

Виконано дослідження впливу температури на магнітні властивості матеріалів, виконаних з марганець-цинкових феритів. Дослідження виконано на чотирьох сердечниках, які були виготовлені з різним процентним співвідношенням в сплаві марганцю і цинку. Результати досліджень показали значну залежність між температурою марганець-цинкового фериту і його магнітними властивостями, що може бути використано, наприклад, для побудови датчиків температури

Ключові слова: феромагнітний матеріал, ферит, магнітні характеристики, вплив температури, кільцевий сердечник, петля гістерезису, максимальна індукція, вимірвальна система

Проведено исследования влияния температуры на магнитные свойства материалов, выполненных из марганец-цинковых ферритов. Исследования проведено на четырех сердечниках, выполненных с разным процентным соотношением в сплаве марганца и цинка. Результаты исследований показали существенную зависимость между температурой марганец-цинкового феррита и его магнитными свойствами, что может быть использовано, например, для построения датчиков температуры

Ключевые слова: ферромагнитный материал, феррит, магнитные характеристики, влияние температуры, кольцевой сердечник, петля гистерезиса, максимальная индукция, измерительная система

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРИТОВ ИЗ МАРГАНЕЦ- ЦИНКОВОГО СПЛАВА

М. Л. Кахняж

Аспирант*

E-mail: m.kachniarz@mchtr.pw.edu.pl

Я. Л. Салах

Кандидат технических наук*

E-mail: j.salach@mchtr.pw.edu.pl

Р. Ю. Шевчик

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: r.szewczyk@mchtr.pw.edu.pl

А. В. Беньковски

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: a.bienkowski@mchtr.pw.edu.pl

И. В. Коробийчук

Кандидат технических наук, доцент

Промышленный институт автоматизации и измерений PIAP

ул. Йерозолимска, 202, г. Варшава, Польша, 02-486

E-mail: ikorobiichuk@piap.pl

*Институт метрологии и биомедицинской инженерии

Варшавский технологический университет

ул. Боболи, 8, г. Варшава, Польша, 02-525

1. Введение

Исследование магнитных свойств материи и магнитных характеристик материалов очень важно с точки зрения современной электроники, где индуктивные элементы играют большую роль. Одной из наиболее важных групп материалов, используемой в данной области, являются ферриты, которые используются в качестве материалов для изготовления магнитных сердечников индукционных элементов, таких как катушки индуктивности, дроссели, фильтры и трансформаторы [1].

Ферриты являют собой керамические материалы, которые содержат оксид железа (Fe_2O_3) химически связанный с одним или более атомами металлических элементов [2]. Так как они являются ферромагнитными материалами, то значит, что они имеют две кристаллические структуры, образованные атомами, которые имеют противоположные магнитные моменты, как в антиферромагнетиках, но противоположные магнитные моменты атомов в кристаллических решетках не уравновешены и поэтому материал имеет спонтанную намагниченность как ферромагнетик. По магнитным

свойствам ферриты можно разделить на две группы. Первую группу составляют магнитомягкие ферриты, которые используются в качестве магнитных сердечников трансформаторов и других индуктивных компонентов. Вторую группу составляют магнитотвердые ферриты, которые используются в качестве материалов для производства постоянных магнитов. Одной из наиболее широко используемых в технике групп магнитомягких ферритов являются ферриты из марганца и цинка (Mn-Zn).

Наиболее полное описание магнитных свойств материала выполняет его магнитная характеристика В-Н [3]. Она позволяет увидеть все изменения в структуре материала и его магнитных параметрах при изменяющемся магнитном поле.

На использование ферритов в технике значительное влияние оказывает исследование влияния условий окружающей среды на магнитные свойства ферритов. Как известно, условия окружающей среды, особенно температура, значительно влияют на магнитные свойства материалов [4]. Поэтому исследование влияния температуры на магнитные свойства феррита марганец-цинкового феррита является актуальным на сегодняшний день.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В книге [1] освещено состояние современных исследований в области магнитных материалов для практического применения. В работе [2] представлена информация о свойствах, методах изготовления и использования керамических материалов, в том числе ферритов. В книге [3] излагаются основы теории магнетизма и магнитных материалов. В работе [5] проведено исследование влияния температуры с добавлением в феррит бария. В [6] получены результаты влияния температуры на сердечник с аморфного материала с добавлением бора. Полученные результаты исследования в [7] показали изменения магнитных свойств ферритов при добавлении SiO_2 в процессе изготовления ферритов. В [8] исследовано влияние температуры на магнитные свойства аморфного материала с добавлением бора, в результате которых получено изменение магнитных свойств при изменении температуры. В [9] проведены исследования влияния температуры на микроструктуру и магнитные свойства наночастиц $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. В книге [10] рассмотрены основы молекулярного поля Вейсса, которая является фундаментальной теорией современной науки магнитных явлений в материи. В статье [11] показана возможность использования влияние температуры на магнитные свойства феррита для измерений температуры. В статьях [12, 13] представлена возможность моделирования влияния температуры на магнитные свойства ферромагнитных материалов. В известных работах отсутствуют данные об исследовании влияния температуры на магнитные свойства феррита на основе марганец-цинкового сплава, а так при добавлении бария, SiO_2 были замечены изменения магнитных характеристик. Поэтому возникает необходимость в проведении подобных исследований для использования марганец-цинкового феррита.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы являлось исследование влияния температуры в диапазоне от -20°C до 60°C на магнитные свойства марганец-цинкового феррита.

Для достижения поставленной цели предполагалось решение следующих задач:

- провести измерения магнитных характеристик четырех ферритовых материалов при различных температурах в исследуемом диапазоне;
- выполнить анализ результатов измерений и оценить влияние температуры на основные параметры исследуемых магнитных материалов.

4. Конструкция и параметры исследуемых сердечников, выполненных из марганец-цинковых ферритов

Для проведения исследований было использовано четыре сердечника, выполненных из разных марганец-цинковых ферритов. Химический состав исследуемых материалов можно представить общей формулой

$\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$. Исследуемые материалы отличались между собой соотношением содержания марганца и цинка (величина параметра x).

Все исследуемые материалы были выполнены в виде кольцевого сердечника (рис. 1). На основе геометрических размеров сердечника были рассчитаны его основные геометрические параметры, необходимые для определения значения напряженности магнитного поля H и магнитной индукции B в сердечнике. Для определения средней длины магнитного потока в сердечнике l_e была использована следующая зависимость:

$$l_e = \frac{(D+d)}{2}, \quad (1)$$

а площадь поперечного сечения S_e вычисляется из зависимости:

$$S_e = \frac{h(D-d)}{2}. \quad (2)$$

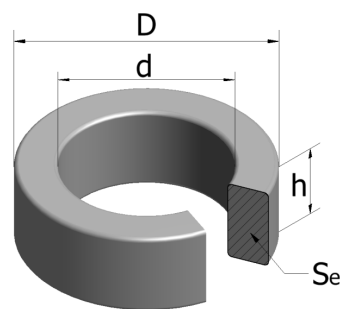


Рис. 1. Форма и геометрические размеры исследуемых марганцево-цинковых сердечников: D — внешний диаметр, d — внутренний диаметр, h — толщина, S_e — площадь поперечного сечения

На каждый из исследуемых сердечников были намотаны обмотка намагничивания и измерительная обмотка. Измерительная обмотка была расположена под намагничивающей обмоткой, для того чтобы эффективная площадь поперечного сечения измерительной катушки была как можно ближе расположена к площади поперечного сечения сердечника. Обмотки были выполнены из изолированного провода. Технические параметры используемых сердечников приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры и количество витков катушек намагничивания n_m и измерительной n_s исследуемых образцов из марганец-цинковых ферритов

Сердечник	F3001	F807	N41	T38
l_e (мм)	62,8	82,0	92,3	62,8
S_e (мм ²)	60	60	99	39
n_m	5	5	10	5
n_s	25	25	50	25

В табл. 1 приведены геометрические параметры и число витков всех четырёх исследуемых сердечников. Названия образцов, используемых в табл. 1, одновременно являются и обозначениями материалов, из которых выполнены сердечники.

5. Описание измерительной системы для исследования магнитных характеристик марганец-цинковых ферритов

Для исследования влияния температуры на магнитные характеристики марганец-цинковых ферритов была использована специальная измерительная система с компьютерным управлением криостатом, которая позволяет стабилизировать заданную температуру. Блок-схема измерительной системы показана на рис. 2.

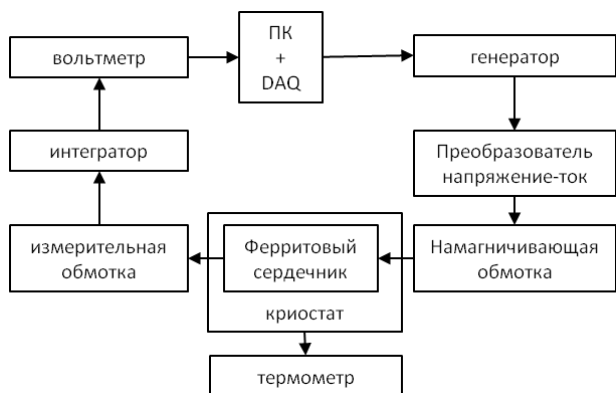


Рис. 2. Блок-схема измерительной системы

Для управления системой используется ПК, оборудованный картой сбора данных (DAQ), а также установленным программным обеспечением для управления системой и сбором данных. Изменения намагниченности создавались с помощью изменений напряжения, которое было преобразовано в изменение тока намагничивания, для чего было использование преобразователь напряжение-ток. Изменения параметров намагничивания, таких как частота и амплитуда, были заданы в программе управления. Изменения магнитных параметров были подаваемы на обмотку возбуждения исследуемого сердечника, что вызывало возникновение намагничивающего поля H , влияющего на сердечник, изменения которого во времени описывает уравнение:

$$H(t) = \frac{n_m i(t)}{l_e}, \tag{3}$$

где $i(t)$ – функция, описывающая преобразование тока намагничивания во времени. В проведенных измерениях намагничивания использован генератор треугольных сигналов, который характеризуется линейным ростом и падением тока намагничивания. Изменения намагничивающей поля H , действующего на сердечник, вызывали изменения напряжения u , которое было индуцировано в измерительной обмотке. Индуцируемое напряжение u связано с магнитной индукцией B сердечника дифференциальным уравнением:

$$u(t) = -n_s S_e \frac{dB(t)}{dt}. \tag{4}$$

Индуцируемое напряжение было проинтегрировано во времени с помощью интегрирующей схемы, для того чтобы получить величины, пропорциональные магнитной индукции B исследуемого сердечника. Интегрируемые изменения были измерены с помощью вольтметра и переданы на ПК, где программой управ-

ления были рассчитаны значения магнитной индукции B сердечника. Изменения магнитной индукции B в зависимости от изменений индуцируемого напряжения u описывает зависимость:

$$B(t) = \frac{K_c}{n_s S_e} \int u(t) dt, \tag{5}$$

где K_c – константа интегратора. Получив расчетные значения намагничивающего поля H и магнитной индукции B , стало возможным определить магнитные характеристики $B-H$ исследуемого сердечника.

Исследуемые сердечники были помещены в криостат камеру, заполненную жидким теплоносителем. Используемый криостат имел возможность охлаждения и нагревания объектов, размещенных в камере. Температура внутри камеры измерялась с помощью цифрового мультиметра, к которому была подключена термопара К-типа.

6. Результаты измерений магнитных параметров исследуемых сердечников

Магнитные характеристики $B-H$ всех исследуемых сердечников были определены в диапазоне температур от -20°C до 60°C . К каждому сердечнику было подобрано максимальное значение намагничивающего поля H_m , таким образом, чтобы оно было равным или близким к насыщению. На рис. 3–6 представлены петли гистерезиса исследуемых ферритовых материалов для трех выбранных температур: -20°C , 20°C и 60°C .

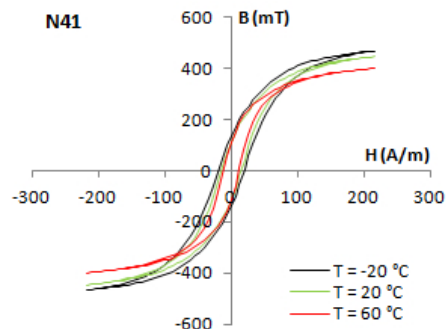


Рис. 3. Влияние температуры на магнитную характеристику $B-H$ феррита марганец-цинкового N41, $H_m=215 \text{ A/m}$

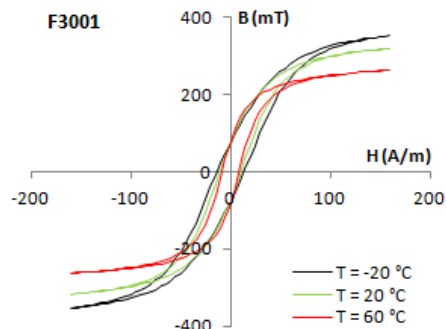


Рис. 4. Влияние температуры на магнитную характеристику $B-H$ феррита марганец-цинкового F3001, $H_m=160 \text{ A/m}$

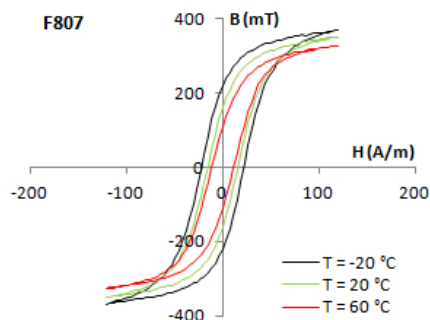


Рис. 5. Влияние температуры на магнитную характеристику В-Н феррита марганец-цинкового F807, $H_m=120$ А/м

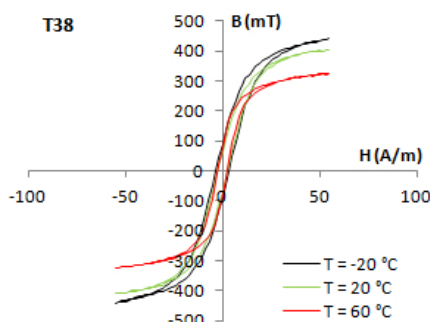


Рис. 6. Влияние температуры на магнитную характеристику В-Н феррита марганец-цинкового T38, $H_m=55$ А/м

С рис. 3–6, можно сделать вывод, что влияние температуры на магнитные характеристики исследуемых ферритовых материалов очевидно. Во всех исследованных материалах при повышении температуры уменьшается площадь поверхности петли гистерезиса. Для максимального значения температуры площадь петли гистерезиса является наименьшей. Это связано с тем, что повышение температуры приводит к уменьшению величин всех параметров петли гистерезиса: коэрцитивного поля, индукции остаточной намагниченности и максимальной индукции. В частности, были видны изменения максимальной индукции в каждом из исследованных сердечников. Также заметны, но немного меньше, уменьшения величин индукции остаточной намагниченности и максимальной индукции. Изменения индукции остаточной намагниченности были особенно хорошо выражены для сердечника F807.

Наиболее заметным результатом влияния температуры на ферритовый сердечник является изменение максимальное индукции B_m в материале. Этот эффект показан на рис. 7, который отображает зависимость максимальной индукции B_m исследуемых сердечников от температуры. Данные результаты были получены при максимальном значении намагничивающего поля $H_m=120$ А/м для каждого из исследуемых сердечников.

Зависимость максимальной магнитной индукции B_m от температуры для всех исследуемых образцов имела монотонный вид. При низких температурах ниже 0 °С, максимальная индукция достигает наивысших значений. При росте температуры индукция начинает уменьшаться. При самой высокой температуре исследований (60 °С) индукция достигает минимального

значения. Максимальная разница между начальной и конечной индукцией была получена для материала T38. В остальных исследуемых образцах разница индукции при повышении температуры была ниже. Это может быть результатом другого химического состава материала T38.

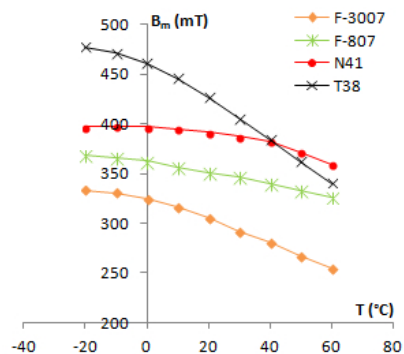


Рис. 7. Зависимость максимальной магнитной индукции B_m от температуры исследуемых сердечников из ферритов марганец-цинковых, $H_m=120$ А/м

7. Обсуждение результатов влияния температуры на магнитные характеристики ферритов из марганец-цинкового сплава

Результаты, представленные в данной статье, в которой показана четкая зависимость – влияние температуры на магнитные свойства марганец-цинковых ферритов, соответствуют теории молекулярного поля Вейсса [10]. Влияние температуры связано с явлениями, происходящими в атомном строении веществ. Когда ферритовый материал расположен в направлениях магнитного поля, то магнитные моменты атомов устанавливаются в направлении намагничивающей силы. С повышением температуры увеличивается также тепловая энергия атомов в кристаллической решетке материала. Тепловые колебания атомов в кристаллической решетке становятся более сильными, в результате чего становится легче изменить направления векторов магнитных моментов отдельных атомов в соответствии с направлением вектора намагничивающей силы. По этой причине наблюдается снижение величин коэрцитивной области и индукции остаточной намагниченности при росте температур. С другой стороны, чем сильнее тепловые колебания атомов, тем больше они мешают полному упорядочиванию векторов магнитных моментов, когда намагничивающее поле достигает значения, соответствующего величине насыщения для данного материала. Это, в свою очередь, приводит к более низкому значению максимальной магнитной индукции материала при высоких температурах.

Таким образом, при более высоких температурах легче размагнитить материал, но при этом магнитные моменты атомов в кристаллической решетке материала не могут достигнуть полного выравнивания в соответствии с насыщением материала. Дальнейшее повышение температуры до величины вне исследуемого диапазона, приведет к углублению тех

же эффектов, вплоть до достижения температуры Кюри материала [10], при которой он теряет ферромагнитные свойства.

Результаты исследований указывают на сильную зависимость между температурой марганец-цинкового феррита и его магнитными свойствами. Эта зависимость есть значительной настолько, что ею нельзя пренебречь в технических использованиях.

Описанное в данной статье явление может найти практическое применение при изготовлении датчиков, в частности для измерения температуры [11]. Кроме того, очень важно, чтобы при проектировании электронных схем с индукционными элементами учитывался температурный диапазон такой системы. Важна также оценка того, будут ли при заданной температуре используемые индуктивные элементы работать должным образом. Для решения таких задач может служить моделирование влияния температуры на магнитные свойства материалов [12, 13], что позволяет оценить параметры магнитного материала при данной температуре.

8. Выводы

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты:

1. Во всех случаях проведенных измерений в при температурах $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ для четырех ферритовых сердечников N41, F3001, F807, T38 из марганец-цинкового сплава, наблюдается наибольшее уменьшение максимальной индукции с 460 Тл до 320 Тл в образце T38, а наибольшее изменение остаточной намагниченности с 230 Тл до 100 Тл наблюдается в образце F807.

2. Установлено снижение величин коэрцитивной области и индукции остаточной намагниченности при температурах $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом также понижалось значение максимальной магнитной индукции материала и уменьшалась площадь поверхности петли гистерезиса. При температурах ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, максимальная индукция достигала своих самых высоких значений, так в образце N41 достигала 450 Тл, в образце F3001 достигала 370 Тл, в образце F807 достигала 360 Тл, в образце T38 достигала 440 Тл.

Литература

- O'Handley, R. Modern Magnetic Materials: Principles and Applications [Text] / R. O'Handley. – New York : John Wiley & Sons, 2000. – 786 p.
- Carter, C. B. Ceramic Materials: Science and Engineering [Text] / C. B. Carter, M. G. Norton. – Springer, 2007. – 716 p. doi: 10.1007/978-0-387-46271-4
- Jiles, D. C. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials [Text] / D. C. Jiles. – London : Chapman & Hall, 1998. – 570 p.
- Kulikowski, J. Field, temperature and stress dependence of magnetostriction in Ni-Zn ferrites containing cobalt [Text] / J. Kulikowski, A. Bieńkowski // Physica Scripta. – 1991. – Vol. 44, Issue 4. – P. 382–383. doi: 10.1088/0031-8949/44/4/013
- Kubo, O. Temperature dependence of magnetocrystalline anisotropy for Sn substituted Ba ferrite particles [Text] / O. Kubo, E. Ogawa // IEEE Transactions on Magnetics. – 1991. – Vol. 27, Issue 6. – P. 4657–4659. doi: 10.1109/20.278907
- Konc, M. Temperature dependence of the magnetization and other physical properties of rapidly quenched amorphous CoB alloys [Text] / M. Konc, P. Spisak, P. Kollar, P. Sovak, O. Dusa, T. Reininger // IEEE Transactions on Magnetics. – 1994. – Vol. 30, Issue 2. – P. 524–526. doi: 10.1109/20.312324
- Mahmoudi, M. Temperature and frequency dependence of electromagnetic properties of sintering Li-Zn ferrites with nano SiO₂ additive [Text] / M. Mahmoudi, M. Kavanlouei // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2015. – Vol. 384. – P. 276–283. doi: 10.1016/j.jmmm.2015.02.053
- Tsepelev, V. Temperature affecting the magnetic properties of the Co₇₉-xFe₃Cr₃Si₁₅B_x amorphous alloy [Text] / V. Tsepelev, Y. Starodubtsev, V. Zelenin, V. Belozerov, V. Konashkov // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Vol. 643. – P. 280–282. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.12.236
- Tian, S.-Y. Optimum study of heat treatment on magnetic properties of nanocrystalline barium ferrite [Text] / S.-Y. Tian, X.-P. Zhang, J. Wang // Rengong Jingti Xuebao/Journal of Synthetic Crystals. – 2015. – Vol. 44, Issue 6. – P. 1637–1643.
- Cullity, B. D. Introduction to magnetic materials [Text] / B. D. Cullity, C. D. Graham. – New York: John Wiley & Sons, 2009. – 568 p.
- Seki, K. Use of a Temperature-Sensitive Ferrite for Temperature/Humidity Measurements [Text] / K. Seki, J. Schida, K. Murakami // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. – 1988. – Vol. 37, Issue 3. – P. 468–470. doi: 10.1109/19.7479
- Jackiewicz, D. Modelling the magnetic characteristics and temperature influence on constructional steels [Text] / D. Jackiewicz, R. Szewczyk, J. Salach // Solid State Phenomena. – 2013. – Vol. 199. – P. 466–471. doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.199.466
- Lu, H. Y. Measurement and modeling of thermal effects on magnetic hysteresis of soft ferrites [Text] / H. Y. Lu, J. G. Zhu, S. Y. R. Hui // IEEE Transactions on Magnetics. – 2007. – Vol. 43, Issue 11. – P. 3953–3960. doi: 10.1109/tmag.2007.904942