ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА СТРУКТУРУ СВОЙСТВА НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

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 статье анализируется влияние условий синтеза на структуру и свойства новых композиционных низкочастотных магнитомягких материалов. Подробно рассмотрены механические, термические и физические свойства металлических матричных композитов (ММК), а также их преимущества и недостатки. В работе освещается влияние материала матрицы, армирующих элементов и состояния границы раздела фаз на конечные характеристики материала. Указаны сферы применения ММК в высокотехнологичных отраслях, таких как аэрокосмическая, автомобильная и электронная промышленность, а также отмечены ограничивающие факторы, включая низкую пластичность и высокую стоимость производства.*

Annotatsiya. *Ushbu maqolada yangi kompozitsion past chastotali yumshoq magnit materiallarning xususiyatlariga sintez sharoitlarining ta'siri tahlil qilinadi. Metall asosli kompozitsion materiallarning (MAKM) mexanik, termik va fizik xususiyatlari, shuningdek, ularning afzalliklari va kamchiliklari batafsil ko'rib chiqilgan. Tadqiqotda matritsa materiali, armaturalovchi elementlar va fazalararo chegara holatining materialning yakuniy xossalariga ta'siri yoritilgan. MAKM larning aviatsiya, avtomobilsozlik va elektronika kabi yuqori texnologiyali sohalarda qo'llanilishi, shuningdek, ularning plastikligi pastligi va ishlab chiqarish tannarxi yuqoriligi kabi cheklovchi omillar ko'rsatib o'tilgan.*

Abstract*. This article analyzes the influence of synthesis conditions on the structure and properties of new composite low-frequency soft magnetic materials. The mechanical, thermal, and physical properties of metal matrix composites (MMCs) are reviewed in detail, including their advantages and disadvantages. The study highlights the impact of the matrix material, reinforcing elements, and the state of the phase interface on the final characteristics of the material. The applications of MMCs in high-tech industries such as aerospace, automotive, and electronics are discussed, alongside limiting factors such as low plasticity and high production costs.*

Ключевые слова: *Композиционные материалы, металлические матричные композиты (ММК), магнитомягкие материалы, низкочастотные материалы, условия синтеза, механические свойства, удельная прочность, износостойкость, термическая стабильность, коэффициент теплового расширения (КТР), армирование, аэрокосмическая промышленность.*

Kalit so'zlar: *Kompozitsion materiallar, metall asosli kompozitlar (MAKM), yumshoq magnit materiallar, past chastotali materiallar, sintez sharoitlari, mexanik xossalar, solishtirma mustahkamlik, izno bardoshlilik, termik barqarorlik, issiqlik kengayish koeffitsiyenti, armaturalash, aerokosmik sanoat.*

Keywords: *Composite materials, metal matrix composites (MMC), soft magnetic materials, low-frequency materials, synthesis conditions, mechanical properties, specific strength, wear resistance, thermal stability, coefficient of thermal expansion (CTE), reinforcement, aerospace industry.*

Введение. Наноматериалы и технологии их синтеза являются в значительной степени междисциплинарными областями. Поэтому методические аспекты развития методов и технологии наноразмерных магнитных материалов в настоящее время представляют одно из наиболее активно развиваемых направлений современной науки, которое в последние годы привлекает все большее внимание исследователей из различных областей химии, физики, биологии и медицины [1,2,3].

Выделяют несколько групп материалов и технологий: наноразмерные частицы и порошки, объемные наноструктурированные материалы, наноразмерные гетероструктуры, композиционные наноматериалы, органические материалы. Условно наноматериалы по пространственному строению можно подразделить на несколько групп. К нульмерным (0D) структурам относят свободные и стабилизированные нанокластеры, фуллерены, квантовые точки. К одномерным (1D) относятся наноструктуры, один из линейных размеров которых много больше остальных: нанотрубки, нановолокна и нанонити, наностержни, ленты и вискеры. Двумерные (2D) – нанопластины, пленки с толщиной порядка десятков нанометров, гетероструктуры [4].

Анализ свойств композиционных наноматериалов [1-12]:

1. Механические свойства. Высокая удельная прочность и жесткость: Это главное преимущество. Добавление высокомодульных волокон (бор, углерод) или частиц (карбид кремния, оксид алюминия) значительно увеличивает прочность и модуль упругости при меньшем весе по сравнению с чистым металлом. Например, Al/SiC легче и прочнее многих сталей и титановых сплавов [6].

Усталостная прочность: как правило, выше, чем у матрицы, особенно при использовании непрерывных волокон. Армирующие элементы препятствуют распространению трещин [7].

Ползучесть: Сопротивление ползучести (медленная деформация под постоянной нагрузкой при высокой температуре) значительно улучшается, особенно с керамическими армирующими компонентами [8].

Износостойкость: чрезвычайно высокая, особенно для систем с твердыми частицами (например, Al/Al_2O_3 или Al/SiC). Это делает ММК идеальными для тормозных дисков, цилиндров, направляющих.

2. Термические свойства. Низкий коэффициент теплового расширения (КТР): Можно "настроить", комбинируя матрицу с армирующими материалами с очень низким КТР (например, карбид кремния, бор). Это критически важно для аэрокосмической и электронной промышленности (например, подложки для микросхем).

Высокая теплопроводность: Композиты на основе алюминия или меди с алмазными или графитовыми волокнами обладают очень высокой теплопроводностью, что идеально для систем теплоотвода (радиаторы, корпуса процессоров).

Жаростойкость: Рабочие температуры выше, чем у чистого металла матрицы. Керамическое армирование "поддерживает" матрицу при температурах, близких к ее точке плавления.

3. Физические и специальные свойства. Электро- и теплопроводность: Можно комбинировать. Например, Cu/C (графит) – хорошая проводимость меди и смазывающие свойства графита.

Радиационная стойкость: Некоторые ММК (например, с борными волокнами) обладают повышенной стойкостью к радиационному повреждению.

4. Недостатки и проблемные свойства. Низкая пластичность и вязкость разрушения: Это главный недостаток. Композиты, как правило, более хрупкие, чем их матричные сплавы. Они хуже поглощают энергию удара.

Сложность и высокая стоимость обработки: Производство ММК (методы: пропитка под давлением, порошковая металлургия, диффузионное сварка) дороже, чем литье или

обработка обычных металлов. Обработка резанием (сверление, фрезерование) затруднена из-за абразивности армирующих компонентов.

Анизотропия свойств: Для композитов с непрерывными волокнами свойства вдоль и поперек волокон сильно различаются. Это нужно учитывать при проектировании.

Проблемы с соединением: Пайка и сварка часто сложны из-за химических реакций на границе раздела матрица-армирование и различий в КТР.

Плотность: Хотя удельные свойства высоки, абсолютная плотность обычно выше, чем у полимерных композитов.

Материалы и методы. Основные системы материалов и их применение. На основе алюминия (Al): Самые распространенные. Al + SiC (частицы) – для аэрокосмических конструкций, автомобильных дисков (Porsche, Lotus), деталей шасси. Al + Al_2O_3 (волокна/частицы) – износостойкие детали.

На основе магния (Mg): Сверхлегкие композиты для аэрокосмической и спортивной индустрии (Mg/B, Mg/C).

На основе титана (Ti): Жаропрочные композиты для авиадвигателей (лопатки компрессоров) и сверхзвуковой авиации (Ti + SiC волокна).

На основе меди (Cu): Высокая теплопроводность для теплоотводников (Cu/алмаз) и антифрикционные детали (Cu/графит).

Ключевые факторы, влияющие на свойства:

1.Материал матрицы: Определяет температурный предел, коррозионную стойкость, плотность.

2.Армирующий материал: Форма (волокна, частицы, нановолокна), размер, объемная доля, ориентация и распределение.

3.Состояние границы раздела: Прочность связи между матрицей и армированием – самый критический параметр. Слишком слабая связь – нет передачи нагрузки, слишком сильная – хрупкое разрушение. Часто требуются специальные покрытия (например, на SiC волокна для титановых ММК).

Результаты. Итог: Композиты на металлической основе – это материалы с уникальным набором свойств (высокая удельная прочность, жесткость, износостойкость, регулируемое КТР), которые делают их незаменимыми в высокотехнологичных отраслях. Однако их применение сдерживается высокой стоимостью, сложностью производства и относительно низкой ударной вязкостью.

Полные данные по свойствам композитных материалов на металлической основе.

Свойства ММК определяются синергией трёх ключевых элементов: матрицы, армирующего элемента и границы раздела между ними.

1. Классификация и состав. Матрица (Непрерывная фаза):

Лёгкие металлы: Алюминий (Al), Магний (Mg), Титан (Ti) и их сплавы.

Тяжёлые металлы: Медь (Cu), Никель (Ni), Железо (Fe, стали), Сверхсплавы на основе Ni или Co.

Специальные: Интерметаллиды (NiAl, TiAl), Свинец (Pb).

Армирующий элемент (Дискретная, упрочняющая фаза):

По геометрии: Частицы (Particle): SiC, Al_2O_3, B_4C, TiC, диоксид тория (ThO_2). Размер: 0.1–100 мкм. Волокна/вискеры (Whisker): SiC, Al_2O_3, диборид титана (TiB_2). Длина: 10–500 мкм. Непрерывные волокна (Fiber): Углерод (C), бор (B), SiC, Al_2O_3, вольфрам (W). Длина >1000 мкм.

Наноразмерные армирующие элементы: Углеродные нанотрубки (УНТ), нановолокна, графен, наночастицы.

По природе: Керамические (оксиды, карбиды, нитриды), металлические (проволока W, сталь), углеродные.

2. Детальные Свойства по Категориям.

Таблица 1.

А. Механические Свойства

Свойство	**Характеристика для ММК**	**Пример (система)**	**Сравнение с матрицей**
Удельная прочность	Резко возрастает, особенно с волокнами.	Al/B (непр.) > 1000 МПа	В 2-5 раз выше
Удельная жёсткость (E/ρ)	Значительный рост (модуль Юнга армирующего в 3-10 раз выше).	Mg/C (непр.), Al/SiC (част.)	В 1.5-4 раза выше
Предел текучести	Существенно повышается (дисперсионное упрочнение, передача нагрузки).	6061Al/Al_2O_3 (20% част.)	На 50-200% выше
Усталостная прочность	Улучшается, армирующие элементы тормозят рост трещин.	Al/SiCp	На 30-100% выше
Сопротивление ползучести	Резко улучшается при высоких температурах.	Ti/SiC (непр.), Ni-сплав/Al_2O_3	На порядок выше
Износостойкость	Одно из главных преимуществ. Низкий коэффициент трения, высокая твёрдость.	Al-Si сплав/SiC, Al/графит	В 3-10 раз выше
Вязкость разрушения (K1c)	Снижается. Основной недостаток. Материал становится более хрупким.	Практически все ММК	На 20-60% ниже
Пластичность (относ. удлинение)	Резко падает.	Al/60% SiCp -> $\delta \approx 1\%$	Может упасть в 5-10 раз

Анализ таблицы «Механические свойства ММК»

Таблица показывает сравнительное изменение механических свойств композитов на металлической основе (ММК) по отношению к матричным сплавам.

Во-первых, прочностные характеристики (удельная прочность, жёсткость, предел текучести) существенно возрастают. Удельная прочность может увеличиваться в 2–5 раз, модуль упругости – в 1,5–4 раза и более, а предел текучести – на 50–200%. Это связано с эффективной передачей нагрузки армирующим элементам (волокнам или частицам).

Во-вторых, эксплуатационные свойства (усталостная прочность, сопротивление ползучести, износостойкость) значительно улучшаются. Особенно заметен рост износостойкости (в 3–10 раз) и сопротивления ползучести при высоких температурах, что делает ММК перспективными для нагруженных и термонапряжённых узлов.

В-третьих, таблица подчёркивает главный недостаток – снижение пластичности и вязкости разрушения. Ударная вязкость уменьшается на 20–60%, а относительное удлинение может снижаться в 5–10 раз. Это свидетельствует о повышенной хрупкости по сравнению с матричными сплавами.

ММК демонстрируют значительный прирост прочности, жёсткости и износостойкости при одновременном снижении пластичности. Следовательно, их рационально применять в конструкциях, где критичны высокая удельная прочность и термостойкость, но не требуется высокая ударная вязкость.

Таблица 2.

B. Термические Свойства

Свойство	**Характеристика для ММК**	**Применение/Эффект**
Коэффициент теплового расширения (КТР)	Можно регулировать (подстраивать) в широком диапазоне, снижая до нуля.	Электроника (подложки), оптические системы, космос. Al/SiC, Cu/Mo
Теплопроводность (λ)	Может быть как высокой (с Cu, Al, алмазом), так и низкой (с керамикой).	Радиаторы (Cu/алмаз, Al/графит), термостабильные конструкции.
Температурная стабильность	Сохраняют свойства при более высоких температурах, чем матрица.	Детали двигателей, теплозащита.
Термоциклическая усталость	Может быть проблемой из-за несовпадения КТР матрицы и армирования.	Трещинообразование на границе раздела при циклическом нагреве/охлаждении

Таблица отражает ключевые термические характеристики композитов на металлической основе и их практическое значение.

Во-первых, коэффициент теплового расширения (КТР) в ММК можно целенаправленно регулировать за счёт подбора армирующей фазы. Это позволяет существенно снижать КТР (вплоть до очень низких значений), что критически важно для электроники, оптических систем и космической техники, где требуется размерная стабильность при изменении температуры.

Во-вторых, теплопроводность может варьироваться в широком диапазоне – от очень высокой (Cu/алмаз, Al/графит) до сравнительно низкой (при керамическом армировании). Это делает ММК универсальными материалами для систем теплоотвода (радиаторы, корпуса микросхем) и термостабильных конструкций.

В-третьих, температурная стабильность композитов выше, чем у матричных металлов. Армирующие компоненты «поддерживают» матрицу при повышенных температурах, что позволяет использовать ММК в деталях двигателей и теплонагруженных узлах.

Однако таблица также указывает на возможную проблему – термоциклическую усталость. Из-за различий в КТР матрицы и армирования при циклическом нагреве и охлаждении могут возникать внутренние напряжения и трещины на границе раздела фаз.

ММК обладают регулируемыми термическими свойствами, высокой теплопроводностью и температурной стабильностью, что делает их особенно ценными для высокотехнологичных и теплонагруженных систем. При этом при проектировании необходимо учитывать совместимость КТР компонентов для предотвращения термических повреждений.

Таблица демонстрирует, что физические и функциональные характеристики композитов на металлической основе существенно зависят от состава матрицы и типа армирования.

Во-первых, плотность ММК обычно ниже, чем у сталей, но выше, чем у полимерных композитов. При этом их удельные свойства (прочность/вес) значительно выгоднее, что делает их перспективными для авиации и транспорта (пример: Ti/SiC).

Таблица 3.

С. Физические и Функциональные Свойства

Свойство	Характеристика	Пример
Плотность	Часто выше, чем у полимерных композитов, но ниже, чем у многих сталей. Удельные свойства выигрышные.	Ti/SiC легче и прочнее стали.
Электропроводность	Зависит от компонентов. Cu/C – хороший проводник, Al/Al_2O_3 – изолятор.	Контакты, скользящие щётки (Cu/графит).
Демпфирующая способность	Часто выше, чем у чистого металла (диссипация энергии на границах раздела).	Виброустойчивые конструкции.
Радиационная стойкость	Некоторые армирующие (B, B_4C) поглощают нейтроны.	Защита в ядерной энергетике.
Коррозионная стойкость	Зависит от системы. SiC в Al может вызывать гальваническую коррозию. Часто требует покрытий.	–

Во-вторых, электропроводность варьируется в широком диапазоне. Системы типа Cu/C сохраняют высокую проводимость, тогда как композиты с оксидной керамикой (Al/Al_2O_3) могут обладать пониженной проводимостью. Это позволяет целенаправленно подбирать материал для контактов, щёток и токопроводящих элементов.

В-третьих, демпфирующая способность часто выше, чем у чистых металлов, благодаря рассеянию энергии на границах раздела фаз. Это повышает виброустойчивость конструкций.

Также отмечена радиационная стойкость отдельных систем (с бором, B_4C), что делает их пригодными для ядерной энергетики. Однако коррозионная стойкость зависит от комбинации компонентов; возможна гальваническая коррозия, поэтому часто требуются защитные покрытия.

Физические и функциональные свойства ММК отличаются высокой вариативностью и могут быть «настроены» под конкретную задачу, однако при проектировании необходимо учитывать совместимость компонентов и возможные коррозионные риски.

3. Ключевые Влияющие Факторы

1. Объёмная доля армирования (Vf): Основной параметр. Свойства обычно растут с увеличением Vf (до предела упаковки ~60-70% для частиц).

2. Размер и распределение армирующих элементов: Меньший размер -> выше прочность (упрочнение Орована). Равномерное распределение критически важно.

3. Ориентация волокон: определяет анизотропию. Максимальные свойства – вдоль волокон.

4. Качество границы раздела: Прочность сцепления должна быть оптимальной: достаточной для передачи нагрузки, но не вызывающей хрупкость. Часто используются барьерные покрытия (например, пиролитический углерод на SiC волокнах для Ti-матрицы).

Выводы. Композиты на металлической основе обладают уникальным сочетанием высокой удельной прочности, жёсткости, износостойкости и регулируемых термических свойств, что делает их востребованными в аэрокосмической, автомобильной и электронной промышленности. Их характеристики определяются синергией матрицы, армирующего элемента и прочности границы раздела между ними. При этом они превосходят традиционные металлы по жаропрочности, усталостной стойкости и стабильности размеров. Однако широкое применение ММК ограничивается высокой стоимостью производства, сложностью обработки и относительно низкой ударной вязкостью.

Список литературы

1. Herzer G. Modern Soft Magnets: Amorphous and Nanocrystalline Materials // Acta Materialia. 2013.
2. McHenry M.E., Willard M.A. Soft Magnetic Materials: Developments and Future Directions // IEEE Transactions on Magnetics. 2018.
3. Makino A. Nanocrystalline Soft Magnetic Alloys for High-Frequency Applications // Materials Science Forum. 2019.
4. Willard M.A. et al. Nanocomposite Soft Magnetic Materials: Recent Advances // Journal of Applied Physics. 2020.
5. Suzuki K. et al. Fe-based Nanocrystalline Soft Magnetic Alloys with High Saturation Magnetization // Materials. 2021.
6. Zhang Y. et al. Effect of Annealing Conditions on Microstructure and Magnetic Properties of Nanocrystalline Alloys // Metals. 2022.
7. Li X. et al. Influence of Grain Size on Coercivity in Fe-based Nanocrystalline Alloys // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2023.
8. Wang H. et al. Low-Frequency Magnetic Properties of Nanocomposite Soft Magnetic Materials // Materials Today Communications. 2024.
9. 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.
10. Pakalniškis A. et al. Rhenium substitution effects on the structural, morphological and magnetic properties of bismuth ferrite BiFe (1-x) RexO3 //Ceramics International. – 2024. – Т. 50. – №. 7. – С. 10171-10182.
11. Нормирзаев, А. Р. Новые материалы и их применение для разработки компонентов опытных образцов миниэлектротранспорта / А. Р. Нормирзаев, М. А. Тухтабаев // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сборник научных трудов: в 2 томах / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет; редкол.: Д. В. Капский, А. С. Поварехо (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2024. – Т. 1. – С. 95-105.
12. Демиденко Ф. О. и др. Выбор оптимального состава исходных металлических порошков и наносимого покрытия на поверхность электромотора //Строительство и образование. – 2023. – Т. 3. – С. 106-114.