

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

*Исследование характеристик
проводящих конструкционных
материалов РЗА
методом вихревых токов*

Утверждено
редакционно-издательским
советом института
в качестве методических указаний
к лабораторным работам

УДК 535.24 (083.96)

Методические указания содержат краткие теоретические сведения и необходимые рекомендации к выполнению четырех лабораторных работ по курсу «Материалы электронной техники» (раздел «Неразрушающие методы контроля качества материалов и изделий»).

Указания предназначаются студентам специальности 0705 радиотехнического факультета дневного и вечернего отделений. Рекомендуются кафедрой «Электротехника».

Составитель канд. техн. наук доц. В. П. Буров

Рецензенты: канд. техн. наук доц. А. В. Зеленский,
И. П. Федорова

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО РАЗДЕЛУ «НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ»:

А. Исследование глубины проникновения вихревых токов в металлы.

Б. Исследование зависимостей выходных сигналов вихретоковых преобразователей от геометрических и электрофизических параметров конструкционных материалов.

В. Высокоточные измерения удельной электрической проводимости металлов.

Г. Контроль материалов на сплошность.

Цель работ: исследование возможности использования метода вихревых токов для неразрушающего контроля качества конструкционных материалов РЭА, изучение особенностей воздействия электромагнитной волны на проводящий материал, определение характеристик материалов с помощью метода вихревых токов.

З а д а н и я:

1. Построить график зависимости показания прибора от толщины металлических листов и частоты электромагнитного поля. Определить глубину проникновения вихревых токов.

2. Построить графики изменения удельной электрической проводимости образцов от частоты возбуждающего поле тока. Экспериментально определить удельную электрическую проводимость образцов материалов и сравнить со справочными данными.

3. Построить графики зависимости показания прибора от расстояния вихретокового преобразователя до контролируемого образца.

4. Представить теоретическую интерпретацию полученных экспериментальных результатов.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

1. ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

В 1931 году М. Фарадей, открыв явление электромагнитной индукции, объяснил такие явления, как магнетизм вращения и нагревание металлических тел при быстром вращении их в магнитном поле, влиянием вихревых токов, т. е. токов, которые замыкаются

внутри металлического массива. Во многих случаях возникновение вихревых токов не приносит пользы. Необходимо защищаться от вихревых токов, возникающих в магнитопроводах трансформаторов электродвигателей и других электрических аппаратов, так как при этом выделяется тепло. Однако известна область, где свойства вихревых токов находят свое полезное использование, в частности, для неразрушающего контроля материалов и деталей из них [1].

2. ПРИРОДА ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА

Переменное электромагнитное поле порождает вихревые токи в проводниках, которые создают свое поле. Это вторичное поле действует, в соответствии с правилом Ленца, навстречу полю возбуждения.

Чем лучше проводник пропускает токи, тем ближе по величине к первоначальному встречное магнитное поле. В идеальный проводник, так называемый сверхпроводник, электромагнитная волна вообще не проникает, вихревые токи текут в бесконечно малом по толщине слое металла. Возникающие на поверхности проводника вихревые токи создают своеобразный экран полю возбуждения. Этот экран уменьшает их собственную силу по мере увеличения расстояния от поверхности проводника.

Если установить катушку индуктивности на металлическую поверхность различной толщины, подключить ее к куметру, то показания прибора будут иметь вид (рис. 1).

Из опыта следует (рис. 1,б), что при определенной толщине T набора листов и частоте f питающего тока дальнейшее их увеличение не изменяет показания (α) приборов. Такая предельная толщина набора будет характеризовать реальную глубину проник-

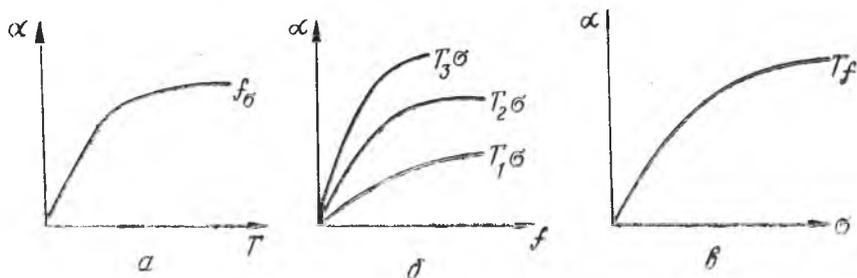


Рис. 1. Зависимость показаний измерительного прибора с вихретоковым преобразователем: а — от толщины T набора металлических листов при постоянных значениях частоты f питающего тока и удельной электрической проводимости материала σ ; б — от частоты питающего тока при различных значениях произведения толщины материала на его удельную электрическую проводимость; в — от удельной электрической проводимости при постоянной толщине набора листов и частоте возбуждающего поля

новения вихревых токов. Изменяя удельную электрическую проводимость σ образцов и выдерживая постоянной толщину набора, можно построить кривую $\alpha = \varphi_1(\sigma)$ (рис. 1,в). Если подобрать масштаб, то эта кривая совпадет с кривой $\alpha = \varphi_2(f)$. Это означает, что обе величины f и σ одинаково влияют на изменения вносимых сопротивлений.

Итак, на значение вихревого тока влияют: удельная электрическая проводимость и магнитная проницаемость материала, толщина образца и частота питающего тока.

Это основные параметры, которыми оперируют в теории вихревых токов.

В теории взаимодействия катушек с электропроводящими материалами приходится, кроме того, учитывать размеры объектов, диаметр, высоту катушек и тот факт, что в воздухе напряженность электромагнитного поля по оси катушки спадает очень быстро. На расстоянии, равном нескольким диаметрам катушки, она фактически равна нулю.

При объяснении поверхностного эффекта электротехника опирается на несколько важных формул, полученных с помощью анализа закономерностей взаимодействия электромагнитной волны и металла. Запишем эти уравнения для решения задачи взаимодействия с металлом любой, в том числе плоской, электромагнитной волны [2]:

$$\text{rot } H = \sigma E = j \quad \text{— закон полного тока,} \quad (1)$$

$$\text{rot } E = -j \omega \mu H \quad \text{— закон электромагнитной индукции,} \quad (2)$$

где H — напряженность магнитного поля;

E — напряженность электрического поля;

j — плотность тока.

Решать эти уравнения не будем, отметим лишь, что в воздухе, когда $\sigma = 0$, вихрь магнитного поля породить электрический ток не может.

Напряженность магнитного поля (при условии, что на поверхности проводящей среды она равна некоторому значению H_0) равна

$$H_0 = H_0 e^{V - j \sigma \mu \omega z} + H_0 e^{V j \sigma \mu \omega z}. \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что в этом случае существуют падающие и отраженные волны.

Вторая часть выражения (3) используется тогда, когда речь идет о тонких проводниках. Если имеется в виду достаточно толстый проводник, то вторую часть выражения отбрасывают. В этом случае говорят, что имеется лишь прямая волна, отраженной электромагнитной волны нет.

Мгновенное значение напряженности магнитного поля

$$H = H_0 e^{-\alpha_0 z} \sin(\omega t - \alpha_0 z + \varphi).$$

Множитель $H_0 e^{-\alpha_0 z}$ характеризует изменение амплитуды, а множитель $\sin(\omega t - \alpha_0 z + \varphi)$ — изменение фазы волны, проникающей в глубь материала. Фаза плоской электромагнитной волны в любой плоскости, параллельной поверхности раздела, постоянна.

Величину $\sqrt{j\omega\mu\sigma}$ называют постоянной вихревых токов. Вещественная ее часть (α_0) позволяет определить глубину проникновения магнитной составляющей поля и глубину проникновения в проводник вихревых токов.

Под глубиной проникновения δ вихревых токов понимают расстояние z , на котором амплитуда вихревых токов уменьшается в «e» раз. При этом $H_0 e^{-\alpha_0 \delta} = H_0/e$. Поэтому $\delta = 1/\alpha_0$. Ослабление тока на глубине δ равно 1 Нп.

Расстояние λ , на котором фаза волны изменяется на 2π , определяется из условия $\lambda = \frac{2\pi}{\alpha_0}$, где

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}. \quad (6)$$

Это расстояние называют длиной волны в металле, на нем волна затухает в 536 раз, т. е. до 0,00187 от ее значения на поверхности.

Численные значения глубин проникновения вихревых токов на трех частотах для некоторых материалов с заданными значениями σ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Металл	σ , МСим/м при 20°C	Глубина проникновения вихревых токов, мм		
		50 Гц	10 кГц	1 МГц
Медь	57,0	9,4	0,66	0,006
Алюминий	36,0	12,4	0,84	0,084
Цинк	16,7	17,7	1,24	0,124
Латунь	13,5	19,5	1,37	0,137
Олово	8,3	25,0	1,75	0,175
Свинец	4,7	33,0	2,30	0,230
Железо ($\mu = 200$)	25,0	3,3	0,24	0,024
Сталь ($\mu = 2000$)	54,0	1,3	0,09	0,009

Приводимое в табл. 1 расчетное значение σ без оговорок используют для практического анализа взаимодействия катушек сравнительно большого диаметра с плоским металлическим телом достаточно большой толщины. Напряженность поля реальных катушек в воздухе уменьшается очень быстро. Причем это уменьшение зависит от радиуса и высоты намотки катушек. Если высота h

и диаметр намотки катушек D соответствует условию $0,5 < h/D < 2$, то ослабление поля вдоль оси катушки достаточно точно учитывается множителем $e^{-xh/D}$ и реальная глубина проникновения вихревых токов для такой катушки $\delta_p = 3\delta$. Заметим, что в плоском металлическом массиве электромагнитная волна затухает слабее, чем в прутке на таком же расстоянии от поверхности.

При переходе электромагнитной волны из воздуха в металл важную роль играет относительный показатель преломления P , который равен отношению длины волны в воздухе к длине волны в материале:

$$P = \lambda/\lambda_1. \quad (7)$$

Напомним, что в диэлектрике $P = \sqrt{\epsilon}$.

Если P велико, то независимо от угла падения угол преломления электромагнитной волны близок к нулю. Это значит, что какова бы ни была форма электромагнитного поля в воздухе, оно будет распространяться в металле нормально к поверхности раздела и вихревые токи будут течь в плоскости, параллельной этой поверхности.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ

Вихревые токи нашли применение при контроле за размером изделий, чистотой обработки, отделкой, состоянием покрытий, при проверке соответствия марки материала, его склонности к коррозии, правильности выполнения предписанных режимов механической и термической обработки. При этом контролируют температуру нагрева и давление при прессовании, время выдержки, температуру закалочной печи и среды для охлаждения, время переноса детали из печи в закалочную ванну при термообработке и т. д. Многие из этих контрольных операций осуществляют с помощью электромагнитного метода неразрушающих испытаний (метода вихревых токов).

Метод вихревых токов может быть использован для измерения удельной электрической проводимости поверхностных слоев ферромагнитных металлов, а также для контроля тех свойств металлов, которые однозначно связаны с σ . Поскольку σ металлов зависит от химических свойств и структурного состава, метод вихревых токов находит успешное применение для сортировки сплавов по маркам, для контроля качества термической обработки и т. п.

Изменение физических и механических параметров металлов может быть связано с его поверхностной твердостью, степенью обезуглероживания, глубиной и качеством термохимических слоев. Нарушение сплошности в поверхностном слое металла препятствует прохождению токов, поэтому электромагнитный метод пригоден

для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов типа трещин, раковин даже под слоем грунта, лака, краски. Величина вихревых токов зависит от диаметра контролируемых прутков, от толщины стенок труб, листов, поэтому метод пригоден для измерения этих величин. На величину вихревых токов влияет также расстояние между катушкой датчика и металлом. Это обуславливает применение метода для контроля толщины лакокрасочных и других неэлектропроводящих покрытий на металлах.

4. СУЩНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Явление при контроле методом вихревых токов аналогично явлению в индуктивно связанных контурах. Известно, что два элемента называются индуктивно связанными в том случае, если изменение тока в одном из элементов приводит к появлению э.д.с. в другом. Возникающую силу называют э.д.с. магнитной индукции. Эта сила возникает при наличии двух катушек, находящихся на сравнительно близком расстоянии между собой. Электрическая близость этих катушек характеризуется коэффициентом связи

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (8)$$

где M — взаимная индукция цепи;

$L_1 L_2$ — индукция на каждой катушке.

Величина $k < 1$, так как из-за наличия рассеяния магнитного потока витки данной катушки сцепляются с меньшим потоком другой катушки. Изменяя расстояние между катушками, можно варьировать величину индуктивной связи. При контроле электромагнитным методом вместо вторичной катушки к первичной подносится контролируемый металл, в котором, как было показано выше, возникающая э.д.с. создает вихревые токи.

Контроль параметров металлов методом вихревых токов основан на измерении обратного действия этих методов на возбуждающую (первичную) или дополнительную (называемую измерительной) катушку. Испытываемый металл удобно представить как вторичную катушку, включенную на некоторое кажущееся сопротивление. То воздействие, которое оказывает испытываемый металл на возбуждающую катушку, заменяется воздействием на нее вторичной катушки. Если пренебречь емкостью, распределенной между витками катушек, то эквивалентная схема будет иметь вид (рис. 2).

Она состоит из первичной возбуждающей катушки с активным сопротивлением $R_{к1}$, индуктивности L_1 и вторичной катушки с $R_{к2}$ и L_2 . Эта катушка нагружена сопротивлением, активная составляющая которого равна R , а индуктивная X_2 . Введем обозначение:

$$\omega L_1 = X_1, \quad R_{к2} + R = R_{\text{э.к.}}, \quad \omega L_2 + X_2 = X_{\text{э.к.}}. \quad (9)$$

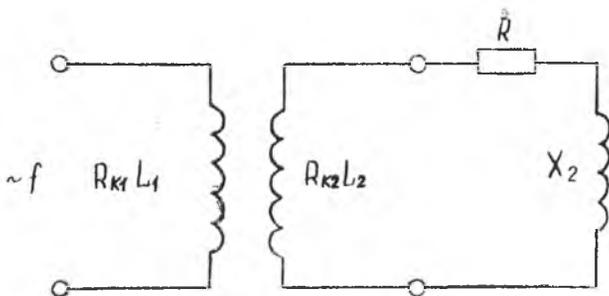


Рис. 2. Эквивалентная схема вихревого преобразователя.

Для обоих контуров, исходя из второго закона Кирхгофа, имеем

$$\begin{aligned} R_{K1} I_1 + j X_1 I_1 - j \omega M I_2 &= U_1, \\ R_{ЭКВ} I_2 + j X_{ЭКВ} \cdot I_2 - j \omega M I_1 &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Решая уравнение (10), получим

$$I_1 = \frac{U_1}{R_{K1} + \frac{\omega^2 M^2}{R_{ЭКВ}^2 + X_{ЭКВ}^2} R_{ЭКВ} + j \left(X_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_{ЭКВ}^2 + X_{ЭКВ}^2} X_{ЭКВ} \right)}. \quad (11)$$

Из структуры выражения следует, что схема может быть заменена эквивалентной с сопротивлениями $R_{K1} + R_{ВН}$ и $X_1 + X_{ВН}$, где

$$R_{ВН} = \frac{\omega^2 M^2}{R_{ЭКВ}^2 + X_{ЭКВ}^2} R_{ЭКВ}; \quad X_{ВН} = \frac{\omega^2 M^2}{R_{ЭКВ}^2 + X_{ЭКВ}^2} X_{ЭКВ}, \quad (12)$$

где $R_{ВН}$ и $X_{ВН}$ — вносимые активные и индуктивные сопротивления.

Таким образом, при наличии контролируемого металла активное сопротивление катушки (в случае немагнитного металла) уменьшается на величину $X_{ВН}$. О величине вихревых токов принято судить по изменению активной и индуктивной составляющих кажущегося сопротивления возбуждающей катушки или по изменению напряжения на измерительной катушке, находящейся вблизи возбуждающей, или по фазе этого напряжения.

Двухкатушечный вихревой преобразователь называется трансформаторным преобразователем. Однокатушечный преобразователь называется параметрическим.

Разновидностью трансформаторного преобразователя является дифференциальный трансформаторный преобразователь (рис. 3).

Дифференциальный трансформаторный преобразователь имеет четыре обмотки, две из которых (первичные) включены последо-

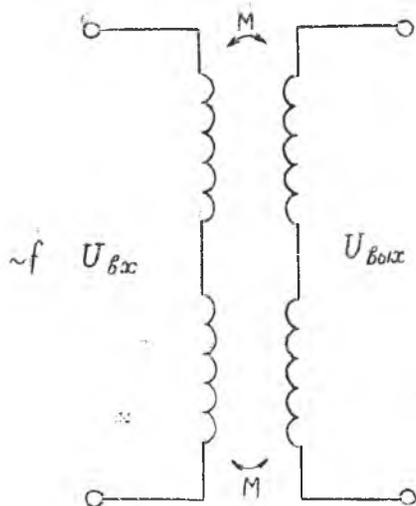


Рис. 3. Эквивалентная схема дифференциального трансформаторного вихретокового преобразователя

вательно согласно, две другие (вторичные) — последовательно встречно. При этом в балансе на холостом ходу, т. е. вдали от металла, на выходе преобразователя можно получить напряжение, равное или близкое к нулю. При поднесении преобразователя к металлу э.д.с. одной из вторичных катушек уменьшается, что приводит к появлению разностного сигнала $U_{\text{вых}} \neq 0$. По параметрам $U_{\text{вых}}$ (амплитуде и фазе) судят о величине удельной электрической проводимости металла, его толщине и других параметрах.

5. ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ МЕТАЛЛОВ

Рассмотренный ранее метод определения удельной электрической проводимости удобен тем, что он не требует непосредственного гальванического контакта с объектом измерения. Однако этот метод имеет и немаловажный недостаток: сравнительно малая точность ввиду многочисленных влияющих факторов и нелинейного аналогового выходного сигнала. Повысить точность можно следующим образом.

Если рассмотреть выражение для вносимого напряжения $U_{\text{вн}}$, наводимого во вторичной обмотке трансформаторного вихретокового преобразователя, установленного над контролируемым изделием, то можно заметить, что амплитуда и фаза $U_{\text{вн}}$ будут функцией только произведения частоты и электропроводности, т. е. частота и электропроводность одинаково влияют на изменение амплитуды сигнала

$$U_{\text{вн}} = F(\omega\sigma), \quad \varphi U_{\text{вн}} = F_2(\omega\sigma).$$

При воздействии на вихретоковый преобразователь эталонного объекта с известной электропроводностью σ_1 на частоте ω_1 , получится сигнал в виде $F(\sigma_1\omega_1)$; если датчик воздействует на образец с σ_2 , то сигнал получится в виде $F(\sigma_2\omega_2)$. Таким образом, изменяя частоту ω , можно добиться следующего равенства:

$$F(\sigma_1\omega_1) = F(\sigma_2\omega_2). \quad (13)$$

Поскольку F обозначает одну и ту же функцию, следует

$$\begin{aligned}\sigma_1 \omega_1 &= \sigma_2 \omega_2 \\ \text{или} \quad \sigma_1 2\pi f_1 &= \sigma_2 2\pi f_2, \\ \sigma_1 f_1 &= \sigma_2 f_2,\end{aligned}$$

где f_1 и f_2 — соответствующие частоты питающего преобразователя тока.

$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{f_1}{f_2}. \quad (14)$$

Эти соотношения позволяют реализовать измерения электропроводности материалов с высокой точностью. Действительно, при использовании материала с известной σ_1 , определяя с помощью цифрового частотомера f_1 и f_2 , можно легко найти σ_2 . Причем погрешность этого определения целиком равна погрешности удельного сопротивления эталонного объекта, т. к. f_1 и f_2 можно измерить с точностью до четвертого—пятого знака. Если перейти в (14) от σ к ρ , то получим:

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{f_2}{f_1}. \quad (15)$$

Выбирая частоту, чтобы отношение $\frac{\rho_1}{f_1}$ было равно 1 или кратно 10, можно легко осуществить представление результата измерения в цифровом виде, ибо в этом случае, как следует из последней формулы,

$$\rho_2 = f_2 \quad \text{или} \quad \rho_2 = 10^n \cdot f_2,$$

где n — выбранное целое число.

Существуют установки, в которых сигнал автоматически управляет частотой. Учитывая сказанное, замечаем, что результат ρ_2 можно непосредственно автоматически получить на цифровом индикаторе частотомера.

Известны и другие высокоточные методы измерения, заключающиеся, например, в задании теста σ путем перемещения преобразователя на фиксированный зазор. Этот метод будет объяснен преподавателем на занятии.

6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Под дефектоскопией понимают комплекс физических методов и средств выявления дефектов в материале заготовок, полуфабрикатов и деталей, а также в сварных швах, клепаных и паяных соединениях. Метод вихревых токов позволяет надежно выявить самые разнообразные дефекты, возникающие как в процессе производства, так и в эксплуатации. Электромагнитные дефектоскопы

объединяются наличием в них устройств для передачи и приема информации, часто совмещенных в один узел. Возбудителями и приемниками электромагнитных полей служат катушки индуктивности. Выполняя роль передающей и приемной антенн, они являются основой датчиков любого электромагнитного прибора, построенного на принципе вихревых токов. Различные виды преобразователей схематически показаны на рис. 4.

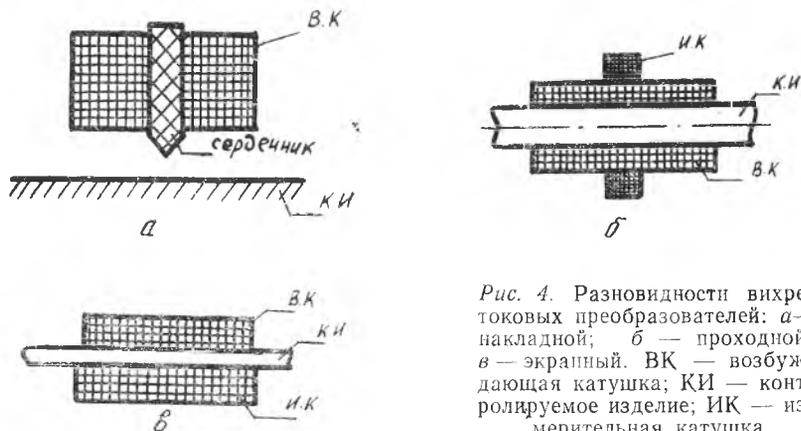


Рис. 4. Разновидности вихревых преобразователей: а — накладной; б — проходной; в — экранированный. В.К. — возбуждающая катушка; КИ — контролируемое изделие; И.К. — измерительная катушка

В табл. 2 дана оценка возможностей различных типов преобразователей.

Таблица 2

Преобразователи	Дефекты				
	структурная неоднородность			трещины	
	массовые детали	листы	проволока	производственные	эксплуатационные
Накладной	Х	ОХ	УД	УД	ОХ
Проходной	ОХ	—	ОХ	Х	—
Экранированный	—	УД	М	—	—

Примечание. ОХ — очень хорошо, Х — хорошо, УД — удовлетворительно, М — малопригоден.

На рис. 5 приведена схема возбуждения вихревых токов в изделиях без дефекта и с дефектом.

Вихревые токи в изделии без дефекта создают электромагнитный поток Φ_1 , который больше электромагнитного потока Φ_2 вихревых токов в изделии с дефектом, т. е. вследствие локального

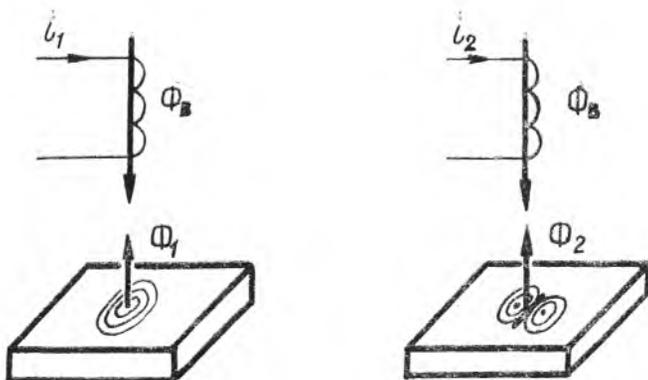


Рис. 5. Схема возбуждения вихревых токов с помощью вихретокового преобразователя в металлическом листе без дефекта и с трещиной.

уменьшения Φ уменьшается плотность вихревых токов. Результирующий поток $\Phi_{p1} = \Phi_B - \Phi_1$ меньше, чем $\Phi_{p2} = \Phi_B - \Phi_2$, поэтому в катушке возбуждения будет протекать ток $i_1 < i_2$.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

А. Исследование глубины проникновения вихревых токов в металлы

На рис. 6. представлена схема экспериментальной установки для определения глубины проникновения вихревых токов.

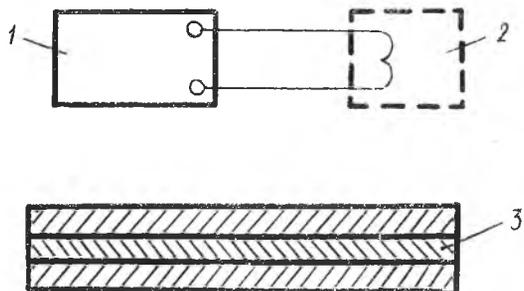


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для определения глубины проникновения вихревых токов: 1 — куметр L ; 2 — вихретоковый преобразователь; 3 — контролируемые образцы.

Куметром задается частота возбуждающего тока I и измеряются добротность и емкость контура, в который включен преобразователь. Расчетным путем определяются реактивное сопротивление преобразователя $X_0 = \omega L_0$ (без контролируемого образца) и относительные вносимые $R_{вн}/\omega L_0$ и $\omega L_{вн}/\omega L_0$ сопротивления преобразователя при установке на контролируемый образец.

Правила эксплуатации куметра описаны в [3].

Б. Исследование зависимостей выходных сигналов вихрековых преобразователей от геометрических и электрофизических параметров конструкционных материалов

На рис. 7 представлена схема универсальной экспериментальной установки.

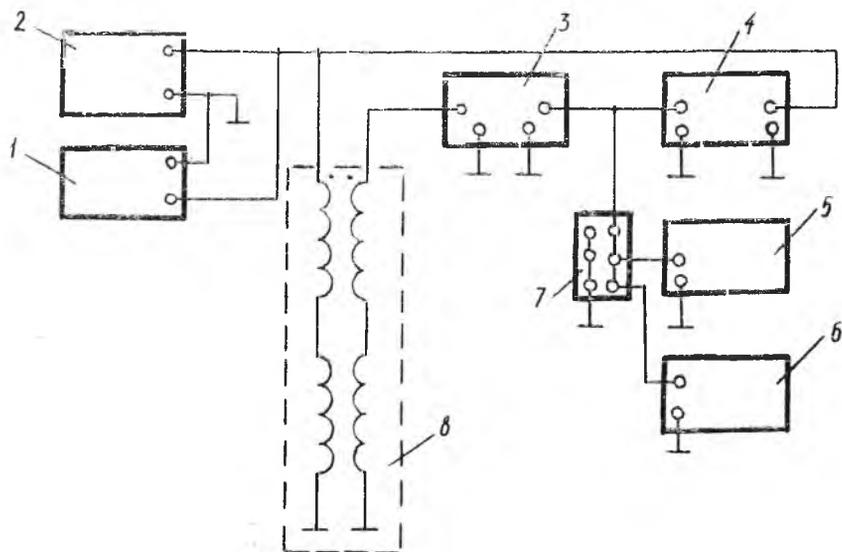


Рис. 7. Схема универсальной экспериментальной установки: 1 — частотомер Ф5080; 2 — генератор ГЗ-33; 3 — усилитель В6-4; 4 — фазометр Ф2-1; 5 — вольтметр ВЗ-38; 6 — осциллограф С1-5; 7 — распределительная колодка; 8 — вихрековый преобразователь.

Правила эксплуатации приборов ГЗ-33, Ф2-1, С1-5, Ф5080, входящих в схему установки, даны в [4, 5].

Прибор В6-4 настраивается в резонанс ручками «Настройка частоты» («Грубо» и «Точно»). С помощью переключателя входного делителя подбирается такое ослабление сигнала, при котором на экране осциллографа С1-5 наблюдается синусоидальный без искажения сигнал.

В. Высокоточные измерения удельной электрической проводимости металлов

Измерения производятся приборами ВФЭ-13Н, ЭИ-23Н-96, ВИЭ-10НЦ (см. рис. 5). Перед началом измерений следует ознакомиться с инструкцией по эксплуатации приборов и откалибровать их по эталонным образцам.

Г. Контроль материалов на сплошность

Осуществляется визуально и с помощью вихретокового дефектоскопа.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

А. Исследование глубины проникновения вихревых токов в металлы

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой, представленной на рис. 6.

2. С помощью микрометра измерить толщину набора $N_1 N_2 \dots N_n$ алюминиевых платин по методике, изложенной в [6].

3. Определить с помощью куметра начальную индуктивность вихретокового преобразователя на частоте 1000 Гц.

4. Устанавливая последовательно преобразователь на все увеличивающийся по толщине набор алюминиевых листов, определить относительные вносимые сопротивления. При определении активного сопротивления R следует учитывать, что куметр позволяет определить добротность катушки индуктивности:

$$Q = \frac{R}{\omega L}.$$

Полученные результаты занесены в табл. 3.

Таблица 3

Образцы	R_n	L_0	$R_{вн}$	$L_{вн}$	$R_{вн}/\omega L_0$	$L_{вн}/L_0$
0 (воздух)						
N_1						
$N_1 + N_2$						
$N_1 + N_2 + N_3$						

5. Построить графики $R_{вн} = f_1(T)$ и $L_{вн}/L_0 = f_2(T)$.

6. Повторить опыты № 3, 4 для частоты $5 \cdot 10^3$ Гц и $10 \cdot 10^3$ Гц.

7. Построить графики $R_{вн}/\omega L_0 = f_3(T)$ и $L_{вн}/L_0 = f_4(T)$.

8. Сформулировать основные выводы по экспериментам.

Б. Исследование зависимостей выходных сигналов вихретоковых преобразователей от геометрических и электрофизических параметров конструкционных материалов

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой (см. рис. 7).
2. Установить на генераторе ГЗ-33 напряжение частотой 500 Гц и амплитудой 3В [5].
3. Настроить прибор В6-4 [5].
4. Устанавливая вихретоковый преобразователь на образцы с различной удельной электропроводностью, оценить чувствительность устройства к различным образцам. При этом титановый образец принять за нулевой отсчет.

$$S_{\varphi} = \frac{\varphi^{\circ}_{\text{контр маг}} - \varphi^{\circ}_{\text{Тл}}}{\varphi^{\circ}_{\text{Тл}}} \cdot 100\% .$$

Измерения производить с помощью фазометра S_{φ} и вольтметра S_U . Результаты измерений занести в табл. 4.

Таблица 4

Параметры	М а т е р и а л				
	Медь	Алюминий	Латунь	Бронза	Титан
σ , См/м					
φ_1					
$\varphi_{\text{расч}}$					
$U_{\text{вн}}$					
$U_{\text{вн}}/U_0$					
S_{φ}					
S_U					

5. Принять начальными значениями относительного вносимого напряжения $U_{\text{вн}}/U_0$ и фазы $\varphi_{\text{расч}}$ вносимого напряжения вихретокового преобразователя при установке его на титан равными соответственно $U_{\text{вн}}/U_0 = 0,1$ и $\varphi_{\text{расч}} = 10^{\circ}$.

6. Рассчитать значения $\varphi_{\text{расч}}$ и $U_{\text{вн}}/U_0$ для всех образцов (табл. 4) в соответствии с принятыми начальными условиями, исходя из условий пропорциональности изменений показаний приборов.

7. Проверить проведенный расчет. Для этого поставить вихре-токовый преобразователь на титановый образец и с помощью ручек «Установка частоты» прибора В6-4 добиться показания фазометра Ф2-1, равного 10° . Последовательно устанавливая на другие образцы, определить значения фазы и сравнить с $\varphi_{расч}$. При расхождении показаний установить причину.

8. По данным табл. 2 построить годографы относительного внешнего напряжения вихреотокового преобразователя.

$$9. \text{ Построить зависимости } \varphi = f_1(\sigma), U = f_2(\sigma), \\ S_\varphi = f_3(\sigma), S_U = f_4(\sigma).$$

10. Снять зависимость выходного напряжения преобразователя от расстояния до алюминиевого образца. Результаты занести в табл. 5.

Таблица 5

Напряжение преобразователя	Зазор h , мкм								
	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
$U_{вых}$, В									

11. Построить зависимость $U = f(h)$.

12. Установить вихреотоковый преобразователь на образцы с лакокрасочными покрытиями и измерить $U_{вых}$.

13. По данным измерений и графику $U = f(h)$ определить толщину покрытия. Сравнить результаты измерений с паспортными данными образцов. Определить погрешность измерений.

14. При погрешности более 5% дать письменное объяснение причин низкой точности измерений. В этом случае исследуйте свойства образцов в непокрытой части.

15. Сформулируйте основные выводы по эксперименту.

В. Высокоточные измерения удельной электрической проводимости металлов

1. Настроить установку (см. рис. 7).

2. Ознакомиться с правилами эксплуатации частотомера по [4].

3. Установить выходное напряжение генератора ГЗ-33 частотой, равной $10 \cdot 10^3$ Гц и амплитудой 3 В [5].

4. Установить вихреотоковый преобразователь на латунный образец с $\sigma = 15 \cdot 10^6$ Сим/м. Снять показания амплитуды и фазы с приборов ВЗ-38, Ф2-1.

5. Установить вихреотоковый преобразователь на бронзовый образец с известной $\sigma = 13 \cdot 10^6$ Сим/м.

6. Изменением частоты генератора ГЗ-33 добиться тех же показаний приборов ВЗ-38 и Ф2-1, что и в опыте 4 работы В.

7. По формулам (14) или (15) определить σ бронзового образца.

8. Определить погрешность измерений.

9. Повторить задания 3—8 на частотах 500 Гц, 1000 Гц, $30 \cdot 10^3$ Гц. Сравнить результаты. Сделать выводы.

10. Определить σ набора образцов, значения удельной электрической проводимости которых установить на основе интуитивных представлений по цвету и оттенкам металла.

11. Настроить приборы ВФЭ-13Н, ЭИ-23Н-96 и ВИЭ-10НЦ и провести измерения σ образцов металла.

12. Сравнить результаты измерений задания 9. Оценить погрешность измерений.

13. Сделать выводы.

Г. Контроль материалов на сплошность

1. Подготовить дефектоскоп к работе в соответствии с инструкцией.

2. Провести исследования образцов с видимыми трещинами.

3. Провести исследования образцов с невидимыми трещинами.

4. Повторить задание 3, используя диэлектрические прокладки между преобразователем и образцом. Определить максимальный зазор, на котором выявляются невидимые трещины.

5. Поместить образцы в термокамеру и провести их нагрев до $T = 80^\circ\text{C}$.

6. Повторить задания 2, 3.

7. Поместить образцы в термокамеру и провести их нагрев до $T = 120^\circ\text{C}$.

8. Повторить задания 2, 3.

9. Сформулировать выводы по эксперименту. Дать теоретическую интерпретацию полученным результатам. Сравнить с результатами визуального осмотра поверхности образцов.

ВОПРОСЫ К КОЛЛОКВИУМУ

1. Что понимают под вихревыми токами?

2. Какова природа поверхностного эффекта?

3. Как зависят показания электромагнитных приборов от толщины и удельной электрической проводимости металлов?

4. Какие параметры металла влияют на величину вихревых токов?

5. Дайте определение постоянной вихревых токов.

6. Какова зависимость глубины проникновения вихревых токов в металл от частоты тока и удельной электрической проводимости металла?

7. Назовите основные задачи электромагнитного контроля металлов.

8. В чем заключается сущность измерения параметров металлов методом вихревых токов?

9. Какими способами можно с помощью установки, схема которой приведена на рис. 7, исследовать геометрические и электрофизические параметры ферромагнитных металлов?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Дорофеев А. Л.* Неразрушающие испытания методом вихревых токов. — М.: Оборонгиз, 1961, 250 с.

2. *Герасимов В. Г., Клюев В. В., Шатерников В. Е.* Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. — М.: Энергоатомиздат, 1983, 272 с.

3. *Шатерников В. Е., Меркулов А. И., Буров В. Н., Федоров М. А.* Мнемосхемы электрорадиоизмерительных приборов. Специальные измерительные приборы. — Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1979, 21 с.

4. *Шатерников В. Е., Меркулов А. И., Буров В. Н., Федоров М. А.* Мнемосхемы электрорадиоизмерительных приборов. Вольтметры, частотомеры. — Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1979, 31 с.

5. *Буров В. Н.* Измерительные приборы для исследований свойств материалов РЭА. Универсальные приборы. — Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1982, 34 с.

6. *Буров В. Н., Дмитриев Ю. С.* Измерительные приборы для исследований свойств материалов РЭА. Приборы общего назначения. — Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1982, 27 с.

Составитель *Виктор Николаевич Буров*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВОДЯЩИХ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РЭА
МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Редактор О. Б. Хнырева
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор В. П. Петрова

Сдано в набор 10.05.84 г. Подписано в печать 3.07.84 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная белая.
Высокая печать. Литературная гарнитура.
Усл. п. л. 1,16. Уч.-изд. л. 0,95.
Тираж 500 экз. Заказ 444. Бесплатно.
Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С. П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Типография УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.