

G-813

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



5079/2-77

19/12-77

9 - 10887

Р.М.Гречишкин, В.И.Илющенко, Д.Д.Мишин

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ
И МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫЕ
ИЗ ТАКИХ МАТЕРИАЛОВ (Обзор)

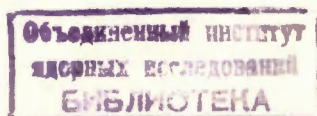
1977

9 - 10887

Р.М.Гречишкин,* В.И.Илющенко, Д.Д.Мишин*

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ
И МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫЕ
ИЗ ТАКИХ МАТЕРИАЛОВ (Обзор)

*Направлено на VI Международную конференцию
по магнитной технологии /Братислава, 1977/*



* Калининский государственный университет.

Гречишкин Р.М., Илющенко В.И., Мишин Д.Д. 9-10887

Современные материалы для постоянных магнитов
и магнитные системы, изготовленные из таких материалов

Постоянные магниты на основе магнитотвердых материалов могут заменить электромагниты, применяемые сейчас в ускорителях. В первой части работы кратко рассмотрены вопросы применения постоянных магнитов, которые, например, позволяют осуществить квадрупольную фокусировку в электростатическом ускорителе.

Сплавы редкоземельных элементов с кобальтом позволяют получить поля, сравнимые по величине с полями "теплых" электромагнитов. На основе SmCo_5 можно изготовить дипольные магниты с полем 5 кГс в зазоре 30 мм и квадрупольные - с градиентом до 5 кГс/см в такой же апертуре. Свойства подобных магнитотвердых материалов, их технология и перспективы развития рассмотрены во второй части работы.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ и Калининском государственном университете.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

© 1977 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

1. ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ В СИНХРОТРОНАХ

1.1. Ионные источники

В источниках типа дуоплазмотрон напряженность магнитного поля в зазоре между промежуточным электродом и анодом равна $B = /1000-5000/ Гс$ ¹. Продольное поле в источнике РИГ - типа имеет величину $B = =/1000-5000/ Гс$ ² в газоразрядном канале диаметром /0,5-1,0/см и длиной /5-10/см. В циклотроне при ускорении многозарядных ионов сепарация пучка требуемой зарядности производится собственным полем ускорителя. В высоковольтном форинжекторе для этой цели применяется отдельный дипольный электромагнит или электромагнит ионного источника³. Применение постоянных магнитов позволит снизить мощность, потребляемую на высоковольтной колонне форинжектора, на несколько кВл.

Магнитное поле такого типа можно сформировать при помощи плоских или кольцевых магнитов из сплава альнико /ЮНДК/⁵ или SmCo_5 с энергетическим произведением $(BH)_{max} \sim 10 \text{ МГс} \cdot \text{Э}$. Экспериментальные кольцевые магниты из SmCo_5 для магнитно-периодических фокусирующих систем /МПФС/ обеспечивают поле $B = = 4200 \text{ Гс}$ при использовании колец толщиной 3,3 мм с внутренним диаметром $2r = 6,1 \text{ мм}$ и внешним диаметром $2R = 13,7 \text{ мм}$ ⁴.

Дипольные магниты с полюсами из SmCo_5 создают в зазоре 1-2 см поле $B = /3000-4000/ Гс$ ⁵.

Для источников поляризованных ионов разработано несколько конструкций квадрупольных⁶ и секступольных⁷⁻⁹ магнитов из сплавов альнико с $(\text{BH})_{\text{max}} = /3,5-7,5/\text{МГс}\cdot\text{Э}$, которые создают на границе апертуры диаметром $2r = /3-30/\text{мм}$ поля $B_r = /3000-1000/\text{Гс}$.

В ионизаторе источника поляризованных ионов требуется продольное однородное поле с B в несколько кГс, которое также можно получить с применением кольцевых магнитов из сплавов альнико или SmCo_5 .

Параметры дипольного сепаратора принципиально не отличаются от приведенных выше требований к магнитному сепаратору источника многозарядных ионов.

В случае применения источника поляризованных ионов, где основная доля электрической мощности расходуется на питание электромагнитов, при переходе на постоянные магниты можно сэкономить 80-90% всех энергозатрат.

1.2. Форинжектор

Первый проект форинжектора Кокрофта-Уолтона с фокусирующими квадрупольными на постоянных магнитах был предложен еще в 1955 г.¹⁰ До настоящего времени выполнены только расчеты конструкции форинжектора с магнитной фокусировкой при ускоряющем напряжении 330 кВ и градиентах полей в квадрупольях $G_r = /500-1500/\text{Гс}/\text{см}$ в апертуре диаметром 4 см^{11,12}. Показано, что максимальный ток ускоренных протонов может достигать 100 мА.

В настоящее время имеется возможность увеличения градиента G_r до $/4000-5000/\text{Гс}/\text{см}$ при использовании магнитов из SmCo_5 или многокомпонентных сплавов на основе интерметаллических соединений RCO_5 и R_2Co_{17} ¹⁴ с $(\text{BH})_{\text{max}} = /13,5-22/\text{МГс}\cdot\text{Э}$.

1.3. Линейный ускоритель

Более интенсивно ведется разработка магнитных квадрупольей для линейных ускорителей. Первое предло-

жение такого рода было выдвинуто еще в 1956 г.¹⁵ В линейном ускорителе на 50 МэВ брукхейвенского синхротрона на 33 ГэВ требуемый на входе градиент магнитного поля равен $G_r = 6000 \text{ Гс}/\text{см}$, на выходе $G_r = 600 \text{ Гс}/\text{см}$ при диаметре апертуры 2,54 см. При моделировании с ферритами FERROXDUR были получены градиенты $G_r = 1000 \text{ Гс}/\text{см}$.

В работе¹⁶ показано, что при использовании сплава ЮНДК-25БА можно обеспечить градиент $G_r = 6000 \text{ Гс}/\text{см}$, применяя магниты шириной 3,8 см и длиной 4,5 см при апертуре диаметром 3,4 см в первой трубке дрейфа линейного ускорителя И-100.

В работе¹⁸ на экспериментальном квадруполье с апертурой диаметром 4 см из сплава ЮНДК-25БА был получен градиент $G_r = 2500 \text{ Гс}/\text{см}$. Показано, что при оптимальной геометрии магнитов можно получить градиент $G_r = 4000 \text{ Гс}/\text{см}$. Экспериментально показана возможность обеспечения градиента с точностью 0,1% при длине квадрупольа 10 см.

1.4. Линии транспортировки пучков

Впервые для целей транспортировки и фокусировки пучка электронов с энергией 7 МэВ постоянные магниты были использованы в 1955 г.¹⁹ Были сформированы 8 квадрупольей из 4 цилиндрических стержней каждый, которые располагались снаружи ионопровода. Пучок проходил внутри трубки длиной 305 см и диаметром 1,6 см. Расходимость пучка на входе составляла 10 мрад. Максимальное увеличение интенсивности электронного пучка составляло 20 при градиенте $G_r = 200 \text{ Гс}/\text{см}$ и фокусном расстоянии системы 100 см.

В 1967 г. исследована система из двух квадрупольей с апертурой диаметром 7,94 см и длиной 7,62 см в стальном магнитопроводе диаметром 20,3 см при градиенте поля $G_r = 470 \text{ Гс}/\text{см}$ ²⁰. Полюса изготавливались из прямоугольных пластин длиной по 2,54 см из феррита IND OX-V. Фокусное расстояние дублета регулировалось при помощи внутреннего стального ци-

линдрического шунта. Линия была испытана на пучке протонов с энергией $E_p = 10 \text{ МэВ}$.

2. СОВРЕМЕННЫЕ МАГНИТОЖЕСТКИЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Хотя постоянные магниты являются древнейшими из известных магнитных материалов, заметный прогресс в улучшении их качества начался только в 30-х годах нашего столетия. Разработанные в 1933 г.^{13,14} сплавы на основе Fe-Ni-Al-Co /альнико/ в короткое время практически полностью вытеснили закаленные высокоуглеродистые легированные стали.

Эти сплавы, свойства которых систематически улучшались в течение ряда лет, а также появившиеся в 50-е годы бариевые ферриты сейчас являются основными промышленными материалами для постоянных магнитов. Однако возможности дальнейшего повышения их магнитных характеристик к настоящему времени в значительной степени исчерпаны²¹.

Теоретический предел энергетического произведения $(BH)_{\max}$ постоянного магнита $B_r^2/4$ / B_r - остаточная индукция/ может быть реализован только в случае достаточно большой коэрцитивной силы H_c , равной по порядку величины B_r . Достигнутые же величины H_c магнитов типа альнико с остаточной индукцией 11-14 кГс составляют /800-1700/Э, что ограничивает их энергетическое произведение величинами 5-10 МГс·Э /13,4 МГс·Э на лучших лабораторных образцах²²/.

Очевидно, что из-за различной физической природы внутренней магнитной индукции и размагничивающего поля задача получения постоянных магнитов с максимальной магнитной энергией должна решаться, с одной стороны, путем разработки составов сплавов с повышенной спонтанной намагниченностью, с другой - получением у этих сплавов коэрцитивной силы, значение которой по порядку величины равняется намагниченности насыщения. Для реализации высокой спонтанной намагниченности необходимо, кроме того, создание совер-

шенной магнитной текстуры и/при использовании методов порошковой металлургии/ высокой плотности изделий.

Эти требования в значительной степени удалось реализовать в недавно разработанных новых материалах для постоянных магнитов из сплавов на основе редкоземельных металлов и кобальта²³. Магнитные характеристики магнитов этого типа намного превышают характеристики сплавов альнико и гексагональных ферритов, что обуславливает первоочередный интерес к исследованию их свойств и изысканию новых сфер применения.

2.2. Из ряда интерметаллических соединений, образующихся в системах РЗМ-Со, наибольший интерес представляют соединения $(\text{РЗМ})\text{Co}_5$ и $(\text{РЗМ})_2\text{Co}_{17}$, имеющие высокие /до 16 кГс/ значения намагниченности насыщения, высокие температуры Кюри /500-900°С/ и большие поля магнитокристаллической анизотропии порядка десятков и сотен килоэрстед²³⁻²⁵. Величина магнитного момента этих соединений удовлетворительно описывается простой двухподрешеточной моделью магнитной структуры, согласно которой результирующие моменты редкоземельной и кобальтовой подрешеток параллельны между собой в соединениях с легкими РЗМ и антипараллельны для тяжелых РЗМ²⁴.

Заметное увеличение намагниченности насыщения сплавов РЗМ-Со может быть достигнуто путем частичного замещения атомов кобальта железом²⁶ а также марганцем. Такие замещения влияют на характер и величину магнитокристаллической анизотропии, которая в зависимости от добавки может изменяться от анизотропии типа "легкая плоскость" к анизотропии "легкая ось".

Оценка верхнего теоретического предела энергетического произведения соединений с наивысшей намагниченностью насыщения $(\text{РЗМ})_2(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Mn})_{17}$ дает весьма высокие значения порядка 40-65 МГс·Э при комнатной температуре.

2.3. При механическом размельчении сплавов /РЗМ/ Co_5 коэрцитивная сила получаемых порошков резко увеличивается по сравнению с исходными мас-

сивными кристаллами^{/27/}. Дислокации, точечные дефекты, включения других фаз, неизбежно присутствующие в реальных материалах, при большой магнитоотрицательности и магнитной анизотропии, присущей соединениям R₃M-Co, оказывают определяющее влияние на величину их коэрцитивной силы^{/28/}. Для соединений на основе R₃M/Co₅ высокие /10-20/кЭ значения коэрцитивной силы порошков сохраняются и даже повышаются при последующем формировании путем прессования в магнитном поле, спекании и термообработке при высоких /1100-1200°C/ температурах. Важным условием такого процесса, являющегося общепринятым в современной практике, является высокое совершенство магнитной текстуры при плотности изделий, близкой к 100%.

В результате спекания плотность сформированных брикетов возрастает до 95-98%. Для получения высокой степени усадки при спекании брикетов больших размеров с минимальной /~60%/ исходной плотностью необходимо уменьшение окисления порошков в процессе измельчения, сушки и спекания, что достигается специальными технологическими приемами.

Наивысшее энергетическое произведение достигается на сплавах вида (Sm,Pr)Co₅, имеющих повышенную магнитную индукцию за счет замещающих самарий добавок празеодима. Применение цериевого мишметалла позволяет получать постоянные магниты с достаточно высокими магнитными свойствами при значительном снижении стоимости исходного сырья.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация энергетического произведения $(BH)_{\max} \approx 60 \text{ МГс} \cdot \text{Э}$ при помощи соединений типа $R_2(\text{Co,Fe})_{17}$ позволит создавать диполи с напряженностью $B_z = 10000 \text{ Гс}$ в зазорах 2-3 см и квадрупольные с $G_1 = 10000 \text{ Гс/см}$ в апертурах диаметром 2-3 см. В результате этого устройства на постоянных магнитах смогут успешно конкурировать с "теплыми" электро-

магнитными системами и сверхпроводящими системами такого типа.

В заключение авторы благодарят доктора технических наук И.А.Шелаева за многочисленные консультации по затронутым в статье вопросам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Illgen J. e.a. *IEEE Trans.*, 1972, NS-19, no.2, p.35.
2. Bennett J.R.J. *IEEE Trans.*, 1972, NS-19, no. 2, p.48.
3. Wolf B.H. *IEEE Trans.*, 1972, NS-19, no2, p.74.
4. Das K., Harrold W.J. *IEEE Trans.*, 1971, MAG-7, no.2, p.281.
5. Илющенко В.И., Куликов Ю.В. *ОИЯИ*, 13-10510, Дубна, 1977.
6. Keller R. e.a. *CERN*, 60-2, 1960.
7. Christiansen R.L., Hamilton D.R. *RSI*, 1959, 30, no.5, p.356.
8. Audoin C. *J.Phys.Appl.*, 1965, 26, no.2, 71A.
9. Kramer C. *PTB-Mitteil*, 1970, 80, no.6, p.434.
10. Wilcox J.M. *UCRL-3184*, 1955.
11. Burnot G. *LYCEN-6767*, Lyon, 1967.
12. Burnot G. *NIM*, 1964, 27, p.77.
13. Nesbitt E.A., Wernick J.H. *Rare Earth Permanent Magnets*. Acad. Press., 1973.
14. Булыгина Т.И. и др. Постоянные магниты из многокомпонентных сплавов на основе интерметаллических соединений $R\text{Co}_5$ и $R_2\text{Co}_{17}$ /обзор/. *Информэлектро*, М., 1975.
15. Blewett J.P. *CERN Symp.*, June, 1956, p.159.
16. Капчинский И.М., Лазарев Н.В. *Препринт ИТЭФ-78*, М., 1975.
17. Капчинский И.М. и др. Аннотации докладов на V Всес. сов. по уск. заряд. частиц. Дубна, 5-6 окт. 1976 г. /Атомиздат, М., 1976/.
18. Мурич Б.П. и др. *ПТЭ*, 1976, №2, с.22.
19. Stubbins W.F., 1955, 26, p.666.
20. Jagger J.W., Riley P.J. *RSI*, 1967, 38, no.7, p.955.
21. Дерягин А.В. *УФН*, 1976, 120, с.393-437.
22. Naastepad P.A. *Z. Angew. Phys.*, 1966, 21, no.2, p.104.
23. Nesbitt E.A., Wernick J.H. *Rare Earth Permanent Magnets*, Acad. Press., New York, 1973.

24. Белов К.П. и др. Редкоземельные ферро- и антиферромагнетики. "Наука", М., 1965.
25. Ray A.E., Strnat K. В сб.: "Редкоземельные металлы, сплавы и соединения", "Наука", М., 1973, с.75.
26. Strnat K. Goldschmidt Informiert, 4/1975, no.35,p.47.
27. Мишин Д.Д. и др. Материалы VI Всесоюзного совещания по физико-химии и применению РЗМ /январь 1969 г./ В сб.: "Редкоземельные металлы и сплавы". "Наука", М., 1971.
28. Мишин Д.Д. Влияние дефектов кристаллической решетки на свойства магнитных материалов. Свердловск, 1968. Издание Уральского отделения АН СССР.

*Рукопись поступила в издательский отдел
28 июля 1977 года.*