

УДК 620.179.161

Л. В. Волкова, канд. техн. наук, доц.  
О. В. Муравьева, д-р техн. наук, проф.  
В. В. Муравьев, д-р техн. наук, проф.  
А. А. Хантимирова, студент  
E-mail: ludmila396@rambler.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Исследование сигнала вихретокового преобразователя при контроле терморасширенного графита**

*В статье рассмотрены результаты исследования сигнала с вихретокового преобразователя в виде накладной индуктивной катушки. Проведена оценка изменения сигнала с листов и матов терморасширенного графита различной толщины и плотности. Получено, что модуль полного сопротивления сигнала зависит от плотности и толщины объекта контроля. Обнаружена неравномерность распределения модуля полного сопротивления по площади образцов из матов и тонких листов.*

**Ключевые слова:** терморасширенный графит, вихретоковый контроль, индуктивная катушка, комплексное сопротивление.

### **Введение**

Терморасширенный графит (ТРГ) становится все более и более распространен для применения в различных приложениях, начиная с нефтегазовой промышленности, химического машиностроения и заканчивая атомной промышленностью [1, 2]. Скрытые дефекты, возникающие во время производства, могут привести к последующим проблемам с качеством итоговой продукции и увеличению затрат и рисков. Типовыми дефектами при производстве являются расслоения, складки, пористость, которые приводят к изменению плотности. Чтобы гарантировать качество и надежность, был разработан метод акустического неразрушающего контроля для проверки плотности, обладающий преимуществом в бесконтактности и высокой чувствительности, однако метод чувствителен к внешним акустическим шумам, которые могут существенно повлиять на результат контроля при производстве [3–5].

Вихретоковый метод неразрушающего контроля – широко используемый метод, основанный на принципе электромагнитной индукции. Метод является бесконтактным с высокой скоростью сканирования и применим для обнаружения дефектов, которые могут быть вызваны

изменением электрической проводимости и магнитной проницаемости [6–8]. Изменение плотности в ТРГ приводит к изменению локальной средней проводимости материала и изменению характеристик электрической проводимости материала, эти изменения электрических характеристик можно обнаружить с использованием технологии вихретокового контроля.

Целью работы являлась оценка возможности контроля плотности ТРГ с использованием вихретокового метода неразрушающего контроля.

### Сведения из теории

Вихретоковый контроль применяется для обнаружения большого разнообразия типов дефектов в тонкослойных структурах, таких как нарушение структуры, трещины, расслоения и волнистость поверхности. Для реализации вихретокового контроля ТРГ матов и листов различной толщины и плотности была использована экспериментальная установка, представленная на рис. 1.

Круглый вихретоковый преобразователь без сердечника помещался над образцами из ТРГ с зазором между преобразователем и объектом контроля 0,1 мм. Импеданс катушки измерялся измерителем RLC (МНИПИ Е7-20) на частоте 1 МГц. Данная частота тока возбуждения обеспечивает глубину проникновения электромагнитного поля в образцы из ТРГ 0,7 мм.

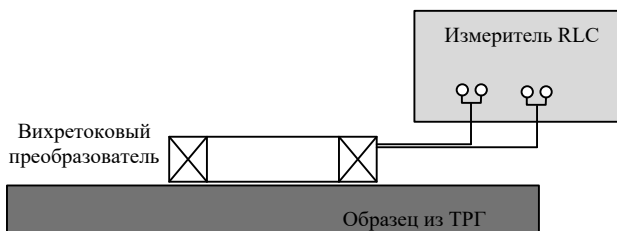


Рис. 1. Экспериментальная установка для вихретокового контроля ТРГ

Вихретоковый преобразователь представляет собой индуктивную катушку с параметрами, представленными в табл. 1.

Таблица 1. Параметры вихретокового преобразователя

№	Количество витков	Диаметр, мм	Высота, мм
1	240	11,96	1,5

Для оценки изменения импеданса катушки по площади объекта контроля были проведены измерения в 16 точках по площади объекта согласно рис. 2.

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16

Рис. 2. Схема измерения объектов из ТРГ

### Результаты и их обсуждение

Для оценки зависимости полного сопротивления  $Z$  от плотности мата и листа были измерены 17 матов и 26 листов с различной плотностью и толщиной. В процессе измерений в каждом объекте измерялось 16 точек по площади объекта, а затем производилось усреднение результатов измерений.

По результатам оценки зависимости модуля полного сопротивления от плотности мата и листа из ТРГ были построены графики изменения модуля полного сопротивления вихретокового преобразователя от плотности объекта контроля (рис. 3, 4), из которых видно, что при увеличении плотности мата в 6 раз, а листа в 1,3 раза модуль полного сопротивления вихретокого преобразователя уменьшается в 1,3 раза. Погрешность измерения проведенных измерений составила 5 Ом. Наличие экстремума измерений при плотности мата  $132 \text{ кг/м}^3$  связано с неравномерной плотностью исследуемого мата по площади и поверхностными дефектами мата.

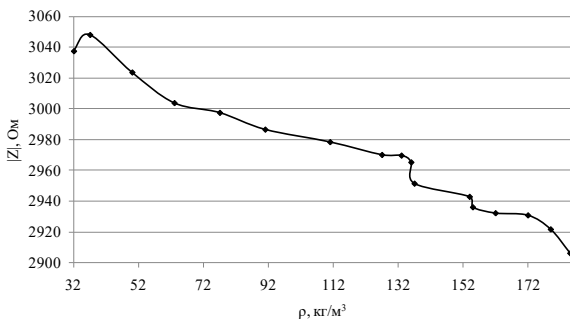


Рис. 3. График изменения модуля полного сопротивления  $|Z|$  вихретокового преобразователя от плотности  $\rho$  мата

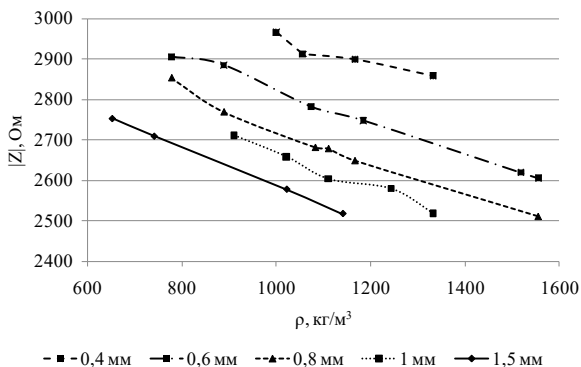


Рис. 4. График изменения модуля полного сопротивления  $|Z|$  вихретокового преобразователя в зависимости от плотности  $\rho$  для листов разной толщины

Из графиков видно, что модуль полного сопротивления вихретокового преобразователя зависит не только от плотности исследуемого объекта, но и от толщины листа. Влияние толщины листа на сигнал вихретокового преобразователя связано с различной плотностью вихревых токов на различных глубинах объекта контроля, в случае малых толщин плотность вихревых токов по толщине объекта контроля высокая, по сравнению с объектами большой толщины. Для ослабления влияния изменений толщины листа при контроле плотности была рассчитана поверхностная плотность объектов контроля  $\rho \cdot T$ ,  $\text{кг/м}^2$  (рис. 5, 6).

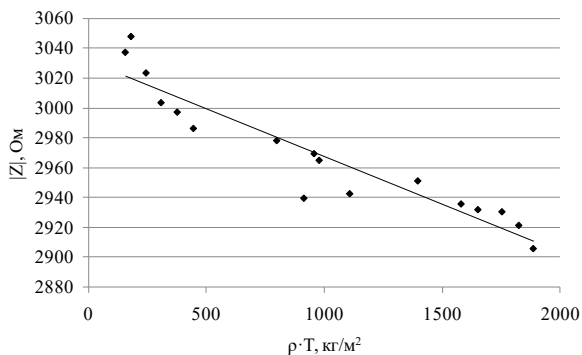


Рис.5 График изменения модуля полного сопротивления  $|Z|$  вихретокового преобразователя в зависимости от поверхностной плотности  $\rho \cdot T$  мата

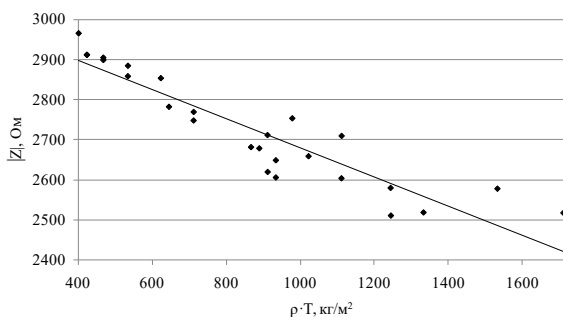


Рис. 6 График изменения модуля полного сопротивления  $|Z|$  вихретокового преобразователя в зависимости от поверхностной плотности  $\rho \cdot T$

Из предложенных зависимостей видно, что модуль полного сопротивления вихретокового преобразователя зависит от поверхностной плотности объекта контроля. Таким образом, для уменьшения влияния толщины объекта контроля необходимо выбирать частоту тока возбуждения достаточно большой, чтобы глубина проникновения электромагнитного поля была меньше толщины листа.

С целью выявления неравномерности свойств в листах ТРГ была проведена оценка распределения комплексного сопротивления по площади листов.

По результатам оценки были рассчитаны относительные изменения сигналов вихретокового преобразователя в зависимости от среднего значения  $Z_{отн}$ .

$$Z_{отн} = \frac{Z - Z_{ср}}{Z_{ср}}, \quad (1)$$

где  $Z$  – значение сопротивления в точке измерения;  $Z_{ср}$  – среднее значение сопротивления по площади образца.

Анализ результатов показал, что для матов наблюдается значительный разброс относительного изменения сигнала по площади образца от 11 до 32 %. При этом для мата с толщиной 4,9 мм неравномерность достигает 32 %. Для листов с толщиной от 0,6 мм до 1,5 мм отклонение полученного сигнала составило от 4 до 5 %, а в листе малой толщины 0,4 мм, отклонение сигнала в различных точках достигает до 47 %.

### Выводы

По результатам проведенных исследований сигнала вихретокового преобразователя в зависимости от характеристик объектов из ТРГ было получено, что модуль полного сопротивления сигнала вихретокового преобразователя существенно зависит от плотности мата и листа, а также от толщины листа, что необходимо учитывать при проведении измерений.

Сигнал вихретокового преобразователя имеет отклонения по площади исследуемых образцов, что может быть связано с неравномерной плотностью; так, в образцах матов, обладающих меньшей плотностью, отклонение сигнала существенное и может достигать 32 %.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашикова» в рамках научного проекта № ПАВ/20-90-17.*

### Список литературы

1. Интеркалированные соединения графита акцепторного типа, новые углеродистые материалы на их основе / Н. Е. Сорокина, И. В. Никольская, С. Г. Иванов, В. В. Авеев // Известия академии наук. Серия химическая. – 2005. – № 8. – С. 1699–1716.
2. Махорин, К. Е. Вспучивание природного графита, обработанного серной кислотой / К. Е. Махорин, А. П. Кожан, В. В. Веселов // Химическая техника. – 1985. – № 2. – С. 3–6.

3. Исследование характеристик листов пенополиэтилена акустическими методами / О. П. Богдан, О. В. Муравьева, А. В. Платунов, Д. С. Рысев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 61–68.
4. Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, С. С. Мкртчян // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 78–88.
5. Акустическая структуроскопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. Ю. Будрин, М. А. Синцов, А. В. Зорин // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 37–44.
6. Enhancement of sensitivity to delamination in eddy current testing of carbon fiber composites by varying probe geometry / K. Mizukami, A. S. bin Ibrahim, K. Ogi, N. Matvieieva, I. Kharabet, M. Schulze, H. Heuer // Composite Structures. 2019. Vol. 226. P. 111227.
7. Wu, D. Non-destructive testing for carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP) using a novel eddy current probe / D. Wu, F. Cheng, F. Yang, Ch. Huang // Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 177. P. 107460.
8. Mizukami, K. A simple inverse analysis method for eddy current-based measurement of through-thickness conductivity of carbon fiber composites / K. Mizukami, Y. Watanabe // Polymer Testing. 2018. Vol. 69. Pp. 320–324.

*L. V. Volkova*, CSc in engineering, associate professor

*O. V. Muravieva*, DSc in engineering, professor

*V. V. Muraviev*, DSc in engineering, professor

*A. A. Hantimirova*, student

E-mail: [ludmila396@rambler.ru](mailto:ludmila396@rambler.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Investigation of the Signal of an Eddy-Current Transducer When Monitoring Thermally Expanded Graphite**

*The article discusses the results of studying a signal from an eddy-current transducer in the form of an overhead inductive coil. An assessment of the change in the signal from sheets and mats of thermally expanded graphite of various thicknesses and densities is carried out. It was found that the amplitude of the signal resistance depends on the density and thickness of the test object. An uneven distribution of the amplitude over the area of samples from mats and thin sheets was found.*

**Keywords:** thermally expanded graphite, eddy current control, inductive coil, complex resistance.