

## МАГНИТОМЯГКИЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

*У.Т. Бердиев-т.ф.н. профессор, У.Б. Сулаймонов - ассистент,  
Ф.Ф. Хасанов – ассистент, С.Б. Нуриддинов - ассистент  
Ташкентский Транспортный Университет, Ташкент,  
Республика Узбекистан*

**Аннотация:** В статье рассмотрены методы использования магнитномягких композиционных материалов для элементов электротехнических устройств. Изучены основные методы получения магнитномягких композитных материалов для того чтобы получить высокоэффективные электрически изолированный порошок для получения деталей с высокой плотностью. Высокие плотности обычно улучшают магнитные свойства, как для уменьшения потерь на гистерезис на низком уровне и для получения высокой магнитной индукции. Это даёт эффект при использовании для магнитных цепей электродвигателей на основе магнитномягких композиционных материалов.

**Ключевые слова:** композиционные, магнитномягкие, эффект, сердечники, магнитных полей, гистерезисной кривой, однородности поля, электромагнит, пондеромоторная сила.

Магнитные материалы активно используются в электронной, компьютерной и телекоммуникационной отраслях. В течение последних десятилетий использовались различные типы магнитных материалов, включая чистое железо и его сплавы. Как известно, что из всех металлов только три металлы, например, железо, никель, кобальт обладают ферромагнетизмом, т.е. способностью значительно сгущать магнитные силовые линии, что характеризуется магнитной проницаемостью. Относительная магнитная проницаемость ферромагнитных металлов достигает десятков и сотен тысяч единиц; для остальных она близка к единице, если относительная проницаемость несколько больше единицы, то она является парамагнитным, а если меньше единицы диамагнитным [1, 3].

Магнитно-мягкие материалы используют для таких применений, как материалы сердечников в индукторах, статорах и роторах для электрических машин, приводов, датчиков и сердечников трансформаторов. Традиционно магнитно-мягкие сердечники, такие как роторы и статоры в электрических машинах, изготавливают из наборных стальных пластинчатых магнитопроводов. Магнитно-мягкие композиционные (ММК) материалы основаны на магнитно-

мягких частицах, обычно на основе железа, с электроизолирующим покрытием на каждой частице [2, 3, 4]. Путем прессования изолированных частиц, необязательно вместе со смазками и/или связующими, с использованием традиционного процесса порошковой металлургии, получают ММК-детали. Путем использования данной порошковой металлургической технологии можно получать ММК-компоненты с более высокой степенью свободы по конструкции, чем при использовании стальных пластинчатых магнитопроводов, поскольку ММК-материал может переносить трехмерный магнитный поток, а также поскольку в результате процесса прессования могут быть получены трехмерные формы. Для того чтобы сделать ММК-детали высокоэффективными и уменьшить их размеры, необходимо улучшить эксплуатационные характеристики магнитно-мягких порошков [4, 5, 8].

Одним важным параметром для улучшения эксплуатационных характеристик ММК-деталей является снижение их характеристик потерь в сердечнике. Когда магнитный материал подвергают воздействию переменного поля, возникают потери энергии как из-за потерь на гистерезис, так и из-за потерь на вихревые токи. Потери на гистерезис пропорциональны частоте знакопеременных магнитных полей, тогда как потери на вихревые токи пропорциональны квадрату частоты. Таким образом, при высоких частотах имеют значение преимущественно потери на вихревые токи, и возникает особая необходимость в снижении потерь на вихревые токи и в то же время в поддержании низкого уровня потерь на гистерезис. Это означает, что является желательным повышение удельного электросопротивления магнитных сердечников [6, 9].

Экспериментальная плотность определялась методом гидростатического взвешивания [3,4], который заключается в следующем. Сначала взвешивается образец на воздухе при комнатной температуре, а затем – образец, погруженный в дистиллированную воду [6, 7, 10]. Для взвешивания брались образцы в виде спрессованных сердечников. Экспериментальная плотность  $d_{\text{эксп}}$  определяется из выражения:

$$d_{\text{эксп}} = \frac{P_1 \cdot d_T - P_1 \cdot d_{\text{возд}}}{P_1 - P_2} \quad (1)$$

где  $P_1$  – вес образца на воздухе,

$P_2$  – вес образца, погруженного в дистиллированную воду,

$d_T$  – плотность дистиллированной воды при данной температуре,

$d_{\text{возд}}$  – плотность воздуха.

Точность этого метода определяется точностью определения его веса и плотности применяемой жидкости.

Кроме того, для того чтобы еще больше снизить потери на гистерезис, требуется термообработка спрессованной детали для снятия напряжений. Для достижения эффективного снятия напряжений термообработку следует предпочтительно осуществлять при температуре выше  $300^{\circ}\text{C}$  и ниже температуры, при которой изолирующее покрытие будет повреждено, т.е. примерно  $600^{\circ}\text{C}$ , в невозстановливающейся атмосфере [7, 8].

При изучении магнитных свойств образцов использована установка, в основу которой положен метод измерения пондеромоторной силы. Метод дает возможность исследовать температурные зависимости намагниченности и магнитной восприимчивости при малых количествах вещества [2, 6]. Это позволяет сравнительно быстро достичь температурного равновесия по всему объему образца. Очевидно, что отсутствие градиента температур на образце в момент измерения удельной намагниченности или восприимчивости обеспечивает наиболее точное определение их величин.

**Как известно [3, 6], пондеромоторная сила определяется выражением:**

$$F = m\sigma_x \frac{\partial B}{\partial x} = \frac{m\chi_g}{\mu_0} B \frac{\partial B}{\partial x} \quad (2)$$

где  $m$  – масса образца,  $\sigma_x$ ,  $\chi_g$  – намагниченность и магнитная восприимчивость единицы массы образца, соответственно,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $B$  – магнитная индукция,  $\partial B/\partial x$  – градиент магнитной индукции  $B$  вдоль оси  $x$ .

Измерения величин магнитных характеристик, осуществляемые таким методом, можно проводить с точностью до 1%, если имеется в наличии калибровочный образец такой же формы и размеров (например, из никеля) [5, 6].

Выбор параметров электромагнита определяется максимальными значениями размеров образца. Электромагнит должен создавать магнитное поле, обладающее неизменной величиной произведения напряженности  $H$  на его градиент  $\partial H/\partial x$  в пространстве таких размеров между полюсными наконечниками, чтобы оно с запасом перекрывало размеры ампулы, в которой находится образец. Конструкция электромагнита позволяет регулировать величину  $2z$  зазора между ними. Диаметр полюсных наконечников  $d = 145$  мм.

Катушки электромагнита намотаны медной шиной 2 мм×5 мм с числом витков, увеличивающихся к внешним концам сердечника. Аналогичный способ переменной намотки, как правило, используется в соленоидах для увеличения однородности поля и устранения краевого рассеивающего эффекта. Кольцевой магнитопровод электромагнита, с одной стороны, обеспечивает минимальное рассеяние магнитного поля в пространстве. С другой, при вертикальном расположении, такая конструкция удобна для поворота электромагнита на любой угол относительно неподвижного образца [7, 8]. Для того, чтобы образец не прилипал к полюсным наконечникам и в то же время обеспечивалась достаточная точность измерений, масса образца, например, ферромагнитного вещества не должна превышать нескольких миллиграммов, а антиферромагнитного – порядка одного грамма. Для проведения исследований основных магнитных характеристик композиционных магнитных материалов с использованием порошков железа ASC100.29 изготовлены сердечники 24×13×10 мм из материалов плотностью  $\rho = 7,6 \text{ г/см}^3$  [9].

Образцы из композиционного магнитного материала были подвергнуты отжигу в вакууме при температуре 350°C в течение 3 часов. Электромагнитные характеристики исследовались с использованием микровеберметра Ф5050. Измерение частотных характеристик композиционных материалов в широком диапазоне изменения магнитных полей, частот перемагничивания и температур производились на экспресс-магнитометре в частотном диапазоне до 10 кГц и магнитных полях до 30 кА/м [6, 7].

Предварительно для нормировки магнетометра производится измерение магнитных свойств на флаксметре. В данном случае для нормировки магнитометра использовался микровеберметр Ф5050. На рисунке 1 приведен внешний вид магнитометра, а на рисунке 2 – результаты обработки данных экспресс-магнитометра и основные характеристики его работы.

Магнитометры предназначены экспресс-контроля магнитных свойств материалов – измерение в широком частотном диапазоне кривых перемагничивания образцов, магнитной проницаемости и суммарных потерь, как при перемагничивании, так и при одностороннем намагничивании. В комплект экспресс флаксметра-магнитометра входит также программное обеспечение для обработки результатов измерений [7, 9].

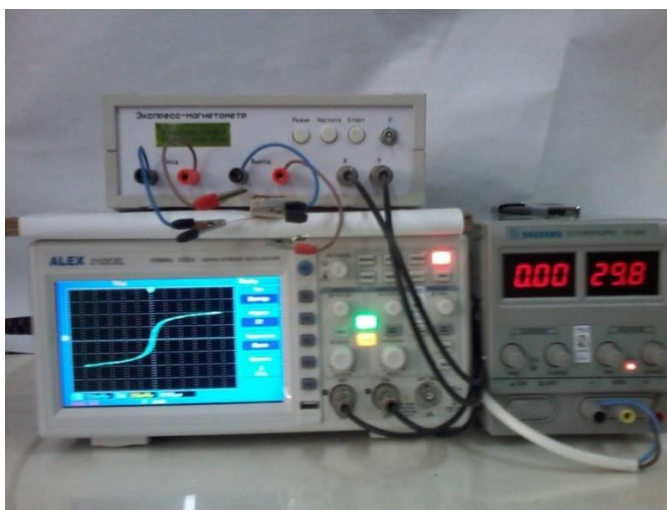
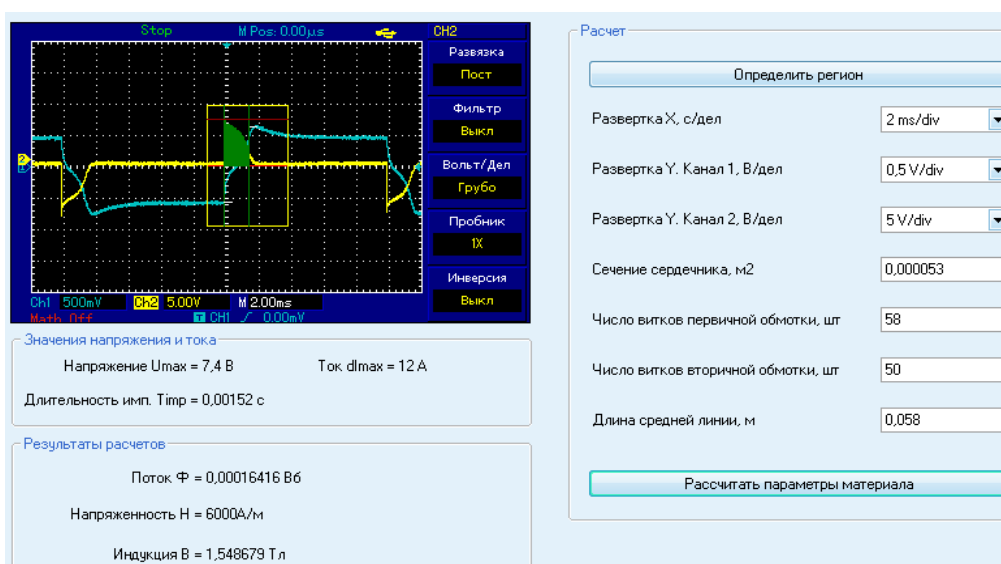
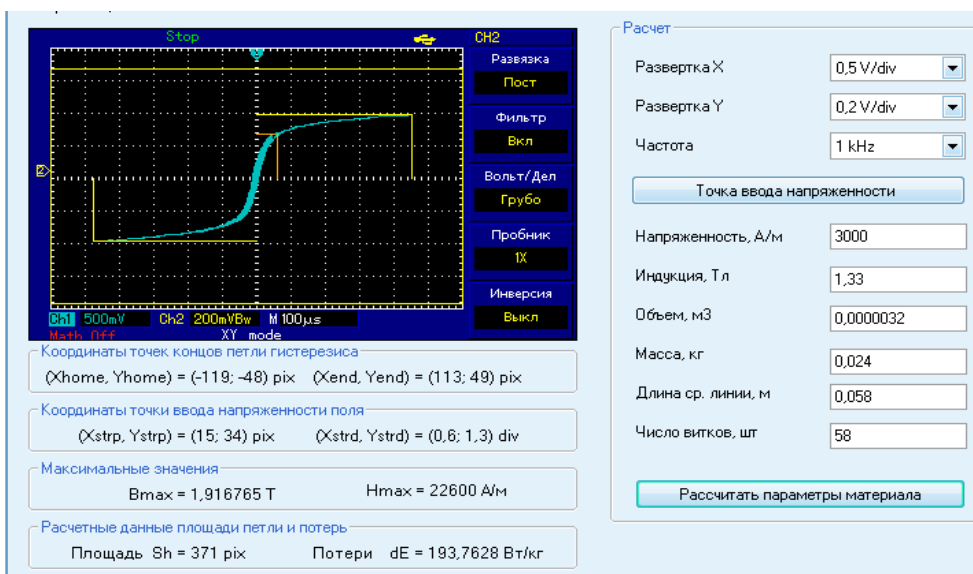


Рисунок 1 – Внешний вид магнитометра



а)



б)

Рисунок 2. – Результаты обработки данных в режиме экспресс флакметра (а) и экспресс-магнитометра (б)

Для того чтобы получить высокоэффективные ММК-частицы, также должно быть возможно подвергать электрически изолированный порошок прессованию в пресс-форме при высоких давлениях, поскольку это очень часто является желательным для получения деталей с высокой плотностью. Высокие плотности обычно улучшают магнитные свойства. В частности, высокие плотности необходимы для поддержания потерь на гистерезис на низком уровне и для получения высокой магнитной индукции насыщения.

Дополнительно, электрическая изоляция должна выдерживать необходимые высокие давления сжатия без повреждения при выталкивании спрессованной детали из пресс-формы.

Результаты, полученные при исследовании, указывают на возможность разработки новых магнитомягких композиционных материалов и перспективность их практического применения для создания различных электротехнических устройств, основной для элементов сердечника роторов и статоров электродвигателя.

### **Список использованных литератур**

1. A.Vetcher, G.Govor, O.Demedenko, A-M. Popesku, U.Berdiev//A composite magnetik material with insulating anticorrosive coatings //Jornal Machines. Technologies. Materials. -2020. -Vol. 14, Issue 7. -P. 296-296.

2. Говор, Г.А. Композиционные магнитно-мягкие материалы на основе порошков железа и перспективы их применения в технике / Г.А. Говор, В.В. Михневич // Неорганические материалы. – 2007. – Т. 43, №7. – С. 805–807. 7.

3. U.T.Berdiev, A.K. Vecher, F.F.Khasanov, Investigation of the frequency characteristics of composite iron powders with insulating oxide coatings. «Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering» (CONMECHYDRO – 2021), Узбекистан, Ташкент, 1 – 3 апреля.

4. Rahman, K.M.; Patel, N.R.; Ward, T.G.; Nagashima, J.M.; Caricchi, F.; Crescimbin, F. Application of direct-drive wheel motor for fuel cell electric and hybrid electric vehicle propulsion system. IEEE Trans. Ind. Appl. 2006, 42,1185-1192.

5. Я.М.Довгалецкий. Легирование и термическая обработка магнитотвердых и магнитомягких сплавов. – М.:Металлургиздат, 2000.-178 с.

6. A U Gapparov, G A Govor, U T Berdiyev, F F Hasanov, and A M Kurbanov. Magnetic-soft materials based on iron for electromechanical engineering, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 614 (2020) 012048.
7. Skorman B, Zhou E, Jansson P 2010 Pat. 2389099 RF, IPC N0Sh/2 Soft magnetic composites, Bull. Number 13
8. Chau, K.T.; Chan, C.C.; Liu, C. Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles. IEEE Trans. Ind. Electron. 2008, 55, 2246-2257.
9. Говор, Г.А. Особенности магнитных характеристик новых композиционных материалов на основе порошков железа / Г.А. Говор, А.К. Вечер, К.И. Янушкевич // Перспективные материалы и технологии / под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: УО «ВГТУ», 2017. – Т. 2. – С. 278–299.
10. Baratov, R., Pirmatov, N. Low - Speed generator with permanent magnets and additional windings in the rotor for small power wind plants and micro hydro power plants. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering this link is disabled, 2020, 883(1), 012183
11. Pirmatov, N., Toshev, S. Overvoltage in the free phase of the stator winding in case of asymmetric short circuit implicit pole synchronous generator biaxial excitation. E3S Web of Conferences, 2019, 139, 01030
12. Нуриддинов, С. Б. Статистика отказов и анализ повреждаемости электрических машин / С. Б. Нуриддинов, Б. К. Авазов, К. Т. Каршиев // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте [Электронный ресурс] : материалы II республиканской научно-технической конференции, 28-29 апреля 2022 г. / редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 446-452.
13. Nuriddinov, S., Avazov, B., Hasanov, F., & Rakhmonova, Y. (2021). Analysis of the causes of traction electric failures of electric cargo cars operated on railways of the Republic of Uzbekistan. In E3S Web of Conferences (Vol. 264, p. 05041). EDP Sciences.
14. Berdiyev, U., Karshiyev, K., & Sulaymonov, U. (2022). WAYS TO IMPROVE THE ENERGY PERFORMANCE OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS OF ROLLING STOCK. Scientific Collection «InterConf», (50), 445–454. Retrieved from <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/638>