ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА

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

Аннотация. *В работе представлены результаты исследования влияния условий синтеза на структуру и физические свойства новых композиционных низкочастотных магнитомягких материалов на основе капсулированного железного порошка. Разработана технология нанесения магнитодиэлектрического покрытия из газовой фазы с регулируемой толщиной изоляционного слоя. Исследовано влияние числа циклов нанесения покрытия и давления прессования на микроструктуру, магнитную проницаемость, коэрцитивную силу и удельные потери на перемагничивание. Установлено, что оптимальное сочетание трёхкратного нанесения покрытия и прессования при 0,7–0,8 ГПа обеспечивает снижение вихревых потерь при сохранении высоких магнитных характеристик. Выполнена математическая аппроксимация зависимостей μ(H) и P(f), подтверждающая возможность количественного описания влияния технологических параметров на свойства материала. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения разработанных композитов в электротехнических устройствах и системах электротранспорта.*

Annotatsiya. *Ushbu ishda kapsulalangan temir kukuni asosida yangi past chastotali magnit yumshoq kompozitsion materiallarning tuzilishi va fizik xossalariga sintez sharoitlarining ta'siri o'rganildi. Gaz fazasidan magnitodielektrik qoplama hosil qilish texnologiyasi ishlab chiqildi hamda izolyatsion qatlam qalinligini boshqarish imkoniyati ko'rsatildi. Qoplamani qo'llash sikllari soni va presslash bosimining mikrostrukturaga, magnit o'tkazuvchanlikka, koertsitiv kuchga hamda magnit yo'qotishlarga ta'siri tahlil qilindi. Uch martalik qoplama va 0,7–0,8 GPa bosimda presslash optimal natijalar berishi, ya'ni girdob tok yo'qotishlarini kamaytirish bilan birga yuqori magnit xususiyatlarni saqlab qolishi aniqlandi. μ(H) va P(f) bog'liqliklari matematik modellashtirildi. Olingan natijalar ishlab chiqilgan materiallarning elektrotexnika va elektrotransport qurilmalarida qo'llash istiqbollarini ko'rsatadi.*

Abstract. *The paper presents the results of studying the influence of synthesis conditions on the structure and physical properties of new composite low-frequency soft magnetic materials based on encapsulated iron powder. A gas-phase deposition technology for magnetic-dielectric coatings with controlled insulation layer thickness was developed. The effect of coating cycles and compaction pressure on microstructure, magnetic permeability, coercive force, and specific core losses was investigated. It was established that triple coating combined with compaction at 0.7–0.8 GPa provides an optimal balance between reduced eddy current losses and high magnetic performance. Mathematical approximation of the μ(H) and P(f) dependencies was performed, confirming the possibility of quantitative assessment of technological parameter influence. The obtained results demonstrate the перспективность of applying the developed composites in electrical engineering devices and electric transport systems.*

Ключевые слова: *магнитомягкие материалы; композиционные материалы; железный порошок; магнитодиэлектрическое покрытие; магнитная проницаемость; удельные потери; синтез; компактирование.*

Kalit so‘zlar: *magnit yumshoq materiallar; kompozitsion materiallar; temir kukuni; magnitodielektrik qoplama; magnit o‘tkazuvchanlik; magnit yo‘qotishlar; sintez; presslash.*

Keywords: *soft magnetic materials; composite materials; iron powder; magnetic-dielectric coating; magnetic permeability; core losses; synthesis; compaction.*

Введение. В современных условиях развития электротехнической и электронной промышленности особую актуальность приобретает создание новых магнитомягких материалов с пониженными удельными потерями и стабильными магнитными характеристиками в широком диапазоне рабочих частот. Традиционно в качестве магнитомягких материалов используется ламинированная электротехническая сталь, однако для ряда применений, особенно в области низких частот и трёхмерных магнитных потоков, её использование не является оптимальным [1]. В связи с этим значительный интерес представляют магнитомягкие композиционные материалы на основе железных порошков.

Наноматериалы и технологии их синтеза относятся к междисциплинарным направлениям современной науки, объединяющим достижения физики твёрдого тела, химии, порошковой металлургии и материаловедения. При уменьшении размеров структурных элементов до микро- и наноуровня проявляются квантово-размерные эффекты, изменяется плотность электронных состояний и возрастает вклад поверхностной энергии в формирование свойств материала [2]. Это приводит к существенной модификации магнитных характеристик, включая намагниченность, магнитную анизотропию и коэрцитивную силу.

Магнитомягкие порошковые материалы обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными листовыми материалами. К ним относятся технологичность изготовления деталей сложной формы, изотропность магнитных свойств, снижение отходов производства и возможность реализации трёхмерных магнитных цепей [1, 2]. Особенно перспективными являются композиционные магнитомягкие материалы (Soft Magnetic Composites, SMC), в которых каждая частица железного порошка покрыта тонким электроизолирующим слоем. Такое покрытие препятствует возникновению межчастичных вихревых токов и позволяет существенно снизить потери на перемагничивание [3].

В качестве коммерческих аналогов широко известны материалы типа Somaloy, полученные на основе железных порошков с фосфатными покрытиями [4]. Однако, несмотря на достигнутые успехи, данные материалы характеризуются сравнительно высокими потерями на перемагничивание и высокой стоимостью, что ограничивает их широкое применение [3,4]. В этой связи актуальной задачей является разработка новых технологических подходов к формированию магнитодиэлектрических покрытий и оптимизация режимов синтеза композиционных материалов.

Магнитные свойства композиционных материалов определяются совокупностью факторов: химическим составом порошка, гранулометрическим распределением, структурой и толщиной изоляционного слоя, плотностью компакта и режимами термической обработки [2,5]. Установлено, что равномерность и сплошность изоляционного покрытия оказывают решающее влияние на уровень вихревых потерь и стабильность магнитных характеристик [3]. В работе [6-9] показано, что применение капсулированных железных порошков позволяет получать материалы, пригодные для эксплуатации в низкочастотном диапазоне при сохранении удовлетворительных значений магнитной проницаемости и индукции.

В рамках ранее проведённых исследований был разработан способ получения композиционного магнитомягкого материала, включающий стадии предварительной подготовки порошков, нанесения защитных и изоляционных покрытий из газовой фазы, а также гидростатического прессования при высоких давлениях [10-13]. Данный подход

обеспечивает формирование равномерных покрытий толщиной от нанометров до микрометров и позволяет варьировать структуру материала за счёт изменения технологических параметров синтеза.

Особое значение для низкочастотных применений имеет использование крупнозернистых железных порошков (размер частиц порядка 200–300 мкм), обеспечивающих структурную целостность компакта и устойчивость к механическим нагрузкам [1]. Нанесение магнитодиэлектрического слоя оксидной природы из газовой фазы с последующим повторением цикла обработки позволяет регулировать толщину изоляции и тем самым управлять соотношением магнитной проницаемости и удельных потерь [14,15].

Таким образом, анализ литературных данных показывает, что физические свойства магнитомягких композиционных материалов в значительной степени определяются условиями синтеза и последующей обработки. Однако закономерности влияния технологических параметров на формирование структуры и магнитных характеристик крупнозернистых композитов остаются недостаточно изученными.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование влияния условий синтеза на структуру и физические свойства новых композиционных низкочастотных магнитомягких материалов на основе капсулированного железного порошка, а также установление взаимосвязи между параметрами технологического процесса и магнитными характеристиками получаемых композитов.

Материалы и методы. В качестве основы для получения композиционного магнитомягкого материала использовали железный порошок марки RD-7266 со средним размером частиц около 200–300 мкм. Выбор крупнозернистой фракции обусловлен требованиями к низкочастотным материалам, для которых важны высокая индукция насыщения, структурная целостность компакта и стабильность магнитных характеристик при механических нагрузках [16-18].

Гранулометрический состав порошка определяли методом воздушной сепарации и ситового анализа. Для дальнейшей обработки отбиралась фракция с размером частиц более 200 мкм, обеспечивающая требуемую однородность структуры.

В качестве изоляционного компонента применяли магнитодиэлектрическое покрытие оксидной природы (на основе соединений фосфора), формируемое из газовой фазы. Для пассивации поверхности использовали высокотемпературный силиконовый лак (0,25 % масс.), предотвращающий окисление частиц в процессе термической обработки. В качестве смазки применяли раствор торфяного воска (0,15 % масс.), вводимый для улучшения прессуемости порошка.

Методика нанесения магнитодиэлектрического покрытия

Процесс подготовки порошка включал несколько последовательных стадий.

Сепарация порошка: Исходный порошок подвергали воздушной сепарации с целью выделения крупнозернистой фракции (> 200 мкм). Это обеспечивало снижение дисперсности распределения частиц и формирование более стабильной структуры композита.

Пассивация поверхности: для защиты частиц от окисления на поверхность наносили силиконовый лак в количестве 0,25 % от массы порошка. Обработка проводилась при перемешивании до равномерного распределения защитного слоя.

Нанесение изоляционного слоя: формирование магнитодиэлектрического покрытия осуществляли в реакторе при температуре 200 °C. Порошок переводили во взвешенное состояние в газовой среде, содержащей пары наносимого оксидного материала и растворителя. По мере протекания процесса растворитель удалялся из реакционной камеры.

Для получения покрытий различной толщины цикл обработки повторяли до трёх раз. Такой подход позволял регулировать толщину изоляционного слоя в диапазоне от

нанометров до микрометров [5,19]. Равномерность покрытия обеспечивалась за счёт динамического перемешивания и вакуумной обработки (остаточное давление 10^{-2}–10^{-3} мм рт. ст.).

После нанесения изоляционного слоя порошок подвергали операции смазки путём смешения с раствором торфяного воска в шаровой мельнице. Смазка способствовала улучшению формуемости и снижению трения при прессовании.

Компактирование осуществляли методом гидростатического прессования в специальных пресс-формах при давлении 0,7–0,8 ГПа [5]. Полученные заготовки подвергали термической обработке при температуре до 200 °C в вакууме для стабилизации структуры и удаления остаточных летучих компонентов.

Измерения проводились при различных значениях напряжённости магнитного поля для установления зависимости свойств от параметров синтеза и толщины изоляционного слоя [3,6,20].

Плотность компактов определяли методом гидростатического взвешивания. Пористость рассчитывали по соотношению экспериментальной и теоретической плотности железа с учётом доли изоляционного слоя.

Сравнительный анализ позволил оценить влияние технологических факторов на магнитные и механические свойства материала. Основное внимание уделялось взаимосвязи между толщиной изоляционного слоя, плотностью компакта и уровнем удельных магнитных потерь.

Таблица 1

Технологические параметры синтеза и контролируемые характеристики композиционных магнитомягких материалов

№ образца	Число циклов нанесения покрытия	Давление прессования, ГПа	Содержание смазки, % масс.	Толщина изоляционного слоя*	Измеряемые магнитные параметры
1	1	0,7	0,15	Нанометр. Диапазон	μ, Hc, Bs, P
2	2	0,7	0,15	Увеличенная	μ, Hc, Bs, P
3	3	0,7	0,15	Максимальная	μ, Hc, Bs, P
4	3	0,8	0,15	Максимальная	μ, Hc, Bs, P
5	3	0,8	0,20	Максимальная	μ, Hc, Bs, P

* Толщина изоляционного слоя регулируется кратностью нанесения покрытия и оценивается косвенно по массе прироста и данным микроскопии.

Размер частиц порошка, > 200 мкм; Температура обработки, 200 °C.

Обозначения: μ – магнитная проницаемость; Hc – коэрцитивная сила; Bs – магнитная индукция насыщения; P – удельные потери на перемагничивание.

Результаты и обсуждение. Формирование структуры композиционного материала

Проведённые исследования показали, что условия синтеза оказывают определяющее влияние на морфологию частиц и характер изоляционного покрытия. После однократного нанесения магнитодиэлектрического слоя формируется тонкая, относительно равномерная оболочка, частично повторяющая микрорельеф поверхности частиц. При увеличении числа циклов обработки наблюдается утолщение покрытия и повышение его сплошности.

Микроструктурный анализ показал, что при трёхкратном нанесении покрытия образуется более однородный изоляционный слой, снижающий вероятность прямых металлических контактов между частицами после прессования. Это свидетельствует о формировании устойчивой межчастичной изоляции, что особенно важно для снижения вихревых токов в низкочастотном диапазоне.

Компактирование при давлении 0,7–0,8 ГПа обеспечило формирование плотной

структуры с минимальной остаточной пористостью. Повышение давления прессования способствовало увеличению плотности компакта, однако при избыточном давлении наблюдались признаки локального разрушения изоляционного слоя, что может приводить к росту межчастичных токов и увеличению магнитных потерь.

Влияние толщины изоляционного слоя на магнитные свойства.

Установлено, что увеличение числа циклов нанесения покрытия сопровождается снижением удельных потерь на перемагничивание. Это объясняется уменьшением величины вихревых токов за счёт повышения электрического сопротивления межчастичных границ.

В то же время чрезмерное увеличение толщины изоляционного слоя приводит к уменьшению доли магнитной фазы в единице объёма композита, что сопровождается некоторым снижением магнитной проницаемости и индукции насыщения. Таким образом, наблюдается компромисс между минимизацией потерь и сохранением высоких магнитных характеристик.

Оптимальные значения магнитной проницаемости и коэрцитивной силы были получены при двух- или трёхкратном нанесении покрытия. В этих условиях достигается достаточная электрическая изоляция частиц без существенного снижения магнитной связности структуры.

Влияние давления прессования

С увеличением давления прессования от 0,7 до 0,8 ГПа отмечается рост плотности материала и улучшение магнитной связности между частицами. Это приводит к увеличению магнитной индукции насыщения и снижению коэрцитивной силы.

Однако при дальнейшем повышении давления возможно частичное разрушение изоляционного слоя и формирование локальных проводящих каналов, что приводит к увеличению удельных потерь. Следовательно, оптимизация давления прессования является критическим фактором при формировании структуры композита.

Комплексный анализ влияния условий синтеза

Сравнительный анализ показал, что магнитные свойства композиционного материала определяются совокупностью следующих факторов:

- гранулометрическим составом порошка;
- толщиной и равномерностью магнитодиэлектрического покрытия;
- плотностью компакта и уровнем остаточной пористости;
- режимами термической обработки.

При использовании крупнозернистого порошка (>200 мкм) формируется устойчивая структура, обеспечивающая высокую индукцию насыщения в низкочастотном диапазоне. Повторное нанесение покрытия позволяет регулировать баланс между снижением потерь и сохранением магнитной проницаемости.

Таким образом, установлено, что оптимальные характеристики достигаются при комплексном подборе технологических параметров: трёхкратное нанесение покрытия при температуре 200 °C и прессование при давлении около 0,7–0,8 ГПа обеспечивают формирование структуры с минимальными потерями и стабильными магнитными свойствами.

Графический анализ магнитных характеристик. Зависимость магнитной проницаемости μ(H)

Анализ экспериментальных кривых μ(H) показал типичное поведение магнитомягкого композиционного материала в низкочастотном диапазоне. На начальном участке при малых значениях напряжённости магнитного поля H наблюдается резкий рост магнитной проницаемости, обусловленный процессами доменной перестройки и смещения доменных границ. Максимальное значение μ достигается в области средних полей, соответствующей наиболее эффективной ориентации магнитных доменов.

Дальнейшее увеличение H приводит к постепенному снижению эффективной проницаемости вследствие приближения материала к состоянию магнитного насыщения. Сравнение образцов показало следующие закономерности:

- При однократном нанесении покрытия наблюдается более высокая максимальная μ, однако фиксируется большая нестабильность параметров, связанная с межчастичными токами.
- При двух- и трёхкратном нанесении покрытия кривая μ(H) становится более сглаженной, максимум несколько снижается, но увеличивается стабильность и уменьшается разброс значений.
- Повышение давления прессования до 0,8 ГПа способствует увеличению μmax за счёт повышения плотности компакта и улучшения магнитной связности частиц.

Таким образом, графики μ(H) демонстрируют компромисс между электрической изоляцией частиц и магнитной связностью структуры.

5.2. Зависимость удельных потерь P(f)

Зависимость удельных магнитных потерь от частоты P(f) имеет возрастающий характер и описывается суммой трёх основных вкладов:

$$P = P_{\text{гист}} + P_{\text{вихр}} + P_{\text{изб}}$$

где: $P_{\text{гист}}$— гистерезисные потери, $P_{\text{вихр}}$— потери на вихревые токи, $P_{\text{изб}}$— дополнительные (аномальные) потери.

В низкочастотной области доминируют гистерезисные потери, практически линейно зависящие от частоты. С ростом частоты наблюдается квадратичное увеличение вклада вихревых токов.

Графический анализ показал:

- Образцы с однократным покрытием демонстрируют наиболее крутой рост P(f), что связано с недостаточной межчастичной изоляцией.
- При увеличении числа циклов нанесения покрытия наблюдается существенное снижение наклона кривой P(f), что подтверждает эффективное подавление вихревых токов.
- При оптимальном сочетании трёхкратного покрытия и прессования при 0,7–0,8 ГПа достигается минимальный уровень потерь во всём исследуемом диапазоне частот.

Следует отметить, что чрезмерное увеличение толщины изоляционного слоя, хотя и снижает вихревые потери, может приводить к снижению магнитной индукции насыщения и, соответственно, к росту гистерезисной составляющей.

Выводы. Разработана технология получения композиционных низкочастотных магнитомягких материалов на основе капсулированного крупнозернистого железного порошка.

1. Установлено существенное влияние условий синтеза и компактирования на микроструктуру и магнитные характеристики композита.
2. Показано, что увеличение толщины магнитодиэлектрического покрытия снижает удельные потери за счёт подавления вихревых токов.
3. Определён оптимальный режим обработки (трёхкратное нанесение покрытия, прессование 0,7–0,8 ГПа), обеспечивающий баланс между высокой магнитной проницаемостью и минимальными потерями.
4. Математическая аппроксимация зависимостей μ(H) и P(f) подтверждает возможность количественного описания влияния технологических параметров на физические свойства материала.

Таким образом, проведённое исследование демонстрирует перспективность разработанного подхода для создания новых низкочастотных магнитомягких композитов с улучшенными эксплуатационными характеристиками для применения в

электротехнических устройствах.

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. – Ташкент, 2024. – 12 с.

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. Govor, G. A. Composite soft magnetic materials based on iron powders / G. A. Govor, V. V. Mihnevich // Inorganic Materials. – 2007. – Vol. 43. – No. 7. – P. 805–807.

11. Jansson, P. Advances in soft magnetic composites // Soft Magnetic Materials Conference. – Barcelona, 1998. – P. 1–5.

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. 2465669 Рос. Федерация / 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. O'Handley, R. C. Modern magnetic materials: principles and applications / R. C. O'Handley. – New York : Wiley, 2000. – 768 p.

16. Suryanarayana, C. Mechanical alloying and milling / C. Suryanarayana. – New York : Marcel Dekker, 2004. – 488 p.

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.

19. Tukhtabayev, M. A., Normirzaev, A. R., Minchukova, O. F., & Zhaludkevich, A. L. (2026). Gas-Phase Phosphate Surface Modification of Iron Powders: Microstructural Evolution

and Coating Formation Mechanisms.

20. 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.