P. 273—276.
9. *Ivanova Y.* Non-destructive monitoring of tensile of mild steel samples by magnetic Barkhausen and ultrasonic methods / MATEC Web of Conferences 145, 05007, 2018, DOI: 10.1051 /mateconf /201814505007
10. *Ronggao C., Li Sh., Wang Z., Wang X.* A modified residual stress dependent Jile-Atherton hysteresis model // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. V. 465. P. 578—584.
11. *Gorkunov E., Povolotskaya A., Zadvorkin S., Putilova E., Mushnikov A., Bazulin E., Vopilkin A.* Some Features in the Behavior of Magnetic and Acoustic Characteristics of Hot-Rolled 08G2B Steel under Cyclic Loading // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. P. 827—836.
12. *Rabung M., Amiri M., Becker M., Kopp M., Tschuncky R., Veile I., Weber F., Weikert-Müller M., Szielasko K.* Nondestructive Characterization of Residual Stress Using Micromagnetic and Ultrasonic Techniques, IntechOpen, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.90740