

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-68>

УДК 621.318.2

СІНЧУК ОЛЕГ

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9637-7069>email: sinchuk@knu.edu.ua**СІНЧУК ІГОР**

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7702-4030>email: olegovich.s@knu.edu.ua**ДОЗОРЕНКО ОЛЕГ**

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7230-0630>email: olegovich.s@knu.edu.ua**ОМЕЛЬЧУК МАКСИМ**

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0009-0008-0763-1717>email: omellejr@knu.edu.ua

НОВІ ПІДХОДИ У ВИРОБНИЦТВІ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ БЕЗ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ: ПЕРСПЕКТИВНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

У статті розглянуто стан в сьогоденні та очікувані перспективи у виробництві постійних магнітів без залучення до цієї технології рідкоземельних елементів, котрі являють собою дефіцитний ресурс в когорті корисних копалин держави. Підтверджено, що постійні магніти є критично важливими компонентами сучасних технологій, що забезпечують функціонування широкого спектру пристроїв – від побутової електроніки до електромобілів (ЕМ), від систем відновлюваної енергетики (вітрові турбіни) до авіації. Їхня незамінність зумовлена унікальними магнітними властивостями, зокрема високою магніторушійною силою, компактними розмірами та енергоефективністю, що є ключовим для застосувань у таких специфічних умовах, як, наприклад, в електродвигунах.

Проведений аналіз висвітлює той факт, що технологія виробництва постійних магнітів без рідкоземельних елементів демонструє складний, але надзвичайно перспективний ландшафт. Наукова та промислова спільнота приділяють значну увагу розвитку матеріалів на основі нітридів заліза (FeN), сполук марганцю та вісмуту (MnBi), а також альтернатив на основі кобальту та фериту, які мають потенціал для створення ефективних магнітів без використання дорогих рідкоземельних металів. Це відповідає глобальній тенденції до впровадження сталих технологій та зменшення залежності від імпортованих стратегічних ресурсів.

Однак, незважаючи на значні досягнення, такі як комерціалізаційні зусилля компанії Niron Magnetics з FeN та успішні випробування MnBi-магнітів у промислових електродвигунах, залишаються численні виклики. Серед них – подолання розриву між теоретичними характеристиками і реальною ефективністю, масштабування складних виробничих процесів, забезпечення стабільності властивостей у великих партіях продукції, а також необхідність перепроєктування кінцевих систем для адаптації до нових типів магнітів.

Подальші дослідження та інвестиції у цю галузь є життєво необхідними для забезпечення стабільного та сталого майбутнього як самої галузі, так і промисловості загалом. Розвиток альтернативних технологій створює потенціал для зменшення залежності від геополітично вразливих ланцюгів постачання, що, у свою чергу, сприяє зміцненню економічної та технічної безпеки. Актуальність тематики зростає в умовах глобальної трансформації енергетичного сектору, який потребує надійних, енергоефективних і доступних рішень для електромеханічних систем наступного покоління.

Ключові слова: постійні магніти, рідкоземельні елементи, NdFeB, коерцитивна сила, ферити, марганець, нітрид заліза, Alnico.

SINCHUK OLEH**SINCHUK IHOR****DOZORENKO OLEH****OMELCHUK MAKSYM**

Kryviy Rih National University

NEW APPROACHES IN THE PRODUCTION OF RARE-EARTH-FREE PERMANENT MAGNETS: PROSPECTIVE MATERIALS AND TECHNOLOGIES

The article examines the current state and future prospects of permanent magnet production without involving rare-earth elements, which are a scarce resource among the country's mineral assets. It is confirmed that permanent magnets are critically important components of modern technologies, ensuring the operation of a wide range of devices – from consumer electronics to electric vehicles (EVs), and from renewable energy systems (such as wind turbines) to aviation. Their irreplaceability is determined by their unique magnetic properties, particularly high magnetomotive force, compact size, and energy efficiency, which are key factors for applications under specific conditions, such as in electric motors.

The conducted analysis highlights that the technology of manufacturing permanent magnets without rare-earth elements presents a complex yet highly promising landscape. The scientific and industrial communities are increasingly focused on advancing materials such as iron nitride (FeN), manganese-bismuth (MnBi), cobalt-based alloys, and other compositions that demonstrate promising magnetic behavior without relying on costly rare-earth metals. These efforts reflect a broader trend toward sustainable materials science and the strategic importance of technological independence in magnet-related industries.

Despite significant achievements, such as the commercialization efforts of Niron Magnetics with FeN-based magnets and successful testing of MnBi magnets in industrial motors, several challenges remain. These include bridging the gap between theoretical and practical performance, scaling up complex manufacturing processes, and the need to redesign end-use systems to adapt to the properties of rare-earth-free magnets. Furthermore, integrating these alternative magnets into existing global supply chains and standardizing their properties pose additional hurdles.

Further research and investment in this field are crucial to ensure a stable and sustainable future for both the magnet industry itself and the broader industrial sector. The development of alternative technologies for permanent magnet production holds potential for reducing dependence on geopolitically vulnerable supply chains, thereby enhancing economic security. The relevance of this topic continues to grow amid the global transformation of the energy sector, which requires reliable, energy-efficient, and cost-effective solutions for the next generation of electromechanical systems.

Keywords: permanent magnets, rare-earth elements, NdFeB, coercivity, ferrites, manganese, iron nitride, Alnico.

Стаття надійшла до редакції / Received 28.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Актуальність досліджень

Протягом останніх десятиліть галузь виробництва постійних магнітів для електричних машин функціонує під егідою магнітів на основі сплавів рідкоземельних елементів (РЗЕ), зокрема неодимових (NdFeB) та самарій-кобальтових (SmCo), завдяки їхній винятковій магнітній силі та енергетичній щільності. Однак, ця залежність від рідкоземельних елементів створює значні виклики. По-перше, ланцюг поставок рідкоземельних елементів є надзвичайно вразливим, оскільки більша частина світового видобутку, переробки та виробництва магнітів припадає на нестабільний у геополітичному середовищі Китай, що створює значні ризики для індустрії, так як дозволяє вищенаведеній державі використовувати свій контроль як інструмент, котрий призводить до цінової волатильності та збоїв у поставках, як це спостерігалось з експортним контролем, що вплинув на виробництво електромобілів (ЕМ). По-друге, видобуток та переробка РЗЕ пов'язані зі значним екологічним збитком, включаючи забруднення ґрунтових вод токсичними та радіоактивними речовинами, утворення величезних обсягів відходів та значне споживання енергії. Прогнозоване збільшення попиту на рідкоземельні елементи в світі до 2030 року лише посилить ці екологічні та соціальні проблеми [1,2].

У відповідь на ці виклики, світова наукова та промислова спільнота активно шукає нові підходи у виробництві постійних магнітів, які не містять рідкоземельних елементів або значно зменшують їхню кількість. Метою даної роботи є висвітлення квінтесенції відомих наукових підходів та авторське бачення перспективних матеріалів та технологій, що мають місце в процесі створення високопродуктивних магнітів без рідкоземельних елементів, аналіз властивостей магнітів, методів їхнього виробництва і огляд потенційно можливих застосувань розглянутих варіантів при виробництві деталей електричних машин.

Мета дослідження

Аналіз та прогнозування перспектив в технологіях виробництва постійних магнітів в контексті їхнього застосування для вітчизняного виробництва електричних машин.

Проблеми та виклики використання магнітів на основі рідкоземельних елементів

Перш за все, розглянемо першопричини виникнення проблеми використання магнітів на основі рідкоземельних елементів. Дана проблема полягає в ранішезгадуваній вимушеній залежності світової промисловості від рідкоземельних елементів у виробництві постійних магнітів, викликаній рядом геополітичних, економічних та технологічних аспектів. На рис. 1 наведений графік, що відображає поточне розподілення видобутку РЗЕ у світі.

Центральною проблемою як видно з рисунку є надзвичайна домінація Китаю, який не лише лідирує у видобутку рідкоземельних елементів, але й контролює лівову частку їхньої переробки (90%) та виробництва готових магнітів (93%). Ця вертикальна інтеграція надає Китаю значний важіль, що було продемонстровано запровадженням експортного контролю на критичні елементи, що призвело до різких стрибків цін та збоїв у поставках. Наприклад, обмеження на експорт рідкоземельних магнітів з Китаю, запроваджені у квітні 2025 року, вже призвели до призупинення виробництва автомобілів. Це підкреслює крихкість поточного становища на ринку постійних магнітів та нагальну потребу в диверсифікації або альтернативних рішеннях.

Викладення основного матеріалу

Економічна нестабільність є прямим наслідком цієї залежності. Ціни на рідкоземельні елементи, такі як диспрозій та неодим, є надзвичайно волатильними. На рис. 2 продемонстрований графік зміни цін на дані елементи протягом останніх років (ліва частина графіку) і експертні прогнози щодо майбутніх змін на наступне десятиліття (права частина графіку).

Попри незначне падіння цін на РЗЕ протягом останніх двох років у порівнянні з роками, що припали на період економічної нестабільності викликані пандемією COVID-19, прогнозується, що надалі ціни будуть поступово зростати і наприклад до 2035 року ціни на диспрозій можуть зрости щонайменше вдвічі (до 340-450% макс.) що відображає зростаючий попит та обмежену пропозицію. Введення високих тарифів (до 145%) на імпорту рідкоземельних елементів з Китаю, як це сталося у США навесні 2025 року, ще більше посилює економічний тиск, створюючи подвійний удар у вигляді збільшення витрат та обмеження поставок. Це робить довгострокове планування та інвестиції ризикованими для галузей, що покладаються на рідкоземельні елементи-магніти [3,7].

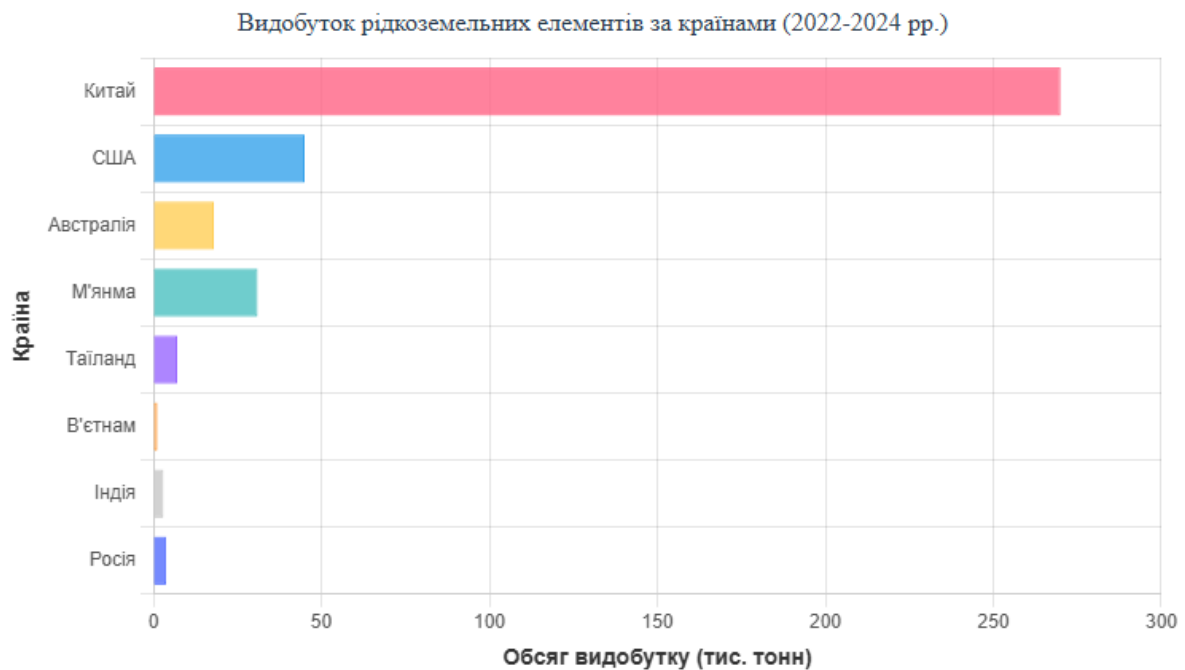


Рис. 1. Видобуток рідкоземельних елементів у світі за 2022-2024 рр.

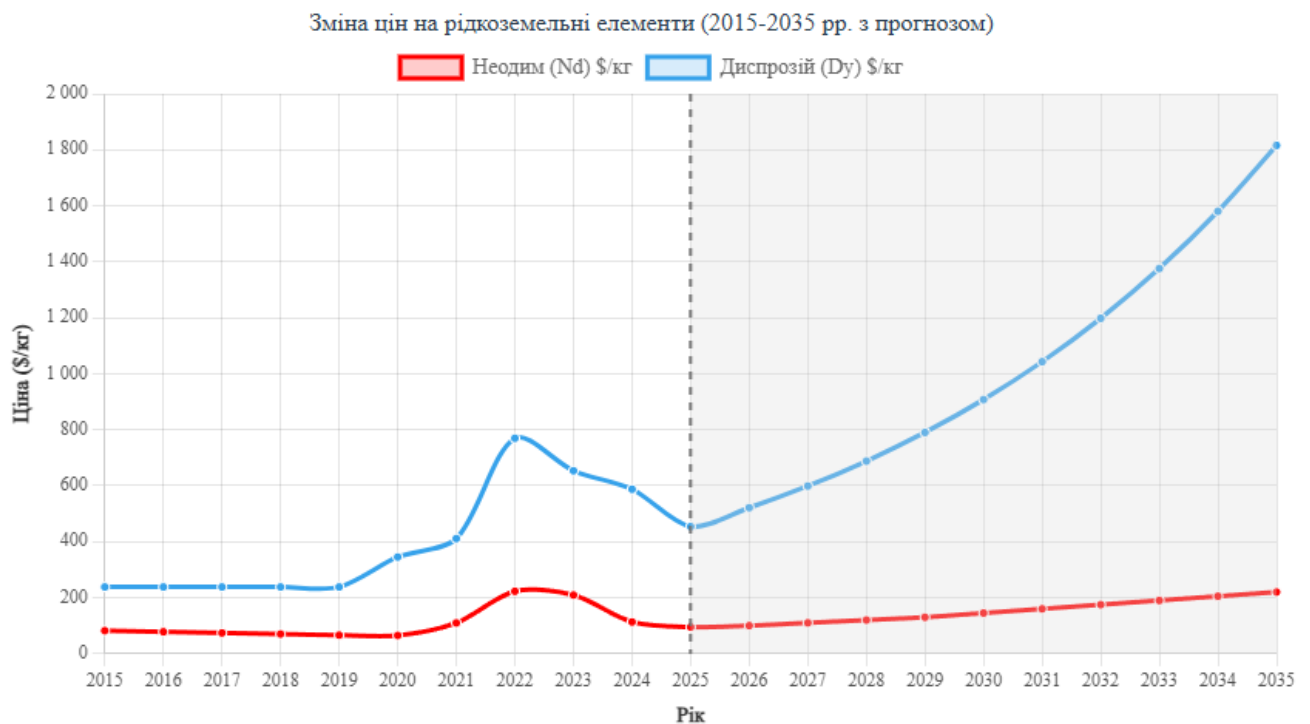


Рис. 2. Динаміка зміни цін на основні рідкоземельні елементи протягом 2015-2025 рр. з прогнозованими значеннями на 2025-2035 рр.

Крім того, існує значна технологічна інерція. Існуючі високопродуктивні магніти, такі як NdFeB та SmCo, глибоко інтегровані в конструкції сучасних систем, від електродвигунів до споживчої електроніки. Їхня заміна на альтернативні матеріали без РЗЕ не є простим процесом, а часто вимагає повної переробки систем, що може зайняти роки та є надзвичайно дорогим. Це створює бар'єр для швидкого впровадження нових, вільних від рідкоземельних елементів технологій, навіть якщо вони демонструють багатообіцяючі властивості.

Видобуток та переробка рідкоземельних елементів пов'язані з серйозними екологічними проблемами, що робить пошук альтернатив не лише економічною чи геополітичною, але екологічною необхідністю. Видобуток РЗЕ часто здійснюється методом відкритого кар'єру, що призводить до значного руйнування екосистем та забруднення навколишнього середовища. Процеси переробки сировини у придатну форму є тривалими, вимагають великих обсягів води та потенційно токсичних хімікатів, і генерують величезну кількість відходів. Ці відходи, що містять кислоти, важкі метали та радіоактивні матеріали (наприклад, торій та уран), можуть просочуватися у ґрунтові води, створюючи постійну загрозу для здоров'я людини та навколишнього середовища. Прикладом є шахта Баян-Обо у

Внутрішній Монголії, Китай, яка у 2019 році забезпечувала 45% світового виробництва рідкоземельних елементів і є одним з найбільш забруднених місць на Землі, де спостерігається опустелювання, забруднення сільськогосподарських угідь та водних ресурсів, а також серйозні проблеми зі здоров'ям у місцевих жителів [4].

Прогнозується, що для досягнення цілей сталого розвитку (т. зв. «чистий нуль») до 2030 року видобуток РЗЕ має зрости в 10 разів. Це зростання попиту, (що вже збільшився на 85% між 2017 та 2020 р.), створює фундаментальну дилему: чи може перехід до "зеленої" економіки відбутися за рахунок неприйнятного екологічного та соціального збитку? Крім того, незважаючи на потенційну роль циркулярної економіки, поточний рівень переробки РЗЕ є критично недостатнім (<1%), а її масштабування стикається зі значними перешкодами, такими як низька концентрація даних елементів у кінцевих продуктах та складність їхнього розділення. Це підкреслює, що лише переробка не зможе вирішити проблему дефіциту та екологічних наслідків, тому розробка альтернативних матеріалів є критично важливою [2,5].

Перспективні матеріали для постійних магнітів

Пошук альтернативних матеріалів для постійних магнітів, що не містять рідкоземельних елементів, є активною галуззю досліджень, спрямованою на подолання залежності від РЗЕ та зменшення екологічного впливу. Кожен з перспективних матеріалів має свої унікальні властивості, переваги та виклики. Загальний перелік таких матеріалів наведений на рис.3:

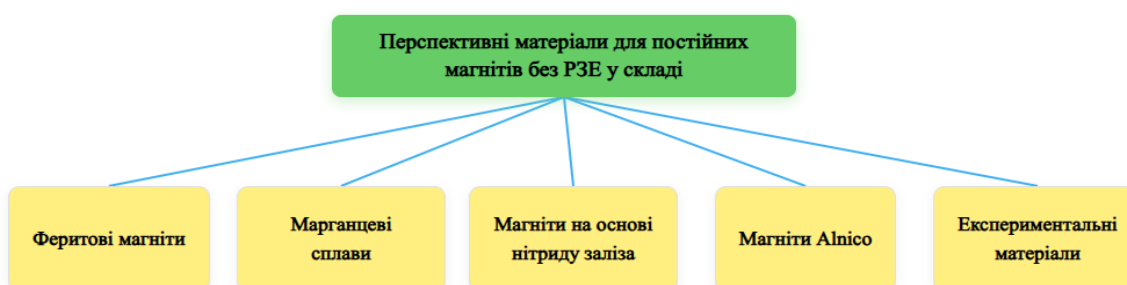


Рис. 3. Перспективні матеріали для постійних магнітів, що не містять рідкоземельні елементи в складі.

Феритові магніти

Феритові магніти, є найстарішим та найбільш поширеним типом постійних магнітів без рідкоземельних елементів. Їхня головна перевага полягає у надзвичайно низькій вартості та доступності сировини, оскільки вони виготовляються з поширеного оксиду заліза.

З точки зору магнітних властивостей, феритові магніти мають найнижчу напруженість магнітного поля серед усіх постійних магнітів, з діапазоном максимального енергетичного добутку $(BH)_{\max}$ від 0,8 до 5,3 МГсЕ. Це значно менше, ніж у неодимових магнітів (до 56 МГсЕ), однак, ферити мають виняткову корозійну стійкість, оскільки вони вже складаються з оксиду заліза. Крім того вони також демонструють відмінну температурну стабільність, зберігаючи свої властивості при температурах до 250°C, а їхній опір розмагнічуванню навіть покращується зі зростанням робочої температури, що робить їх особливо корисними для електродвигунів [6].

Як наведено на діаграмі на рис. 4, у 2024 році феритові магніти все ще займали значну частку ринку постійних магнітів (близько 30%) завдяки своїй економічній ефективності. Незважаючи на їхню нижчу магнітну силу, їхня надійність, довговічність та стійкість до зовнішніх умов роблять їх незамінними для багатьох сфер застосувань [7].

Марганцеві сплави (MnAl, MnBi, MnGa)

Привабливими, згідно своїх технологічних можливостей, виступають марганцеві сплави, які розглядаються як перспективні кандидати для заповнення "проміжку" продуктивності між недорогими феритами та високопродуктивними РЗЕ-магнітами. Марганець є недорогим металом, який може підтримувати високі магнітні моменти, і його сплави з іншими елементами можуть проявляти позитивний рівень феромагнітних властивостей. Розглянемо детальніше:

1. MnAl (Марганець-Алюміній). Феромагнітна τ -фаза у системі MnAl(C) є однією з найбільш багатобічючих альтернатив. Вона характеризується високим магнітним моментом, високою температурою Кюрі (650 K) та великою константою магнітокристалічної анізотропії (1,7 МДж/м³). MnAl-магніти також мають відмінну механічну міцність, хорошу корозійну стійкість та низьку щільність (приблизно 4,4–5,1 г/см³). Теоретичний $(BH)_{\max}$ для τ -MnAl може досягати 12,64 МГсЕ, що є значно вищим, ніж у феритів. Однак, досягнення чистої τ -фази та високої коерцитивної сили на практиці є складним завданням, часто вимагаючим додавання вуглецю для покращення стабільності фази та використання нерівноважних методів синтезу [8].
2. MnBi (Марганець-Вісмут). MnBi привернув значну увагу завдяки своїй унікальній властивості - позитивному температурному коефіцієнту коерцитивної сили. Це означає, що її коерцитивна сила збільшується зі зростанням температури (досягаючи максимуму 2,5 Т при 540 K), що

робить її надзвичайно перспективним матеріалом для високотемпературних застосувань, де традиційні NdFeB магніти втрачають свої властивості. При 450 К коерцитивна сила MnBi може бути у 3,07 рази вищою, ніж у NdFeB. MnBi також має високу теоретичну максимальну енергію (17,6 МГсЕ) та велику магнітну анізотропію (1,6 МДж/м³). Крім того, його електричний опір приблизно в 4,5 рази вищий, ніж у NdFeB, що призводить до менших втрат на вихрові струми в електродвигунах [9,10]. Незважаючи на ці переваги, виробництво високочистого MnBi є складним через велику різницю температур плавлення марганцю та вісмуту, а також перітектичні реакції, що призводять до неоднорідності фазового складу та сегрегації елементів. Проте, останні дослідження демонструють значний прогрес у досягненні високої чистоти (до ~98 мас.%) MnBi та виготовленні об'ємних магнітів з (BH)_{max} до 7,3 МГсЕ за допомогою методів швидкого загартування та контрольованого відпалу [11].

3. MnGa (Марганець-Галій). Сплави MnGa також проявляють високу коерцитивну силу (від 7,2 до 18,2 кЕ) та магнітну анізотропію, що робить їх перспективними кандидатами, особливо для застосувань у тонких плівках для надвисокощільного магнітного запису та спин-електронних пристроїв [12].



Рис. 4. Частка різних матеріалів для виробництва постійних магнітів

Магніти на основі нітриду заліза (FeN)

Магніти на основі нітриду заліза, зокрема Fe₁₆N₂, вважаються одними з найбільш багатообіцяючих безрідкоземельних альтернатив, що потенційно можуть конкурувати або навіть перевершувати неодимові магніти за певними параметрами. Їхня виняткова магнітна властивість обумовлена тетрагональною кристалічною структурою фази Fe₁₆N₂, яка забезпечує надзвичайно високу намагніченість насичення, теоретично досягаючи приблизно 2,4 Тесла, що перевершує навіть сучасні зразки ефективних неодимових магнітів. Теоретичний потенціал накопиченої енергії для Fe₁₆N₂ становить 135 МГсЕ, що значно перевищує найкращі РЗЕ-магніти (до 60 МГсЕ).

Основна перевага нітриду заліза полягає у використанні поширених та недорогих елементів – заліза та азоту, що робить їх значно дешевшими у виробництві та екологічно безпечнішими, оскільки виключається шкідливий видобуток присутній при видобутку і обробці РЗЕ. Крім того, вони демонструють хорошу механічну міцність та корозійну стійкість.

Незважаючи на високий теоретичний потенціал, основні виклики для FeN-магнітів полягають у нестабільності при кімнатній температурі та нижчій коерцитивній силі (здатності опиратися розмагнічуванню) порівняно з NdFeB. Досягнення високої чистоти та стабільності є складним завданням, що обмежує їхнє широке впровадження та масштабованість виробництва. Проте, компанії, такі як Niron Magnetics, активно працюють над комерціалізацією цієї технології, заявляючи про розробку FeN-магнітів з магнітною силою, вищою за більшість марок NdFeB, та кращою температурною стабільністю [13].

Магніти Alnico

Магніти Alnico, що складаються зі сплавів алюмінію (Al), нікелю (Ni) та кобальту (Co) з додаванням заліза, міді та іноді титану, були найсильнішими постійними магнітами до появи неодимових магнітів у 1970-х роках. Їхньою головною перевагою є виняткова температурна стабільність, що дозволяє їм зберігати магнітні властивості при дуже високих температурах, до 538-550°C. Вони також мають високу корозійну стійкість і зазвичай не потребують захисних покриттів. Alnico-магніти можуть бути виготовлені як методом лиття (для складних форм, таких як підковоподібні), так і методом спікання (для кращих механічних властивостей).

З іншого боку, Alnico-магніти мають нижчу коерцитивну силу порівняно з альтернативними неодимовими магнітами, що робить їх більш схильними до розмагнічування сильними зовнішніми полями. Вони також є досить крихкими, але незважаючи на це та інші недоліки, Alnico-магніти продовжують займати нішу на ринку (4-5%) завдяки своїй неперевершеній температурній стійкості, що

робить їх ідеальними для застосувань у приладах, датчиках, електродвигунах, аерокосмічній та військовій техніці, де стабільність в екстремальних умовах є критичною [14,15].

Інші перспективні матеріали

Окрім наведених вище загальновідомих матеріалів та сплавів для виробництва високоєфективних магнітів, лабораторні дослідження також ведуться над іншими більш експериментальними матеріалами, такими як FeNi та FeCo, які теоретично можуть досягати високих енергетичних добутків, близьких до магнітів на основі рідкоземельних елементів. Один з таких «екзотичних» сплавів - Fe₄CoSi, наприклад, демонструє високу критичну температуру (980 K) та значний (BH)_{max} при кімнатній температурі, позиціонуючись як потенційний "проміжний" магніт. Крім того, розробляється тетратеніт, сплав заліза-нікелю, який утворюється в метеоритах і має магнітні властивості, що наближаються до NdFeB магнітів, без використання рідкоземельних елементів [2,6,16].

Вищенаведене оцінювання тих чи інших матеріалів для виробництва постійних магнітів, в тому числі і для виготовлення ЕМ, не може бути достатнім без врахування технологій їхнього виробництва. Проте це мета для іншої наукової праці.

Оцінку нових магнітних матеріалів без рідкоземельних елементів необхідно провести шляхом порівняння їхніх властивостей з існуючими РЗЕ-магнітами та визначити їхні ніші застосування. Проведемо порівняльний аналіз за такими ключовими параметрами як залишкова індукція (Br), коерцитивна сила (Hc), максимальний енергетичний добуток (BH)_{max}, максимальна робоча температура, корозійна стійкість та вартість. Дані аналізу наведені в табл.1.

Таблиця 1

Параметри магнітів							
Тип магніту	Основний склад	Br (Тл) (орієнтовно)	Hc (кА/м) (орієнтовно)	(BH) _{max} (кДж/м ³) (орієнтовно)	Макс. робоча Темп. (°C)	Корозійна стійкість	Вартість (відносна)
З РЗЕ							
Неодим (NdFeB)	Nd, Fe, B	1.1 - 1.4	800 - 2000	200 - 450	80 - 230	Низька (потребує покриття)	Висока
Самарій-Кобальт (SmCo)	Sm, Co	0.8 - 1.1	600 - 1600	120 - 240	250 - 350	Висока	Висока
Без РЗЕ							
Ферит	Fe ₂ O ₃ , Sr/Ba	0.2 - 0.4	150 - 350	10 - 40	до 250	Дуже висока	Дуже низька
Alnico	Al, Ni, Co, Fe, Cu, Ti	0.6 - 1.2	40 - 100	10 - 80	до 550	Висока	Середня - Висока
MnAl	Mn, Al (з C)	0.5 - 0.7	100 - 300	50-100	200-300	Хороша	Низька
MnBi	Mn, Bi	0.4 - 0.6	150 - 1000 (при 450K)	30-70 (до 120 експ.)	до 200	Низька	Низька
Нітрид Заліза (FeN)	Fe, N	до 2.4 (експ.)	100-600 (експ.)	80-200 (теорет. до 400-500)	до 150 (Кюрі)	Хороша (потребує покриття)	Дуже низька

Значення є орієнтовними та можуть значно відрізнятися залежно від конкретної марки, методу виробництва та умов вимірювання. Для FeN вказані теоретичні значення (BH)_{max} та температура, практичні значення Br та Hc можуть бути нижчими через проблеми стабільності фази та коерцитивної сили.

Вибір матеріалу магнітів для конкретної галузі використання є складною проблемою, що стосується перш за все аспекту оптимізації, де "вища продуктивність" залежить від конкретного застосування. Магніти, що не містять у складі рідкоземельні елементи не обов'язково повинні мати універсальну перевагу, а скоріше повинні пропонувати переконливі комбінації властивостей (наприклад, вартість, температура, корозійна стійкість), що робить їх ідеальними для певних сегментів ринку, де РЗЕ-магніти є або непридатними, або занадто дорогими.

Майбутнє перспективних постійних магнітів без РЗЕ виглядає багатообіцяючим, але вимагає продовження інтенсивних досліджень та розробок. Ключові напрямки включають подальші дослідження зосереджені на підвищенні коерцитивної сили FeN-магнітів, стабілізації метастабільних фаз та оптимізації магнітних властивостей Mn-базованих сплавів за допомогою мікроструктурного інжинірингу та допінгу, розробку більш ефективних, масштабованих та економічно вигідних методів виробництва, таких як вдосконалена порошкова металургія, швидке загартування та адитивне виробництво, є критично важливою для переходу від лабораторних досягнень до масового

виробництва, коректну оцінку нових матеріалів, що враховує не лише магнітні властивості та вартість сировини, але й загальну вартість володіння, включаючи енергоефективність кінцевого пристрою та екологічний слід виробничого процесу. Також окрему увагу слід приділити проблеми диверсифікації застосувань.

Загалом, розвиток даних напрямків виробництва постійних магнітів є стратегічним імперативом, що дозволить зменшити ризики, мінімізувати екологічний вплив та забезпечити стабільний розвиток критично важливих технологій.

Висновки

Дослідження нових підходів у виробництві постійних магнітів без рідкоземельних елементів виявляє складний, але надзвичайно перспективний ландшафт матеріалів та технологій. Проаналізовані матеріали – ферити, марганцеві сплави (MnAl, MnBi, MnGa), нітрид заліза (FeN) та Alnico – кожен пропонує унікальний набір властивостей, що дозволяє їм заповнити різні технологічні ніші на ринку постійних магнітів. Ферити залишаються економічно ефективним рішенням для великооб'ємних застосувань, де висока магнітна сила не є критичною, завдяки їхній низькій вартості, відмінній корозійній стійкості та температурній стабільності. Марганцеві сплави, зокрема MnBi з його унікальним позитивним температурним коефіцієнтом коерцитивної сили, є багатообіцяючими "проміжними" магнітами, що можуть перевершити NdFeB у високотемпературних умовах. Нітрид заліза демонструє революційний теоретичний потенціал з надзвичайно високою намагніченістю насичення, що може перевершити рідкоземельні елементи-магніти, хоча і стикається з викликами стабільності фази та коерцитивної сили. Alnico-магніти продовжують займати важливу нішу завдяки своїй неперевершеній температурній стабільності в екстремальних умовах.

Успіх цих матеріалів нерозривно пов'язаний з розвитком передових технологій виробництва, таких як порошкова металургія, швидке загартування, адитивне виробництво та нанесення тонких плівок. Ці методи дозволяють контролювати мікроструктуру, фазовий склад та анізотропію, що є ключовим для реалізації теоретичного потенціалу нових матеріалів.

Література

1. Popa D.-C. Securing Rare Earth Permanent Magnet Needs for Sustainable Energy Initiatives / D.-C. Popa, L. Szabó // *Materials*. — 2024. — Vol. 17, № 22. — P. 5442. — Access mode: <https://doi.org/10.3390/ma17225442>.
2. Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets / J. Cui et al. // *Acta Materialia*. — 2018. — Vol. 158. — C. 118–137. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.049>.
3. Althaf S. Disruption risks to material supply chains in the electronics sector / S. Althaf, C. W. Babbitt // *Resources, Conservation and Recycling*. — 2020. — Vol. 162. — P. 105248. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105248>.
4. Recycling of rare earths: a critical review / K. Binnemans et al. // *Journal of Cleaner Production*. — 2013. — Vol. 51. — C. 1–22. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>.
5. Sugimoto S. Current status and recent topics of rare-earth permanent magnets / S. Sugimoto // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2011. — Vol. 44, № 6. — P. 064001. — Access mode: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/6/064001>.
6. Unveiling potential candidates for rare-earth-free permanent magnet and magnetocaloric effect applications: a high throughput screening in Fe-N alloys : Preprint. Shenyang University of Technology ; 2501.01607 / G. Qiang et al. — Shenyang, 2025. — 13 p. — Access mode: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.01607>.
7. Rare earth permanent magnets for the green energy transition: Bottlenecks, current developments and cleaner production solutions / Y. Ghorbani et al. // *Resources, Conservation and Recycling*. — 2025. — Vol. 212. — P. 107966. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107966>.
8. An Overview of MnAl Permanent Magnets with a Study on Their Potential in Electrical Machines / S. Kontos et al. // *Energies*. — 2020. — Vol. 13, № 21. — P. 5549. — Access mode: <https://doi.org/10.3390/en13215549>.
9. Nguyen T. X. MnBi-Based Bulk Magnets: Preparation and Magnetic Performance / T. X. Nguyen, N. T. T. Dang, V. Van Nguyen // *Journal of Electronic Materials*. — 2022. — Vol. 51, № 3. — C. 1436–1442. — Access mode: <https://doi.org/10.1007/s11664-021-09415-4>.
10. Preparation and magnetic properties of MnBi-based hard/soft composite magnets / Y. L. Ma et al. // *Journal of Applied Physics*. — 2014. — Vol. 115, № 17. — P. 17A755. — Access mode: <https://doi.org/10.1063/1.4868078>.
11. Magnetic properties of large-scaled MnBi bulk magnets / S. Kim et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2017. — Vol. 708. — C. 1245–1249. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.067>.

12. Keller T. Manganese-based permanent magnet materials / T. Keller, I. Baker // *Progress in Materials Science*. — 2022. — Vol. 124. — P. 100872. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100872>.
13. Wang J.-P. Environment-friendly bulk Fe₁₆N₂ permanent magnet: Review and prospective / J.-P. Wang // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. — 2020. — Vol. 497. — P. 165962. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165962>.
14. Wang H. Review of additive manufacturing of permanent magnets for electrical machines: A prospective on wind turbine / H. Wang, T. N. Lamichhane, M. P. Paranthaman // *Materials Today Physics*. — 2022. — Vol. 24. — P. 100675. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100675>.
15. Mohapatra J. Rare-earth-free permanent magnets: The past and future / J. Mohapatra, J. P. Liu // *Handbook of Magnetic Materials*. — 2018. — Vol. 27. — C. 1–57. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/bs.hmm.2018.08.001>.
16. Islam R. Historical overview and recent advances in permanent magnet materials / R. Islam, K. Vero, J. P. Borah // *Materials Today Communications*. — 2024. — Vol. 41. — P. 110538. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110538>.

References

1. Popa D.-C. Securing Rare Earth Permanent Magnet Needs for Sustainable Energy Initiatives / D.-C. Popa, L. Szabó // *Materials*. — 2024. — Vol. 17, № 22. — P. 5442. — Access mode: <https://doi.org/10.3390/ma17225442>.
2. Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets / J. Cui et al. // *Acta Materialia*. — 2018. — Vol. 158. — C. 118–137. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.049>.
3. Althaf S. Disruption risks to material supply chains in the electronics sector / S. Althaf, C. W. Babbitt // *Resources, Conservation and Recycling*. — 2020. — Vol. 162. — P. 105248. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105248>.
4. Recycling of rare earths: a critical review / K. Binnemans et al. // *Journal of Cleaner Production*. — 2013. — Vol. 51. — C. 1–22. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>.
5. Sugimoto S. Current status and recent topics of rare-earth permanent magnets / S. Sugimoto // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2011. — Vol. 44, № 6. — P. 064001. — Access mode: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/6/064001>.
6. Unveiling potential candidates for rare-earth-free permanent magnet and magnetocaloric effect applications: a high throughput screening in Fe-N alloys : Preprint. Shenyang University of Technology ; 2501.01607 / G. Qiang et al. — Shenyang, 2025. — 13 p. — Access mode: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.01607>.
7. Rare earth permanent magnets for the green energy transition: Bottlenecks, current developments and cleaner production solutions / Y. Ghorbani et al. // *Resources, Conservation and Recycling*. — 2025. — Vol. 212. — P. 107966. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107966>.
8. An Overview of MnAl Permanent Magnets with a Study on Their Potential in Electrical Machines / S. Kontos et al. // *Energies*. — 2020. — Vol. 13, № 21. — P. 5549. — Access mode: <https://doi.org/10.3390/en13215549>.
9. Nguyen T. X. MnBi-Based Bulk Magnets: Preparation and Magnetic Performance / T. X. Nguyen, N. T. T. Dang, V. Van Nguyen // *Journal of Electronic Materials*. — 2022. — Vol. 51, № 3. — C. 1436–1442. — Access mode: <https://doi.org/10.1007/s11664-021-09415-4>.
10. Preparation and magnetic properties of MnBi-based hard/soft composite magnets / Y. L. Ma et al. // *Journal of Applied Physics*. — 2014. — Vol. 115, № 17. — P. 17A755. — Access mode: <https://doi.org/10.1063/1.4868078>.
11. Magnetic properties of large-scaled MnBi bulk magnets / S. Kim et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2017. — Vol. 708. — C. 1245–1249. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.067>.
12. Keller T. Manganese-based permanent magnet materials / T. Keller, I. Baker // *Progress in Materials Science*. — 2022. — Vol. 124. — P. 100872. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100872>.
13. Wang J.-P. Environment-friendly bulk Fe₁₆N₂ permanent magnet: Review and prospective / J.-P. Wang // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. — 2020. — Vol. 497. — P. 165962. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165962>.
14. Wang H. Review of additive manufacturing of permanent magnets for electrical machines: A prospective on wind turbine / H. Wang, T. N. Lamichhane, M. P. Paranthaman // *Materials Today Physics*. — 2022. — Vol. 24. — P. 100675. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100675>.
15. Mohapatra J. Rare-earth-free permanent magnets: The past and future / J. Mohapatra, J. P. Liu // *Handbook of Magnetic Materials*. — 2018. — Vol. 27. — C. 1–57. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/bs.hmm.2018.08.001>.
16. Islam R. Historical overview and recent advances in permanent magnet materials / R. Islam, K. Vero, J. P. Borah // *Materials Today Communications*. — 2024. — Vol. 41. — P. 110538. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110538>.