

## Измерение толщины стенок изделий из углеродных композиционных материалов с использованием вихретокового фазового метода

А. И. Потапов, В. А. Сясько

*В статье рассмотрены принципы построения преобразователей для измерения толщины стенок изделий из углеродных композиционных материалов, вопросы расчета и оптимизации их характеристик, а также подавления мешающих параметров. Приведены конструкция и основные метрологические характеристики разработанных преобразователей.*

Углеродные композиционные материалы (УКМ) широко применяются в различных отраслях промышленности, в том числе в авиакосмическом комплексе. Изделия из них могут быть как малоразмерными, так и крупногабаритными, площадью до десятков м<sup>2</sup>, в том числе с шероховатой поверхностью. Диапазон толщин стенок несущих конструкций из УКМ в большинстве случаев составляет от 2 до 10 мм [1, 2]. Обеспечение заданной толщины стенки в процессе формования изделия является одной из гарантий требуемых прочностных характеристик изделий.

Чаще всего при контроле затруднен двусторонний доступ к стенке изделия, что серьезно ограничивает применение механических средств измерения толщины, а использование акустического эхо-метода не обеспечивает достоверности измерений из-за многократных отражений звуковых волн в слоистой структуре, значительного разброса скорости ультразвука по объему и площади изделия, а также шероховатости поверхности.

Сотрудники  
Федерального  
государственного  
бюджетного обра-  
зовательного уч-  
реждения высшего  
профессиональ-  
ного образования  
«Национальный  
минерально-сырь-  
евой университет  
«Горный», кафедра  
«Приборостроение»



**Потапов  
Анатолий  
Иванович**  
Заведующий,  
профессор, д. т. н.



**Сясько  
Владимир  
Александрович**  
Профессор, д. т. н.

В связи с этим представляет интерес использование вихретокового метода неразрушающего контроля. При этом объект контроля следует рассматривать как многослойную электропроводящую неферромагнитную пластину толщиной  $T$  и электропроводностью  $\sigma_i$  каждого слоя. Можно говорить о некотором интегральном значении электропроводности  $\sigma_{\text{и}}$  объекта контроля в объеме распространения вихревых токов. Для большинства изделий из УКМ  $\sigma_{\text{и}}$  лежит в диапазоне  $\approx 5 \div 40$  кСм/м и может сильно варьироваться (до  $\pm 10 \div 15\%$ ) в одном изделии.

Вихретоковый фазовый метод измерения толщины электропроводящих материалов основан на анализе электромагнитного поля вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте, зависящих от  $T$ ,  $\sigma_{\text{и}}$  и геометрических характеристик материала (диаметра  $d$ , шероховатости  $R_z$  и др.), а также величины зазора  $h$  между изделием и контактной поверхностью преобразователя. Структурная схема трансформаторного трехобмоточного вихретокового фазового преобразователя, использующего в качестве опорного сигнала напряжение на компенсационной обмотке, изображена на рис. 1.

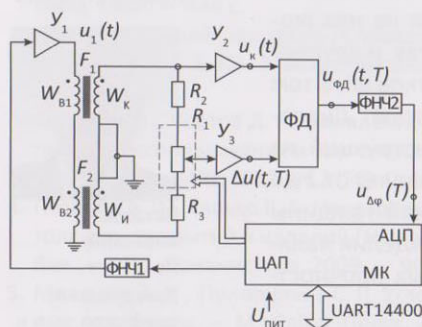


Рис. 1. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя:  $U_1 - U_3$  — усилители, ФД — фазовый детектор, ФНЧ1 — ФНЧ2 — фильтры низкой частоты,  $W_{B1}$ ,  $W_{B2}$  — обмотки возбуждения,  $W_K$  и  $W_I$  — дифференциально включенные компенсационная и измерительная обмотки, МК — микроконтроллер,  $R_1$  — управляемый цифровой балансировочный потенциометр,  $F_1$ ,  $F_2$  — ферритовые броневые сердечники

Обмотка  $W_{B1}$  запитывается синусоидальным напряжением  $u_1(t)$  частоты  $f$ . Усиленное разностное (вносимое) напряжение  $\Delta u(t, T)$  поступает на фазовый детектор ФД. Опорным сигналом для фазового детектора служит напряжение  $u_k(t)$  с выхода компенсационной обмотки  $W_K$ . Постоянное напряжение  $U_{\text{Дж}}$  на выходе фильтра низкой частоты пропорционально разности фаз  $D_j$  между напряжением  $u_k(t)$  и разностным (вносимым) напряжением  $\Delta u(t, T)$ . Балансировка обмоток преобразователя производится с использованием цифрового потенциометра, управляемого микроконтроллером.

Для анализа характеристик измерительного преобразователя удобно использовать обобщенный параметр

$$\beta = R\sqrt{2\pi f\sigma_{и}\mu_0}, \quad (1)$$

где  $R$  — эквивалентный радиус обмотки возбуждения;  
 $f$  — частота тока возбуждения;  
 $\sigma_{и}$  — интегральная электропроводность материала;  
 $\mu_0$  — магнитная постоянная.

При выборе соответствующего значения  $f$  вариация  $T$  будет приводить к изменению  $\Delta\varphi$ . Однако девиация электропроводности материала изделия также будет приводить к изменению  $\Delta\varphi$  и вызывать дополнительную погрешность  $\Delta T(\sigma)$ , для подавления которой следует определять истинное значение  $\sigma_{и}$  в точке изменения.

Для обеспечения приемлемой чувствительности при измерении  $T$  величину  $\beta_T$  следует выбирать на уровне  $0,5 \div 2$ , а при измерении  $\sigma$  величину  $\beta_\sigma$  следует выбирать на уровне  $5 \div 20$  [3].

В общем случае глубина проникновения вихревых токов  $\delta$ , определяющая максимальную измеряемую толщину  $T_{\max}$  и минимальную допустимую толщину при измерении электропроводности  $T_{\min}$ , равна [4]:

$$\delta = 1/\sqrt{\pi f\sigma_{и}\mu_0}, \quad (2)$$

Проведенные исследования показали, что слои углеродных композиционных материалов могут отличаться по электропроводности, следовательно глубина проникновения вихревых токов должна обеспечивать интегральную оценку их свойств при измерении  $\sigma_{и}$ .

В соответствии с [3] допустимыми для рассматриваемой задачи являются  $T_{\max} \approx 0,7\delta$ , а  $T_{\min} \approx 1,7\delta$ .

Из указанных выше соотношений и (2) следует, что оптимальные значения частоты преобразователей для измерения толщины и электропроводности равны:

$$f_{T_{\text{опт}}} \approx 0,49 / (\pi\mu_0\sigma T_{\max}^2), \quad (3)$$

$$f_{\sigma_{\text{опт}}} \approx 2,89 / (\pi\mu_0\sigma T_{\min}^2) \quad (4)$$

соответственно.

Для обеспечения указанных выше значений  $\beta_T$  и  $\beta_\sigma$  эквивалентный радиус  $R$  обмотки  $W_1$  для вихретоковых фазовых преобразователей необходимо выбирать из условия:

$$R = \beta/\sqrt{2\pi f\sigma_{и}\mu_0}. \quad (5)$$

При анализе характеристик преобразователей следует учесть влияние мешающих параметров:

- величины и вариации  $\sigma_{и}$  изделия;
- зазора  $h$  между преобразователем и изделием;
- диаметра  $d$  изделия в зоне измерения и его вариации;
- шероховатости  $R_z$  изделия.

Измерение электропроводности изделий из УКМ проводилось на образцах продукции в соответствии с методикой, изложенной в [5]. Проведенные исследования изделий с отличающимися схемами армирования и различными соотношениями армирующего материала и связующего показали, что применительно к задачам измерения толщины стенки можно говорить о следующем диапазоне интегральной электропроводности  $\sigma_{и} \approx 7 \div 35$  кСм/м. При этом граничные значения  $T \approx 2 \div 10$  мм.

Для изделий с интегральной электропроводностью  $\sigma_{и} = 35$  кСм/м оптимальные частоты для граничных значений  $T$  составят  $f_{\text{топт}}(T=10) \approx 35$  кГц и  $f_{\text{топт}}(T=2) \approx 875$  кГц. Соответственно, оптимальные частоты для измерения электропроводности  $f_{\sigma_{\text{опт}}}(T=10) \approx 200$  кГц и  $f_{\sigma_{\text{опт}}}(T=2) \approx 5$  МГц. Для изделий с интегральной электропроводностью  $\sigma_{и} = 7$  кСм/м  $f_{\sigma_{\text{опт}}}(T=10) = 176$  кГц и  $f_{\sigma_{\text{опт}}}(T=2) = 4,4$  МГц,  $f_{\sigma_{\text{опт}}}(T=10) \approx 1$  МГц и  $f_{\sigma_{\text{опт}}}(T=2) \approx 25$  МГц. Для сердечников броневго типа с радиусом экрана  $R = 6 \dots 15$  мм при рассчитанных значениях частот  $\beta_T \approx 0,6$ ,  $\beta_\sigma \approx 7$ , что, в принципе, удовлетворяет условиям обеспечения оптимальной чувствительности. Однако приведенная на рис. 1 схема обеспечивает верхний диапазон рабочих частот на уровне  $\approx 5$  МГц, что соответствует  $T_{\text{мин}} \approx 5$  мм при  $\sigma_{и} = 7$  кСм/м. То есть измерение электропроводности во всем диапазоне контролируемых  $T$  и  $\sigma_{и}$  не будет обеспечено. В этом случае при  $T < 5$  мм для измерения  $\sigma_{и}$  возможно применение вихретокового частотного метода [6] с учетом того, что он не обеспечивает отстройки от  $h$  и  $R_z$ .

Напряжение на измерительной обмотке  $W_{и}$  равно сумме напряжения  $\dot{U}_0$ , возникающего в отсутствие контролируемого изделия, и вносимого (разностного) напряжения  $\dot{U}_{\text{вн}}$ , возникающего вследствие влияния изделия с покрытием:  $\dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{U}_{\text{вн}}$ .

Комплексное относительное вносимое напряжение  $\dot{U}_{\text{вн}}^*$  в соответствии с [3] равно:

$$\dot{U}_{\text{вн}}^* = \frac{\dot{U}_{\text{вн}}}{|\dot{U}_0|} = \frac{j\pi c_0 R_B R_{и}}{M} \int_0^\infty J_1(\lambda R_B) J_1(\lambda R_{и}) e^{-\lambda(z_0 + z_{и})} \chi_0 d\lambda,$$

$$\chi_0 = \frac{(\lambda - q_1)(q_1 + q_2)e^{Tq_1} - (\lambda + q_1)(q_2 - q_1)e^{-Tq_1}}{(\lambda + q_1)(q_1 + q_2)e^{Tq_1} - (\lambda - q_1)(q_2 - q_1)e^{-Tq_1}}, \quad (6)$$

$$q_i = \sqrt{\lambda^2 + j\mu_0\sigma_i\omega},$$

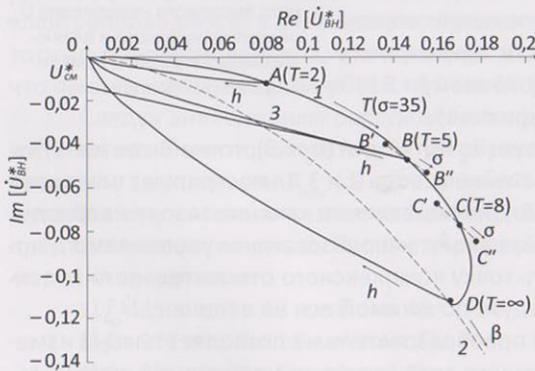
где  $T$  — толщина материала;  $R_B$  — радиус обмотки возбуждения;  $R_{и}$  — радиус измерительной обмотки;  $z_{и}$ ,  $z_B$  — расстояние от измерительной обмотки и обмотки возбуждения до поверхности изделия, соответственно;  $J_1(\lambda R_i)$  — функция Бесселя первого порядка;  $\lambda$  — параметр преобразования;  $\sigma_i$  — электропроводность материала;  $M$  — коэффициент начальной взаимной индукции между обмотками;  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота тока возбуждения.

При расчетах можно принять радиусы обмоток равными радиусу ферритового броневого сердечника [4].

Разность фаз  $\Delta\varphi$  определяется выражением:

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}[\dot{U}_{BH}^*]}{\text{Re}[\dot{U}_{BH}^*]}. \quad (6)$$

На рис. 2 представлена рассчитанная в соответствии с (6) зависимость комплексного относительного вносимого напряжения  $\dot{U}_{BH}^*$  от толщины изделия для  $\sigma_{и} = 35$  кСм/м при  $f = 35$  кГц и  $R \approx 15$  мм (кривая 1). Во всем диапазоне изменения  $T$  от 2 до 10 мм обеспечивается приемлемая чувствительность, позволяющая с учетом погрешности измерения разности фаз схемы



измерения разности фаз схемы  $\Delta\varphi$  обеспечить абсолютную погрешность измерения на уровне  $\pm 0,01T$  в нормальных условиях. Однако изменение указанных выше мешающих параметров будет вызывать дополнительную погрешность измерения.

Рис. 2. Зависимость комплексного вносимого напряжения  $\dot{U}_{BH}^*$  от контролируемого и влияющих параметров при измерениях толщины изделия

Линия отвода 3 иллюстрирует

влияние  $h$  в точке измерения  $B$ . Изменение зазора до  $0,3$  мм вызовет дополнительную погрешность измерения порядка  $0,1T$ . Для подавления влияния зазора (а также эквивалентных зазору  $R_z$  и  $d$ ) необходимо электронной балансировкой с использованием управляемого потенциометра  $R_1$  сместить точку комплексного относительного вносимого напряжения на воздухе по мнимой оси на величину  $\dot{U}_{cm}^*$ , соответствующую диапазону измерения  $T$ .

Влияние вариации электропроводности изделия иллюстрируют линии  $B'-B''$  и  $C'-C''$ , соответствующие изменению  $\sigma_{и}$  от  $32$  до  $38$  кСм/м ( $\pm 10\%$  от номинального значения), и показывающие, что дополнительная погрешность измерения может достигать величины  $\pm(0,1 \dots 0,15) T$ , в зависимости от диапазона измерения. Контроль  $\sigma_{и}$  может позволить подавить влияние девиации  $\sigma_{и}$  на результат измерения  $T$ .

Для других значений  $\sigma_{и}$  годографы  $\dot{U}_{вн}^*$  ( $T$ ) носят аналогичный характер (например, при  $\sigma_{и} = 7$  кСм/м для получения аналогичных зависимостей измерения необходимо проводить при  $f \approx 176$  кГц и  $R \approx 15$  мм).

Зависимость  $\dot{U}_{вн}^*$  для задачи определения электропроводности применительно к преобразователю с  $R = 6$  мм и  $f \approx 5$  МГц представлена на рис. 3 (кривая 1).

Точка  $A$  соответствует  $\sigma_{и} = 7$  кСм/м ( $b_{\sigma} \approx 3$ ), точка  $B$  соответствует  $\sigma_{и} = 35$  кСм/м ( $b_{\sigma} \approx 7$ ). Линии отвода 2 и 3 иллюстрируют влияние  $h$  в точках измерения  $A$  и  $B$ . Для подавления влияния зазора необходимо электронной балансировкой с использованием управляемого потенциометра  $R_1$  сместить точку комплексного относительного вносимого напряжения на воздухе по мнимой оси на величину  $\dot{U}_{cm}^*$ .

Рассматриваемый преобразователь не позволяет плавно изменять частоту возбуждающего тока, поэтому необходимо оптимальным образом подобрать частоты нескольких преобразователей для перекрытия диапазонов измерения  $T$  и  $\sigma$ . На рис. 4 представлены зависимости  $T_{min}$  ( $\sigma$ ) для трех значений  $f$  и  $R$ . Соответствующие годографы

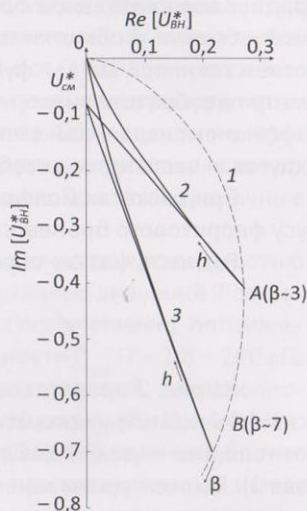


Рис. 3. Зависимость комплексного вносимого напряжения  $\dot{U}_{вн}^*$  от контролируемого и влияющих параметров при измерении электропроводности

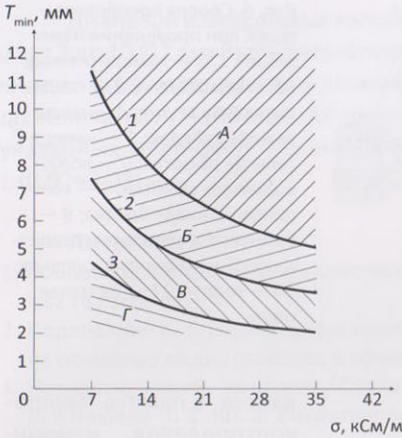


Рис. 4. Зависимость минимальной допустимой толщины изделия  $T_{\min}$  от измеряемой электропроводности (1 —  $f = 0,8$  МГц,  $R = 15$  мм; 2 —  $f = 1,8$  МГц,  $R = 10$  мм; 3 —  $f = 5,0$  МГц,  $R = 6$  мм)

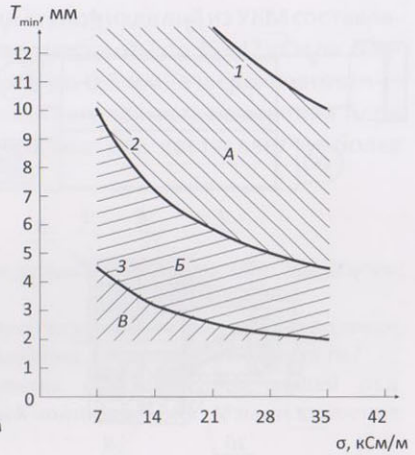


Рис. 5. Зависимость максимальной контролируемой толщины изделия  $T_{\max}$  от электропроводности основания (1 —  $f = 35$  кГц,  $R = 15$  мм; 2 —  $f = 176$  кГц,  $R = 10$  мм; 3 —  $f = 875$  кГц,  $R = 6$  мм)

комплексного относительного вносимого напряжения  $\hat{U}_{\text{вн}}^*$  представлены на рис. 3. Измерение электропроводности в зоне А оптимально проводить преобразователем, у которого  $f = 0,8$  МГц,  $R = 15$  мм, в зоне Б — преобразователем, у которого  $f = 1,8$  МГц,  $R = 10$  мм, в зоне В — преобразователем, у которого  $f = 5$  МГц,  $R = 6$  мм. Измерение электропроводности в зоне Г можно производить вихретоковым частотным преобразователем, у которого  $f \approx 12$  МГц,  $R = 3$  мм, учитывая, что при его использовании не достигается подавление влияния  $h$ .

Следуя аналогичным рассуждениям, для измерения толщины изделия можно использовать три преобразователя. На рис. 5 представлены зависимости  $T_{\max}(\sigma)$  для преобразователей, у которых годографы относительного вносимого напряжения  $\hat{U}_{\text{вн}}^*$  соответствуют представленным на рис. 2. Параметры преобразователей и зоны измерения следующие:

- 1)  $f = 35$  кГц,  $R = 15$  мм (зона А);
- 2)  $f = 176$  кГц,  $R = 10$  мм (зона Б);
- 3)  $f = 875$  кГц,  $R = 6$  мм (зона В).

Градуировка преобразователей производится на эталонных образцах толщины и электропроводности, изготавливаемых по технологии производителя изделий. Семейство характеристик записыв-

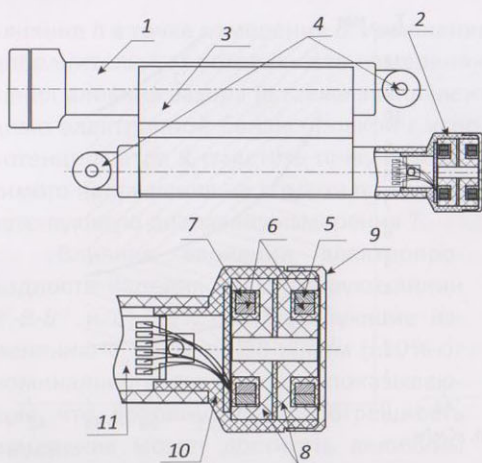


Рис. 6. Сборка преобразователей при проведении измерений: 1, 2 — измерительные преобразователи; 3 — соединительная втулка; 4 — места вывода кабелей; 5 — измерительная обмотка; 6 — возбуждающие обмотки; 7 — компенсационная обмотка; 8 — броневые ферритовые сердечники; 9 — защитный колпачок; 10 — корпус; 11 — печатная плата

Элементы электрической схемы, представленной на рис. 1, располагаются на печатной плате внутри преобразователей, что позволяет существенно уменьшить уровень наводок и собственных шумов и обеспечить требуемую чувствительность при измерениях. Связь с блоком обработки и представления информации осуществляется по каналу связи UART.

При измерениях требуемые преобразователи соединяются в единый блок с использованием соединительной втулки (рис. 6) и подключаются к блоку обработки и представления информации «Константа К6».

Перед началом измерений оператор задает границы диапазона  $T$ , затем с использованием одного из преобразователей оценивается величина электропроводности изделия, производится сборка необходимых для измерения преобразователей и их подключение к прибору. Прибор не требует проведения калибровки на образцах продукции перед началом контроля. Измерения могут осуществляться двумя способами:

- оператор производит измерение среднего значения электропроводности изделия по зоне контроля  $\sigma_{\text{иср}}$  и далее производит измерения толщины изделия по заданной зоне, корректируя их с учетом  $\sigma_{\text{иср}}$ ;
- оператор производит измерение электропроводности  $\sigma_{\text{и1}}$  в каждой точке измерения и корректирует полученное в этой точке значение толщины с учетом  $\sigma_{\text{и1}}$ .



Диапазон измеряемых толщин стенок изделий из УКМ составляет от 2 до 10÷12 мм при электропроводности от 7 до 35÷42 кСм/м. Влияние зазора подавляется в диапазоне до 0,3 мм, а шероховатости — до величины  $R_z \approx 150$  мкм. Абсолютная погрешность измерения  $T$  при указанных величинах мешающих параметров составляет не более  $\pm (0,02 \div 0,03) T$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бобович Б. Б. Полимерные композиционные материалы. URL: <http://www.ics2.ru/articles/>
2. Перепелкин К. Е. Полимерные композиты на основе химических волокон, их основные виды, свойства и применение. URL: <http://www.unctm.ru/>
3. Неразрушающий контроль/Справочник в 8 томах под общей ред. В. В. Клюева. Т. 2. Кн. 2: Вихретоковый контроль. — М.: Машиностроение, 2006. — 688 с.
4. Дорофеев А. Л., Никитин А. И., Рубин А. Л. Индукционная толщинометрия. — М.: Энергия, 1978. — 184 с.
5. Pauw L. J. van der. A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape. — Philips Techn. Rev. 1958/59. V. 20. No. 8. P. 220–224.
6. Потапов А. И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. — СПб.: Гуманистика, 2009. — 904 с.