

Точки передачи на частоте 1,59 кГц

$R - C$: 1 кОм — 0,1 мкФ; 10 кОм — 0,01 мкФ; 100 кОм — 1 нФ;

$C - L$: 1 нФ — 1 Гн; 10 нФ — 100 мГн; 100 нФ — 10 мГн.

Погрешность $R - C$ -передачи менее $1 \cdot 10^{-6}$; погрешность $C - L$ -передачи менее $10 \cdot 10^{-6}$.

Л и т е р а т у р а

1. Сурду М. Н. и др. Автоматическая прецизионная система для метрологического обеспечения измерений параметров импеданса. Ч. 1. Принципы действия // Измерительная техника. 2012. № 7. С. 51—57.

2. Богданов Г. П. и др. Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники. М.: Радио и связь, 1990.

3. ГОСТ 8.216—88. ГСИ. Трансформаторы напряжения: Методика поверки.

4. Grohmann K., Zapf T. L. An International Comparison of Inductive Voltage Divider Calibration Methods Between 10 kHz and 100 kHz // Metrologia. 1979. V. 15. N 2. P. 69—70.

5. Waltrip B. C., Koffman A. D., Avramov-Zamurovic S. The design and self-calibration of inductive voltage dividers for an automated impedance scaling bridge // Proc. Instrum. and Measur. Technol. Conf. Anchorage (AK), 2002. V. 2. P. 1191—1195.

6. Toshiaki Aoki, Katsumi Yokoi. Calibration of a Ratio Transformer // Proc. NCSL Workshop & Symp. Dallas (USA), 1995. P. 701—704.

7. Nakamura Yasuhiro. Calibration and uncertainty estimation of a two-staged inductive voltage divider // AIST Bull. Metrology. 2005. V. 4. N 1. P. 45—52.

8. Tarach D., Trenkler G. Calibration of inductive voltage dividers at extremely low frequencies // Metrologia. 1995. V. 32. P. 367—370.

9. Grohmann K. Error Determination of Inductive Voltage Dividers with Nondecade Ratio Settings // IEEE Trans. Instrum. and Measur. 1980. V. 29. N 4. P. 496—500.

10. Kibble B. P., Rayner G. H. Coaxial AC Bridges. Bristol: Adam Hilger Ltd., 1984.

11. Трансформаторные измерительные мосты // Под ред. К. Б. Карандеева. М.: Энергия, 1970.

Дата принятия 07.11.2011 г.

620.179.14

Измерения толщины и удельной электрической проводимости немагнитных пластин вихретоковым методом

В. А. САНДОВСКИЙ

Институт физики металлов РАН, Екатеринбург, Россия, e-mail: mar19@e-sky.ru

Выполнены исследования, показывающие, что при использовании адекватной математической модели путем решения соответствующих электродинамических уравнений, включающих результаты экспериментальных измерений вихретоковым методом, можно отдельно определять толщину и удельную электрическую проводимость немагнитных материалов и образцов в форме пластин, лент и фольг.

Ключевые слова: удельная электрическая проводимость, толщина, фольга, вихретоковый преобразователь, математическая модель.

The studies were carried out showing that at using of the adequate mathematical model by means of solution of appropriate electrodynamic equations including the results of experimental measurements by eddy current method the separate determination of thickness and conductivity of nonmagnetic materials and of specimens of plates, tapes and foils types is possible.

Key words: conductivity, thickness, foil, eddy current converter, mathematical model.

Вихретоковые преобразователи [1] широко используются в технике, в производственных и лабораторных условиях для измерений и контроля деталей и материалов. В случае если контролируемые образцы достаточно тонкие, измеряемый вихретоковым преобразователем сигнал зависит не только от свойств материала образца, но также и от его толщины. Были поставлены задачи — измерять удельную электрическую проводимость пластин независимо от их толщины и, наоборот, измерять толщину пластин независимо от удельной электрической проводимости материала. Для этой цели исследована возможность применения расчетов по соответствующей математической модели совместно с экспе-

риментальными измерениями с использованием вихретокового трансформаторного преобразователя накладного типа [1].

Описание математической модели. Для расчетов вихретоковый преобразователь рассматривается в виде математической модели, состоящей из двух concentрических витков, расположенных над немагнитной пластиной толщиной d (рис. 1). Внешний виток радиусом R является токовым, внутренний виток радиусом r — измерительным. Расстояния до каждого из витков от поверхности пластины равны соответственно h_1 и h_2 .

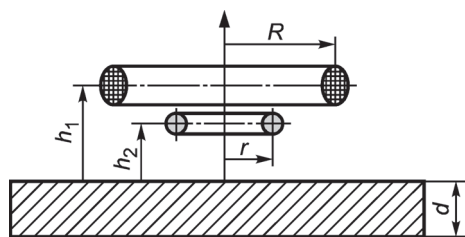


Рис. 1. Накладной вихретоковый преобразователь над пластиной

Сигнал, вносимый пластиной в измерительный виток, можно рассчитать по формулам [2]:

$$Z_2 = j\omega\mu_0\pi r \int_0^\infty J_1(\delta x) J_1(x) F(x) \exp(-\alpha x) dx;$$

$$F(x) = (x^2 - q^2)(1 - Y) / [(x+q)^2 - (x-q)^2 Y];$$

$$q = \sqrt{x^2 + j\beta^2}; Y = \exp(-2\zeta\beta); \zeta = d/R; \beta = R\sqrt{\omega\mu_0\sigma};$$

$$\omega = 2\pi f; \delta = r/R; \alpha = (h_1 + h_2)/R,$$

где μ_0 — магнитная постоянная; J_1 — функции Бесселя первого рода первого порядка; σ — удельная электрическая проводимость материала пластины; f — частота тока, протекающего по внешнему витку.

Сигнал на измерительном витке в отсутствие проводящей пластины можно рассчитать как [3]:

$$Z_1 = \frac{\omega\mu_0\pi r}{\pi\sqrt{\delta}k} [(2 - k^2)K - 2E],$$

где K, E — полные эллиптические интегралы от параметра

$$k = 2\sqrt{\delta / [(1 + \delta)^2 + \alpha_1^2]}; \alpha_1 = |h_1 - h_2|/R.$$

В общем случае сигнал измерительного витка при установленном на поверхность пластины преобразователе равен сумме $Z = Z_1 + Z_2$. Поскольку в вихретоковом методе, как правило, используют относительный сигнал, т. е. суммарный сигнал, нормированный к сигналу измерительного витка в отсутствие образца, то

$$U_{отн} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1} = 1 + \frac{j}{S_0} \int_0^\infty J_1(\delta x) J_1(x) F(x) \exp(-\alpha x) dx,$$

$$\text{где } S_0 = [(2 - k^2)K - 2E] / (\pi\sqrt{\delta}k).$$

Чтобы определить неизвестные толщину d и удельную электрическую проводимость σ материала пластины, изме-

рения выполняют с применением преобразователя, состоящего из двух concentrically расположенных катушек с малым поперечным сечением катушки, что позволяет как можно точнее воспроизвести двухвитковую расчетную модель. При этом используют стандартную схему включения вихретокового преобразователя с фазометром [1] и следующую аппаратуру: генератор ГЗ-33, частотомер ЧЗ-33, вольтметр В7-65/2, фазометр Ф2-34. Разрешающая способность прибора составляет 0,01°. Погрешность, указанная в паспорте прибора для случая одинаковых входных напряжений, в диапазоне частот $20 < f < 5 \cdot 10^6$ Гц выражается формулой $\pm (0,1 + 10^{-7}f)$. В случае десятикратного перепада входных напряжений погрешность прибора возрастает до 0,3°. Практически входные напряжения могут отличаться не более, чем в 5–6 раз. Поэтому можно считать, что погрешность измерения фазового угла φ не превышает 0,3°.

Система уравнений, в которой слева стоят расчетные значения, а справа — соответствующие им измеренные параметры сигнала измерительной катушки, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re} U_{отн} &= U \cos \gamma; \\ \operatorname{Im} U_{отн} &= U \sin \gamma; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $U = U_2/U_1$; U_2 — измеряемое вольтметром напряжение на измерительной катушке преобразователя, установленного на поверхность образца; U_1 — то же в отсутствие образца; γ — показания фазометра при установленном на поверхность образца преобразователе.

Система уравнений (1) решается относительно составляющих d и σ в компьютерной программе с использованием процедуры минимизации функционала по методу деформируемого многогранника Нелдера—Мида [4, 5].

Для проверки возможностей метода вначале использовали вихретоковый преобразователь большого диаметра радиусом $R = 27$ мм. При этом в программе применяли математическую модель с параметрами $\alpha = 0,1$; $\delta = 0,5$ и $S_0 = 0,276$, которые для преобразователя такого большого размера устанавливали путем непосредственных измерений. Результаты измерений выбранных образцов и расчетов по программе приведены в табл. 1 для трех образцов разной толщины и материалов; указаны частоты, на которых выполнялись измерения, удельные электрические проводимости и толщина d , полученные в результате измерений и расчетов по приведенной методике, средние из измеренных значений.

Таблица 1

$d = 5,5$ мм (сплав ВТ1-0)			$d = 10$ мм (сплав ВТ-6)			$d = 26$ мм (графит)		
f , кГц	σ , МСм/м	d , мм	f , кГц	σ , МСм/м	d , мм	f , кГц	σ , МСм/м	d , мм
1,75	1,82	5,56	3,00	0,63	9,99	15	0,15	25,62
2,12	1,83	5,56	4,00	0,63	10,10	20	0,16	25,68
2,53	1,83	5,59	5,00	0,63	10,12	25	0,21	26,00
3,00	1,82	5,67	6,00	0,62	9,96	30	0,21	25,97
3,50	1,83	5,62	7,00	0,61	10,02	35	0,18	25,78
4,00	1,83	5,59	8,00	0,60	10,07	40	0,20	25,60
4,50	1,84	5,48	10,0	0,61	10,12	45	0,17	25,68
5,00	1,83	5,45	12,0	0,60	10,18	—	—	—
Среднее	1,82	5,56	—	0,616	10,07	—	0,183	25,76

Эти эксперименты подтверждают принципиальную возможность метода. Однако использование этого метода для измерения образцов указанной в табл. 1 толщины не имеют большого практического применения, так как удельную электрическую проводимость можно измерить вихретоковым измерителем удельной электрической проводимости, например ВЭ-27НЦ, а толщину образцов — штангенциркулем, микрометром либо стрелочным индикатором. Толщину металлических образцов также можно измерить ультразвуковым толщиномером, если известна скорость распространения звука в данном материале или данный толщиномер откалиброван по эталонным образцам.

Если же пластины достаточно тонкие, то измерение удельной электрической проводимости вихретоковым методом осложняется тем, что толщина пластины влияет на показания прибора. Также если на какой-либо материал нанесен электропроводящий слой, то непосредственное измерение его механическими инструментами становится невозможным. Во многих случаях измерение такого слоя при помощи ультразвукового толщиномера тоже неосуществимо, поскольку у этих приборов имеется так называемая мертвая зона — предельная толщина, меньше которой измерения невыполнимы. Например, ультразвуковые толщиномеры итальянской фирмы SONIC-100 и SONIC-434 позволяют измерять толщину металлических образцов от 0,2 мм и выше.

Приведем несколько примеров необходимости одноступенчатых измерений, встречающихся на практике: контроль толщины стенки различных замкнутых резервуаров и специализированных полых изделий, измерение толщины и качества различных проводящих слоев, например, толщины стенки охлаждаемых лопаток турбин современных авиационных двигателей, серебряного покрытия на керамической основе, медного слоя на керамических деталях электровакуумных установок. Поэтому в данной статье ставится задача подобрать вихретоковый преобразователь для указанных целей и проанализировать его возможности в широком диапазоне изменений толщины d и удельной электрической проводимости материала образцов σ .

Коррекция математической модели. В дальнейшем рассматривается возможность измерения весьма тонких образцов немагнитных материалов, и для этого использован накладной вихретоковый преобразователь небольших размеров. Но при этом возникают затруднения в выборе для него подходящей математической модели. Вначале исследования заключаются в том, чтобы подобрать для конкретного преобразователя достаточно адекватную математическую модель, а в качестве критерия адекватности предлагается задать значения соответствующих погрешностей. Очевидно, что, в первую очередь, необходимо опробовать ту же самую модель, но с другими параметрами. Для этого использовали эталонные образцы известных толщины и удельной электрической проводимости. Значения искоемых параметров определяли по той же программе в режиме поиска. В результате получили следующие параметры: $R = 9$ мм; $\alpha = 0,24$; $\delta = 0,5$; $S_0 = 0,294$. Уменьшение размеров преобразователя связано с увеличением относительного зазора, т. е. параметра α , а это приводит к ухудшению чувствительности. Поэтому возникает необходимость оценить чувствительность данного преобразователя к изменениям толщины:

$$C_d = (\Delta\varepsilon/\varepsilon) / (\Delta d/d),$$

где $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ — относительное приращение амплитуды сигнала за

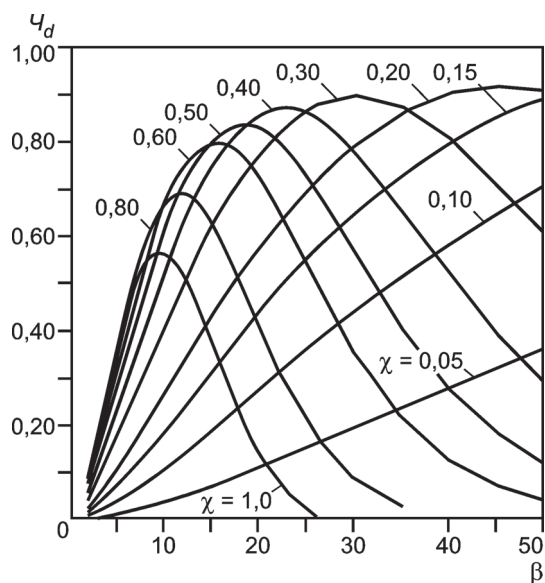


Рис. 2. Зависимость чувствительности преобразователя к толщине пластин от параметров β и χ

счет относительного приращения толщины образца $\Delta d/d$.

На рис. 2 показаны рассчитанные теоретически зависимости чувствительности C_d для преобразователя с указанными параметрами. Кривые на графике соответствуют различным значениям параметра

$$\chi = \beta\zeta,$$

который характеризует отношение толщины d к глубине проникновения электромагнитного поля в образец. Видно также, что чувствительность существенно зависит от обобщенного вихретокового параметра β .

Сравнение с аналогичными графиками, приведенными в [2, рис. 10.6а] для параметра $\alpha = 0,10$, показывает, что увеличение зазора до $\alpha = 0,24$ привело к уменьшению чувствительности почти в два раза. Как станет ясно из дальнейшего описания, чувствительность играет важную роль в успешной реализации метода.

Результаты измерений. Из анализа предварительных исследований различных образцов следует, что снижение чувствительности вихретокового преобразователя к изменениям толщины пластин существенно ухудшает возможности рассматриваемого метода. Причина этого заключается в специфике вихретокового контроля пластин, которая становится понятной из рассмотрения годографов, соответствующих различной толщине d . В области низких частот и малых значений параметра ζ линии годографов фактически сливаются. Кроме того, уменьшение чувствительности ухудшает разрешающую способность метода, при этом итерационный процесс [3, 4] сбивается, и компьютерная программа не завершается решением системы уравнений.

Это обстоятельство вынуждает перейти от двухпараметрового метода, который, как было показано выше, позволяет сразу определять оба неизвестные значения d и σ , к однопараметровому. Таким образом, если известна толщину

Таблица 2

Номер образца	Материал	d , мм	σ_m , МСм/м	σ , МСм/м	$\Delta\sigma$, МСм/м	δ_σ , %	d^* , мм	Δd , мм	δ_d , %
1	Алюминий	0,0125	34,5	34,4	-0,1	-0,3	0,0125	0,0005	4,2
2	Латунь	0,0240	16,2	16,0	-0,2	-1,2	0,0231	-0,0009	-3,8
3	Алюминиевый сплав	0,0381	20,1	19,8	-0,3	-1,5	0,0382	0,0002	0,52
4	Латунь	0,0270	13,5	13,7	0,2	1,5	0,0280	0,001	3,7
5	Латунь	0,0393	14,6	14,3	-0,3	-2,05	0,0400	0,001	2,6
6	Титан	0,0501	1,98	1,94	-0,04	-2,02	0,0497	-0,0003	-0,6
7	Фольгированный гетинакс	0,0370	50,2	49,1	-1,10	-2,2	0,0360	-0,0010	-2,7
8	Фольгированный стеклотекстолит	0,0520	48,8	47,7	-1,1	-2,2	0,0500	-0,0020	-3,84
9	Медь	0,0701	49,0	49,1	0,1	0,2	0,0721	-0,0020	-3,0
10	Медь	0,0450	43,1	42,9	-0,2	-0,46	0,0447	-0,0003	-0,67
11	Бронза	0,0550	38,1	37,3	-0,8	-2,1	0,0560	0,001	1,82
12	Алюминий	0,0700	32,0	31,6	-0,4	-1,30	0,0695	-0,0005	-0,7
13	Латунь	0,0700	13,1	12,9	-0,2	-1,5	0,0674	-0,0026	-3,7
14	Алюминий	0,1002	35,8	34,8	-1,0	-2,9	0,0987	-0,0013	-1,3
15	Сплав Д16	0,1100	19,2	19,3	0,1	0,52	0,1120	0,002	1,82
16	Бронза	0,1303	12,0	11,8	-0,2	-1,7	0,1280	-0,002	-1,5
17	Алюминиевый сплав	0,1302	27,0	26,7	-0,3	-1,1	0,1310	0,001	0,8
18	Латунь	0,1551	12,1	12,2	0,1	0,8	0,1580	0,003	2,0
19	Латунь	0,1800	13,7	13,5	-0,2	-1,1	0,1770	-0,003	-1,7
20	Медь	0,2001	53,7	52,8	-0,90	-1,7	0,2030	0,003	1,5
Среднее квадратическое значение					0,54	1,62	—	0,0017	2,50

на d образца, то ее значение вносится в компьютерную программу и в результате решения системы уравнений определяется σ . Наоборот, если известно значение σ , то оно вносится в программу, а определяется толщина d . Оба эти вариан-

та опробовали с датчиком, у которого радиус токовой обмотки $R = 9$ мм, при использовании большого количества различных образцов. Наиболее простым оказался первый вариант.

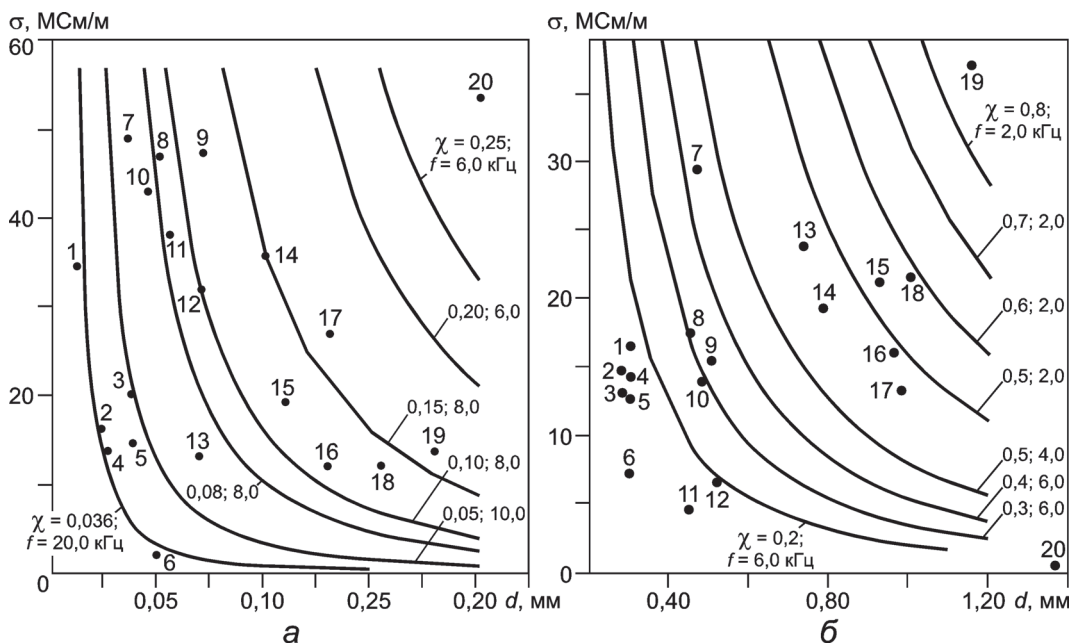


Рис. 3. Соотношение параметров σ , χ и f в диапазонах толщины 12 мкм — 0,25 мм (а) и 0,25 — 1,4 мм (б)

Толщину образцов измеряли в пяти различных точках, в табл. 2 указана средняя толщина по результатам пяти измерений; образцы толщиной более 0,2 мм измеряли микрометром, менее 0,2 мм — стрелочным индикатором. По первому варианту табличное значение толщины вносили в компьютерную программу и находили σ . Затем полученное таким образом значение σ вносили в программу и определяли толщину образца d .

Второй вариант оказался более сложным, так как здесь проявился тот же эффект, о котором говорилось выше: в случае малых значений параметра ζ и недостаточно высоких частот годографы сливаются в одну линию, что может привести к остановке компьютерной программы. Однако в однопа-

Таблица 3

Номер образца	Материал	d , мм	σ_m , МСм/м	σ , МСм/м	$\Delta\sigma$, МСм/м	δ_σ , %	d^* , мм	Δd , мм	δ_d , %
1	Вольфрам	0,300	16,8	16,5	-0,3	-1,8	0,297	-0,003	-1,0
2	Латунь	0,275	14,7	14,2	-0,5	-3,4	0,270	-0,005	-1,82
3	Латунь	0,280	13,0	13,2	0,2	1,54	0,298	0,018	6,4
4	Латунь	0,300	14,6	14,2	-0,4	-2,7	0,292	-0,008	-2,67
5	Латунь	0,300	12,6	12,5	-0,10	-0,8	0,320	0,020	6,7
6	Бронза	0,300	7,14	7,00	-0,14	-2,0	0,291	-0,009	-3,0
7	Алюминий	0,460	30,1	29,4	-0,7	-2,3	0,464	0,004	0,7
8	АМЦ	0,450	17,4	17,1	-0,3	-1,8	0,435	-0,015	-3,3
9	АМГ	0,500	15,4	15,5	0,10	0,65	0,520	0,02	4,0
10	Бронза	0,480	13,8	14,4	0,54	3,9	0,490	0,01	2,1
11	Бронза	0,450	4,47	4,51	0,04	0,89	0,460	0,01	2,2
12	Бронза	0,520	6,51	6,49	-0,02	-0,3	0,500	-0,02	-3,8
13	Сплав Д16	0,730	23,8	23,9	0,05	0,21	0,760	0,03	4,1
14	Сплав Д16	0,780	19,2	19,3	0,06	0,26	0,790	0,01	1,3
15	Сплав Д16	0,920	21,2	21,8	0,63	2,97	0,960	0,04	4,3
16	Латунь	0,960	16,05	16,2	0,15	0,93	0,950	-0,01	-1,0
17	Латунь	0,980	13,1	13,2	0,10	0,76	0,970	-0,01	-1,0
18	Сплав Д16	1,000	21,5	21,3	-0,2	0,93	1,040	0,04	4,0
19	Бронза	1,150	36,1	37,0	0,9	2,5	1,170	0,02	1,7
20	Сплав ВТ5-1	1,370	0,39	0,40	0,01	2,6	1,350	-0,02	-1,46
Среднее квадратическое значение					0,38	2,03	—	0,02	3,38

раметровом методе этот недостаток преодолевается повышением частоты и чувствительности к интересующим параметрам. С ростом частоты рабочая точка перемещается в область годографа, в которой линии, соответствующие различной толщине образца, начинают расходиться. Для выбора режимов работы вихретокового преобразователя удобно руководствоваться графиком на рис. 2.

В табл. 2 приведены результаты измерений различных образцов с первого по двадцатый. Во втором столбце указаны материал образца, в третьем — толщина образца d , измеренная непосредственно микрометром или стрелочным индикатором. Далее приведены результаты измерений удельной электрической проводимости: σ_m — мостовым методом и σ — вихретоковым. Для измерения σ_m мостовым методом на постоянном токе от каждого образца отрезали узкую полоску, которую также использовали для измерения σ . Затем определяли абсолютную $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_m$ и относительную $\delta = \Delta\sigma/\sigma_m$ погрешности. В трех последних столбцах табл. 2 приведены результаты измерения толщины d^* вихретоковым методом, абсолютная $\Delta d = d^* - d$ и относительная $\delta_d = \Delta d/d$ погрешности. В последней строке таблицы указаны их средние квадратические значения. Толщину фольгированных гетинакса и стеклотекстолита (образцы № 7 и 8) измеряли на шлифе при помощи микроскопа.

На рис. 3, а построены зависимости $\sigma(d)$, цифры возле каждой точки обозначают но-

мер образца в соответствии с табл. 2. Линии постоянных значений параметра χ для разных частот f отражают одно из основных положений электродинамики: чем больше удельная электрическая проводимость материала, тем меньше глубина проникновения электромагнитного поля в образец и тем меньше должна быть толщина образца для поддержания чувствительности, необходимой для ее измерения.

Табл. 3 является продолжением табл. 2, а график на рис. 3, б — продолжением графика на рис. 3, а. Здесь пред-

Таблица 4

Фольгированный стеклотекстолит				Фольгированный гетинакс			
f , кГц	d , мм	Δd , мм	δ_d , %	f , кГц	d , мм	Δd , мм	δ_d , %
19,21	0,0508	0,0004	0,79	17,81	0,0366	0,0002	0,82
20,00	0,0506	0,0002	0,40	18,87	0,0369	0,0005	1,4
20,77	0,0503	-0,0001	-0,20	20,08	0,0369	0,0005	1,4
21,29	0,0506	0,0002	0,40	20,42	0,0367	0,0003	0,82
21,90	0,0507	0,0003	0,59	21,23	0,0365	0,0001	0,27
22,41	0,0505	0,0001	0,20	21,86	0,0363	-0,0001	-0,27
23,03	0,0503	-0,0001	-0,20	22,48	0,0367	0,0003	0,82
24,04	0,0503	-0,0001	-0,20	23,25	0,0358	-0,0006	-1,68
25,14	0,0499	-0,0005	-1,0	23,90	0,0364	0,0	0,0
25,93	0,0499	-0,0005	-1,0	25,13	0,0358	-0,0006	-1,68
Среднее	0,0504	0,0003	0,62	—	0,0364	0,0003	0,92

ставлены результаты измерений более толстых образцов. Под номерами 8 и 9 в табл. 3 указаны алюминиевые сплавы: АМЦ, легированный магнием и цинком, и АМЦ, легированный магнием. Если для рассмотренных выше измерений абсолютные средние квадратические погрешности $\Delta\sigma_{cp} = 0,54$ МСм/м, $\Delta d_{cp} = 0,0017$ мм, то при измерении более толстых пластин имеем $\Delta\sigma_{cp} = 0,38$ МСм/м, $\Delta d_{cp} = 0,020$ мм. В первом случае относительные средние квадратические погрешности составляют 1,62 и 2,50 %, а во втором — 2,03 и 3,38 %, т. е. больше.

В случае двухпараметрового метода следует отметить возможность его применения также с преобразователями небольшого размера. Однако при этом в качестве начальных условий в программе необходимо задать σ и d близкими к ожидаемым значениям, что существенно облегчает процесс итерации при решении соответствующих уравнений. В этом режиме программу опробовали на образцах № 7 и 8 (см. табл. 2). Поскольку одной из составляющих погрешностей (см. табл. 2 и 3) являются погрешности непосредственных измерений, толщины образцов — микрометром и удельной электрической проводимости — мостовым методом, представляет интерес оценить погрешность самой методики.

Для этой цели использовали те же образцы № 7 и 8 (см. табл. 2). На каждом образце проводили по десять измерений на различных частотах в диапазоне 19 — 27 кГц. Результаты представлены в табл. 4. За эталонное значение принимали среднее арифметическое из десяти результатов измерений толщины фольги. Абсолютные и относительные погрешности в нижней строке таблицы рассчитаны как среднее квадратическое для десяти измерений; они значительно меньше приведенных в табл. 2 и 3.

Для сравнения, если, например, погрешность, указанная в паспорте ультразвукового толщиномера, составляет 0,010 мм, то его предпочтительнее применять для измерения больших толщин. Но при измерении тонких материалов относительная погрешность измерений таким прибором существенно возрастает: при измерении образцов толщиной 0,2 мм она составляет 5 %.

Выводы. Предложена методика измерений вихретоковыми преобразователями толщины d и удельной электри-

ческой проводимости σ немагнитных материалов, включающая расчеты с использованием математической модели. Методика приведена в двухпараметровом и однопараметровом вариантах. Двухпараметровый вариант применен для образцов в диапазонах измерений $d = 5 \dots 25$ мм, $\sigma = 0,15 \dots 1,8$ МСм/м (см. табл. 1); однопараметровый — в диапазонах $d = 12$ мкм ... 1,4 мм и $\sigma = 0,39 \dots 54$ МСм/м (см. табл. 2 и 3).

Рассчитана чувствительность вихретокового преобразователя к толщине измеряемых образцов в зависимости от обобщенного вихретокового параметра и относительного значения толщины образца, а также от частоты в диапазоне $\sigma = 2 \dots 53$ МСм/м.

Определены средние статистические погрешности измерений по приведенной методике: $\delta_{\sigma} = 1,62$ % и $\delta_d = 2,5$ % в диапазоне 12 мкм — 0,2 мм; $\delta_{\sigma} = 2$ % и $\delta_d = 3,4$ % в диапазоне 0,3 — 1,4 мм.

Оценена собственная погрешность рассмотренной методики и показано, что она несколько меньше погрешности, определяемой путем сравнения с эталонными значениями. Например, при измерении толщины в диапазоне 12 мкм — 0,2 мм относительные статистические погрешности соответственно равны 0,92 и 2,4 %.

Л и т е р а т у р а

1. **Неразрушающий** контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003.
2. **Дякин В. В., Сандовский В. А.** Задачи электродинамики в неразрушающем контроле. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2007.
3. **Батыгин В. В., Топтыгин И. Н.** Сборник задач по электродинамике. М.: Наука, 1970.
4. **Плис А. И., Сливина Н. А.** Лабораторный практикум по высшей математике. М.: Высшая школа, 1994.
5. **Левит М. Г.** Программное обеспечение для решения задач численного анализа на СМ ЭВМ. Кишинев: Штиинца, 1991.

Дата принятия 13.07.2012 г.

