

МНОГОЧАСТОТНЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ЛИСТОВ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

© 2024 г. А.В. Егоров^{1,*}, В.В. Поляков^{1,**}

¹Алтайский государственный университет, Россия 656049 Барнаул, пр-т Ленина, 61

E-mail: *egorov@phys.asu.ru; **pvv@asu.ru

Поступила в редакцию 08.07.2024; после доработки 12.09.2024

Принята к публикации 04.10.2024

Приведены результаты исследования влияния на результаты вихретокового контроля толщины листов конструкционной стали такого параметра, как давление прижима вихретокового преобразователя к поверхности объекта контроля. Для выделения контролируемого параметра использовались полученные с помощью многочастотных измерений экспериментальные значения вносимых сопротивлений вихретокового преобразователя. Выявлены зависимости этих сопротивлений для накладного вихретокового преобразователя от силы прижима и толщины стального листа. Предложен метод обработки результатов вихретоковых измерений, обеспечивающий подавление мешающих параметров и надежное выделение контролируемого параметра.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, многочастотные вихретоковые измерения, вихретоковая толщинометрия, конструкционная сталь, метод главных компонент.

MULTI-FREQUENCY EDDY CURRENT CONTROL OF STRUCTURAL STEEL SHEETS

© 2024 A.V. Egorov^{1,*}, V.V. Polyakov^{1,**}

¹Altai state university, Russia, 656049, Barnaul, pr. Lenina, 61

E-mail: *egorov@phys.asu.ru; **pvv@asu.ru

The results of the study of the effect on the results of eddy current testing of the thickness of structural steel sheets of such a parameter as the force of pressing the eddy current sensor to the surface of the object of control are presented. To isolate the controlled parameter, experimental values of the introduced resistances of an eddy current converter obtained using multi-frequency measurements were used. The dependences of these resistances for the overhead eddy current transducer sensor on the clamping force and thickness of the steel sheet are revealed. A method for processing the results of eddy current measurements is proposed, which ensures the elimination of interfering parameters and reliable isolation of the controlled parameter.

Keywords: eddy current testing, multi-frequency eddy current measurements, eddy current thickness measurement, structural steel, principal component method.

DOI: 10.31857/S0130308224110048

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных и эффективных видов неразрушающего контроля изделий из электропроводных материалов является вихретоковый вид [1, 2]. Значительными возможностями обладает вихретоковый контроль таких важных для эксплуатации параметров, как толщина металлических листов [3, 4], в том числе с изоляционным покрытием (например, в случае трубопроводов), а также толщина защитных покрытий на металлических изделиях [5]. В то же время практическое применение вихретокового вида неразрушающего контроля связано с существенными ограничениями, снижающими точность, надежность и достоверность проводимого контроля и существенно сужающих сферу использования вихретоковых измерений. Это негативное обстоятельство обусловлено тем, что кроме естественных физических ограничений, обусловленных электрическими и магнитными свойствами конкретного материала, на результаты вихретокового контроля влияет большое число мешающих параметров различной природы. Поскольку полностью исключить такие факторы принципиально невозможно, для повышения эффективности вихретокового контроля на первый план выходит задача их подавления [6].

К числу воздействий, обусловленных ролью случайных факторов, нужно отнести сложность в условиях реального производства надежно контролировать размер зазора вихретокового преобразователя [7]. Величина этого зазора определяется кроме особенностей геометрии и состояния поверхности контролируемого изделия, формы и размера преобразователя также силой прижима преобразователя к объекту контроля. Последний параметр в условиях реально-

го производства имеет случайную природу и практически не позволяет надежно стабилизировать величину зазора. Влияние этого параметра сказывается для любых металлов и сплавов [8], однако наибольшие сложности возникают при вихретоковом контроле изделий, изготовленных из магнитных материалов, в том числе из конструкционных сталей различных марок. Это вызвано принципиальной ролью вклада магнитных свойств в измеряемые параметры вихретокового преобразователя. В случае изделий из конструкционной стали относительная магнитная проницаемость достаточно велика, вследствие этого малые вариации в величине зазора заметно сказываются на результатах вихретоковых измерений.

В настоящей работе исследуется влияние на результаты вихретокового контроля давления прижима накладного вихретокового преобразователя к поверхности изделий, изготовленных из листов конструкционной стали различной толщины. В качестве контролируемого параметра выступает толщина стальных листов.

МЕТОДИКА ВИХРЕТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Наибольшая информативность методов вихретокового вида неразрушающего контроля достигается при использовании многочастотных измерений, в которых изменение параметров вихретокового преобразователя определяется в широком интервале частот тока возбуждения. На основе этих данных строятся экспериментальные диаграммы вносимых сопротивлений вихретокового преобразователя [8, 9], которые отражают совместное влияние всех параметров, влияющих на регистрируемые сигналы в заданном интервале частот тока возбуждения вихретокового преобразователя.

В настоящей работе использовались многочастотные измерения, проводившиеся в диапазоне частот от 100 Гц до 10 кГц, что обеспечивало надежное построение диаграмм вносимых сопротивлений вихретокового преобразователя. Испытания проводились для 50 фиксированных частот из данного интервала.

Выходным обрабатываемым параметром при вихретоковых испытаниях являлось комплексное сопротивление вихретокового преобразователя. Измерение комплексного сопротивления и обработка регистрировавшегося сигнала проводились с помощью автоматизированного комплекса, структурная схема которого приведена на рис. 1а. Сигнал сложной формы, полученный путем суммирования гармонических сигналов с заданным набором частот, с генератора 1 подавался на измерительную цепь, которая состояла из последовательно включенных параметрического вихретокового преобразователя 2 и резистора 3. С помощью синхронных аналого-цифровых преобразователей 4 и 5, тактируемых импульсами с генератора 6, получали цифровые последовательности сигналов на входе и выходе измерительной цепи соответственно, которые передавались на вычислительное устройство 7 для дальнейшей обработки.

В связи с тем, что контролируемые изделия могут обладать существенно разными геометрическими параметрами, наиболее распространены в условиях производства различные варианты накладных вихретоковых преобразователей. В настоящей работе использовался параметрический преобразователь, конструктивно представлявший из себя катушку индуктивности 1 (рис. 1б), располагавшуюся в полуброневом ферритовом сердечнике 2 марки 2000МН диаметром 20 мм. Катушка была помещена в защитный корпус 3, имеющий посадочное место под пружину 4, за счет деформации которой обеспечивался различный прижим к поверхности объекта контроля.

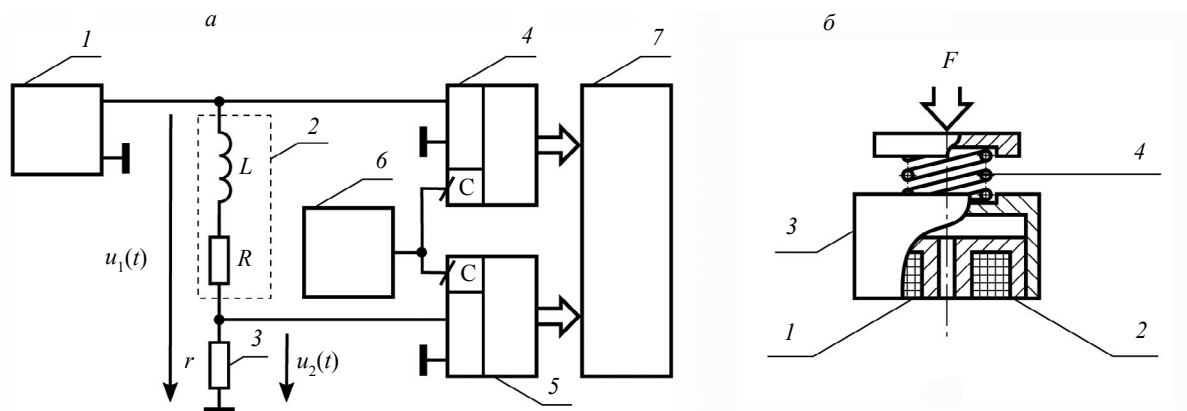


Рис. 1. Устройство для вихретоковых измерений: структурная схема (а); блок вихретокового преобразователя (б).

Непосредственно для проведения испытаний использовалась модификация многочастотного метода вихретокового контроля, предложенная авторами [10], обеспечивавшая измерение параметров вихретокового преобразователя во всем рабочем диапазоне частот ω посредством одного измерения. Для этого на вход измерительной цепи подавался сигнал специальной формы $u_1(t)$, полученный путем суперпозиции M гармонических сигналов с фиксированными циклическими частотами $\omega_1, \dots, \omega_p, \dots, \omega_M$. Выходной сигнал $u_2(t)$ имел линейчатый спектр, содержащий информацию о параметрах преобразователя на этих фиксированных частотах. Это позволяло с помощью дискретного преобразования Фурье извлечь из регистрировавшегося сигнала экспериментальные данные, необходимые для построения диаграммы вносимых сопротивлений вихретокового преобразователя.

При проведении расчетов комплексные амплитуды гармоник $\dot{U}_1(\omega_i)$ входного сигнала $u_1(t)$ представлялись в виде:

$$\dot{U}_1(\omega_i) = U_1(\omega_i) e^{j\varphi_1(\omega_i)}, \quad (1)$$

где $U_1(\omega_i)$ — амплитуда гармоники с частотой ω_i ; $\varphi_1(\omega_i)$ — ее начальная фаза. Сигнал $u_1(t)$, проходя через измерительную цепь, включавшую в себя вихретоковой преобразователь с индуктивностью L , сопротивлением потерь R и постоянный резистор с сопротивлением r , преобразовывался в выходной сигнал $u_2(t)$. Комплексные амплитуды гармоник $\dot{U}_2(\omega_i)$ выходного сигнала записывались как

$$\dot{U}_2(\omega_i) = U_2(\omega_i) e^{j\varphi_2(\omega_i)}, \quad (2)$$

где $U_2(\omega_i)$ — амплитуда гармоники с частотой ω_i ; $\varphi_2(\omega_i)$ — ее начальная фаза. Для расчета измеряемых параметров датчика использовалась связь между комплексными амплитудами гармоник входного $\dot{U}_1(\omega_i)$ и выходного $\dot{U}_2(\omega_i)$ сигналов, определявшаяся соотношением:

$$\dot{U}_2(\omega_i) = \frac{r}{r + R(\omega_i) + jX(\omega_i)} \dot{U}_1(\omega_i), \quad (3)$$

здесь $j = \sqrt{-1}$. Из этого соотношения следовали выражения для расчета реактивного $X(\omega_i) = (\omega_i)L(\omega_i)$ и активного $R(\omega_i)$ сопротивлений вихретокового преобразователя на частоте (ω_i) :

$$X(\omega_i) = r \frac{U_1(\omega_i)}{U_2(\omega_i)} \sin(\varphi_1(\omega_i) - \varphi_2(\omega_i)); \quad (4)$$

$$R(\omega_i) = r \left[\frac{U_1(\omega_i)}{U_2(\omega_i)} \cos(\varphi_1(\omega_i) - \varphi_2(\omega_i)) - 1 \right]. \quad (5)$$

Получаемые в результате измерений диаграммы вносимых сопротивлений вихретокового преобразователя представлялись в следующем виде: по оси абсцисс откладывалась величина $\Delta R/X_0$, где $\Delta R = R - R_0$ — вносимое активное сопротивление преобразователя при наличии объекта контроля (R и R_0 — активные сопротивления преобразователя с образцом и без образца соответственно); $X_0 = \omega L_0$ — реактивное сопротивления преобразователя без образца; по оси ординат откладывалась величина $\Delta X/X_0$, здесь $\Delta X = \omega(L - L_0)$ — вносимое реактивное сопротивление преобразователя; L_0 и L — соответственно индуктивность преобразователя без образца и с образцом; ω — циклическая частота соответствующей гармоники сигнала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВИХРЕТОКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Вихретоковые измерения проводились для образцов, изготовленных из углеродистой конструкционной стали марки СтЗсп. Внутренняя структура стали представлена соединением «феррит—перлит», химический состав характеризовался содержанием порядка 0,2 % углерода и до 3 % легирующих добавок (кремния, марганца, никеля, хрома, меди). Образцы изготавливались из стального прутка методом электроэрозионной резки с последующей шлифовкой поверхности и имели вид плоскопараллельных пластин диаметром 50 мм. Толщина пластин h задавалась в интервале от 0,7 мм до 1,6 мм и контролировалась микрометром с приборной погрешностью 5 мкм.

Основными материальными факторами, влияющими на результаты вихретоковых измерений, являлись относительная магнитная проницаемость μ и удельная электропроводность σ . Значение удельной электропроводности определялось с помощью четырехточечного метода и составляло $\sigma = 6,4 \pm 0,6$ МСм/м. Значение магнитной проницаемости измерялось баллистическим методом при напряженности намагничивающего поля 10 А/м и составляло $\mu = 105 \pm 7,0$. Влияние материальных факторов объекта контроля на сигнал вихретокового преобразователя оценивалось путем проведения независимых измерений на цифровом LCR-метре AM3002 при фиксированной частоте тока возбуждения $f = 120$ Гц. Измеренные значения индуктивности L и добротности Q катушки преобразователя при установке на листе стали Ст3пс толщиной $h = 1,6$ мм изменялись от 4,25 мГн до 82,4 мГн и от 0,16 до 1,5 соответственно, что отвечало изменению индуктивного сопротивления $X = \omega L$ (здесь $\omega = 2\pi f$) и активного сопротивления $R = \omega L/Q$ от 3,2 Ом до 62,1 Ом и от 20 Ом до 41,4 Ом соответственно, при этом рассчитанные значения $\Delta X/X_0$ и $\Delta R/R_0$ составляли 18,4 и 6,7 соответственно.

Полученные на описанном устройстве (см. рис. 1а) экспериментальные данные представлены на рис. 2 в виде диаграмм вносимых сопротивлений, описывающих результаты измерений для стальных листов с разной толщиной при фиксированной силе $F = 3$ Н прижима преобразователя к поверхности образца. Вид диаграмм отражает смещение экспериментальных точек при увеличении частоты из верхней части кривой в нижнюю, что связано с ростом скорости изменения магнитного потока и плотности вихревых токов в электропроводном материале и, как следствие, к уменьшению индуктивности преобразователя и сдвигу точек по оси $\Delta X/X_0$ вниз. Из рис. 2 видно, что для образцов с разными толщинами $h_1 = 0,7$ мм, $h_2 = 0,8$ мм (рис. 2а) и $h_1 = 1,4$ мм, $h_2 = 1,6$ мм (рис. 2б) экспериментальные кривые имеют разную форму. Это обусловлено тем обстоятельством, что параметры вихретокового преобразователя зависят от соотношения толщины образца и глубины проникновения электромагнитного поля преобразователя. В том случае, когда эти величины сопоставимы, вихретоковые данные чувствительны к толщине электропроводного объекта и могут использоваться для ее контроля. При увеличении величины h свыше величины, существенно превышающей глубину проникновения электромагнитного поля, диаграммы вносимых сопротивлений, соответствующие разным толщинам, будут постепенно перекрываться, прежде всего на участке высоких частот. Дальнейший рост толщины образцов практически не изменяет вид диаграмм, что накладывает естественное ограничение на применимость вихретокового контроля в задачах толщинометрии.

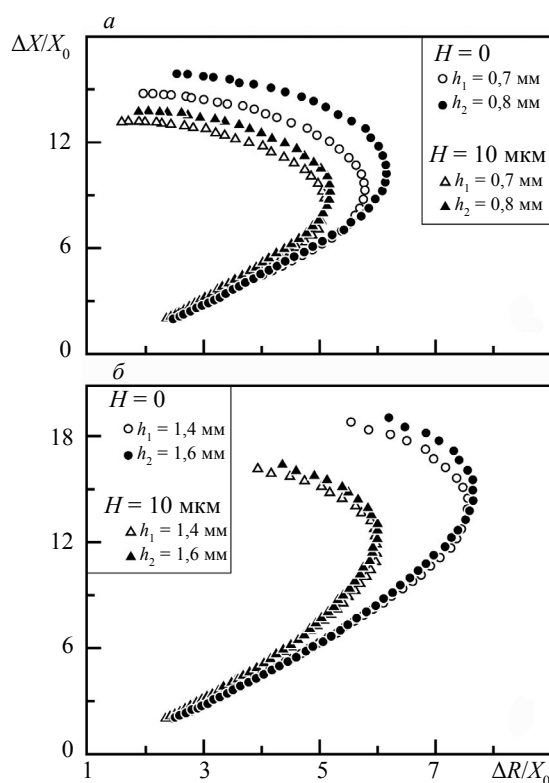


Рис. 2. Экспериментальные диаграммы вносимых сопротивлений вихретокового преобразователя для листов стали Ст3пс: толщина образцов 0,7 мм и 0,8 мм (а); толщина образцов 1,4 мм и 1,6 мм (б).

Рис. 2 также демонстрирует влияние зазора вихретокового преобразователя на вид диаграмм вносимых сопротивлений. Величина зазора задавалась тонкими диэлектрическими прокладками фиксированной толщины H . Видно, что увеличение зазора приводит к приближению линий к оси $\Delta X/X_0$ и сдвигу этих линий друг относительно друга вдоль оси абсцисс.

На рис. 3 представлено влияние давления прижима преобразователя на вид экспериментальных диаграмм вносимых сопротивлений преобразователя для образцов с близкими толщинами. Как видно из рис. 3, для диаграмм, описывавших измерения для образцов с одной и той же толщиной и разными значениями F , увеличение прижима приводит к отдалению от оси $\Delta X/X_0$. Это обусловлено влиянием, оказываемым уменьшением зазора, проиллюстрированным на рис. 2. Данный эффект наиболее заметен при низких частотах (верхняя часть диаграмм вносимых сопротивлений преобразователя). Из рис. 3 следует, что диаграмма вносимых сопротивлений, описывающая измерения для образцов с толщиной h_2 и определенной силой прижима, перекрывается с семейством диаграмм, соответствующих образцам с близкой толщиной h_1 при разных значениях силы прижима F . Это означает, что исключить такой случайный мешающий фактор, как сила прижима, и выделить непосредственно из экспериментальных данных контролируемый параметр (толщину стального листа) весьма затруднительно. В то же время, как показывает рис. 3, вид кривых, описывающих диаграммы вносимых сопротивлений при изменении частоты, для образцов с разной толщиной различается, другими словами, выявляется, что изменения толщины стальных образцов и давления прижима вихретокового преобразователя по-разному влияют на зависимость измерявшегося комплексного сопротивления преобразователя от частоты. В силу этого задачей является проведение такой обработки результатов измерений, которая обеспечивает выявление закономерностей влияния на многочастотные измерения именно контролируемого параметра.

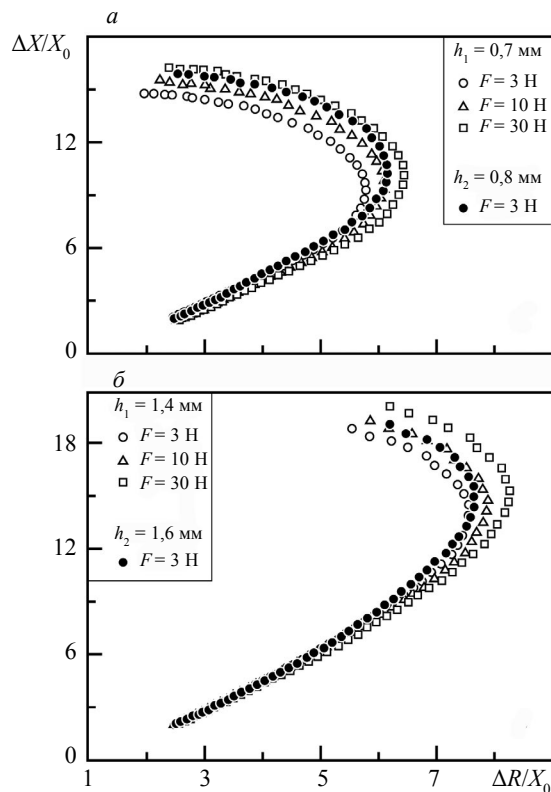


Рис. 3. Влияние прижима накладного вихретокового преобразователя на вид диаграмм вносимых сопротивлений: толщина образцов 0,7 мм и 0,8 мм (а); толщина образцов 1,4 мм и 1,6 мм (б).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В задачах выявления закономерностей в полученных экспериментальных данных успешно проявили себя методы обработки, основанные на математическом аппарате многомерного анализа данных. Этот подход был успешно применен при вихретоковом контроле различных экс-

плуатационных характеристик металлических материалов [11—13]. Поэтому для разделения результатов вихретоковых измерений, полученных для листов стали СтЗсп с разными толщинами и различиями в давлении прижима вихретокового преобразователя к объекту контроля, был привлечен подход, основанный на обработке экспериментальных диаграмм вносимых сопротивлений преобразователя с помощью метода главных компонент [14].

В соответствии с методом главных компонент вся совокупность измеренных комплексных сопротивлений для использованного дискретного набора частот, формирующая экспериментальную диаграмму для одного образца с заданными толщиной и давлением прижима, определяла многомерные координаты соответствующей точки в многомерном пространстве. Поскольку при измерении определялись относительные изменения двух сопротивлений преобразователя — активного и реактивного, число координат n , определявшее размерность этого пространства, составляло $n = 2M$, где M — число частот в наборе (в настоящей работе $M = 50$). Число экспериментальных точек k , образующих многомерное пространство, равнялось числу измеренных диаграмм вносимых сопротивлений преобразователя. Метод главных компонент позволял выявить закономерности распределения этих точек в многомерном пространстве, отражающие влияние основных факторов на результаты измерений. Точки, описывавшие близкие по значению измеренные характеристики, образовывали кластеры, расположенные в одной области многомерного пространства, а точки, соответствовавшие измерениям с отличавшимися данными, располагались в другой области и образовывали другие кластеры. Полученные закономерности представлялись в виде проекций на главные компоненты — оси многомерного пространства, вдоль которых происходили наибольшие изменения в массиве экспериментальных данных.

При проведении математической обработки переход к главным компонентам осуществлялся следующим образом. Вначале создавалась исходная матрица \mathbf{Z} размерности $k \times n$ в виде:

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{k1} & \cdots & z_{kn} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где k — число диаграмм; n — число координат одной диаграммы; строка z_{i1}, \dots, z_{in} содержит все координаты i -й диаграммы. На следующем шаге элементы матрицы центрировались, а именно, рассчитывались значения x_{ij} :

$$x_{ij} = z_{ij} - \bar{z}_j, \quad (7)$$

где \bar{z}_j — среднее значение j -й координаты, рассчитываемое по формуле:

$$\bar{z}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k z_{ij}. \quad (8)$$

Матрица \mathbf{X} центрированных значений записывалась как

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{k1} & \cdots & x_{kn} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Поскольку элементы z_{ij} , входящие в матрицу \mathbf{Z} , являются безразмерными величинами, то и элементы x_{ij} матрицы \mathbf{X} также размерности не имеют. Разложение на главные компоненты проводилось путем представления матрицы \mathbf{X} в виде:

$$\mathbf{X} = \mathbf{T} \mathbf{P}^T = \begin{pmatrix} t_{11} & \cdots & t_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{k1} & \cdots & t_{kn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{n1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{1n} & \cdots & p_{nn} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где \mathbf{T} — матрица размерности $k \times n$; \mathbf{P}^T — транспонированная матрица размерности $n \times n$. Элементы t_{i1}, \dots, t_{in} матрицы \mathbf{T} являются координатами i -й диаграммы в осях главных компонент, элементы матрицы \mathbf{P} определяют направления j -й главной компоненты. Для совместного нахождения матриц \mathbf{T} и \mathbf{P} использовался итерационный алгоритм NIPALS [14, стр. 152], в рамках которого главные компоненты определяются последовательно одна за другой вплоть до

главной компоненты с заданным номером $1 \leq m \leq n$. В этом случае на m -й итерации матрица \mathbf{X} представляется следующим образом:

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}^{(m)} \left(\mathbf{P}^{(m)} \right)^T + \mathbf{E}^{(m)} = \begin{pmatrix} t_{11} & \cdots & t_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ t_{k1} & \cdots & t_{km} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{n1} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{1m} & \cdots & p_{nm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_{11}^{(m)} & \cdots & e_{1n}^{(m)} \\ \vdots & & \vdots \\ e_{k1}^{(m)} & \cdots & e_{kn}^{(m)} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $\mathbf{E}^{(m)}$ — матрица остатков, элементы $e_{ij}^{(m)}$ которой не были описаны первыми m главными компонентами. На следующих итерациях на ее основе вычисляются элементы $t_{1,m+1}, \dots, t_{k,m+1}$ новой матрицы $\mathbf{T}^{(m+1)}$ и соответствующие им элементы $p_{1,m+1}, \dots, p_{n,m+1}$ матрицы $\mathbf{P}^{(m+1)}$.

Результаты проведенной математической обработки представлены на рис. 4 на плоскостях первых главных компонент ГК1—ГК2 (рис. 4а) и ГК2—ГК3 (рис. 4б). На рис. 4а приведены данные для образцов с толщинами $h_1 = 0,7$ мм и $h_2 = 0,8$ мм, на рис. 4б — с толщинами $h_1 = 1,4$ мм и $h_2 = 1,6$ мм, при этом сила прижима изменялась в интервале от 1 до 50 Н. Как следует из рис. 4, все экспериментальные данные разбились на два линейно разделимых кластера, каждый из которых отвечал определенной толщине стального листа. Разброс точек внутри каждого кластера определялся разными значениями давления прижима накладного вихретокового преобразователя к поверхности образца. Таким образом, воздействуя на результаты измерений двух разных влияющих факторов — толщины листа и давления прижима — отчетливо разделились. Это означает, что использованный метод обработки обеспечивает возможность выделения контролируемого параметра (толщины стального листа) в условиях случайных вариаций зазора, вызванных различием в прижиме преобразователя.

Для апробации предложенного подхода был применен следующий эксперимент. Для стальных листов толщиной h_1 с различными давлениями прижима преобразователя экспериментально строилась серия диаграмм вносимых сопротивлений преобразователя. По этим данным рассчитывались матрицы \mathbf{T}_1 и \mathbf{P}_1 , которые характеризовали образцы с толщиной h_1 .

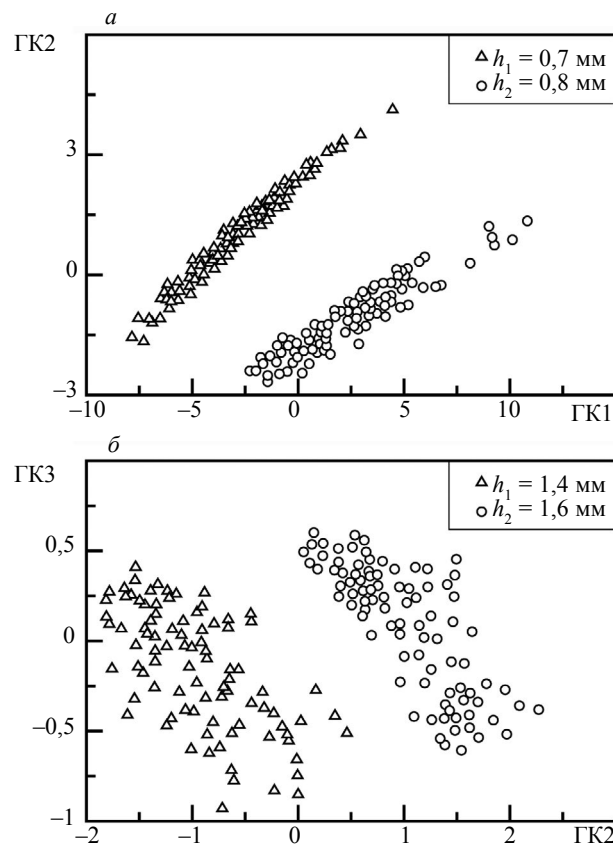


Рис. 4. Проекция результатов вихретоковых измерений на плоскости главных компонент: толщина образцов 0,7 мм и 0,8 мм (а); толщина образцов 1,4 мм и 1,6 мм (б).

Аналогичные измерения и расчеты проводили для образцов с толщиной h_2 , которые характеризовались матрицами T_2 и P_2 . Элементы матриц T_1 и T_2 описывали кластеры точек многомерного пространства в координатах, задаваемых матрицами P_1 и P_2 соответственно. Далее осуществлялись измерения на «неизвестных» образцах, не используемых в указанных построениях. Для каждого такого образца полученная диаграмма записывалась в виде вектора-строки x :

$$x = (z_1 - \bar{z}_1, \dots, z_n - \bar{z}_n), \quad (12)$$

где z_1, \dots, z_n — координаты экспериментальных точек диаграммы, а $\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_n$ — средние значения этих координат, полученные при построении соответствующих матриц T и P . Затем на основе уравнения (10) переходили к пространству главных компонент, в котором диаграмма вихретокового преобразователя для «неизвестного» образца представлялась в виде вектора-строки t :

$$t = x (P^T)^{-1} \quad (13)$$

с координатами t_1, \dots, t_n . Этот вектор определял координаты точки в многомерном пространстве для «неизвестного» образца. По этим данным рассчитывалось расстояние Махаланобиса D :

$$D^2 = t(T^T T)^{-1} t^T. \quad (14)$$

Расчеты по формулам (12)—(14) проводили отдельно для толщин h_1 и h_2 и определяли D_1 и D_2 соответственно.

Таким образом, для двух групп стальных образцов с толщинами h_1, h_2 и различными давлениями прижима преобразователя были получены «расстояния» D_1 и D_2 от центров соответствующих кластеров в многомерном пространстве до точки, описывавшей конкретный образец. Полученные результаты представлены на плоскости D_1 — D_2 на рис. 5, на котором штриховыми линиями обозначен типичный уровень значимости $\alpha = 5\%$. Здесь I — область данных, соответствующая образцам толщиной $h_1 = 0,7$ мм (рис. 5а) и $h_1 = 1,4$ мм (рис. 5б); II — область данных, соответствующая образцам толщиной $h_2 = 0,8$ мм (см. рис. 5а) и $h_2 = 1,6$ мм (рис. 5б).

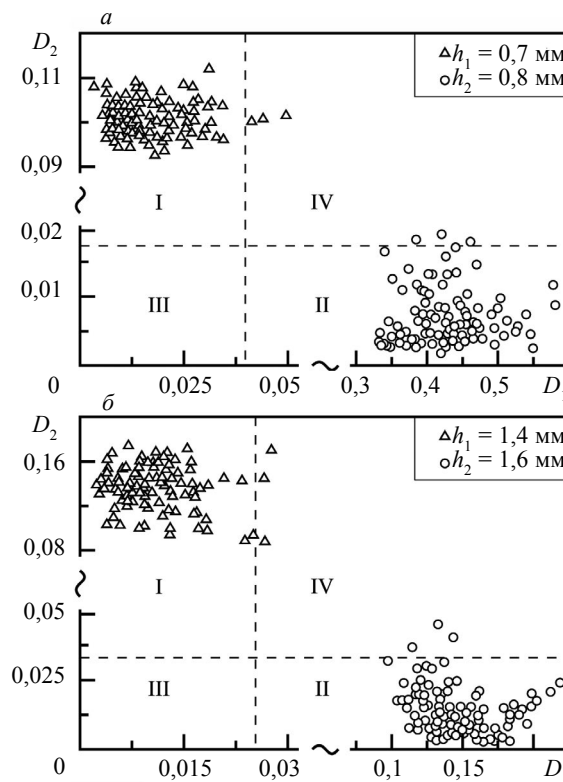


Рис. 5. Результаты вихретокового контроля толщины листов стали СтЗсп: толщина образцов 0,7 мм и 0,8 мм (а); толщина образцов 1,4 мм и 1,6 мм (б).

= 1,6 мм (см. рис. 5б), отсутствие точек в области III отражает то обстоятельство, что результаты измерений для близких толщин не перекрывались (см. рис. 4а, б), точки в области IV интерпретируются как отвечающие выбранному уровню значимости выбросы. Как видно из рис. 5, практически все точки, соответствовавшие вихретоковым измерениям для образцов с толщиной h_1 , располагались в области I, а для образцов с толщиной h_2 — в области II. Это означает, что проведенный многочастотный вихретоковый контроль с последующей обработкой результатов измерений позволяет подавить влияние такого мешающего параметра, как давление прижима.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучено влияние такого фактора, как давление прижима накладного вихретокового преобразователя на результаты многочастотного вихретокового контроля толщины листов конструкционной стали. На примере углеродистой стали марки СтЗсп выявлены закономерности изменения вносимых сопротивлений вихретокового преобразователя в зависимости от толщины листа стали и прижима преобразователя к его поверхности, влияющего на зазор вихретокового преобразователя. Предложен метод обработки сигнала вихретокового преобразователя, обеспечивающий выделение контролируемого параметра из всего массива многочастотных вихретоковых измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль / Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2-х кн. / Кн. 2. Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский и др. Вихретоковый контроль. М.: Машиностроение, 2003. 688 с.
2. *García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E.* Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing // *Sensors*. 2011. V. 11. Is. 3. P. 2525—2565. DOI: 10/3390/s110302525
3. *Pedersen L.B., Magnussion K.A., Zhengsheng Y.* Eddy Current Testing of Thin Layers Using Co-planar Coils // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2000. V. 12. Is. 1. P. 53—64. DOI: 10.0007/s001640000005
4. *Sikora R., Chady T., Gratkowski S., Komorowski M., Stawicki K.* Eddy Current Testing of Thick Aluminum Plates with Hidden Cracks // *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*: V. 22. No.1. AIP Conference Proceedings. 2003. V. 657. P. 427—434. DOI: 10.1063/1.1570167
5. *Егоров А.В., Поляков В.В., Борцова Я.И.* Применение проекционных методов многомерного анализа в вихретоковой толщинометрии // *Измерительная техника*. 2019. № 7. С. 49—53. DOI: 10.32446/0368-1025it.2019-7-49-53
6. *Egorov A.V., Kucheryavskiy S.V., Polyakov V.V.* Resolution of Effects in Multi-frequency Eddy Current Data for Reliable Diagnostics of Conductive Materials // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2017. V. 160. P. 8—12. DOI: 10.1016/j.chemolab.2016.11.007
7. *Lu M., Huang R., Chen L., Peyton A., Yin W., Meng X.* Lift off Tolerant Pancake Eddy-current Sensor for the Thickness and Spacing Measurement of Nonmagnetic Platex // *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. 2021. V. 70. P. 9237995. DOI: 10.1109/TIM.2020.3033377
8. *Kucheryavskiy S., Egorov A., Polyakov V.* Coupling Analytical Models and Machine Learning Methods for Fast and Reliable Resolution of Effects in Multifrequency Eddy-current Sensors // *Sensors*. 2021. V. 21. Is. 2. P. 1—16. Article 618. DOI: 10.3390/s21020618
9. *Атавин В.Г., Терехов А.И., Исхужин Р.Р., Куранов В.В.* Построение и анализ годографов для исследования электрофизических параметров объектов с использованием подключаемых вихретоковых преобразователей // *Дефектоскопия*. 2013. № 10. С. 53—60.
10. *Егоров А.В., Поляков В.В., Лепендин А.А., Грачева Я.И.* Применение сигналов специальной формы в многочастотных вихретоковых измерениях // *Автометрия*. 2017. Т. 53. № 3. С. 28—35. DOI: 10.15372/AUT20170304
11. *Shokralla S., Morelli J.E., Krause T.W.* Principal Components Analysis of Multifrequency Eddy Current Data Used to Measure Pressure Tube to Calandria Tube Gap // *IEEE Sensors Journal*. 2016. V. 16. No. 9. P. 3147—3154.
12. *Sophian A., Tian G.Y., Taylor D., Rudlin J.* A Feature Extraction Technique Based on Principal Component Analysis for Pulsed Eddy Current NDT // *NDT E International*. 2003. V. 36. Is. 1. P. 37—41. DOI: 10.1016/S0963-8695(02)00069-5
13. *BinFeng Y., FeiLu L., Dan H.* Research on Edge Identification of a Defect Using Pulsed Eddy Current Based on Principal Component Analysis // *NDT E International*. 2007. V. 40. Is. 4. P. 294—299. DOI: 10.1016/j.ndteint.2006.12.005
14. *Эсбенсен К.* Анализ многомерных данных. Избранные главы / Пер. с англ. С.В. Кучерявского. Черноголовка: Изд-во ИПХФ РАН, 2005. 157 с.

REFERENCES

1. Nerazrushayushchii kontrol / Spravochnik (Nondestructive Testing. Handbook). V.V. Klyuev. Eds. Moscow: Mashinostroenie, 2003. V. 2. 688 p.
2. *García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E.* Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing // *Sensors*. 2011. V. 11. Is. 3. P. 2525—2565. DOI: 10/3390/s110302525
3. *Pedersen L.B., Magnusson K.A., Zhengsheng Y.* Eddy Current Testing of Thin Layers Using Co-planar Coils // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2000. V. 12. Is. 1. P. 53—64. DOI: 10.0007/s001640000005
4. *Sikora R., Chady T., Gratkowski S., Komorowski M., Stawicki K.* Eddy Current Testing of Thick Aluminum Plates with Hidden Cracks // *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*: V. 22. No.1. AIP Conference Proceedings. 2003. V. 657. P. 427—434. DOI: 10.1063/1.1570167
5. *Egorov A.V., Polyakov V.V., Bortsova Y.I.* The Use of Projection Methods of Multivariate Analysis in Eddy Current Thickness Measurement // *Measurement Techniques*. 2019. V. 62. P. 629—635. DOI: 10.1007/s11018-019-01670-6
6. *Egorov A.V., Kucheryavskiy S.V., Polyakov V.V.* Resolution of Effects in Multi-frequency Eddy Current Data for Reliable Diagnostics of Conductive Materials // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2017. V. 160. P. 8—12. DOI: 10.1016/j.chemolab.2016.11.007
7. *Lu M., Huang R., Chen L., Peyton A., Yin W., Meng X.* Lift off Tolerant Pancake Eddy-current Sensor for the Thickness and Spacing Measurement of Nonmagnetic Platex // *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. 2021. V. 70. P. 9237995. DOI: 10.1109/TIM.2020.3033377
8. *Kucheryavskiy S., Egorov A., Polyakov V.* Coupling Analytical Models and Machine Learning Methods for Fast and Reliable Resolution of Effects in Multifrequency Eddy-current Sensors // *Sensors*. 2021. V. 21. Is. 2. P. 1—16. Article 618. DOI: 10.3390/s21020618
9. *Atavin V.G., Terekhov A.I., Iskhuzhin R.R., Kuranov V.V.* Plotting and analysis of hodographs for studying the electrophysical parameters of objects using attachable eddy-current transducers // *Defektoskopiya*. 2013. No.10. C. 53—60.
10. *Egorov A.V., Polyakov V.V., Lependin A.A., Gracheva Ya.I.* Using Signals of Special Form in Multi-Frequency Eddy Current Testing // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2017. V. 53. No. 3. P. 223—229. DOI: 10.3103/S8756699017030049
12. *Sophian A., Tian G.Y., Taylor D., Rudlin J.* A Feature Extraction Technique Based on Principal Component Analysis for Pulsed Eddy Current NDT // *NDT E International*. 2003. V. 36. Is. 1. P. 37—41. DOI:10.1016/S0963-8695(02)00069-5
13. *BinFeng Y., FeiLu L., Dan H.* Research on Edge Identification of a Defect Using Pulsed Eddy Current Based on Principal Component Analysis // *NDT E International*. 2007. V. 40. Is. 4. P. 294—299. DOI: 10.1016/j.ndteint.2006.12.005
14. *Esbensen K.* Multivariate Data Analysis. Selected chapters / Translated from the English by S.V. Kucheryavskiy. Chernogolovka: Publishing house of the IPHF RAS, 2005. 157 p.