ТИПЫ МАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ И МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ, ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА И ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНОЙ СИЛЫ ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО МАГНИТНОГО УЛОВИТЕЛЯ МОФ-3

Марасулов Муроджон Сойибжон угли

Аннотация. *В статье проведён сравнительный анализ типов магнитных сепараторов и магнитных материалов для стационарного магнитного уловителя МОФ-3. Обоснован выбор гибридной системы на основе феррита и NdFeB с учётом магнитных характеристик, термостойкости, коррозионной стойкости и стоимости. Показано, что оптимальная сила магнита должна обеспечивать надёжное удержание металлических обломков при умеренном запасе, поскольку чрезмерное усиление магнитного поля приводит к неоправданному увеличению стоимости и эксплуатационным ограничениям.*

Ключевые слова: *магнитный сепаратор, магнитный уловитель, феррит, NdFeB, магнитные материалы, магнитная индукция, обломки стальных шаров, пульпа, МСЦ-7300×13000, МОФ-3.*

При работе барабанных мельниц МШЦ-7300×13000 на АГМК МОФ-3 обломки стальных шаров попадают в пульпу и вызывают ускоренный абразивный износ насосов, гидроциклонов и трубопроводов гидротранспорта. Извлечение обломков магнитным полем известно в мировой практике десятилетиями, но реализуется разными конструкциями и материалами, поэтому выбор типа сепаратора, магнитного материала и что не менее важно самой силы магнита не может быть произвольным. Ниже этот выбор обоснован последовательно: какие устройства и материалы существуют, почему выбрана гибридная схема феррит + NdFeB и почему сила магнита должна быть не максимальной, а оптимальной.

Типы устройств магнитной сепарации

Устройства извлечения металла магнитным полем различаются конструктивной схемой и местом установки (табл. 1) [1, 2, 9].

Тип устройства	Принцип действия	Основное применение
Подвесные (надленточные)	Магнит над конвейером; извлекает металл из верхнего слоя материала	Защита дробилок и грохотов от крупных предметов
Шкивные (магнитный барабан)	Барабан конвейера намагничен; немагнитный материал слетает, магнитный прилипает	Заводы вторичной переработки, пищевая промышленность
Барабанные (сухие/мокрые)	Вращающийся кожух с неподвижным магнитным блоком внутри	Обогащение магнетита; очистка пульпы после мельниц
Цапфенные (trunnion)	Барабанный магнит на разгрузочной цапфе, между мельницей и насосом	Извлечение обломков шаров из потока пульпы
Пластинчатые/решётчатые	Магнитные стержни в потоке материала или бункере	Пищевая, химическая, фармацевтическая промышленность
Поперечно-ленточные	Отдельная намагниченная лента над конвейером	Волокнистые и слипающиеся материалы
Внутритрубные	Магнитные стержни внутри трубопровода/лотка	Защита трубопроводов в жидких и пульпообразных средах

Ближе всего по конструкции к разрабатываемому решению цапфенные (trunnion) и мокрые барабанные сепараторы: кожух вращается, магнитный блок неподвижен внутри [3, 4]. Отличие разработки в том, что магнитная система встраивается прямо в без ситовую зону барабана бутары мельницы, без выноса в отдельный узел и без демонтажа грохочения такое решение в изученных источниках не встречено.

Классификация магнитных материалов

Для этих устройств применяются постоянные магниты (феррит, NdFeB, SmCo, AlNiCo) и электромагниты; их характеристики в (таблице 2).

Материал	Остаточная индукция Br, Тл	Максимальная рабочая температура, °C	Стойкость к коррозии	Относительная стоимость
Феррит (керамика)	0,22–0,41	до 250	высокая	низкая
NdFeB (неодим)	1,17–1,48	80–230 (по марке)	низкая, нужно покрытие	высокая
SmCo (самарий-кобальт)	0,87–1,16	250–350	отличная	самая высокая
AlNiCo (альнико)	0,72–1,35	до 450–550	хорошая	Средняя-высокая
Электромагнит	регулируемая	ограничена нагревом обмотки	зависит от исполнения	нужен источник питания

Для NdFeB важна термостойкость по маркам: без суффикса и «M» - до 80-100 °C, «H», «SH», «UH» - до 120, 150 и 180 °C соответственно, но с некоторым снижением остаточной индукции [6].

Почему для уловителя выбрана гибридная схема феррит + NdFeB

Электромагнит исключён: рядом с вращающимся барабаном под слоем пульпы подводить кабель и охлаждать обмотку непрактично, а постоянный магнит не зависит от электропитания. Альнико отпадает из-за низкой коэрцитивной силы под вибрацией и напором пульпы обломки могут срываться. SmCo исключён по той же логике: его преимущества (термо и коррозионная стойкость) здесь избыточны, а цена самая высокая среди материалов.

Из феррита и NdFeB выбран гибрид, а не один материал, по трём причинам. Чистый феррит при нужной индукции (0,245 Тл на расстоянии =50 мм, шаг полюсов 160 мм) потребовал бы большого объёма материала, утяжеляя раму. Чистый NdFeB при массе узла =1,3 т стоит 24 000-43 000 долл. США только материал [7], что неоправданно для всего объёма. Стандартный NdFeB работает лишь до 80 °C, а фактическая температура в зоне барабана ещё не измерена при превышении потребуется дорогая термостойкая марка на весь объём. Гибрид снимает все три ограничения: ферритовый каркас дешёвый и термостойкий, вставки NdFeB локально усиливают поле там, где нужен пик, по тому же принципу, что в серийных магнитах ЭРГА и Eriez [3, 4]. Остаётся вопрос какой силы должен быть магнит; ему посвящён следующий раздел.

Почему магнит должен быть не максимальным, а оптимальным

Кажется, что чем сильнее магнит тем лучше. На деле и слишком слабый, и слишком сильный магнит вредны по-своему: нужен оптимум, а не максимум.

Если сила недостаточна, обломок не удерживается у стенки барабана: вес и центробежная сила отрыва превышают притяжение, и обломок срывается в поток в насос, гидроциклон, трубопровод; это и есть исходная проблема, которую должен решать уловитель. Если же магнит намного сильнее нужного, возникают другие проблемы: дороже (NdFeB и так самый дорогой материал, лишнее поле лишний расход без пользы [7]), опаснее для процесса (расширенная зона притяжения захватывает немагнитные частицы и нагружает раму) и сложнее в обслуживании (сильное поле притягивает инструмент уже на расстоянии).

Поэтому нужна не максимальная, а достаточная сила с умеренным запасом. В расчёте проекта запас отношение силы притяжения к отрывающей силе; в самой сложной точке диапазона (обломок 25 мм) он составляет около 1,33: запас у единицы ненадёжен, запас в разы больше перерасход материала. Выбранный запас (около трети сверх минимума) делает уловитель надёжным, но не избыточным. Точный подбор объёма и марки NdFeB под этот запас, отдельная задача расчёта магнитной цепи; в литературе такие расчёты силы постоянных магнитных сепараторов выполняются методом конечных элементов [10].

Заключение

Систематическое сравнение показывает: выбор гибридной феррит-NdFeB системы для уловителя МОФ-3 не произволен, а обоснован сопоставлением материалов по индукции, термостойкости, коррозионной стойкости и стоимости, а также требованием, чтобы сила магнита была не максимальной, а рассчитанной с умеренным запасом, избыточный магнит нежелателен так же, как и недостаточный.

ЛИТЕРАТУРА

1. Common Types of Magnetic Separation Equipment - Stanford Magnets.

2. Magnetic Separators 911Metallurgist.

3. Патент RU 2400306 «Магнитный сепаратор для шаровой мельницы» / ООО «ЭРГА Плюс», 2013.

4. Eriez Trunnion Magnets Prolong Equipment Life in Ball/SAG Mills - MINING.COM.

5. NdFeB vs. SmCo vs. Ferrite vs. Alnico: Magnet Material Comparison - Radial Magnets.

6. Magnet Grades Chart: NdFeB, SmCo, Alnico & Ferrite Strength - SourceMagnets.

7. Top 10 Magnetic Separator Manufacturers in the World - MAG SPRING.

8. Islam R., Vero K., Borah J.P. Historical overview and recent advances in permanent magnet materials Materials Today Communications, Vol. 41, 2024.

9. Nzeh N.S., Popoola P.A., Adeleke A., Adeosun S. Physical Concentration of Heavy Minerals: A Brief Review on Low and High Intensity Magnetic Separation Process Techniques - JOM, Vol. 76, No. 3, pp. 1329-1344, 2024.

10. Nedelcu S., Watson J.H.P. Magnetic separator with transversally magnetised disk permanent magnets - Minerals Engineering, Vol. 15, Issue 5, 2002.