



рис.1. Модель ВОД для исследования на механические воздействия

Исследования показали, что смоделированный нами ВОД имеет незначительную нелинейность при приложенном давлении на стальные стержни от 1 до 10 МПа сохраняется стабильная линейность характеристик, соответственно есть возможность использование в качестве измерительного органа со стороны массива горных пород для контроля внезапного обрушения свода выработки.

Список публикаций:

- [1] Liu, All Fiber Optic Coal Mine Safety Monitoring System, (invited) SC3. SC3.2 IEE Explorer, Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronic Exposition & Conference (AOE) 2008.
- [2] Мехтиев А.Д., Нешина Е.Г., Биличенко А.П. Исследование температурных воздействий на оптический кабель. Сборник XIX Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники», г. Красноярск, 2016. – С. 101-106.
- [3] Соколов А.Н., Яцеев В.А. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы // Измерительная техника. LightWave.– 2006. – № 4.

МЕТОД КОНТРОЛЯ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРИТОВОЙ КЕРАМИКИ

Петрова Анна Борисовна, Малышев Андрей Владимирович

Томский политехнический университет
Суржиков Анатолий Петрович, д.ф.-м.н.
abk9@tpu.ru

Ферриты являются неметаллическими твердыми магнитными материалами, представляющими собой химические соединения оксида железа с оксидами переходных металлов, таких как титан, цинк, марганец, литий. Так, наряду с высокими электромагнитными параметрами, преимуществом ферритов является достаточно простая технология их изготовления, позволяющая получать материалы с различными заданными параметрами. Наибольшее распространение ферриты нашли в области радиотехники, электроники и автоматики, они применяются для изготовления сердечников бытовой и специальной радиоэлектронной аппаратуры, сердечников для телевизионной аппаратуры и импульсных трансформаторов, преобразователей постоянного напряжения, для магнитного экранирования и поглощения радиопомех и др.

Одним из важных параметров, позволяющих оценить ферритовую керамику, является магнитная проницаемость, исследование которой позволяет проследить за общими закономерностями преобразования дефектности материала. Актуальность данной тематики подтверждается публикационной активностью научных групп, занимающихся данным вопросом [1-3]. В литературе имеются сведения о различных методах, позволяющих осуществлять измерения магнитной проницаемости [4]. К ним относятся: мостовые методы измерения магнитных характеристик; индукционный метод с использованием дифференциального трансформатора; метод, основанный на измерении отношения двух напряжений, пропорциональных индукции и напряженности полям [5, 6]. Большое распространение получил косвенный метод, заключающийся в измерении индуктивности образца с намагничивающей обмоткой с последующим расчетом магнитной проницаемости образца. Цель данной работы заключалась в исследовании магнитной

проницаемости литий-цинковой ферритовой керамики, подвергшейся радиационно-термическому спеканию на ускорителе ЭЛВ-6 (ИЯФ СО РАН) при температурах 1050 °С и 1100 °С.

В качестве исходных реагентов для синтеза образцов служили промышленные порошки Fe₂O₃, Li₂CO₃, ZnO. Смесь порошков подвергалась механоактивации в планетарной мельнице АГО-2С с использованием стальных размольных стаканов и шаров в течение 60 минут при комнатной температуре в режиме максимальной энергонапряженности (g-фактор 60). Весовое соотношение материала и шаров составляло 1:10. Как показано в работе [7] механическая активация исходных реагентов обеспечивает более высокую гомогенность литиевых ферритов. Образцы формовались холодным односторонним прессованием в виде таблеток диаметром 15 мм и толщиной 2 мм на гидравлическом прессе ПГр-10 при постоянном давлении 200 МПа в течение 3 минут. Для измерения магнитных характеристик образцы прессовались при аналогичном давлении и времени в форме тороидов с размерами: диаметр внешний 21.3 мм, внутренний 16.3 мм, высота 2.4 мм.

Радиационно-термическое спекание образцов проводилось на ускорителе электронов ЭЛВ-6 в Институте ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск) при температурах 1100 °С и 1050 °С.

Удельное электрическое сопротивление образцов было определено двухэлектродным методом, при котором на торцевых гранях образца термическим испарением в вакууме были изготовлены омические контакты, через которые пропускали постоянный электрический ток при температуре 25 °С. Величина удельного сопротивления была определена по формуле (1) [8]:

$$\rho_{dc} = U \cdot S / (I \cdot d) \quad (1)$$

где U – приложенное напряжение, В; I – ток через образец, А; S – площадь электродов, см²; d – толщина образца, см.

Плотность спеченных образцов определялась методом гидростатического взвешивания с использованием аналитических весов Shimadzu AUW-220D. Расчет плотности производился по формуле (2):

$$\rho_k = \rho_{ж} \cdot m_c / (m_n \cdot m_b) \quad (2)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность дистиллированной воды, г/см³; m_c – масса сухого образца, г; m_n – масса образца, насыщенного дистиллированной водой, г; m_b – масса образца, погруженного в дистиллированную воду, г.

По методике, представленной в работе [9], были определены открытая пористость образцов Θ . На сканирующем электронном микроскопе были получены снимки микроструктуры образцов ферритовой керамики с облученной и с необработанной стороны, после чего, методом секущих, был рассчитан средний размер зерен в образцах D_{cp} (таблица 1).

Удельная намагниченность σ_s была рассчитана по формуле (3):

$$\sigma_s = M_s / \rho_t \quad (3)$$

где ρ_t – теоретическая (рентгеновская) плотность, 4,85 г/см³. Значения намагниченности насыщения M_s измерялись с использованием импульсного магнитометра Н-04.

Область когерентного рассеяния (ОКР) и параметры решетки образцов обоих типов были определены при помощи рентгеноструктурного анализа. Температура Кюри для образцов ферритовой керамики была определена термомагнитометрическим методом, описанным в работе [10].

Для определения магнитной проницаемости μ были использованы образцы в форме тороидов. Обмотка, состоящая из 30-35 витков, была выполнена из медного провода в лаковой изоляции. Измерения индуктивности L (измеритель LCR-819) проведены при комнатной температуре. Значения магнитной проницаемости образцов рассчитывались по формуле (4) [5]:

$$\mu = 10^9 \cdot L / [2 \cdot \ln(D/d) \cdot h \cdot N^2] \quad (4)$$

где D – внешний диаметр тороидального сердечника, см; d – внутренний диаметр тороидального сердечника, см; h – высота тороидального сердечника, см; N – число витков.

Таблица 1 – Магнитные, электрические и структурные параметры литий-цинковой ферритовой керамики

Образец	T _{сп} , °С	μ	ρ _{dc} , Ом·см	ρ, г/см ³	Θ, %	D _{cp} , мкм	σ _s , Гс·см ³ ·г ⁻¹	О.К.Р., нм	Параметр решетки, Å	T _к , °С
1	1100	69,3	2·10 ³	4,15	13,2	2,5	67	148	8,3545	509

2	1050	49	$6,6 \cdot 10^3$	4,09	14, 5	2,2	70,5	131	8,3593	508
---	------	----	------------------	------	----------	-----	------	-----	--------	-----

Таким образом, в работе показана удовлетворительная применимость косвенного метода измерения магнитной проницаемости литий-цинковой ферритовой керамики. Как видно из таблицы, искомое значение магнитной проницаемости образцов первого типа, значительно выше, чем для образцов второго типа. Следовательно, для получения более высоких значений магнитной проницаемости образцов ферритовой керамики, спеченной радиационно-термическим способом, целесообразно применять более высокую температуру спекания. Также для образцов, полученных при более высокой температуре характерны более высокие значения плотности, низкая пористость и удельное сопротивление. При этом значения других магнитных и рентгеноструктурных параметров остаются практически неизменными.

Список публикаций:

- [1] Прутулов А. М. и [др.] // *Перспективные материалы: научный журнал*. 1998. № 2. С. 62,
[2] Susliaev V. I., Korovin E. Yu., Zhuravlev V. A. // *IJNT*. Vol. 12. № 3/4. P. 192.
[3] Malyshev A. V., Lysenko E. N., Vlasov V. A., Nikolaeva S. A. // *Ceramics International*. 2016/ Vol. 42. № 14. С. 16180.
[4] Шрамков Е. Г. // *Изд-во: М.: Высшая школа*. 1972. С. 397
[5] Чечерников В. И. // *Изд-во: М.: МГУ им. Ломоносова*. 1969. С. 242.
[6] Гадиев Т. А., Куркачева В. А., Гайнуллин Р. Н. // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. № 1. С. 30
[7] Surzhikov A. P., Lysenko E. N., Vlasov V. A., Malyshev A. V., Nikolaev E. V. // *Russ.Phys.J.* 2013. № 56, P. 681
[8] Еспенбетов Ж. Р., Малышев А. В. // *Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность*, г. Томск, 23-27 мая 2016 г.: в 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. Т. 1. 4 С.
[9] Петрова А. Б. // *Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов V Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых*, г. Томск, 3-8 октября 2016 г.: в 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. Т. 1. С. 163.
[10] Тойчбай Э., Астафьев А. Л., Лысенко Е. Н. // *Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*, г. Томск, 26-29 апреля 2016 г.: в 7 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. Т. 2. С. 38.