

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ФЕРРОМАГНЕТИКИ – БАЗОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МАГНИТНЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ В КРИОГЕННЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМАХ

А.С. Булатов

ННЦ «Харьковский физико-технический институт
г. Харьков, Украина

Анализируются результаты экспериментальных исследований по литературным источникам возможности использования низкотемпературных редкоземельных ферромагнетиков (Ho, Dy, Gd, Td, Er) в качестве концентратора магнитного потока для получения сильных стационарных магнитных полей в сверхпроводящих соленоидах. На примере диспрозия показана перспективность метода холодной гидрокстружии РЗМ с последующей термообработкой для создания благоприятной текстуры деформации с целью улучшения магнитных характеристик. Величина намагниченности текстурированного диспрозия в полях выше 5 Тл составляет 98% от намагниченности насыщения монокристалла. Приведена эффективная конструкция магнитного концентратора, изготовленного из текстурированного диспрозия, дающая индукцию насыщения в пределах 5...7,6 Тл. Однородность магнитного поля на уровне 10^{-4} .

ВВЕДЕНИЕ

Напряженность магнитного поля, подобно температуре и давлению, один из основных экспериментальных параметров, которые используются для измерения физического состояния вещества. Расширение диапазона любых этих параметров приводит к новым открытиям и вносит вклад в фундаментальные знания многих разделов современной физики. Поэтому неизменно стремление содействовать прогрессу физики и техники стационарных магнитных полей предельной напряженности. История создания постоянных супермагнитных полей является интересной и волнующей, как история любого научного достижения. Генерация полей напряженностью $H > 15$ Тл требует значительных технических усилий и финансовых затрат, которые оказались доступны только для узкого круга национальных магнитных лабораторий мира [1, 2]. До 1960 г. магнитные поля $H \leq 25$ Тл создавались «Биттер-конструкцией», т.е. водоохлаждаемым резистным соленоидом из чередующихся дисков металла и изолятора. При этом потребляемая мощность достигает ~ 100 МВт (для сравнения мощность Днепрогэса составляет 600 МВт) при скорости подачи воды $\sim 10^4$ л/мин и жесточайшем требовании к ее химической чистоте. Основными ограничениями «способа Биттера» являются высокая концентрация энергии, проблема охлаждения и механическая прочность конструкции соленоида. С 1965 г. интенсивно разрабатываются магнитные системы с открытием веществ, сохраняющих сверхпроводимость в сильных магнитных полях и при больших плотностях тока (Nb_3Sn , V_3Ga , $Nb-Zr-Ti$), на сверхпроводящих материалах. Отсутствие электрического сопротивления выгодно отличает новые магниты от резистных устройств, поскольку их к.п.д. может быть близок к 100%, тогда как в обычных магнитах при генерации поля в непрерывном режиме коэффициент стремится к нулю. Освобождение от громоздких источников питания и охлаждения делают магниты портативными и эконо-

мичными, особенно при необходимости получать сильные поля в большом объеме. В последние десятилетия широко используются «гибридные» системы, когда во внешнем сверхпроводящем соленоиде размещен внутренний биттеровский магнит. Например, рекордное стационарное поле 45 Тл в рабочем отверстии 32 мм достигнуто суммарными усилиями соленоидов – сверхпроводящего $H=11,4$ Тл и резистного $H=33,7$ Тл [3, 4]. Иной, технически доступный путь создания «гибридных» супермагнитных систем – на основе сверхпроводящего соленоида с концентратором магнитного потока в виде ферромагнитного сердечника с высокой величиной намагниченности насыщения ($\mu_0 M_s$, Тл) и малой коэрцитивной силой. Весьма перспективными для этой цели являются тяжелые редкоземельные металлы (ТРЗМ), обладающие при криогенных температурах максимальным значением $\mu_0 M_s$. Это преимущество иллюстрируется в сравнении с традиционным ферромагнетиком – железом (табл. 1).

Таблица 1
Температура Кюри T_C и намагниченность насыщения $\mu_0 M_s$, Тл при 4,2 К ферромагнитных материалов

ТРЗМ	Fe	Er	Ho	Dy	Tb	Gd
T_C, K	1056	18	20	85	220	293
$\mu_0 M_s, Tл$	2,16	3,04	3,84	3,81	3,36	2,70

В данной работе в обозримом виде рассмотрены оригинальные решения проблемы использования ферромагнитных ТРЗМ в качестве концентраторов магнитного потока в сверхпроводящих соленоидах.

ОСОБЕННОСТИ ФЕРРОМАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ТЯЖЕЛЫХ РЗМ

Согласно нейтронографическим и магнитным измерениям [5] ниже температуры Кюри T_C тяжелые РЗМ следует условно разделить на две группы: неколлинеарные (Gd, Ho и Er) и коллинеарные (Dy,

Tb) спонтанные ферромагнетики. В первом случае гексагональная плотноупакованная решетка сохраняется в магнитоупорядоченном состоянии, а во втором – появление ферромагнитной фазы сопровождается ее ромбическим искажением [6]. Однако в первой группе ферромагнитные структуры существенно отличаются.

Гадолиний при 232...293 К является коллинеарным осевым ферромагнетиком – атомные магнитные моменты $\mu=7,55\mu_B$ ориентированы вдоль главной оси ГПУ-решетки. Ниже 232 К моменты отклоняются от оси $\langle 0001 \rangle$ и прецессируют относительно нее, образуя неколлинеарную угловую фазу (F) вплоть до 4,2 К, в базисной плоскости отсутствует спонтанное магнитное упорядочение.

Гольмий при $T < T_c \approx 20$ К обладает ферромагнитной структурой типа ферромагнитной спирали (FS): проекции магнитных моментов концентрируются вблизи шести кристаллографических направлений в базисной плоскости, образуя геликоидальное упорядочение, а сами моменты отклоняются на угол $\sim 80^\circ$ от оси $\langle 0001 \rangle$, ферромагнитная составляющая магнитного момента ($\mu=10,34\mu_B$) вдоль главной оси невелика $\mu_{||}=1,7\mu_B$.

Эрбий ниже 18 К (T_c) также имеет структуру типа FS, но момент ориентируется под угол $\sim 29,6^\circ$ к главной оси с параметром ферромагнитной спирали, например при 6 К, $\mu_c=7,8\mu_B$ и $\mu_a=4,44 \pm 0,12\mu_B$.

Диспрозий и тербий при $T < T_c$ проявляют коллинеарный ферромагнетизм (F) с осями легчайшего намагничивания: $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ – ось *a* и $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ – ось *b* соответственно, лежащих в базисных плоскостях, перпендикулярных гексагональным *c*-осям. Параметры магнитных структур $\mu_a=10,64\mu_B$ (Dy) и $\mu_a=9,77\mu_B$ (Tb).

Общей особенностью магнетиков ТРЗМ (за исключением Gd) является проявление экстремально высоких значений констант энергии магнитокристаллической анизотропии, причина которой – участие орбитального магнитного момента в намагничении анизотропного кристалла. В табл. 2 дается сравнение экспериментальных данных экстраполированных к 0 К одноосной K_2 и плоскостной K_6^6 анизотропии ряда Er–Gd [5].

Таблица 2
Константы магнитокристаллической анизотропии редкоземельных ферромагнетиков

ТРЗМ	Er	Ho	Dy	Tb	Gd
$K_2, 10^8$ эрг см ⁻¹	-1,2	2,0	5,5	5,6	0,018
$K_6^6, 10^6$ эрг см ⁻¹	6,0	27,0	-7,6	2,4	-0,2

Гигантская величина магнитокристаллической анизотропии исключает эффективность применения редкоземельных ферромагнетиков в изотропном поликристаллическом состоянии, поскольку при этом

достижение величин, близких к $\mu_0 M_s$, возможно в экспериментально сильных магнитных полях $B \geq 10^2$ Тл. Это убедительно иллюстрируется на рис. 1, где сравниваются изотермы намагниченности Dy при 4,2 К – в магнитном поле для монокристалла (кр. 1, 2, 4) и изотропного поликристалла (кр. 3).

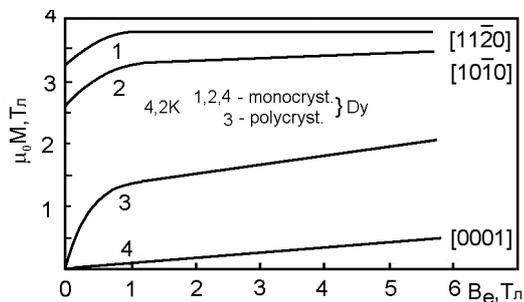


Рис. 1. Зависимость намагниченности диспрозия при 4,2 К от магнитного поля: 1, 2, 4 – монокристалл; 3 – изотропный поликристалл

Наиболее перспективно использование монокристаллов, ориентированных осями легкого намагничивания вдоль направления магнитного поля. В этой связи для получения в легко достижимых в сверхпроводящих соленоидах магнитных полях $B \sim 10$ Тл максимальной величины магнитной индукции в сердечниках из РЗМ необходимо обладать массивными ($V \geq 10$ см³) монокристаллическими заготовками. К сожалению, из-за наличия у всех ТРЗМ высокотемпературных полиморфных структурных превращений типа ОЦК ↔ ГПУ (за исключением Er) при температурах на 20...30 К ниже температуры плавления получение монокристаллов необходимых размеров с осью роста, ориентированной в заданном кристаллографическом направлении, пока практически невозможно. Дополнительную трудность вносит и невысокая чистота исходного металла (99,7...99,8%). Пока остается в единственном числе работа [7], в которой удалось использовать монокристаллический тербий с выделенной осью легкого намагничивания в виде насадки длиной 10 и диаметром 13 мм составного концентратора для сверхпроводящего соленоида. Использовать столь малый монокристалл неэффективно из-за большого размагничивающего поля, поэтому он выполнял роль насадки к массивному сердечнику из пермендюра, который давал возможность существенно снизить размагничивающее поле в составном концентраторе, а также несколько устранял ориентационную неопределенность оси легкого намагничивания. В составном концентраторе с конической монокристаллической насадкой из Tb, усеченном на диаметр 4 мм, в зазоре 0,7 мм во внешнем магнитном поле $H=5$ кЭ было получено дополнительное поле $\Delta H=43,8$ кЭ, при $H=40$ кЭ суммарное поле составило 83,8 кЭ. В работе также предпринята приоритетная попытка создать концентратор с использованием сплавов тяжелых редкоземельных металлов. Эти сплавы характе-

ризуются тем, что образуют непрерывные твердые растворы и сохраняют гексагональную решетку, параметры которой при сплавлении изменяются незначительно [8]. В сплавах ТРЗМ представляется возможным, в частности, варьировать в широком диапазоне значений магнитной анизотропии. Наиболее эффективен оптимальный сплав 30%Ho–20%Dy–50%Er (вес. %), который имеет намагниченность 3,5 Тл при гелиевых температурах в поле 55 кЭ [9].

На рис. 2 приведены результаты испытаний различных материалов конических наконечников (геометрические размеры в масштабе одинаковые) составного концентратора в магнитном поле сверхпроводящего соленоида [7].

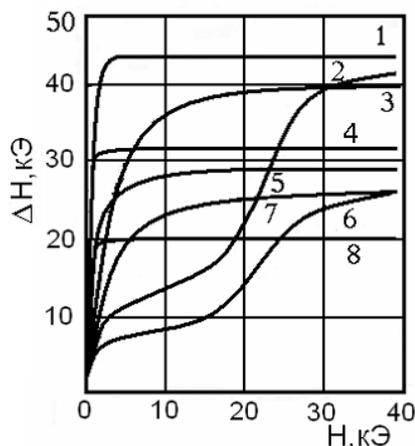


Рис. 2. Дополнительное магнитное поле в зазоре S составного концентратора с коническими наконечниками, усеченными на диаметре $\varnothing_1=4$ мм; $S=0,7$ мм (1-4) и $\varnothing_2=9$ мм; $S=1,7$ мм (5-8); 1,5 – монокристалл Tb; 2,6 – сплав Er-Ho-Dy; 3,7 – поликристаллический Dy; 4,8 – пермендиур

Как следует из рисунка, указанный оптимальный сплав дает возможность получить во внешнем магнитном поле $H=50$ кЭ добавочное поле, близкое для концентраторов с монокристаллической насадкой из Tb, а в сравнении с поликристаллическим диспрозием он вступает «в игру» начиная с 35 кЭ. Все же недостатков больше, чем успехов. Сплавы ТРЗМ в отличие от монокристаллов обладают заметным магнитным гистерезисом, что приводит к неоднородности результирующего поля при циклическом использовании концентратора. Все результаты получены в основном на сравнительно малых поликристаллических слитках ~ 5 см³. В массивных заготовках возможно отклонение от указанных магнитных свойств в силу несоблюдения однородности состава в объеме протяженного слитка. До настоящего времени к магнитным сплавам сохраняется только научный интерес.

Идентичность кристаллографической симметрии ТРЗМ порождает их общее поведение анизотропии их механических свойств, проявляя единый механизм пластической деформации по схеме типа двойного призматического и базисного скольжения. На-

глядно подобное деформационное текстурирование было обнаружено на диспрозиевых фольгах толщиной $\sim 0,25$ мм, полученных холодной прокаткой [10]. В направлении прокатки формируется кристаллографическая текстура типа $(0001) \langle 10\bar{1}0 \rangle$ и кривые намагничивания при 4,2 и 77 К находятся в отличном согласии с магнитными измерениями монокристалла диспрозия в направлении легкого намагничивания. Несомненно, текстурированные фольги не решают окончательно проблему получения сплошного массивного однородного в сечении материала с предельной намагниченностью. Все же исследование фольги наводит на мысль, что использование РЗМ ферромагнетиков в качестве поликристаллических концентраторов возможно при условии наличия кристаллографической текстуры, благоприятной для ориентации магнитных моментов вдоль внешнего магнитного поля.

В 1979 г. Борисом Григорьевичем Лазаревым предложена плодотворная идея применить способ гидропрессования (гидроэкструзии) для создания объемных текстурированных поликристаллических сердечников из РЗМ, и она была успешно реализована на примере диспрозия совместными усилиями научных коллективов ННЦ ХФТИ и ДонФТИ НАНУ [11]. Диспрозий послужил идеальным модельным объектом в решении проблемы получения практических высокоэффективных концентраторов магнитного потока для техники сильных магнитных полей.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ГИДРОЭКСТРУДИРОВАННОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО ДИСПРОЗИЯ

Суть способа гидроэкструзии заключается в холодном прессовании материала жидкостью высокого давления и выполняется в два этапа: предварительно заготовку переводят в пластическое состояние высоким давлением жидкости и затем выдавливают через очко матрицы той же жидкостью в среду с атмосферным давлением [12]. В случае Dy перевод в пластическое состояние заготовки производится в оболочке из металла, твердость которого выше твердости редкоземельного металла. Использование промежуточной среды, роль которой играет оболочка, способствует равномерному формированию цилиндрической заготовки в радиальном направлении при высоком уровне гидростатического давления. После гидроэкструзии оболочка удалялась, и для снятия внутренних напряжений стержни Dy отжигались в вакууме ($\sim 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.) при $T=450$ °С ниже температуры рекристаллизации в течение 4 ч. Первоначально исследования структурных и магнитных свойств гидроэкструдатов Dy относительно малых размеров (длина 40 и диаметр 7 мм) преследовали единственную цель: выяснить возможности технологии холодного гидропрессования для улучшения магнитных свойств РЗМ [13].

Рентгенографические исследования на уровне построения стереографических проекций полюсных фигур главных кристаллографических плоскостей позволили проследить за особенностью развития текстурообразования в деформированном Ду. Его типичные полюсные фигуры показаны на рис. 3, из которого следует, что уже после деформации с $\delta=77\%$ отчетливо формируется текстура с преимущественным расположением плоскостей $\{0001\}$ вдоль направления выдавливания (НВ) со степенью рассеяния равной $\pm 12^\circ$. С увеличением деформации до 80% она снижается до $\pm 10^\circ$. Типичная полюсная фигура для семейства плоскостей $\{10\bar{1}0\}$ свидетельствует о присутствии и призматического направления $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ вдоль НВ.

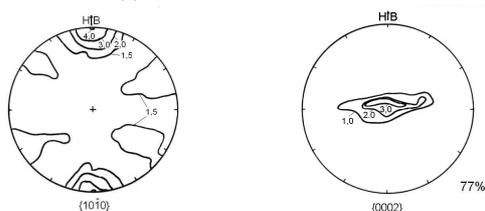


Рис. 3. Полюсные фигуры гидроэкструдированного диспрозия

Таким образом, по аналогии с Ду фольгами в объеме гидроэкструдата созданы условия его легкого намагничения. Отжиг при 450°C приводит к снижению внутренних напряжений при сохранении дисперсности. Средний размер блоков когерентного рассеяния $D \leq 1$ мкм.

На рис. 4 приведены результаты измерения в магнитном поле 6 Тл при температуре 4,2 К зависимости намагненности $\mu_0 M$ от степени деформации δ диспрозия. Измерения выполнялись на цилиндрических образцах (длиной 35 и $\varnothing 3,5$ мм) с коническими торцами для уменьшения размагничивающего фактора. Для калибровки абсолютной величины намагненности использовали образец из армо-железа с намагненностью при 4,2 К равной 2,18 Тл.

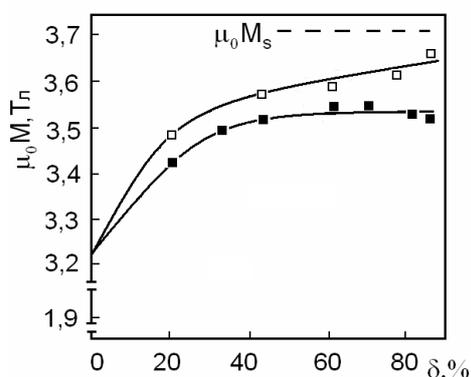


Рис. 4. Зависимость намагненности диспрозия при 4,2 К от степени деформации в магнитном поле 6 Тл

Намагненность возрастала до $\delta=40\%$, и после формирования текстуры она слабо изменяется с ростом деформации. Отжиг при $T < T_{\text{рекрист}}$ вызывает у деформированных образцов повышение намагненности, которое достигает максимальной величины 3,67 Тл для $\delta=85\%$, что составляет 98% от $\mu_0 M_s$. Увеличение $\mu_0 M$ после термообработки в основном связано с ослаблением внутренних напряжений, создающих энергетический барьер для вращения векторов спонтанной намагненности и вызывающих дополнительную магнитокристаллическую анизотропию.

Зависимость $\mu_0 M(\delta)$ позволила оценить эффективное значение угла γ между вектором намагненности и направлением магнитного поля согласно формуле $\gamma = \arccos(M/M_s)$, где M – намагненность в данном магнитном поле B_e . Так, зная экспериментальные значения намагненности в поле 6 Тл, были получены следующие значения γ для образцов с $\delta=85\%$: в деформированном состоянии $\gamma \approx 19^\circ$, а в термообработанном – $\gamma \approx 9^\circ$. Величина γ близка к величине угла рассеяния по рентгеновским данным.

На рис. 5 показаны изотермы намагненности диспрозия при 4,2 К: кр. 1-3 – монокристаллического диспрозия [14]; кр. 4 – гидропрессованного образца, термообработанного при 450° после деформации на $\delta \sim 85\%$. В гидроэкструдированном стержне диспрозия в поле выше 5 Тл созданы благоприятные условия для его легкого намагничения.

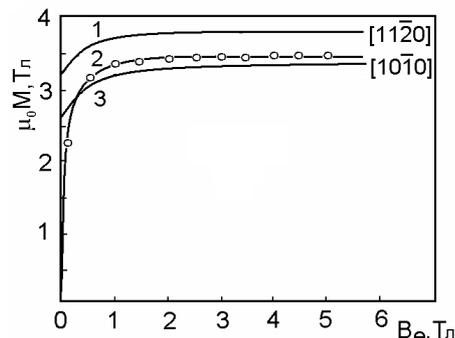


Рис. 5. Зависимость намагненности диспрозия при 4,2 К от магнитного поля: 1,3 – монокристалл; 2 – после деформации $\delta=83\%$ и отжига при 450°C

На основе подобных малоразмерных текстурированных стержней-образцов Ду был изготовлен опытный концентратор магнитного потока [19], который убедительно доказал его превосходство в сравнении с монокристаллом тербия [7] (рис.6).

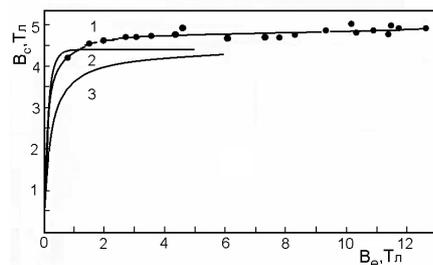


Рис. 6. Зависимость добавочного магнитного поля B_c , создаваемого концентратором, от собственного поля соленоида B_e . Концентраторы: 1 – из гидроэкструдированного Ду; 2 – с монокристаллом Tb; 3 – из литого поликристаллического Ду

Изложенные результаты исследования [13] вселили оптимизм в дальнейшее развитие технологии гидропрессования Ду для получения массивных сердечников с диаметром ~ 20 мм [15]. Из слитка чистотой 99,7% (примеси в основном остальные РЗМ) после гидропрессования на $\delta=60\%$ были получены стержни – заготовки длиной 45 мм, диаметром 17,3 мм, которые позволили применить метод Монтгомери [16] для определения намагниченности в случае цилиндрических стержней. Используя соотношение $B-H_0=\mu_0M(\cos\theta_2-\cos\theta_1)$, где B – индукция в зазоре S между двумя цилиндрами; H_0 – внешнее поле соленоида, геометрические параметры ясны из рис. 7. Измерения магнитной индукции выполнялись при 4,2 К в поле $H_0=6$ Тл сверхпроводящего соленоида при разных величинах зазора S (в данном случае от 1,5 до 0,67 мм).

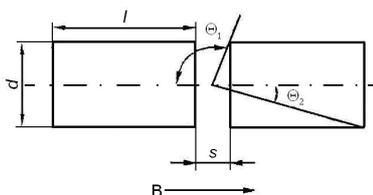


Рис. 7. Схема расположения образцов диспрозия для измерения намагниченности

Полученная линейная зависимость экстраполировалась на нулевой зазор, что давало величину намагниченности массивного сплошного изделия. По этим измерениям при 4,2 К значение намагниченности $\mu_0M=(3,68\pm 0,1)\%$, что близко к предельному значению намагниченности насыщения. Подобным приемом были получены изотермы намагничивания при температурах 4,2, 20 и 77 К в магнитных полях до 14 Тл [17]. Зависимости $\mu_0M(H)$ при 4,2 и 20 К практически совпадают. При температуре 77 К изменение зависимости $\mu_0M(H)$ проявляется только в масштабном факторе; так значение намагниченности $\mu_0M_S=3,38$ Тл достигается в поле 6 Тл и слабо повышается до $\mu_0M_S=3,4$ Тл в поле 14 Тл. Величина гигантской осевой магнитокристаллической анизотропии, по-видимому, незначительно меняется при 77 К.

Выше была отмечена необычайно высокая структурная дисперсность гидроэкструдатов, что стимулировало к стремлению выяснить уровень однородности намагниченности массивного гидроэкструдата для «деловых» применений. Это было изящно решено в эксперименте [15, 17] в обнаружении квантовых осцилляций магнитосопротивления высокочистого и совершенного монокристалла бериллия

($0,35\times 0,35\times 3$ мм) с ориентацией гексагональной оси вдоль магнитного поля. Проявляется это явление в магнитных полях ≥ 5 Тл с однородностью не хуже $\sim 10^{-4}$ [18]. Бериллиевый измеритель помещался в зазор (1,65 мм) между плоскими полюсами. На рис. 8 иллюстрируется типичная зависимость $R(H)$. Осцилляции магнитосопротивления разрешались уже в полях $H<4,5$ Тл (см. рис. 8,а), а в полях $H\approx 8\dots 9$ Тл (см. рис. 8,б) фиксировалось их четкое разрешения с ростом их амплитуды в соответствии с природой явления. Эти результаты подтвердили высокую однородность поля в зазоре и, вместе с тем, хорошую однородность деформации массива гидроэкструдата Ду и близость его магнитных свойств к монокристаллу. Дальнейший прогресс в повышении магнитных свойств поликристаллического Ду следует ожидать в создании совершенной текстуры с осью легчайшего намагничивания $\langle 11\bar{2}0 \rangle$, но при этом необходимо иметь высокочистый металл, который обеспечит достаточную пластичность при его обработке высоким давлением. Возможно, невысокая чистота металлического гольмия не позволила получить высокий положительный эффект при его гидроэкструзии, но подтвердила тенденцию к образованию деформационной кристаллографической текстуры аналогичной в Ду.

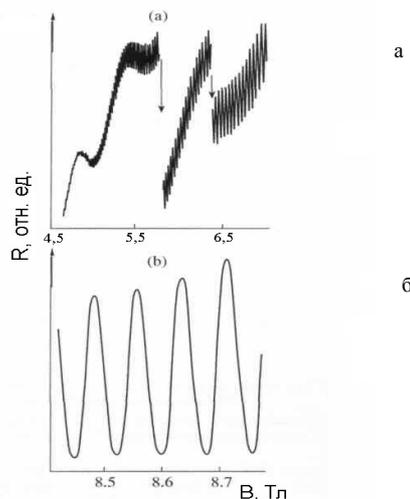


Рис. 8. Эффект Шубникова-де Хаазе в монокристалле бериллия при 4,2 К в магнитных полях с диспрозиевым концентратором

КОНЦЕНТРАТОРЫ МАГНИТНОГО ПОТОКА ИЗ РЗМ ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СОЛЕНОИДОВ

Конструкции магнитных концентраторов для сверхпроводящих соленоидов, как правило, выполняются из соосных протяженных ферромагнитных стержней-сердечников одного диаметра, однородно намагниченных вдоль оси, с полюсами в виде усеченного конуса с вершиной в центре зазора. К ним применим метод магнитного заряда для расчета напряженности магнитного поля в зазоре между по-

люсными наконечниками [20]. Например, по такому подобию выполнен магнитный концентратор из поликристаллического гольмия, который позволил в «гибридной» магнитной системе (сверхпроводящий и резистный соленоиды) с собственным магнитным полем 30,1 Тл получить добавочное поле на уровне 3,5 Тл. Рис. 9 дает представление о конструкции концентратора, стержни которого имеют длину 32 мм и диаметр 19 мм каждый.

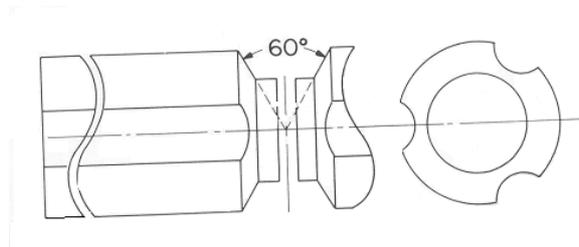


Рис. 9. Концентратор магнитного поля из поликристаллического гольмия

Конусные наконечники усечены на диаметр 12 мм. Рабочий зазор между полюсами равен 2 мм. Исследования выполнялись при 4,2 К. На рис. 10 приведена зависимость добавочного магнитного поля от приложенного внешнего магнитного поля. Общее магнитное поле на любой точке кривой определяется как сумма значений координат.

К настоящему времени из предложенных разработок [7, 14, 16, 21, 22] наиболее весомое достижение магнитной индукции насыщения было получено в оригинальном решении [23] именно благодаря тому, что использовался текстурированный поликристаллический диспрозий.

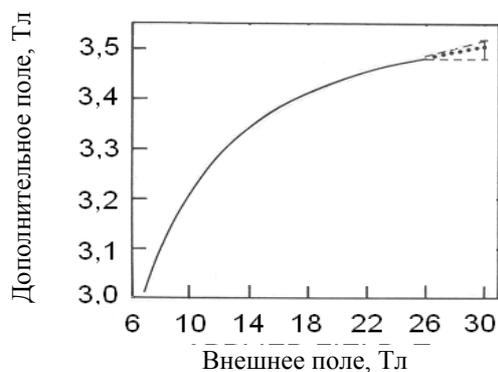


Рис. 10. Зависимость дополнительного магнитного поля, создаваемого концентратором из Ho, от внешнего магнитного поля

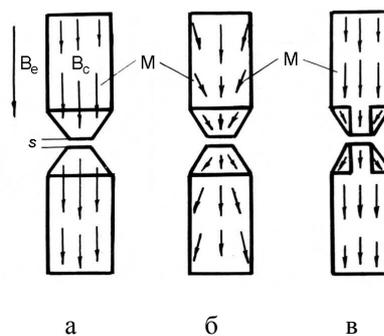


Рис. 11. Схема магнитных моментов, ориентированных в концентраторах с коническими наконечниками

Суть успеха можно объяснить схемами на рис. 11. Из позиции 11,а следует, что в текстурированном концентраторе магнитные моменты доменов M в сердечниках и конусных частях во внешнем поле B_c соленоида ориентированы параллельно, и магнитные силовые линии, формируемые этими моментами, концентрируются не эффективно, поскольку нет их преимущественного направления в зазоре S . По этой схеме выполнен концентратор [19], создающий в рабочем зазоре $S=0,9$ мм конусных наконечников добавочную магнитную индукцию $B_c=5,0$ Тл при температуре 4,2 К и во внешнем поле $B_e=4...6$ Тл. Предельное значение B_c можно достичь при условии направленности вектора намагниченности M к центру S во всем объеме концентратора, как изображено на рис. 11,б, однако технологически сложно осуществить подобную схему. Компромиссным решением может быть вариант (см. рис. 11,в), где только в конусной части магнитные моменты направлены преимущественно в зону концентрации. Подобная схема была реализована в концентраторе, изготовленном из текстурированных диспрозиевых прутков-заготовок, полученных гидропрессованием со степенью деформации $\delta=75\%$ и термообработанных при 450 °С в течение 3,5 ч в вакууме $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст. [22].

Основные детали концентратора приведены на рис. 12. Массивные сердечники 1 диаметром 38,7 мм заканчиваются конусными наконечниками двух типов: N и R с одинаковым углом при вершине $2\varphi=96^\circ$, который выбран из известных условий создания максимальной концентрации магнитных силовых линий в зазоре S концентратора. Все прочие геометрические размеры одинаковые. В N-варианте наконечники выполнены съемными и изготовлены из пяти деталей: центрального стержня 2 диаметром 2,5 мм и четырех конусных сегментов. Конусы R-типа выточены непосредственно на сердечнике 1, т.е. вариант R представляет собой единый монолит и соответствует схеме (см. рис. 11,а). Каждый сегмент вырезался из исходного текстурированного прутка так, чтобы плоскость легкого намагничивания (0002) располагалась под углом $\alpha=\varphi/2$ к центральной оси сердечника. При такой ориентации кристаллографи-

ческой плоскости в каждом конусном сегменте магнитные силовые линии, создаваемые моментами, направлены преимущественно в S-зазор (см. рис. 12, сечение А-А), что усилило эффект концентрации и повысило величину индукции магнитного насыщения B_c . Испытания проведены при температуре 4,2 К в магнитном поле B_e до 14,9 Тл, создаваемом сверхпроводящим соленоидом. Измерение индукции суммарного поля $B = B_c + B_e$ в зазоре производили датчиком Холла типа ПХЭ606118А размером рабочего участка 0,15×0,25 мм.

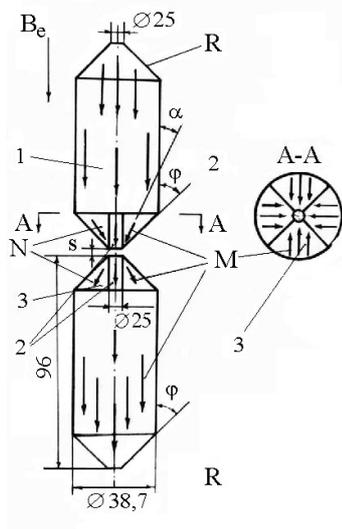


Рис. 12. Концентратор из текстурированного диспрозия

При равных величинах зазора S значение B_c в N -варианте на 17% выше, чем в случае R . На рис. 13 показана зависимость собственного поля концентратора B_c от внешнего поля B_e в разных зазорах между конусами N -типа. Полученные значения $B_c = 5,5...7,6$ Тл являются наибольшими по сравнению с известными.

Таким образом, данный пример делового концентратора, выполненного из гидроэкструдированного диспрозия, демонстрирует экономичное компактное устройство для работы с сильными постоянными магнитными полями, создаваемыми сверхпроводящими системами.

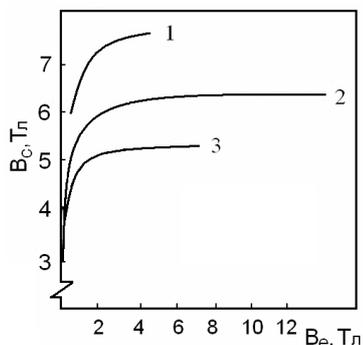


Рис. 13. Зависимость магнитного поля концентратора B_c от поля соленоида B_e в зазоре S : 1 – 0,75; 2 – 0,90; 3 – 1,90 мм

К сожалению, результаты исследования экструзии находятся на стадии предварительного этапа и требуют обладания металлом высокой чистоты, чтобы обеспечить достаточную пластичность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из рассмотренных в информационном поле экспериментальных результатов использования ферромагнитных РЗМ в качестве концентраторов магнитного потока наибольшие успехи в практическом приложении получены при использовании текстурированного диспрозия. Деформационное текстурообразование создается путем холодной гидроэкструзии. Магнитные свойства гидроэкструдата практически близки к свойствам монокристалла. Разработанная технология гидропрессования РЗМ позволяет изготавливать эффективные магнитные концентраторы в широком диапазоне линейных размеров: длиной 100...200 мм и диаметром 10...45 мм и получать в сверхпроводящем соленоиде добавочное магнитное поле от 3 до 8 Тл с высокой однородностью на уровне 10^{-4} . Возникает потребность в высокочистых РЗМ для изучения процессов текстурообразования в деформированных металлах при гидроэкструзии. Это обеспечит как проведение прецизионных магнитных характеристик, так и высокую пластичность металлов при обработке высоким давлением. Следует расширить исследования сплавов редкоземельных металлов с целью раскрытия возможностей управлять магнитокристаллической анизотропией и создавать на их основе концентраторы магнитного потока.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Ф. Херлах. *Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применения*. М.: «Мир», 1988, с. 9–29.
- 2.F. Herlach, Ios A.I. Perenboom. Magnet laboratory facilities world wide – on update // *Physica B*. 1995, v. 211, p. 1–16.
- 3.B.L. Brandt, S. Hannahs, H.I. Schneider-Muntau, G. Voebinger, N.S. Sullivan. The National High Magnetic Field Laboratory // *Physica B*. 2001, v. 294-295, p. 505–511.
- 4.I.R. Dixon, M.D. Bird, S. Bole. End effect in NHMFL 45T hybrid resistive Insert // *IEEE Transac. On Appl. S. Superconduc.* 2002, N12, p. 452–455.
- 5.P.I. Elliott. *Magnetic properties of rare Earth Metals*. Peenum Press, London and New York, 1972, p. 81–129.
- 6.В.А. Финкель. *Структура редкоземельных металлов*. М.: «Металлургия», 1978, с. 48–56.
- 7.С.А. Никитин, Г.И. Катаев, В.П. Посядо, Г.Е. Чуприков. Использование монокристаллического тербия для концентрации магнитного потока в

- сверхпроводящих соленоидах //ИТЭ. 1977, т. 2, с. 201–202.
- 8.С.А. Никитин. *Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов*. МГУ, 1989, с. 32–94.
- 9.А. С. №370259. *Магнитный сплав* /К.П. Белов, О.П. Элютин, С.А. Никитин, Г.В. Пшеченкова //Бюл. ОИПОТЗ. 1972.
- 10.Wayne M. Swift, Mahendra P. Mathur. Cryogenic Magnetic Properties of secondary recrystallized thin sheet Dysprosium //IEEE Trans. On Magn. 1974, MAG-10 #2, p. 308–313.
- 11.А.с. №2876622. *Способ изготовления ферромагнитных сердечников из редкоземельных металлов* /А.А. Галкин, Б.Г. Лазарев, А.С. Булатов, В.З. Спущанюк, С.И. Горидов и М.Коваленко //Бюл. ОИПОТЗ. 1979.
- 12.А.с. №549219. А.А. Галкин, Ю.Ф. Черный, В.С. Ковико //Способ прессования изделий жидкостью высокого давления. Бюл. ОИПОТЗ, 1977, 15, с. 35.
- 13.Б.Г. Лазарев, А.А. Галкин, А.С. Булатов и др. Низкотемпературные магнитные свойства гидропрессованного диспрозия //ФММ. 1984, т. 57, в. 2, с. 298–304.
- 14.I.I. Phyne, S. Foner. Rare earth metals single crystals. I. High-field properties of Dy, Er, Ho, Tb and Gd //J. Appl. Phys. 1968, v. 39, #2, pt. 11, p. 892–893.
- 15.Б.Г. Лазарев, Л.С. Лазарева, Н.А. Черняк, А.А. Чупиков и др. Магнитные свойства массивного гидроэкструдированного диспрозия //ФММ. 1990, т. 5, с. 103–107.
- 16.D.V. Montgomery. *High Magnetic Fields*, 1962, Ch. 16, p. 180.
- 17.Б.Г. Лазарев, Л.С. Лазарева, Н.А. Черняк, А.А. Чупиков и др. Предельно высокие свойства низкотемпературных ферромагнетиков – гидроэкструдированных диспрозия и гольмия //ФММ. 1998, т. 86, в. 3, с. 46–57.
- 18.Н.Е. Алексеевский, В.С. Егоров. О магнитном пробое в бериллии //ЖЭТФ. 1968, т. 55, №4, с. 1153–1159.
- 19.А.С. Булатов, С.И. Горидов, П.А. Куценко. Концентратор магнитного потока из текстурированного диспрозия //ИТЭ. 1985, №6, с. 161–162.
- 20.L.G. Rubin, B.L. Brandt, R.J. Weggel, S. Foner and E.J. McNiff, Jr. 33.6 T dc magnetic field produced in a hybrid magnet with Ho pole pieces //Appl. Phys. Lett. 1986, v. 49(1), p. 49–51.
- 21.V. Stepankov. Magnetically aligned polycrystalline dysprosium as ultimate saturation ferromagnet for magnetic field polepieces //Physica B. 1995, v. 211, p. 345–347.
- 22.A.S. Bulatov, S.I. Goridov, M.A. Tichonovsky and S.I. Novikov. Magnetic concentrator from textured Dysprosium, contributed up to 7.6T //IEEE Transac. Magn. 1992, v. 28, p. 502–504.

РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНІ ФЕРОМАГНЕТИКИ – БАЗОВІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ МАГНІТНИХ КОНЦЕНТРАТОРІВ В КРІОГЕННИХ МАГНІТНИХ СИСТЕМАХ

О.С. Булатов

Аналізуються результати експериментальних досліджень по літературним джерелам можливості використання низкотемпературних рідкісноземельних ферромагнетиків (Ho, Dy, Tb, Gd, Er), в якості концентратора магнітного потоку для здобуття потужних стаціонарних магнітних полів в надпровідних соленоїдах. На прикладі диспрозія посвідчено перспективність методу холодної гідроекструзії РЗМ з послідовним температурним відполюванням для створіння сприятливої текстури деформації з метою поліпшення магнітних характеристик. Величина намагніченості текстурированого диспрозія в полях вище 5 Тл складає 98% від намагніченості насичування монокристалу. Надана ефективна конструкція магнітного концентратора з текстурированого диспрозія, у якого індукція насичування в межах 5-7,6 Тл. Однорідність магнітного поля на рівні 10^{-4} .

RARE EARTH FERROMAGNETIC – MATERIALS BASIS FOR MAGNETIC CONCENTRATORS FOR CRYOGENIC MAGNETIC SYSTEMS

A.S. Bulatov

The results of experimental researches under references of an opportunity of use low-temperature rare-earth ferromagnets (Ho, Dy, Tb, Gd, Er) as the concentrator of a magnetic stream for reception of strong stationary magnetic field in superconducting solenoids are analyzed. On an example of Dysprosium the effectiveness of the method of cold hydroextrusion of rare-earth metals with further heat treatment to create of a favorable deformation texture to improve of magnetic characteristics is shown. The value of magnetization of textured Dysprosium in the fields more than 5 T equal 98 % of monocrystal saturation magnetization. An efficient construction of the magnetic concentrator made of textured Dysprosium that gives saturation induction in the range of 5-7,6 T is suggested. The homogeneity of a magnetic field is on the level 10^{-4} .