

05

Магнитные и экранирующие свойства ленточных аморфных ферромагнитных материалов

© С.А. Гудошников^{1,2}, Ю.Б. Гребенщиков³, В.Т. Волков⁴,
Ю.В. Прохорова²

¹ Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“, Москва

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк

³ Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва
E-mail: gudosh@izmiran.ru

Поступило в Редакцию 13 февраля 2014 г.

Изучены магнитные и экранирующие свойства цилиндрических экранов, изготовленных из ленточных аморфных ферромагнитных материалов. Установлено, что магнитная проницаемость данного материала может превышать значения 10^{-6} . Показано, что воздействие знакопеременным затухающим магнитным полем переводит данный материал в состояние безгистерезисного намагничивания, характеризующееся исключительно высокими, более $2 \cdot 10^7$, значениями магнитной проницаемости в магнитных полях порядка 10 нТ. На основании результатов измерений получены оценки коэффициентов экранирования магнитного поля Земли внутри цилиндрических магнитных экранов с открытыми торцами для различных диаметров и в зависимости от количества слоев ленточного аморфного ферромагнитного материала.

Создание магнитных экранов и экранирующих камер значительного объема, в которых естественное магнитное поле Земли (МПЗ) ослабляется в тысячи раз (остаточная магнитная индукция 20 нТ и менее), является сложной и дорогостоящей научно-технической задачей. Существующие магнитные экранирующие камеры [1] созданы на основе широко распространенных магнитомягких сплавов пермаллового класса — μ -metal (российский аналог — сплав 79НМ). Относительно недавно появились аморфные и нанокристаллические сплавы на основе кобальта, магнитные свойства которых (начальная

и максимальная магнитная проницаемость) существенно выше пермаллоевых сплавов [2]. Подобные аморфные ферромагнитные материалы изготавливаются методом спиннингования расплава в виде лент толщиной 15–30 μm и шириной 2–50 mm. К ним относятся производимый за рубежом материал Metglass 2705 M [3] и выпускаемый в России в ОАО „МСТАТОР“ сплав АМАГ-172 состава $\text{Co}_{72}\text{Fe}_5\text{Ni}_{10}\text{Cr}_{1.5}\text{Mn}_{1.5}\text{Si}_7\text{B}_3$, характеризующийся намагниченностью насыщения ($\mu_0 M_s = 0.6 \text{ Т}$), начальной и максимальной относительной магнитной проницаемостью 13 000 и 700 000 соответственно [4]. Высокая эффективность магнитных экранов на основе ленточных материалов была продемонстрирована при их работе в активных режимах с использованием дополнительного перемещающего поля (magnetic shaking) [5,6] и знакопеременного затухающего поля (demagnetization) [7], а также в пассивном режиме, без использования дополнительных подмагничивающих полей [8]. Однако максимальный диаметр рабочей зоны указанных магнитных экранов не превышал 0.7 m. Для проектирования крупногабаритных (диаметром более 1 m) экранов на основе ленточных материалов важно знать эффективную зависимость относительной проницаемости материала от магнитного поля $\mu(B)$. В данной работе представлены методика измерения и экспериментальные зависимости $\mu(B)$ ленточного материала АМАГ-172. Для цилиндрических экранов больших диаметров рассчитано необходимое количество слоев ленточного материала, обеспечивающих заданную степень экранирования МПЗ без использования размагничивающих полей. Показано, что воздействие размагничивающим полем может обеспечивать безгистерезисный режим намагничивания материала экрана и значительное увеличение коэффициента экранирования.

Известно [9], что для поперечного магнитного поля коэффициент экранирования K цилиндрического экрана длиной L в случае $L/D \geq 3$ хорошо описывается выражением для бесконечного цилиндра

$$K = 1 + \frac{\mu t}{D}, \quad (1)$$

где t — толщина магнитного слоя, D — диаметр экрана, μ — относительная магнитная проницаемость материала, $K = B_{ex}/B_r$ — отношение внешнего приложенного поля к внутреннему полю экрана. Из этого выражения следует, что по известным значениям K для экранов различной толщины и диаметров могут быть получены оценки

Таблица 1. Параметры исследованных экранов

Номер экрана	Диаметр D , mm	Число слоев, n	Остаточная индукция	
			до размагничивания, B_r , nT	после размагничивания, B_r^* , nT
1	152	1	243–324	137
2	130	1	160–227	55
3	152	2	87–126	15.6
4	130	2	64–79	9.8
5	50	1	52–77	5.8
6	75	2	35–47	4.4
7	50	3	21–27	2

относительной магнитной проницаемости материала от магнитного поля $\mu(H)$ (далее используется функция $\mu(B_r)$).

В данной работе коэффициенты экранирования K цилиндрических экранов с открытыми торцами из материала АМАГ-172 определялись экспериментально по измерениям магнитных полей вне и внутри экрана. Остаточное магнитное поле экранов измерялось до воздействия на них знакопеременным затухающим магнитным полем и после соответствующего воздействия. Внешним однородным полем являлось естественное магнитное поле Земли с индукцией в месте измерения 49 930 nT.

Образцы исследуемых экранов изготавливались из указанного ленточного материала толщиной 20 μm и шириной ленты 30 mm. При изготовлении экрана лента с равномерным нахлестом $\sim 1\text{--}2$ mm навивалась по спирали на соответствующий полый цилиндрический каркас, образуя на его поверхности равномерный слой магнитного материала. Укладка следующего слоя ленточного магнитного материала осуществлялась в противоположном направлении, при этом предыдущий слой изолировался тонкой клеевой лентой. Длина экранов выбиралась с учетом соотношения $L \geq 3D$. Размеры семи экранов, используемых в экспериментах, и число слоев экранирующего материала каждого экрана приведены в табл. 1.

Устройство, создающее знакопеременное затухающее поле, включало источник затухающего тока и соленоид. При его включении в соленоиде создавалось знакопеременное магнитное поле с медленно уменьшающейся до нуля амплитудой и воздействующее на исследуемый экран

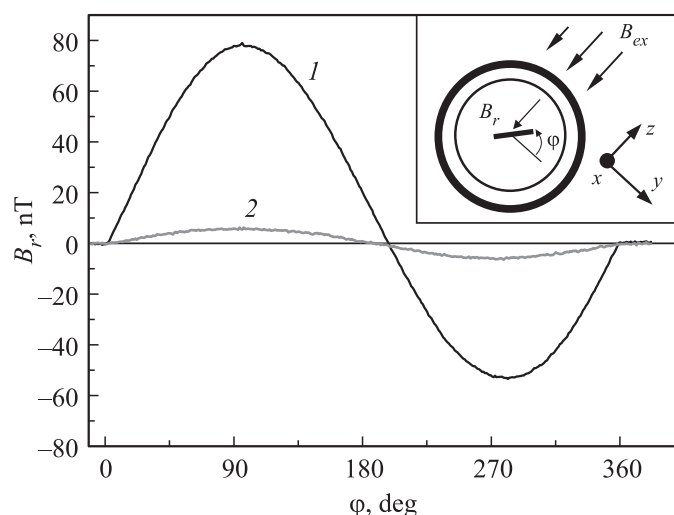


Рис. 1. Зависимость остаточного магнитного поля внутри однослойного экрана диаметром 50 mm от угла вращения ГМИ-датчика до процедуры размагничивания (1) и после размагничивания (2). На вставке показано взаимное расположение и ориентация размагничивающего соленоида, исследуемого экрана, ГМИ-датчика и МПЗ в процессе измерений.

вдоль его оси. Для измерения остаточного магнитного поля внутри экрана использовался малогабаритный однокомпонентный магнитометр на эффекте гигантского магнитного импеданса (ГМИ-магнитометр), в котором датчик был изготовлен на основе кобальтового аморфного ферромагнитного микропровода в стеклянной оболочке [10]. Датчик ГМИ-магнитометра с помощью специального держателя закреплялся в центре экрана на его оси и ориентировался так, чтобы измерялась остаточная компонента магнитного поля, перпендикулярная оси экрана. При этом конструкция держателя обеспечивала возможность вращения датчика ГМИ-магнитометра на 360° . В начальном положении датчик ориентировался перпендикулярно МПЗ.

Перед измерениями соленоид размагничивающего устройства устанавливался в горизонтальной плоскости и ориентировался перпендикулярно МПЗ. Исследуемый магнитный экран помещался внутрь размагничивающего устройства, перпендикулярно МПЗ, после чего в

центре экрана фиксировался датчик ГМИ-магнитометра. На вставке рис. 1 приведено взаимное расположение размагничивающего соленоида, исследуемого цилиндрического экрана и датчика магнитного поля в выбранной системе координат. В процессе измерений регистрировались значения величины остаточной магнитной индукции поля экрана B_r в зависимости от угла вращения датчика при полном обороте на 360° . Полученные данные использовались для определения величины и ориентации остаточного магнитного поля внутри экрана, коэффициента экранирования K и величины μ магнитной восприимчивости материала экрана.

Предварительные измерения показали, что открытые торцы экранов при данном способе намотки аморфной ленты АМАГ-172 и ориентации экранов относительно МПЗ не влияют на величину остаточного поля в центре экранируемой области. В последующих экспериментах для каждого из 7 экранов проводились записи $B_r(\varphi)$ остаточной магнитной индукции в центре экрана до воздействия размагничивающим полем и после размагничивания. В качестве примера на рис. 1 представлены характерные зависимости остаточного магнитного поля внутри однослойного экрана диаметром 50 mm от угла вращения ГМИ датчика до процедуры размагничивания и после размагничивания. Повторная процедура размагничивания практически не изменяла величину остаточного магнитного поля. Чтобы привести экран в первоначальное состояние (соответствующее состоянию „до размагничивания“), достаточно было немного повернуть экран внутри размагничивающей системы. Последующее выполнение процедуры размагничивания приводило экран в состояние, близкое к состоянию „после размагничивания“. Значения величин остаточной магнитной индукции до и после размагничивания исследуемых экранов определялись как полуразность максимального и минимального значений соответствующих кривых $B_r(\varphi)$ и $B_r^*(\varphi)$ и приведены в табл. 1. Следует отметить, что в состоянии „до размагничивания“ остаточная индукция внутри экрана имела значительный разброс, связанный с наличием магнитного гистерезиса материала. Поэтому в табл. 1 в соответствующем столбце приведен диапазон значений остаточной индукции внутри каждого образца экрана.

Экспериментальные значения (табл. 1) остаточной магнитной индукции внутри экранов и выражение (1) использовались для оценки соответствующих величин $\mu(B_r)$ материала экрана в условиях до и после размагничивания. На рис. 2, а различными символами (круж-

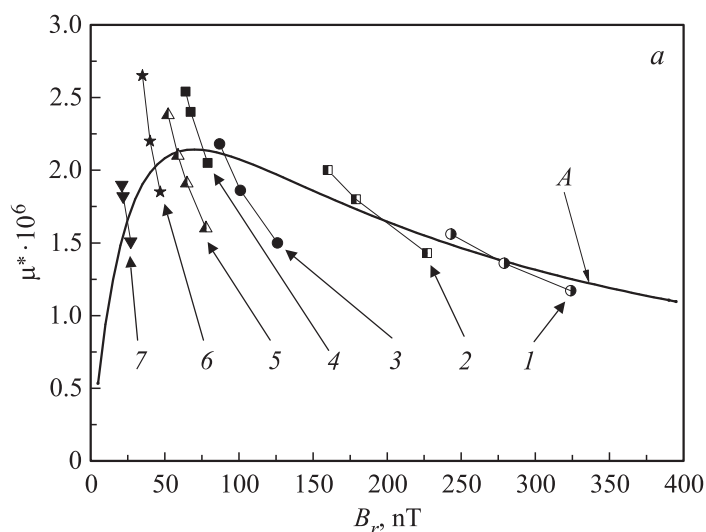


Рис. 2. Зависимости относительной магнитной проницаемости ленточного материала экранов от величины остаточного магнитного поля: *a* — до процедуры размагничивания, *b* — после процедуры размагничивания. Символами показаны величины $\mu(B_r)$, полученные при пересчете экспериментальных значений остаточных магнитных полей образцов магнитных экранов, представленных в табл. 1. Сплошные линии соответствуют расчетным зависимостям в соответствии с выражением (2).

ки, квадратики, треугольники, звездочки) показаны расчетные значения $\mu(B_r)$, полученные для магнитного материала всех 7 образцов экранов (в соответствии с табл. 1, пронумерованных от 1 до 7) до процедуры размагничивания. Размеры тонких линий, соединяющих одинаковые символы, соответствуют разбросу значений относительной проницаемости, полученных из данных табл. 1. Сплошная кривая *A* на рис. 2, *a* соответствует модельной зависимости $\mu(B)$ в виде

$$\mu(B) = \frac{\mu_0 M_s B}{(B_m + B)^2}. \quad (2)$$

Подобная зависимость описывает кривую с максимумом относительной проницаемости $\mu_m = \mu_0 M_s / 4B_m$ при значении индукции магнитного

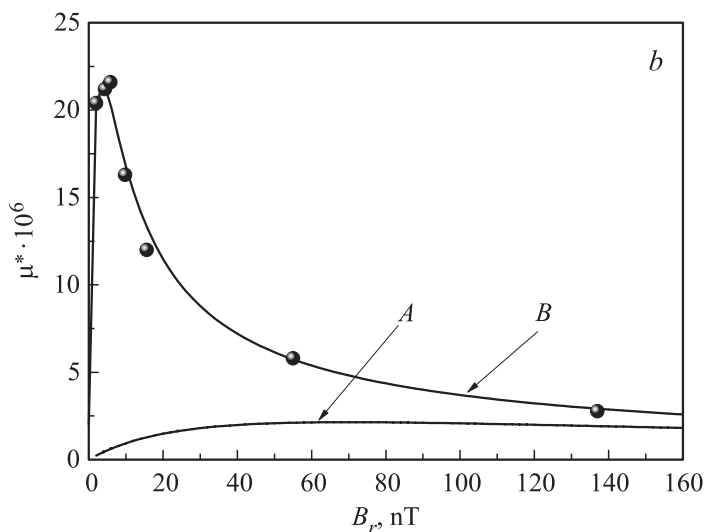


Рис. 2 (продолжение).

поля $B = B_m$ (полагаем, что намагниченность насыщения равна паспортному значению АМАГ-172 $\mu_0 M_s = 0.6$ Т). Положение максимума относительной проницаемости $B_{m1} = 70$ нТ ($\mu_{m1} = 2.1 \cdot 10^6$) кривой А на рис. 2, а подбиралось эмпирически, исходя из экспериментальных величин остаточного поля экрана, измеренных до размагничивания.

Для сравнения та же кривая А приведена и на рис. 2, б, где черными кружками представлены значения $\mu(B_r)$, полученные из экспериментальных данных остаточной индукции внутри экрана после процедуры размагничивания (табл. 1). Видно, что в этом состоянии ленточный материал в области слабых полей характеризуется очень высокой относительной проницаемостью. Экспериментальные данные хорошо описываются модельной зависимостью $\mu(B_r)$ (кривая В), в которой величина B_m выражения (2) монотонно возрастает с полем: $B_m(B) = \frac{50B+480}{B+100}$. Данная кривая имеет максимум $\mu_{m2} = 21.7 \cdot 10^6$ при еще меньшем значении индукции, $B_{m2} = 3.4$ нТ.

В соответствии с (1) можно показать, что на правых склонах кривых А и В (рис. 2, а) для $B > B_m$ при увеличении числа слоев ленточного магнитного материала n уменьшение внутреннего поля экрана

Таблица 2. Расчетное количество слоев ленточного магнитного материала экранов различных диаметров для обеспечения заданной степени экранирования МПЗ. (В скобках указано необходимое число слоев материала с учетом процедуры размагничивания.)

Диаметр, м	Коэффициент экранирования				
	50	100	200	500	1000
0.13	1	1	1	2(1)	4(1)
0.15	1	1	1	2(1)	4(2)
0.5	3	3	4(3)	6(4)	12(4)
1.0	5	6(5)	7(6)	12(7)	24(9)
1.5	7	8(8)	11(9)	19(11)	36(13)
2.0	10(9)	11(10)	14(11)	24(14)	48(17)
2.5	12(11)	14(13)	17(14)	30(17)	60(21)

происходит по линейному закону $\Delta B = \frac{\mu_0 M_s t_0}{D} n$. В области магнитных полей $B < B_m$ увеличение числа слоев становится менее эффективным из-за уменьшения μ (кривая *A*). Воздействие размагничивающим полем позволяет существенно увеличить μ в области слабых магнитных полей (кривая *B*) за счет выхода материала на безгистерезисный режим намагничивания. Используя найденные зависимости $\mu(B)$, были рассчитаны оценочные значения коэффициентов экранирования МПЗ внутри цилиндрических магнитных экранов с открытыми торцами для различных диаметров D и заданного числа слоев n ленточного ферромагнитного материала АМАГ-172. Значения полученных коэффициентов экранирования до и после размагничивания приведены в табл. 2. Первые 2 строки данной таблицы соответствуют экранам с диаметрами 0.13 и 0.15 м (образцы исследованных экранов с номерами 1–4) и хорошо совпадают с полученными экспериментальными данными.

Таким образом, установлено, что в поперечном магнитном поле высокая максимальная относительная магнитная проницаемость ленточного материала АМАГ-172 (более $2 \cdot 10^7$) может быть достигнута после его размагничивания знакопеременным затухающим полем. На основании результатов измерений найдены аппроксимационные зависимости относительной магнитной проницаемости, с помощью которых для одиночных цилиндрических экранов заданных диаметров с открытыми торцами определено количество слоев ленточного материала,

соответствующее требуемому коэффициенту ослабления магнитного поля Земли. Рассчитано, что при использовании режима размагничивания экранирующая система диаметром 2.5 м с толщиной магнитного слоя менее 1 мм может ослабить магнитное поле Земли более чем в 1000 раз.

Часть результатов получена в рамках госзадания Минобрнауки России № 2014/113.

Список литературы

- [1] <http://www.vacuumschmelze.com>
- [2] Кузнецов П.А., Фармаковский Б.В., Толочко О.В., Аскинази А.Ю., Васильева О.В., Песков Т.В. // Вопросы материаловедения. 2009. N 3 (59). С. 204–216. (Kuznetsov P.A., Farmakovskiy B.V., Tolochko O.V., Askinazi A.Yu., Vasilieva O.V., Peskov T.V. // (Rus) Problems of materials science. 2009. N 3 (59). P. 204.)
- [3] <http://www.metglass.com>
- [4] <http://www.mstator.ru>
- [5] Sasada I., Kubo S., Harada K. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 10. P. 5696.
- [6] Sasada I., Kimura T., Takeda T., Shimada M. // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. P. 08P501.
- [7] Гудошников С.А., Венедиктов С.Н., Гребенчиков Ю.Б., Кузнецов П.А., Маннинен С.А., Криволапова О.Н., Круглов О.С., Труханов К.А., Спасский А.В. // Измерительная техника. 2012. № 3. С. 58–61. (Gudoshnikov S.A., Venediktov S.N., Grebenshchikov Yu.B., Kuznetsov P.A., Manninen S.A., Krivolapova O.N., Trukhanov K.A., Kruglov O.S., Spasskii A.V. // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 3. P. 329.)
- [8] Malkowski S., Adhikari R., Hona B., Mattie C., Woods D., Yan H., Plaster B. // Rev. Sci. Instrum. 2011. V. 82. P. 075104.
- [9] Мейлихов Е.З. // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 11. С. 1317–1334. (Meilikhov E.Z. // J. Communications Technology and Electronics. 2005. V. 50. N 11. P. 1215.)
- [10] Gudoshnikov S., Usov N., Nozdrin A., Ipatov M., Zhukov A., Zhukova V. // Phys. Status Solidi. A. (1–6) 2014. DOI 10.1002/pssa.201300717.