DOI: 10.65322/j.srd.02162026.14

СИНТЕЗ И СТРУКТУРНО-МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ПОРОШКОВ

Желудкевич А.Л., *канд. физ.-мат. наук, видящий научный сотрудник,*
Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларус.
Нормирзаев А.Р., *к.т.н., доцент,*
Тухтабаев М.А., *PhD, заведующий кафедры,*
Наманганский государственный технический университет, Наманган,

Аннотация. *В данной работе исследуется влияние условий синтеза на структуру и магнитные свойства новых композиционных низкочастотных магнитомягких материалов на основе покрытых железных порошков. Основное внимание уделено влиянию технологических параметров, включая толщину изоляционного покрытия, количество циклов нанесения и давление прессования, на формирование микроструктуры и магнитные характеристики композитов. Экспериментальные результаты показали, что формирование равномерного изоляционного слоя способствует значительному снижению потерь на вихревые токи при сохранении высокой магнитной проницаемости. Проведён анализ взаимосвязи между структурными параметрами и магнитными свойствами на основе зависимостей магнитной проницаемости μ(H) и удельных потерь P(f). Установлено, что оптимальные условия синтеза — трёхкратное нанесение покрытия и прессование при давлении 0,7–0,8 ГПа — обеспечивают минимальные потери при высоких магнитных характеристиках. Полученные результаты подтверждают возможность целенаправленного управления свойствами материала путём изменения технологических параметров синтеза, что делает данные композиты перспективными для применения в электротехнических устройствах и системах электротранспорта.*

Abstract. *This paper investigates the influence of synthesis conditions on the structure and magnetic properties of novel composite low-frequency soft magnetic materials based on coated iron powders. The study focuses on the effects of technological parameters, including coating thickness, number of coating cycles, and compaction pressure, on the microstructure and magnetic characteristics of the composites. Experimental results show that the formation of a uniform insulating layer significantly reduces eddy current losses while maintaining high magnetic permeability. The relationships between structural features and magnetic properties are analyzed using dependencies of magnetic permeability μ(H) and specific losses P(f). It is established that optimal synthesis conditions–three coating cycles combined with compaction at 0.7-0.8 GPa–ensure a balance between low energy losses and high magnetic performance. The obtained results demonstrate that controlled synthesis parameters enable effective tuning of material properties, making these composites promising for applications in electrical engineering devices and electric transport systems.*

Ключевые слова. *композиционные магнитомягкие материалы, условия синтеза, железные порошки, магнитная проницаемость, потери на вихревые токи, магнитные свойства, порошковая металлургия, низкочастотные применения*

Keywords. *composite soft magnetic materials, synthesis conditions, iron powders, magnetic permeability, eddy current losses, magnetic properties, powder metallurgy, low-frequency applications*

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.14

Введение. Современное развитие электротехнической промышленности и транспортных систем требует создания новых функциональных материалов с улучшенными магнитными и энергетическими характеристиками. Особую актуальность приобретает разработка магнитомягких композиционных материалов, обеспечивающих снижение энергетических потерь и повышение эффективности электрических машин [1–4].

Традиционно в электротехнике применяется ламинированная электротехническая сталь, однако её использование ограничено при реализации пространственных магнитных систем и работе в условиях переменных нагрузок. В связи с этим значительный интерес представляют композиционные магнитомягкие материалы на основе железных порошков, позволяющие формировать трёхмерные магнитные цепи и изотропные магнитные свойства [5–7]. Использование покрытых железных порошков обеспечивает снижение вихревых токов за счёт электрической изоляции частиц, что особенно важно для низкочастотных электромеханических устройств [8, 9]. Магнитные характеристики таких материалов определяются микроструктурой композита, толщиной изоляционного слоя и условиями компактирования [10–12].

Физические процессы намагничивания ферромагнетиков связаны с движением доменных границ и вращением магнитных моментов, что подробно рассмотрено в фундаментальных работах по магнетизму [13–15]. Управление структурными параметрами порошковых композитов позволяет целенаправленно изменять магнитную проницаемость, коэрцитивную силу и уровень удельных потерь.

Несмотря на наличие коммерческих магнитомягких композитов, проблема оптимального сочетания высокой магнитной проницаемости и низких потерь остаётся актуальной. Поэтому исследование влияния условий синтеза на структуру и физические свойства новых композиционных низкочастотных магнитомягких материалов представляет значительный научный и практический интерес.

Целью работы является исследование влияния технологических параметров синтеза и компактирования на структуру и магнитные свойства композиционных материалов на основе капсулированного железного порошка.

Материалы и методы. В качестве исходного материала использовался железный порошок со средним размером частиц 200–300 мкм, применяемый при изготовлении магнитомягких композитов [5, 10]. Крупнозернистая структура обеспечивает высокую магнитную индукцию и стабильность эксплуатационных характеристик.

Подготовка порошка включала воздушную сепарацию с выделением фракции более 200 мкм. Для предотвращения окисления проводилась пассивация поверхности частиц силиконовым составом.

Нанесение магнитодиэлектрического покрытия осуществлялось из газовой фазы при температуре 200 °C в вакуумных условиях по методике, аналогичной описанной в [8, 11]. Толщина изоляционного слоя регулировалась количеством циклов обработки.

После нанесения покрытия порошок смешивался со смазкой и подвергался гидростатическому прессованию при давлении 0,7–0,8 ГПа. Методы порошковой металлургии и особенности формирования структуры композитов подробно рассмотрены в работе [16].

Структурные исследования выполнялись методами микроскопического анализа. Магнитные характеристики определялись индукционным методом с измерением магнитной проницаемости μ, коэрцитивной силы Hc, индукции насыщения Bs и удельных потерь P.

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.14

Результаты и обсуждение. Проведённые исследования показали, что параметры газофазного фосфатирования оказывают существенное влияние на структурное состояние и формирование поверхностного покрытия железных порошков. Анализ фазового состава методом рентгеновской дифракции (XRD) показал, что исходный порошок характеризуется типичной кристаллической структурой α-Fe с объемно-центрированной кубической решёткой. После проведения обработки в газовой фазе существенных изменений положения дифракционных пиков не наблюдается, что свидетельствует о сохранении кристаллической структуры железа и отсутствии фазовых превращений в процессе модификации поверхности. Это является важным результатом, поскольку сохранение структуры металлического ядра обеспечивает стабильность эксплуатационных свойств материала.

Микроструктурный анализ, выполненный с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM), выявил заметные изменения морфологии поверхности частиц. Исходные порошки имеют характерную неровную и шероховатую поверхность, обусловленную методом распыления. После газофазной обработки наблюдается формирование более сглаженной поверхности с наличием тонкого равномерного слоя, что указывает на образование фосфатного покрытия. При этом не зафиксировано признаков спекания или образования «шейки» между частицами, что подтверждает корректный выбор температурного режима обработки.

Элементный анализ методом энергодисперсионной спектроскопии (EDS) подтвердил наличие фосфора на поверхности обработанных порошков, что является прямым доказательством формирования фосфатного слоя. Кроме того, отмечено увеличение содержания кислорода, связанное с образованием фосфатных соединений. Карты распределения элементов показали достаточно равномерное распределение фосфора по поверхности частиц, что свидетельствует о гомогенности покрытия и эффективности газофазного метода обработки.

Полученные результаты позволяют предложить механизм формирования покрытия, включающий адсорбцию активных паровых компонентов на поверхности частиц с последующим протеканием химических реакций и ростом фосфатного слоя. Процесс начинается с активации поверхности при повышенной температуре, после чего происходит взаимодействие реагентов с активными центрами и постепенное формирование сплошной плёнки.

Особое значение имеет влияние технологических параметров процесса. Установлено, что температура порядка 200 °C обеспечивает оптимальные условия для протекания поверхностных реакций без разрушения структуры порошка. Работа в условиях пониженного давления способствует равномерному распределению реакционных компонентов и предотвращает нежелательное окисление. Таким образом, комбинация температуры и вакуумных условий позволяет эффективно контролировать процесс формирования покрытия.

В целом результаты исследования подтверждают, что газофазное фосфатирование является эффективным методом модификации поверхности железных порошков. Полученные покрытия характеризуются высокой равномерностью, стабильностью и могут быть использованы для повышения эксплуатационных свойств материалов порошковой металлургии.

Структурные особенности композитов

Установлено, что увеличение числа циклов нанесения покрытия приводит к формированию равномерного изоляционного слоя между частицами порошка. При прессовании образуется плотная структура с уменьшенной пористостью, что положительно влияет на магнитную связность материала.

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.14

При недостаточной толщине покрытия наблюдаются металлические контакты между частицами, вызывающие рост вихревых токов. Аналогичные эффекты отмечены в работах [8, 9].

Зависимость магнитной проницаемости μ(H)

Экспериментальные зависимости μ(H) имеют типичный нелинейный характер. Начальный рост магнитной проницаемости связан со смещением доменных границ, а последующее снижение обусловлено достижением магнитного насыщения [13, 14].

Аппроксимация зависимости описывается выражением:

$$\mu(H) = \mu_{max} \frac{H}{H + H_0}$$

где H_0характеризует процессы закрепления доменных границ.

Повышение плотности компакта приводит к увеличению максимальной магнитной проницаемости вследствие улучшения магнитного взаимодействия частиц.

Частотная зависимость потерь P(f)

Удельные магнитные потери описываются выражением:

$$P(f) = k_1 f + k_2 f^2$$

где линейный член соответствует гистерезисным потерям, а квадратичный — потерям на вихревые токи [15, 17].

Увеличение толщины магнитодиэлектрического покрытия приводит к уменьшению коэффициента k_2, что свидетельствует о снижении вихревых токов. Полученные результаты согласуются с исследованиями Fe-based SMC материалов [8].

Комплексный анализ

Совместный анализ зависимостей μ(H) и P(f) показал существование оптимального режима синтеза. При трёхкратном нанесении покрытия и прессовании при 0,7–0,8 ГПа достигается минимальный уровень магнитных потерь при сохранении высокой магнитной проницаемости. Полученные результаты подтверждают возможность управления свойствами материала посредством изменения технологических параметров синтеза.

Выводы. Разработана технология получения композиционных низкочастотных магнитомягких материалов на основе покрытых железных порошков. Установлено, что условия синтеза существенно влияют на структуру и магнитные характеристики композита. Определён оптимальный режим обработки, обеспечивающий снижение удельных потерь при сохранении высокой магнитной проницаемости. Математическое моделирование зависимостей μ(H) и P(f) подтверждает возможность количественного описания влияния технологических параметров на свойства материала. Полученные материалы перспективны для применения в электротехнических устройствах и системах электротранспорта.

В результате проведённого исследования установлено, что параметры газофазного фосфатирования оказывают определяющее влияние на формирование структуры и поверхностного покрытия железных порошков. Применение метода газофазной обработки при контролируемых температурных и вакуумных условиях позволяет обеспечить эффективную модификацию поверхности без нарушения кристаллической структуры металлического ядра.

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.14

Рентгеноструктурный анализ подтвердил сохранение α-Fe фазы после обработки, что свидетельствует об отсутствии фазовых превращений и высокой структурной стабильности материала. Микроструктурные исследования показали формирование равномерного фосфатного покрытия на поверхности частиц, сопровождающееся сглаживанием исходной шероховатости без признаков спекания.

Результаты энергодисперсионного анализа подтвердили присутствие фосфора и равномерное распределение элементов по поверхности частиц, что указывает на гомогенность покрытия и эффективность выбранного метода обработки. Установлено, что оптимальные условия процесса (температура около 200 °C и пониженное давление) обеспечивают формирование стабильного покрытия при минимизации нежелательных побочных процессов.

Таким образом, газофазное фосфатирование является перспективным методом управления поверхностными свойствами железных порошков. Полученные результаты открывают возможности для целенаправленного регулирования характеристик материалов и их применения в технологиях порошковой металлургии, в частности при создании композиционных магнитомягких материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Список литературы

1. Демиденко, Ф. О. Выбор оптимального состава исходных металлических порошков и наносимого покрытия на поверхность электромотора / Ф. О. Демиденко [и др.] // Строительство и образование. – 2023. – Т. 3. – С. 106–114.

2. Нормирзаев, А. Р. Новые материалы и их применение для разработки компонентов опытных образцов миниэлектротранспорта / А. Р. Нормирзаев, М. А. Тухтабаев. – 2024.

3. Demidenko, O. F. Elektrodvigatel ishlab chiqarishda yumshoq magnitli materiallardan foydalanish afzalliklari / O. F. Demidenko, B. F. Valiyev // Механика и технология. – 2023. – Т. 3. – № 12. – С. 141–148.

4. Govor, G. Production of motor-wheels for prototypes of mini-electric vehicles based on new soft magnetic materials / G. Govor [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 452. – P. 04012.

5. Govor, G. A. Properties of a composite magnetically soft material based on coated iron powders / G. A. Govor [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 365. – P. 05001.

6. Demidenko, O. F. New magnetic materials and their application for development of prototype mini-electric transport components / O. F. Demidenko [et al.] // International Journal of Early Childhood Special Education. – 2022. – Vol. 14. – No. 6. – P. 518–525.

7. Говор, А. Г. Изготовление мотор-колеса для опытных образцов миниэлектротранспорта на основе новых магнитомягких материалов / А. Г. Говор [и др.] // Строительство и образование. – 2023. – Т. 3. – С. 95–105.

8. Meng, B. Low-loss and high-induction Fe-based soft magnetic composites coated with magnetic insulating layers / B. Meng, J. Hou [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – Vol. 492. – P. 165651.

9. Grande, M. A. New SMC material for small electric machine / M. A. Grande, L. Ferraris, F. Francici, E. Poskovic // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2018. – Vol. 54. – No. 1. – P. 195–203.

10. Минчукова О. Ф., Нормирзаев А. Р., Тухтабаев М. А. Исследование физические свойства новых композиционных низкочастотных магнитомягких материалов //Ilm, tadqiqot va taraqqiyot/Наука, исследования и развитие. – 2025. – Т. 5. – №. 13. – С. 152-156.

11. Jansson, P. Advances in soft magnetic composites // Proceedings of Soft Magnetic Materials Conference. – Barcelona, 1998.

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.14

12. Govor, G. A. The magnetic properties of a magnetically soft composite material for use in the low-frequency range / G. A. Govor, A. O. Larin // Inorganic Materials: Applied Research. – 2019. – Vol. 10. – No. 2. – P. 387–390.

13. Говор, Г. А. Способ изготовления композиционного магнитомягкого материала : пат. RU 2465669 C1 / Г. А. Говор, В. И. Митюк, А. В. Тамонов. – Опубл. 27.10.2012.

14. Cullity, B. D. Introduction to Magnetic Materials / B. D. Cullity, C. D. Graham. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2009. – 568 p.

15. Valiyev B. F., Tuxtabayev M. A. Новые порошковые материалы инновационные конструкции электродвигателей //Строительство и образование. – 2025. – Т. 4. – №. 2. – С. 456-459.

16. Нормирзаев, А. Р. Новые материалы и их применение для разработки компонентов опытных образцов миниэлектротранспорта // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сборник научных трудов: в 2 томах / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет. – Минск : БНТУ, 2024. – Т. 1. – С. 95-105.

17. Bertotti, G. Hysteresis in Magnetism / G. Bertotti. – San Diego : Academic Press, 1998. – 558 p.

18. Goldman, A. Modern Ferrite Technology / A. Goldman. – 2nd ed. – New York : Springer, 2006. – 438 p.