

УДК 622.6.2

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ПОСТОЯННЫХ
МАГНИТОВ ДЛЯ СИСТЕМ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА**

Гордин С.А., техник НИЛЦТПМСК
Захаров А. Ю., д.т.н., профессор
Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева
г. Кемерово

В области транспортного машиностроения, в частности в конвейерных системах, в настоящее время разрабатываются принципиально новые ленточные конвейеры с магнитным подвесом ленты конвейера. Данный подход позволяет реализовать движения ленты без контакта с неподвижными частями конвейера, что приводит к значительному снижению износа механических компонентов системы за счет минимизации сил трения между движущимися частями. Для проектирования магнитных подвесов ключевым аспектом является выбор рода магнитного поля, оно может быть создано электромагнитами, постоянными магнитами и суперпроводниками. Одним из наиболее выгодных вариантов являются постоянные магниты.

При применения постоянных магнитов в качестве источника магнитного поля в магнитном подвесе конвейерной ленты, важным фактором является магнитный материал из которого изготовлен постоянный магнит [1]. Среди ключевых различий магнитных материалов следует выделить такие как: остаточная намагниченность, коэрцитивная сила по магнитной индукции и по намагниченности, температурную стабильность стоимость интенсивность магнитного взаимодействия, и устойчивость к процессам демагнетизации.

В ходе проведения контент анализа марок постоянных магнитов была составлена классификация (рис.1) и были выделены 5 основных магнитных материалов, таких как: алюминеникельевые, неодимовые, самаревокобольтовые, ферритовые и магнитопласты (магнитоэласты) [2].

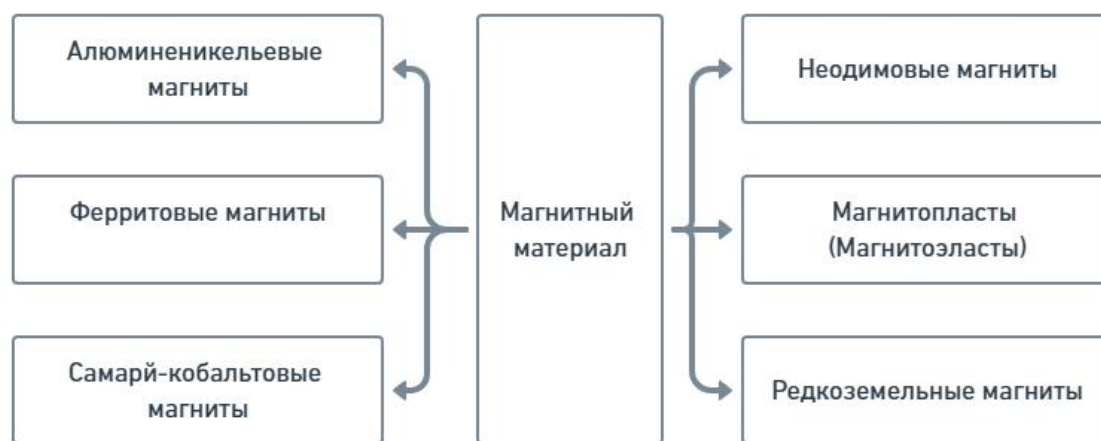


Рис. 1. Классификация рассматриваемых магнитных материалов

Постоянные литые магниты ЮНД (AlNi), ЮНДК (AlNiCo)

Постоянные литые алюминеникельевые магниты ЮНД (анизотропные магниты на основе алюминия, никеля и железа) и ЮНДК (кобальтсодержащие аналоги ЮНД, относятся к семейству сплавов AlNiCo). Способны сохранять магнитные свойства при высоких температурах, в отличие от многих других типов постоянных магнитов.

Анизотропные магниты ЮНД производятся методом литья и последующей термообработкой, которая улучшает их магнитные свойства путем ориентации магнитных доменов в предпочтительном направлении. Добавление кобальта в сплав ЮНДК дополнительно повышает температурную стабильность и магнитные характеристики.

Данный тип магнитов часто используют при высоких температурах, стоит отметить, что магниты AlNiCo стоят дороже ферритовых магнитов, но обычно дешевле редкоземельных магнитов, таких как неодимовые или самарий-кобальтовые.

С технологическим прогрессом и развитием новых материалов, таких как неодимовые магниты, применение AlNiCo магнитов стало более ограниченным, но они по-прежнему используются там, где их уникальные свойства наиболее ценны.

Таблица 1. – Магнитные свойства алюминеникельевых сплавов

Марка сплава	Остаточная индукция, Тл	Коэрцитивная сила по индукции, кА/м	Максимальная энергия (ВН)max, кДж/м ³
ЮНДКТ5БА	1.00 ... 1.10	110 ... 120	72.0 ... 88.0
ЮНДКТ5АА	1.05 ... 1.10	115 ... 120	80.0 ... 88.0
ЮНДКТ8	0.70 ... 0.75	145 ... 168	≥36.0

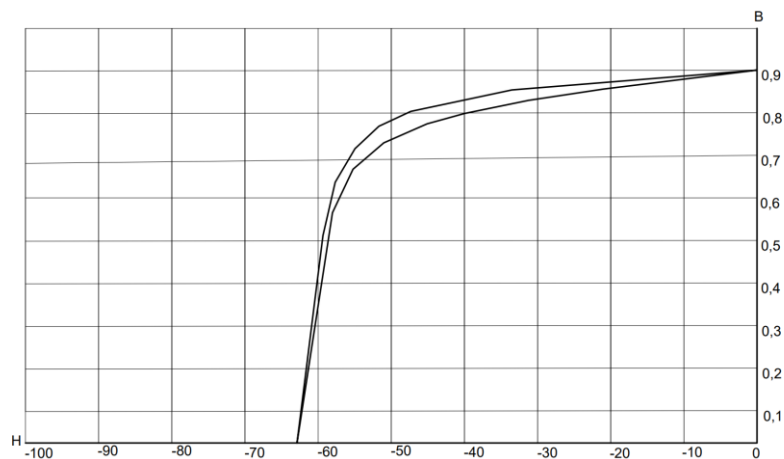


Рис.2. Кривая размагничивания магнита марки ЮНДК

Постоянные феритовые магниты, также известные как керамические магниты, созданы на основе феррита — кристаллического соединения оксида железа (Fe_2O_3) с другими металлическими элементами, такими как барий, стронций или свинец. Феритобарьевые магниты содержат барий в своем составе и являются одним из подтипов феритовых магнитов.

Постоянные феритовые магниты являются доступным вариантом на рынке постоянных магнитов благодаря их относительно низкой стоимости производства, делающей их востребованными для множества применений. Эти магниты имеют способность работать в значительном диапазоне температур, обычно поддерживая свои свойства до температур в пределах $250\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$. Хотя феритовые магниты обладают более слабыми магнитными свойствами в сравнении с металлическими магнитами, такими как AlNiCo или редкоземельные магниты, их стойкость к коррозии позволяет использовать их в условиях, подверженных окислению, без дополнительного защитного покрытия. Однако их хрупкость требует осторожности при эксплуатации, особенно в приложениях, где возможны ударные и изгибающие нагрузки, поскольку это может привести к повреждению магнитов. В общем, феритовые магниты представляют собой рациональное сочетание стоимости и функциональности для широкого спектра промышленных и потребительских приложений.

Из-за их низкой стоимости и удовлетворительных магнитных свойств они являются одним из самых распространенных типов магнитов, используемых сегодня.

Таблица 2.— Магнитные свойства ферритовых сплавов

Марка материала	Остаточная индукция, Тл, не менее	Коэрцитивная сила по индукции, А/м, не менее	Коэрцитивная сила по намагниченности, А/м, не менее
4БИ145	0.17	95	145
25РА150	0.38	150	150
28БА190	0.37	190	190

Феритовые магниты, хотя и популярны из-за своей низкой стоимости и прочности на коррозию, значительно уступают неодимовым магнитам по магнитной силе. Неодимовые магниты, состоящие из сплава неодима, железа и бора (NdFeB), являются в настоящее время самыми мощными постоянными магнитами доступными на коммерческой основе. Эти магниты превосходят феритовые по величине магнитного поля и энергетическому продукту, что делает их предпочтительным выбором для приложений, требующих максимальной магнитной производительности в малом объеме. Их высокие магнитные свойства особенно ценятся в современных технологиях, таких как жесткие диски, электродвигатели, высококачественные динамики и медицинское оборудование. Однако стоит отметить, что неодимовые магниты более дороги и менее устойчивы к коррозии и высоким температурам по сравнению с феритовыми магнитами, что может потребовать использования защитных покрытий и рассмотрения мер по поддержанию температурного режима [3].

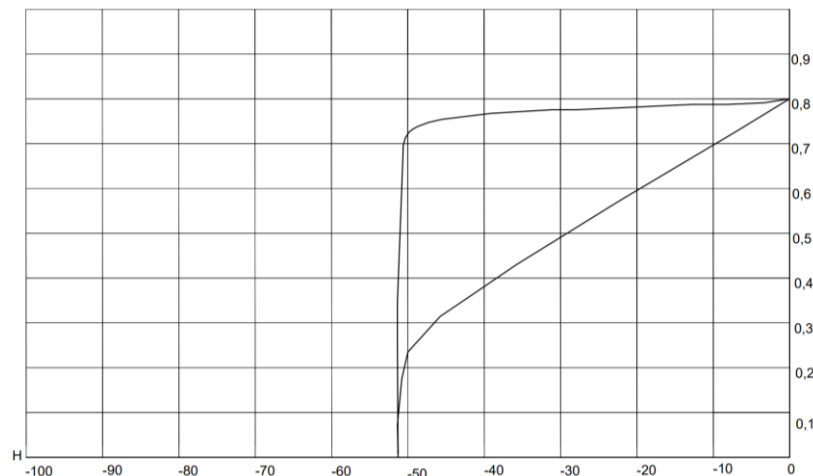


Рис.3.Кривая размагничивания ферритового магнита марки 28БА190

Постоянные неодимовые магниты, также известные как магниты NdFeB (сплав из неодима, железа и бора), представляют собой наиболее мощные коммерчески доступные постоянные магниты. Неодимовые магниты характеризуются отличными магнитными свойствами, такими как высокие значения остаточной индукции и коэрцитивности, что позволяет им создавать сильное магнитное поле.

Однако неодимовые магниты обладают несколькими недостатками, включая сравнительно низкую температурную стабильность и склонность к коррозии, что обычно требует применения защитных покрытий для увеличения их долговечности. Кроме того, стоимость неодимовых магнитов выше, чем ферритовых из-за более сложных производственных процессов и исходных материалов.

Их применение нашло широкое распространение во многих областях, включая высокопроизводительные электродвигатели, генераторы, электроинструменты, датчики, личные электронные устройства, медицинское

оборудование и другие применения, где необходимы компактные и сильные магниты [4].

Таблица 3. – Магнитные свойства неодимовых материалов

Марка	Остаточная индукция, Тл	Коэрцитивная сила	
		по магнитной индукции, А/м	по намагниченно- сти, А/м
НмБ 200/80	1.00 ... 1.08	680 ... 700	≥ 800
НмБ 220/110	1.08 ... 1.13	750 ... 840	≥ 1100
НмБ 250/120	1.13 ... 1.24	840 ... 900	≥ 1200

В целом, неодимовые магниты предоставляют решения для широкого спектра индустрий, несмотря на то что их использование требует тщательного учета условий эксплуатации и более высоких начальных инвестиций.

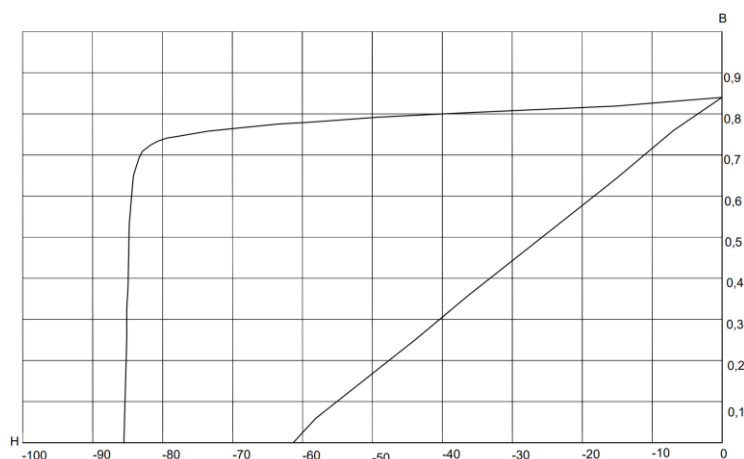


Рис.4. Кривая размагничивания неодимового магнита марки Nd2Fe14B

Самарий-кобальтовые магниты (SmCo), как и неодимовые магниты, относятся к классу редкоземельных магнитов и представляют собой два основных типа: SmCo5 и Sm2Co17.

Несмотря на то, что самарий-кобальтовые магниты имеют магнитную силу, которая обычно чуть ниже, чем у неодимовых, они выделяются благодаря своей высокой коэрцитивной силе и способности противостоять демагнетизации. Одним из ключевых преимуществ этих магнитов является их высокая температурная стабильность; они могут эффективно функционировать при температурах до 350 °С, не теряя магнитных свойств, что делает их идеальными для использования в высокотемпературных приложениях [5]. В дополнение к этому SmCo магниты демонстрируют исключительную устойчивость к коррозии и не требуют защитного покрытия, что делает их подходящими для эксплуатации в жестких условиях. Однако это все влияет на цену — эти магниты значительно дороже, чем ферритовые и неодимовые, из-за высокой стоимости исходных материалов и более сложного производственного процесса. Кроме финансовых аспектов, при работе с SmCo необходимо учитывать их

хрупкость, так как неосторожное обращение может привести к сколам и трещинам, как это характерно для материалов с подобными свойствами.

Таблица 4. – Магнитные свойства самарий-кобальтовых магнитов

Марка	Остаточная индукция B_r , Тл	Коэрцитивная сила по индукции $H_{св}$, А/м	Коэрцитивная сила по намагниченности $H_{см}$, А/м, не менее
КС25ДЦ-225	1.06	760	900
КС20ММ17	0.70	520	960
КС25ММ12	0.73	580	1275

Обычно SmCo используют при высоких температурах, где требуется высокая работоспособность и стабильность, например, в аэрокосмической промышленности, военной технике, медицинских устройствах и в качестве частей в высокопроизводительных промышленных двигателях. Кроме того, благодаря своей температурной стабильности и устойчивости к коррозии, SmCo магниты хорошо подходят для использования в таких условиях эксплуатации, где эти факторы критичны [6].

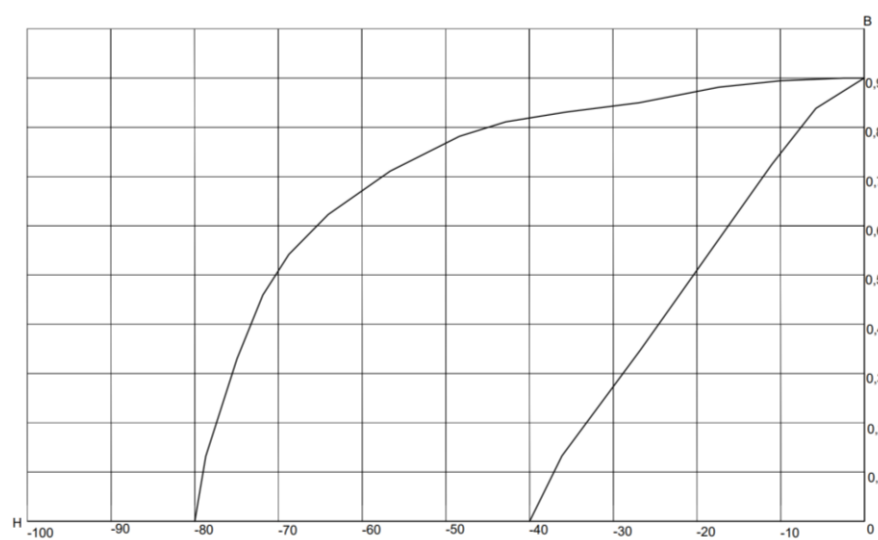


Рис.5. Кривая размагничивания Самарий-кобальтового магнита Sm₂Co₁₇

Магнитпласты — это тип композитных постоянных магнитов, которые объединяют магнитный порошок с полимерной связкой. В качестве магнитных компонентов часто используются порошки феррита, неодима и других магнитных материалов, в то время как полимерная матрица может включать такие вещества, как различные типы пластмасс, резины или эластомеры.

Таблица 5. Магнитные свойства магнитопластов

Марка	Остаточная индукция, Тл, не менее	Коэрцитивная сила по индукции, кА/м, не менее	Коэрцитивная сила по намагниченности, кА/м, не менее
50КНП320	0.60 ... 0.70	160 ... 280	320 ... 400
70КНП640	0.60 ... 0.70	400 ... 480	640 ... 720
70КНП720	0.60 ... 0.70	450 ... 500	720 ... 800

Магнитпласты, сочетая в себе магнитный порошок и полимерную связку, отличаются своей гибкостью и способностью гнуться, что предоставляет возможность их использования в различных конструкциях и устройствах. Они легко поддаются формованию и могут быть изготовлены в виде листов, полос или сложных форм, удовлетворяя потребности массового потребительского производства. Влагостойкость и химическая устойчивость магнитпластов [7] обеспечиваются за счёт использования полимерной составляющей в качестве связующего вещества, что делает их надёжными в агрессивных средах. Хотя их магнитные свойства уступают металлическим магнитам, они всё же обладают достаточным уровнем магнитной силы для ряда практических задач. Благодаря процессу производства, который часто бывает экономически более выгодным по сравнению с традиционными магнитами, магнитпласты являются экономически привлекательным выбором, особенно при масштабном производстве разнообразных товаров и компонентов.

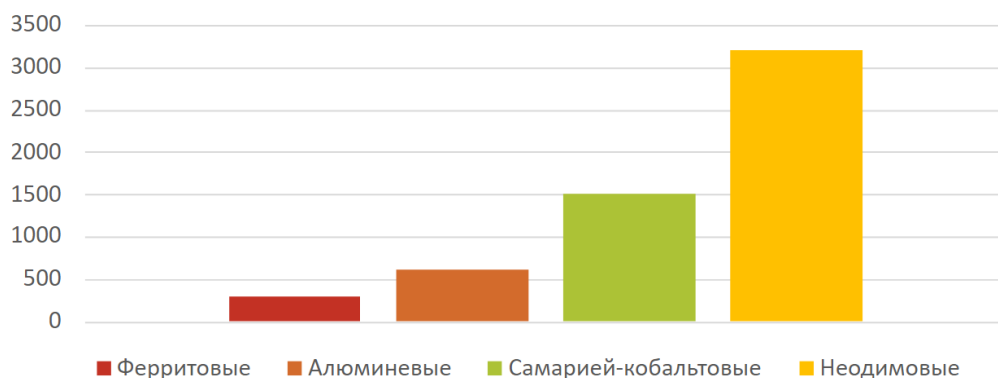


Рис.6. Остаточная намагниченность для разных магнитных материалов

Исследования в области магнитных материалов дают возможности для значительного повышения эффективности производственных процессов. Это снижает износ и трение механических компонентов, увеличивает срок их службы. Уникальные свойства каждого типа магнитного материала делают их пригодными для конкретных приложений. Так в конвейере с магнитным подвесом ленты опорные магнитные конструкции неподвижны и крепятся к ставу конвейера, а магниты встраиваемые в конвейерную ленту должны иметь соответствующие свойства. Прогресс в изучении магнитных технологий и материаловедения предвещает улучшения в эффективности и экологичности производственных и транспортных систем. Следовательно, продолжение научных исследований в этой сфере будет стимулировать появление новых

технологических решений и материалов, способствуя экономически эффективным и экологически устойчивым производственным практикам.

Финансирование работ осуществляется за счет государственного задания на оказания государственных услуг по соглашению № 075-03-2024-082-2 от 15 февраля 2024 года.

Список литературы

1. Чепиков, П. В. Влияние геометрических параметров на выбор магнитного материала В системы магнитного подвеса / П. В. Чепиков, А. Ю. Захаров // Россия молодая : Сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, Кемерово, 21–24 апреля 2015 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2015. – С. 95. – EDN UKULAD.
2. Пятин, Ю.М. Постоянные магниты справочник / Ю.М. Пятин. – Москва : Энергия, 1980. – 370 с.
3. ГОСТ 17809-72. Материалы магнитотвердые литые. Марки. М.: Издательство стандартов, 2001.
4. ГОСТ Р 52956-2008. Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплава неодим-железо-бор. Классификация. Основные параметры. М.: Стандартиформ, 2008.
5. Постоянные магниты // Мир Магнитов URL: <https://mirmagnitov.ru> (дата обращения: 18.03.2024).
6. Постоянные магниты каталог // БЭК URL: <https://bec-shop.ru/> (дата обращения: 18.03.2024).
7. Постоянные магниты каталог радиодеталей // Группа компаний магнит URL: <https://gkmagnit.ru> (дата обращения: 18.03.2024).