

Магнитные экраны на основе аморфных сплавов

В работе представлены результаты исследований и разработок в области применения аморфных магнитомягких сплавов для создания магнитных экранов для защиты от постоянных и переменных магнитных полей, выполненные авторским коллективом за последние 10 лет. Показано, что магнитные экраны из аморфных магнитомягких сплавов на основе Со, прошедших соответствующую термообработку для увеличения исходных магнитных свойств, могут быть эффективнее магнитных экранов из пермаллоев. Разработана и запатентована конструкция магнитного экрана на основе лент аморфных сплавов. Приведены примеры практической реализации выполненных исследований и разработок.

Ключевые слова: экранирование, магнитное поле, аморфные магнитомягкие материалы, спиннингование, магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, безгистерезисная кривая намагничивания, магнитный экран, гипомагнитные камеры.

Введение

В журнале Инновации № 5 за 2004 г. была опубликована статья о разработке нового класса магнитных экранов на основе лент аморфных сплавов [1]. Сейчас, по прошествии десяти лет, можно сказать, что мы находились в самом начале пути и еще не знали, сколько вопросов и проблем предстоит решить. Скептики нам говорили, что все уже сделано за рубежом, незачем изобретать велосипед, все, что нужно уже экранировано и лучше пермаллоя ничего нет. Поэтому считаю необходимым отметить, что мы не зря верили в создание нового материала, у которого есть будущее. Это позволило нам продолжать движение вперед и развивать данное направление.

В связи с этим побудительным мотивом к написанию данной статьи явилась необходимость изложить тот путь, который пришлось пройти от идеи через исследования к инновационному продукту, который имеет реальную перспективу не только на российском рынке, но и на зарубежном.

От идеи к ее реализации

Перед тем как приступить к выбору материала для эффективного экранирования магнитного поля необходимо разобраться с тем, в чем суть магнитного экранирования, а также понять от каких параметров материала зависит эффективность экранирования.

Принцип защиты заключается в замыкании силовых линий магнитного поля в толще материала и исключении их проникновения из внешнего пространства внутрь замкнутого объема или из замкнутого



П. А. Кузнецов,
д. т. н., начальник НИО «Наноматериалы и нанотехнологии»,
ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»
e-mail: mail@crism.ru

объема во внешнее пространство [2], что графически представлено на рис. 1.

На первый взгляд все достаточно просто, но открытым остается вопрос, как связаны между собой внешнее магнитное поле H_0 и магнитное поле внутри сферы/цилиндра H_i . В данном случае это является ключевым вопросом, так как в дальнейшем будет не понятно, на какие характеристики ферромагнитного материала следует обращать внимание. В целом, конечно, интуитивно ясно, что эффективность экранирования должна быть пропорциональна магнитной проницаемости, диаметру и толщине экранирующей оболочки. При этом, чем больше проницаемость или толщина экрана, тем больше эффективность экранирования. Однако, как говорится, без формулы, хотя бы упрощенной, мало куда можно продвинуться, разве что заняться эмпирикой и строить регрессионные зависимости.

Следует отметить сразу, что вопросом вывода формулы для расчета магнитного поля внутри сфе-

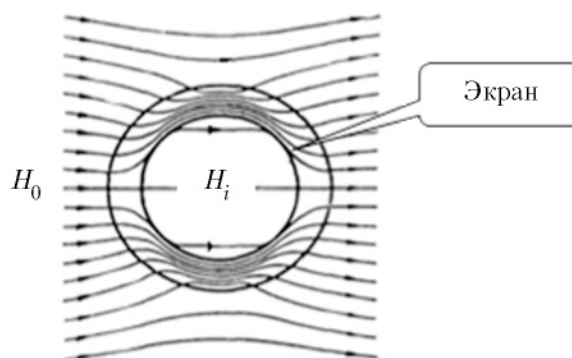


Рис. 1. Принцип защиты от магнитного поля

рической ферромагнитной оболочки, помещенной во внешнее магнитное поле занялись еще в позапрошлом веке. Это было, по-видимому, связано с тем, что активно стали развиваться приборы для измерения электрических величин (гальванометры), а также телефонная связь. Тогда, в конце XIX в., выбор ферромагнитных сплавов был не велик, даже сказать правильнее — он совсем отсутствовал. Использовалось технически чистое железо и электротехнические стали FeSi. Магнитная проницаемость этих ферромагнетиков была не велика и остро требовалась теория магнитного экранирования для увеличения эффективности экранирования. Ведь до открытия Элменом пермаллоя оставалось еще лет двадцать–тридцать [3].

К одному из ярких примеров российской научной мысли следует отнести работу Эсмарха [4], которую найти было бы достаточно трудно, если бы не вышедшая в 2006 г. в свет книга Ю. Я. Реутова, в которой автор собрал достаточно полно сведения о магнитном экранировании [5]. Есть и другие книги, но именно в этой, с одной стороны достаточно компактно, а с другой — полно и широко, рассмотрены практически все известные сведения о магнитном экранировании.

Итак, формула для расчета коэффициента экранирования, т.е. отношения напряженности внешнего поля H_0 к напряженности поля H_i в области, защищенной экраном, ($K_{\text{экр}} = H_0/H_i$) записывается в следующем виде:

$$K_{\text{экр}} = 1 + 0,25 (\mu^{1/2} - (1/\mu)^{1/2})^2 (1 - r_i^2/r_e^2), \quad (1)$$

где μ — магнитная проницаемость стенки экрана, r_i и r_e — внутренний и внешний радиусы цилиндрического магнитного экрана, соответственно.

Поскольку в большинстве случаев $\mu \gg 1$, то формула (1) может быть записана в следующем виде:

$$K_{\text{экр}} = 1 + 0,25 \mu (1 - r_i^2/r_e^2). \quad (2)$$

Если толщина стенки экрана (t) мала по сравнению с диаметром экрана (r), то выражение для $K_{\text{экр}}$ принимает следующий вид:

$$K_{\text{экр}} = 1 + 0,5 \mu (t/r). \quad (3)$$

Если внешний радиус цилиндрического экрана r_e много больше его внутреннего радиуса r_i , то выражение для $K_{\text{экр}}$ преобразуется следующим образом:

$$K_{\text{экр}} \approx 1 + 0,25 (\mu + 1/\mu - 2). \quad (4)$$

Таким образом, нами получен инструмент, позволяющий сказать, что эффективность экранирования пропорциональна магнитной проницаемости и имеет квадратичную зависимость от радиусов экрана. Интересен и еще один момент — при бесконечной толщине экрана коэффициент экранирования имеет конечное значение (4). Это принципиально важно, так как в большинстве литературных источников приводится исключительно упрощенная формула (3), исходя из которой коэффициент экранирования может обращаться в бесконечность.

Следовательно, нам необходимо найти сплавы с высокой магнитной проницаемостью. Сразу оговоримся, что для создания магнитных экранов наиболее распространенными материалами являются кристаллические сплавы на основе железа (пермаллой и кремнистая сталь) [6]. Анализ современных тенденций показывает, что по совокупности магнитных свойств имеется реальная перспектива замены этих материалов более эффективными аморфными и нанокристаллическими магнитомягкими сплавами [7, 8]. Аморфные сплавы получают в виде лент по технологии сверхбыстрого охлаждения струи расплава на быстровращающемся диске-холодильнике [9–11].

Ленты, полученные методом спиннингования, сами по себе могут являться только исходным материалом для изготовления экранов, поэтому встала задача рассмотрения существующих конструкций магнитных экранов из лент, определения их преимуществ и недостатков, и, в случае необходимости, усовершенствования существующих конструкций. Было установлено, что наиболее распространенным способом изготовления магнитных экранов является технология полотняного переплетения аморфных лент и изготовление из них полотен по системе «основа–уток» [12–14], которая обладает как рядом преимуществ, так и существенных недостатков. Использование технологии полотняного переплетения для изготовления магнитного экрана позволяет сразу получить достаточно прочную конструкцию. Поэтому данный способ является вполне очевидным при решении задачи разработки конструкции магнитного экрана. Однако при переплетении в местах пересечения лент образуются отверстия (не сплошности) размером до 1 мм, и при изгибе такого полотна для его нанесения на криволинейные поверхности имеющиеся отверстия могут увеличиваться, что может привести к уменьшению эффективности экранирования. Кроме этого, технологически трудно изготовить ленты одинаковой ширины для основы или утка без применения промежуточной операции по резке лент на заданную ширину, что приведет к увеличению расхода материала и его стоимости соответственно. Необходимо отметить также, что в результате плетения получается двухслойное полотно. В случае достижения необходимых экранирующих свойств одним слоем лент, данный способ также экономически нецелесообразен. Следовательно, разрабатываемая конструкция магнитного экрана должна обеспечивать 100% сплошность и полное ее сохранение при изгибе экрана. С учетом этого нами разработана (рис. 2) и запатентована конструкция магнитного экрана [15], отличающаяся от известных аналогов тем, что аморфные ленты (1) расположены внахлест с перекрытием не менее толщины самой ленты и зафиксированы относительно друг друга с помощью эластичного материала (2). При наложении устройства на криволинейную поверхность изгиб осуществляется не только за счет лент (1), но и за счет эластичного покрытия (2), что обеспечивает защиту криволинейных поверхностей с меньшим радиусом, чем сплошной лист из того же материала одной и той же толщины, не нарушая при этом сплошность конструкции экрана и обеспечивая неизменность ко-

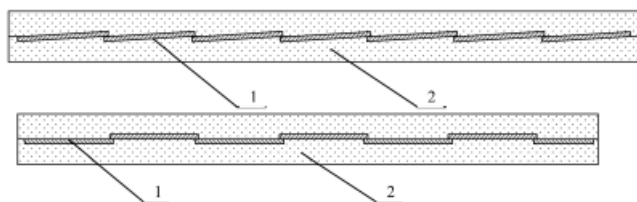


Рис. 2. Варианты расположения лент в магнитном экране:
1 — лента аморфного сплава; 2 — эластичный материал для фиксации лент

эффекта экранирования как на плоских, так и на криволинейных участках поверхности.

Казалось бы, с экранированием разобрались, конструкцию придумали и запатентовали. Теперь можно смело делать экраны и продавать их. Однако выяснилось, что все не так просто. Необходимо разработать технологию изготовления экранов. Несмотря на то, что первые аморфные сплавы получены уже более 50 лет назад, до сих пор остается проблемой стабильность свойств. В связи с этим настоятельно требовались методики входного и выходного контроля магнитных и экранирующих свойств. Чтобы магнитные экраны нашли применение в сфере товаров народного потребления необходимо наличие гигиенических и пожарных сертификатов.

По мере движения в этом направлении выяснилось, что магнитный экран сам по себе мало кому нужен. Связано это в первую очередь с тем, что это не просто обои, которыми можно обклеить что-нибудь и добиться магнитного экранирования, а научный продукт, для которого необходимо проводить соответствующие расчеты эффективности экранирования для различных геометрических размеров. Таким образом появилась необходимость найти программы, которые позволяли бы учитывать нелинейную зависимость магнитной проницаемости от величины внешнего магнитного поля.

Такие программные комплексы были найдены и начаты первые эксперименты. Тут-то и выяснилось, что наши расчеты дают завышенную оценку по сравнению с реальным экспериментом. С чем это было связано оставалось непонятным. В одной из работ по исследованию распределения магнитных свойств по длине мотка аморфной ленты магистрантом было замечено, что в зависимости от способа изготовления тороидов зависимости выглядят по-разному. Если моток аморфной ленты предварительно перемотать в тороиды и провести термическую обработку, то распределение магнитных свойств по длине ленты выглядит более или менее равномерным. Если моток аморфной ленты предварительно термообработать, а затем перемотать в тороиды, то распределение магнитных свойств по длине ленты выгладит немного по-другому — магнитная проницаемость уменьшается от начала к концу мотка. Это выглядит немного странным, так как в литературе отмечается одно из главных достоинств аморфных сплавов — нечувствительность к механическим деформациям. После проведения детального исследования было установлено, что наличие в ленте деформации в упругой области приводит к изменению кривой намагничивания, которая «опускается» ниже

кривой намагничивания ленты, в которой отсутствует деформация, что приводит к уменьшению начальной и максимальной магнитной проницаемости [16, 17]. Установление этих закономерностей позволило нам существенно повысить экранирующие свойства, и получилось так, что при увеличении числа слоев экрана экранирующие свойства становятся существенно выше, чем предсказывает расчетная модель. Наконец-то нам удалось добиться того, что расчет дает так называемую «пессимистическую» оценку или оценку снизу, ниже которой мы получить не должны, но чтобы выше — это оказалось удивительным. Анализ литературы позволяет нам делать некоторые предположения о безгистерезисном намагничивании экрана в цилиндре или о еще каком-нибудь механизме намагничивания. Однако это — наши дальнейшие исследования, и что будет достигнуто в будущем, мы можем только догадываться.

Любому исследователю приятно, когда его разработки находят практическую реализацию и после представления решенных научных проблем, по-видимому, целесообразно осветить те разработки, которые были выполнены с использованием имеющегося опыта. В следующих двух разделах будут приведены примеры создания конкретных изделий, в том числе: гипомагнитных камер и экранированных комнат, силовых кабелей и защитных жилетов, а также примеры дальнейшего развития этого направления.

Практическое применение разработанных магнитных экранов

Институт НИЯФ МГУ им. Д. В. Скобельцына совместно с ИМБП РАН поставили задачу создания двух гипомагнитных камер, экранирующих поле Земли в 400 раз. Внутренний рабочий диаметр камеры должен быть 300 мм, а длина — 500 мм. Камера разрабатывалась совместно со специалистами ИЗМИРАН [18, 19].

Были проведены численные расчеты в двумерном приближении методом конечных элементов с помощью программного пакета ELCUT (версия 5.4.0.557) [20], позволяющего моделировать двумерные магнитные поля. Для задания магнитных свойств экрана в расчете использовали кривые намагничивания, предварительно измеренные на магнитоизмерительной установке МК-3Э по аттестованной «Методике

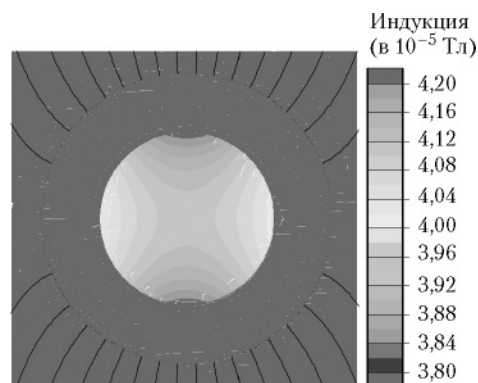


Рис. 3. Картина магнитного поля внутри двойного экрана



Рис. 4. Внешний вид готовых гипомангнитных камер

определения магнитных свойств (коэрцитивной силы, магнитной проницаемости и индукции насыщения) функциональных наноматериалов на основе магнитомягких сплавов» (свидетельство об аттестации МВИ № 261.13.16.016/2009).

Для начала был рассчитан самый простой вариант экрана — бесконечный цилиндрический одинарный экран в однородном поле индукцией 50 мкТл. Под одинарным экраном понимается экран, состоящий из нескольких слоев листового экранирующего материала МАР-1К, нанесенных вплотную друг к другу. Результаты расчета КЭ для такого экрана в зависимости от числа слоев МАР-1К показали, что использование одинарного экрана не позволяет добиться требуемого КЭ 400 при приемлемом числе слоев экранирующего материала. В соответствии с классической теорией магнитного экранирования [5], эффективное увеличение КЭ возможно при использовании двойного экрана, состоящего из двух многослойных одинарных экранов разного диаметра, вложенных один в другой.

Таблица 1

Коэффициент экранирования для одинарных цилиндрических многослойных экранов

Количество слоев	Диаметр 300 мм			Диаметр 500 мм		
	Расчет	Обр. № 1	Обр. № 2	Расчет	Обр. № 1	Обр. № 2
1	5	4,2	4,7	2	1,7	2,5
2	75	37	30	15	2,8	–
3	84	105	101	74	6.7	–
4	91	353	164	79	–	22
5	96	556	305	84	41	75
6	101	976	435	89	56	165
7	104		–	92		
8	107		770	96		
9	109		1050	99		
10	111			101		
15	119					
20	126					

Была проведена серия расчетов двойных экранов и исследована зависимость КЭ такой системы от толщины экранов и величины зазора между ними. В результате этого были выбраны следующие размеры экрана: диаметр внутреннего цилиндра — 300 мм, диаметр внешнего цилиндра — 500 мм. При этом количество слоев на внешнем цилиндре — 10, а на внутреннем — 20. Это позволяет добиться трехкратного запаса по коэффициенту экранирования и достичь значения 1200. Такой запас был сделан в связи с тем, что коэффициент экранирования экрана в конструкции может отличаться от расчетного значения для бесконечного цилиндра, а магнитная проницаемость экрана может уменьшиться из-за механических деформаций и при воздействии климатических факторов. Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 3.

Опуская подробности всей процедуры изготовления экрана, включающую в себя: входной контроль лент по химическому составу и магнитным свойствам, термическую обработку, повторный контроль магнитных свойств, изготовление магнитных экранов и контроль их экранирующих свойств, нанесение экранов на цилиндр и контроль экранирующих свойств, готовые цилиндры представлены на рис. 4. С одной стороны может показаться, что такое количество контрольных операций излишне, однако в качестве примера следует отметить, что в процессе производства аморфной ленты возможно нарушение химического состава и режима получения ленты (уменьшение скорости охлаждения расплава на диске холодильнике), что приводит к невозможности добиться в сплаве высоких магнитных, а следовательно, и экранирующих свойств. При выполнении данной работы нами была отбракована одна партия (2 кг) из девяти (18 кг).

Результаты измерения экранирующих свойств (табл. 1, 2) показали, что измеренная величина коэффициента экранирования на больших слоях достаточно существенно превосходит расчетное значение. По всей видимости, такой результат объясняется тем, что материал экрана находится не на основной кривой намагничивания, что может приводить к увеличению его эффективной магнитной проницаемости. Одним из наиболее близких претендентов может быть безгистерезисная кривая, которая идет левее основной кривой намагничивания. Предварительные оценки, опубликованные в работе [18], позволяют достаточно уверенно утверждать, что намагничивание лент в экранирующей конструкции происходит по безгистерезисной кривой.

Таблица 2

Коэффициент экранирования двойных экранов

Количество слоев		КЭ
Внешний	Внутренний	
Первая камера		
3	4	600
5	5	850
6	6	1200
Вторая камера		
5	9	1850
6	9	1870

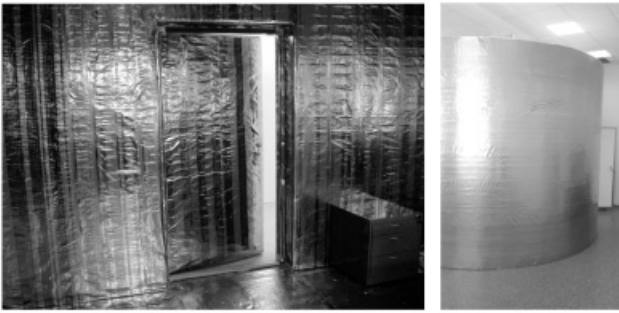


Рис. 5. Примеры использования магнитных экранов для создания магнитоэкранированных помещений: экранированная комната ЦНИИ КМ «Прометей» (слева) и ОАО ЦНИИ «Электроприбор» (справа)

В этом случае эффективная магнитная проницаемость может достигать значений в несколько миллионов, что и позволяет добиться высокого коэффициента экранирования.

Разработанные магнитные экраны нашли применение и при создании магнитоэкранированных комнат. Как было отмечено ранее, экранирование магнитного поля необходимо для проведения магниточувствительных исследований, к которым следует отнести следующие: микроскопия высокого разрешения, медицинская диагностика, проверка оборудования, биологические исследования и т. д. Кроме этого, чистые помещения создаются для изготовления изделий электронной техники. Это необходимо для исключения/предотвращения попадания частичек пыли на поверхность микросхем, процессоров и т. д., которые могут нарушить структуру многослойного покрытия, что в конечном итоге приведет к неправильному функционированию электронного устройства. За последнее десятилетие в зарубежной патентной литературе опубликован ряд патентов, в которых описывается чистая комната, в которую встроена магнитоэкранированная комната [21–23]. Необходимость создания таких помещений, по-видимому, связана с тем, что при электронной и ионной литографии требуется отсутствие магнитного поля, так как заряженная частица в магнитном поле начинает двигаться по спирали. При наличии этого явления должно накладываться ограничение на точность и качество литографии, например, при изготовлении МЭМС и НЭМС устройств. Аналогичным образом обстоит ситуация и в электронной микроскопии. Чтобы избежать девиации пучка заряженных частиц, колонна микроскопа должна быть размещена в магнитоэкранированном цилиндре [24, 25].

На основе разработанных материалов изготовлено две магнитоэкранированные комнаты (рис. 5). Одна установлена в Наноцентре на базе ЦНИИ КМ «Прометей» и предназначена для проведения особо чувстви-

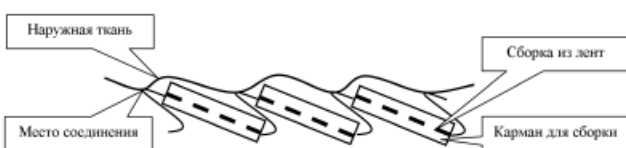


Рис. 6. Конструкция защитного жилета

тельных к воздействию магнитных полей, в том числе магнитного поля Земли, испытаний и измерений, а также для проведения медико-биологических исследований. Вторая установлена в ЦНИИ «Электроприбор» для проведения проверки магниточувствительного навигационного оборудования.

Так как данная публикация преследует своей целью показать развитие направления магнитного экранирования с помощью аморфных магнитомягких сплавов, справедливо будет упомянуть и об относительно «старых», но в целом перспективных, экранирующих образцах — жилет и кабель, которые были созданы совместно с Санкт-Петербургской академией технологии и дизайна и ООО НИИ «Севкабель», соответственно. Их относительная «невостребованность», по-видимому, связана с тем, что наши отечественные гигиенические нормативы по уровню магнитных полей не столь жесткие по сравнению с зарубежными. Например, в России допустимый уровень магнитного поля промышленной частоты в жилом помещении составляет 5 мкТл, однако, как показывает наша практика, жильцов квартир, которые сталкиваются с такой проблемой (повышенные уровни магнитных полей промышленной частоты) больше устраивает европейская норма в 0,25 мкТл. К сожалению, в этой области до сих пор работает хорошо известный принцип «спасение утопающих — дело рук самих утопающих». Мне кажется, что любой человек вряд ли бы согласился спать в непосредственной близости к распределительному щитку или над встроенной трансформаторной подстанцией. В этой связи приятно было увидеть инициативу членов Законодательного собрания Санкт-Петербурга о создании закона, защищающего права населения на комфортные условия проживания по уровням магнитных и электромагнитных полей, который был отвергнут как не соответствующий нормам закона. Однако, это уже совершенно из другой области, и необходимо вернуться к магнитным экранам.

Особенностью предлагаемой конструкции жилета явилось то, что для придания гибкости экраны были предварительно уложены в тканевые карманы и пришиты внахлест с изнаночной стороны (рис. 6). Такая конструкция обеспечивает гибкость и свободу движений. При этом обеспечивается защита основных жизненно важных органов человека (рис. 7).

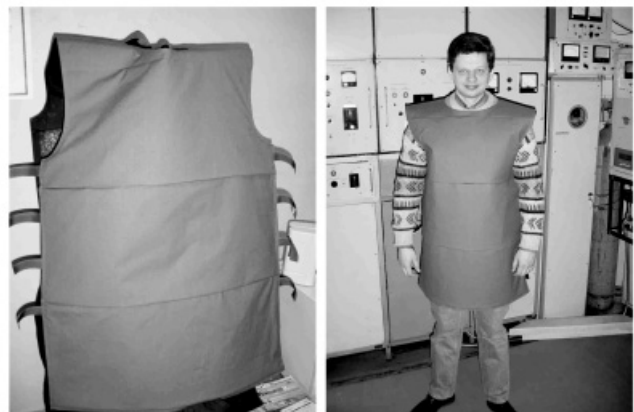


Рис. 7. Общий вид защитного жилета



Рис. 8. Общий вид магнитного экрана для силового кабеля

Далее были проведены испытания жилета для защиты сварщиков, обслуживающего персонала морских сооружений и судов. Измерения постоянного магнитного поля, создаваемого работающим аппаратом вокруг сварочного поста, показало, что максимальные уровни индукции магнитного поля до 1000 мкТл регистрируются на расстоянии 5 см от силового провода питания дуговой горелки (ток дуги 110–120 А). Испытания защитного жилета были проведены в идентичных условиях, при тех же параметрах работы сварочного поста. Результаты эксперимента показали, что внутри жилета уровни индукции составляют 70–90 мкТл. Таким образом, в области тела человека при использовании защитной одежды (рис. 6) на основе магнитных экранов из аморфных сплавов удастся существенно снизить поле, более чем в 10 раз, и оптимизировать условия труда персонала.

Измерения магнитного поля частотой 50 Гц вокруг силовых кабелей марки АВВГ 4×24 (рис. 8, 9) показали, что максимальные уровни индукции магнитного поля до 130 мкТл регистрируются на расстоянии 10 см и до 30 мкТл на расстоянии 30 см от кабеля.

Эффективность экранирования (К) определялась, как отношение индукции поля без экрана к индукции поля в той же точке при наличии экрана на кабеле.

Измерение магнитного поля двухжильного кабеля с экраном и без такового показало, что при всех

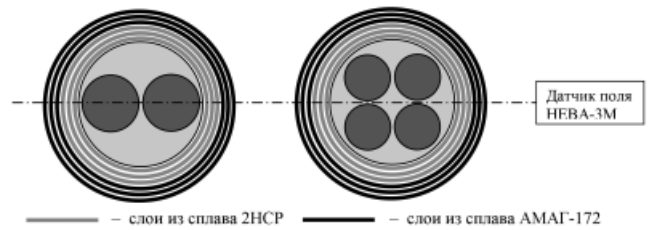


Рис. 9. Схема экранов для двухжильного (слева) и четырехжильного (справа) силового кабеля АВВГ 4×24, а также место расположения датчика поля

значениях магнитного поля и расстояниях до кабеля достигается экранирование магнитного поля. Полученные результаты показывают, что применением шестислойного экрана можно добиться снижения магнитных полей в 1,5–15 раз.

Измерение магнитного поля четырехжильного кабеля с экраном и без такового показало, что при всех значениях магнитного поля и расстояниях до кабеля также достигается экранирование магнитного поля (табл. 3).

Из табл. 3 следует, что величина тока, протекающего по каждой жиле кабеля, превышает номинальное значение тока для кабеля АВВГ 4×24, использованного в качестве основы, в 2–2,5 раза. При этом максимальное значение индукции магнитного поля возле неэкранированного участка кабеля превышает 100 мкТл, а возле экранированного участка не превышает 0,2 мкТл. Таким образом, путем экранирования удастся снизить уровень магнитного поля в 100–500 раз [26, 27]. Это существенно расширяет области применения такого кабеля.

Дальнейшие испытания защитного кабеля проводились на предмет экранирования магнитных полей микросекундных импульсных токов [28], показавшие, что шестислойный экран эффективно экранирует магнитные поля импульсных токов величиной до 800 А. Эффективность экранирования составляет при этом более 50, а при токах до 700 А эффективность экранирования составляет более 250.

Таким образом, можно заключить, что разработанный экран для силового кабеля эффективно защищает не только от магнитных полей промышленной частоты, но и магнитных полей импульсных микросекундных токов.

Таблица 3

Индукция магнитного поля на различных расстояниях от оси четырехжильного экранированного и неэкранированного силового кабеля для различных значений тока

Ток, А	Расстояние до оси кабеля, см									
	0	5	15	30	50	0	5	15	30	50
	Индукция магнитного поля, мкТл									
	Неэкранированный участок					Экранированный участок				
120	>100	10	1,1	1,0	0,9	0,2	0,12	0,1	0,1	–
150	>100	15	1,0	*–	–	–	0,15	–	–	–
160	>100	20	1,1	–	–	–	0,2	–	–	–

* Знак «–» означает, что результат измерения не фиксировался в связи с тем, что значение поля на соответствующем расстоянии от экранированного кабеля не превышало общего магнитного фона возле испытательного стенда.

Перспективы применения магнитных экранов

В докладе Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) магнитные и электромагнитные поля искусственного/техногенного происхождения рассматриваются как один из неблагоприятных факторов [29, 30]. В связи с этим актуальной является разработка новых более эффективных защитных материалов от электромагнитных полей радиочастотного диапазона и магнитных полей промышленной частоты, удовлетворяющих современным требованиям директивы совета Европы № 89/336, а также российским СанПиН и ГОСТам по электромагнитной совместимости (ЭМС) [31]. Без выполнения этих требований невозможна сертификация и соответствующая реализация 36 обобщенных групп продукции, в частности, средств связи, радиолокационных и радионавигационных станций; транспортных средств и оборудования транспортных средств, в том числе авиационной и морской техники; линий электропередачи и электрических подстанций.

Активно развиваются инновационные методы медицинской диагностики, основанные на регистрации слабых магнитных полей от биологических объектов с помощью SQUID-магнетометров [32]. Величина регистрируемых полей составляет единицы пикатесла, и для регистрации таких малых полей требуются специальные помещения — экранированные комнаты. Например, в Германии в головном метрологическом институте PTB совместно с корпорацией Siemens создана магнитоэкранированная комната на основе традиционного пермаллоя [33, 34]. Эта комната, состоящая из восьми слоев пермаллоя, экранирует внешнее поле земли в 10^5 раз, а при подключении системы активного подавления — в 10^6 раз. В России подобного рода магнитоэкранированные комнаты отсутствуют. Связано это в первую очередь с тем, что отсутствуют материаловедческие разработки, на основании которых имелась бы возможность создавать подобного рода объекты в нашей стране.

Следует отметить также, что мировое сообщество стоит на пороге осуществления важнейшего проекта — пилотируемый полет человека в космос на Марс или Луну. Космическое пространство — это среда, в которой отсутствует магнитное поле. Вся эволюция биологических организмов на Земле прошла в присутствии магнитного поля. Его отсутствие может крайне неблагоприятно сказаться на самочувствии пилотов при дальних пилотируемых полетах. Проведенные в 1969 г в НАСА эксперименты перед запуском космонавтов на Луну показали, что в течение 10 дней видимых изменений не происходит [35]. Однако публикаций о более длительном пребывании человека в «нулевом» магнитном поле до сих пор не приводилось. В связи с этим ИМБП РАН, являясь головным предприятием Федерального космического агентства по направлению космической медицины и биологии, провел первый этап экспериментов по полету человека на Марс — проект МАРС-500. В этом проекте подготовленная команда провела 500 дней в замкнутом пространстве, имитирующем пилотируемый космический полет на Марс, проведение модельных экспериментов на пла-

нете Марс и возвращение на Землю. На следующем этапе предполагается провести исследования по длительному пребыванию человека в условиях «нулевого» магнитного поля [36]. Использование для этих целей традиционных магнитомягких сплавов пермаллового класса может привести к существенному усложнению конструкции и, как следствие, привести к значительному удорожанию такого рода исследовательского комплекса.

Современные средства связи и навигации, такие как, волоконно-оптические гироскопы и антенные системы, должны обеспечивать повышенную точность и чувствительность, а также узкую диаграмму направленности. Для выполнения этих требований необходимо использовать материалы с высокими магнитными свойствами.

Заключение

Представленные данные в части разработки и исследования конструкции магнитного экрана приведены достаточно поверхностно. Однако и по ним можно судить, что коллективом пройден достаточно большой путь.

Можно ли это назвать инновацией и как теперь все это «упаковать», как говорят современные менеджеры, для выпуска на рынок и проведения мероприятий по коммерциализации разработок, не знаю. Знаю одно, что мы в процессе всего этого пути набили много «шишек» и представляем собой достаточно уникальный коллектив, который совместными усилиями способен создавать уникальный для российского рынка продукт. Готовы ли мы отдать все это какому-либо инвестиционному фонду для дальнейшей коммерциализации, также не знаю. Знаю одно, что имеется реальная возможность развить это в стенах нашего института. Тем более, что в разделе практическая реализация ясно показано, что сам по себе магнитный экран, как мы считали раньше, не является конечным продуктом, а на рынке востребованы конкретные изделия — камеры, боксы, комнаты. А это новые перспективы и новые горизонты, так как наша практика показывает, что там еще много научных и технических вопросов, требующих дальнейшей проработки.

Список использованных источников

1. П. А. Кузнецов, А. Ю. Аскинази, Б. В. Фармаковский. Материалы на основе аморфных магнитомягких сплавов как средство защиты от магнитных полей промышленной частоты // Инновации, № 5, 2004.
2. В. А. Говорков. Электрические и магнитные поля. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1968.
3. H. D. Arnold, G. W. Elme. Permalloy, a new magnetic material of very high permeability // Bell System Technical Journal, V. 2, i3, July, 1923.
4. В. Эсмарх. Исследование магнитной защиты слоистых систем. М.: типография Г. Лисснера и Д. Собко, 1910.
5. Ю. Я. Реутов. Классические магнитные экраны. Екатеринбург: УрО РАН, 2006.
6. В. В. Садчиков, З. Г. Прудникова. Аморфные материалы в электромагнитных экранах // «Сталь», № 4, 1997.
7. J. Petzold. Advantages of softmagnetic nanocrystalline materials for modern electronic applications // J. Magn. Magn. Mater., V. 242–245, 2002.

8. J. Petzold. Application of nanocrystalline softmagnetic materials for modern electronic devices//Scripta Materialia, V. 48, № 7, 2003.
9. И. В. Золотухин, Ю. Е. Калинин, О. В. Стогней. Новые направления физического материаловедения: учебное пособие. Воронеж: Издательство Воронежского государственного университета, 2000.
10. Ю. В. Ефимов, Г. Варлимонт, Г. Г. Мухин и др. Метастабильные и неравновесные сплавы/Под ред. Ю. В. Ефимова. М.: Металлургия, 1988.
11. Быстрозакаленные металлы/Под ред. Б. Кантора; перевод с англ. под ред. А. Ф. Прошкина//Сборник научных трудов. М.: Металлургия, 1983.
12. Flexible electromagnetic shield comprising interlaced glassy alloy filaments. Патент США 4126287 от 21.11.1978. Владелец: Allied Chemical Corporation. Изменен: 21.06.1994.
13. Magnetic shielding garment for electro-biologic measurements. Патент США 5578359 от 26.11.1996. Владелец: Hewlett-Packard.
14. Magnetic shielding material. Патент США 5045637 от 3.09.1991. Владелец: Nippon Steel Corp.
15. П. А. Кузнецов, Б. В. Фармаковский, А. Ю. Аскинази, Я. В. Орлова, Т. В. Песков. Патент РФ «Магнитный и электромагнитный экран» № 2274914 от 20.04.2006. Бюл. изобр. № 11.
16. В. Ш. Суфьяров, П. А. Кузнецов, О. В. Васильева, С. А. Маннинен, Л. В. Галаткина. Влияние упругих напряжений на магнитные свойства аморфного сплава $Co_{72}Fe_5Ni_{10}Cr_{1.5}Mn_{1.5}Si_7B_3$ //Современные металлические материалы и технологии (СММТ'11). 9-я международная научно-техническая конференция, 22–24 июня 2011 г. СПб: СПбГПУ, 2011.
17. П. А. Кузнецов, О. В. Васильева, С. А. Маннинен. Влияние упругих изгибных деформаций на магнитные и экранирующие свойства рулонного магнитного экрана//Вопросы материаловедения, № 4, 2011.
18. С. А. Гудошников, С. Н. Венедиктов, Ю. Б. Гребенщиков, П. А. Кузнецов, С. А. Маннинен, О. Н. Криволапова, К. А. Труханов, О. С. Круглов, А. В. Спасский. Экранирующая камера для ослабления магнитного поля Земли на основе рулонных магнитных материалов//Измерительная техника, № 3, 2012.
19. П. А. Кузнецов, С. А. Маннинен, О. В. Васильева, С. А. Гудошников. Магнитоэкранирующая камера на основе рулонных магнитных экранов для проведения магниточувствительных исследований//9-й Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. Труды симпозиума, 13–16 сентября 2011 г. СПб., 2011.
20. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.4. Руководство пользователя — Производственный кооператив ТОР. СПб., 2006.
21. I. Noboru. Magnetically shielded room for clean room and magnetic shielding panel, JP09283967, Shimizu Corp, 03.10.1997.
22. Miyake Nobuyuki и др. Shield clean room, JP9195557, TAISEI Corp, 29.07.1997.
23. Патент JP8288688. Magnetic shield hepa filter and magnetic shield room using the same (01.11.1996). Ishikawa Noboru, Sekiguchi Takeshi (Shimizu Corp.).
24. M. Nakasuji и др. Charged-particle-beam microlithography apparatus and methods including shielding of the beam from extraneous magnetic fields. US patent 6614034, 02.09.2003, Nikon Corp.
25. S. Hiroshi. Charged particle beam device, JP3095844, 22.04.1991, Jeol Ltd.
26. П. А. Кузнецов, А. Ю. Аскинази, Б. В. Фармаковский, Г. Г. Середа, В. В. Миллер, В. Н. Никитина, Г. Г. Ляшко. Силовой кабель с защитным экраном из аморфных магнитомягких сплавов//Труды 6-го Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, СПб., 21–24 июня, 2005 г.
27. П. А. Кузнецов, Т. В. Песков, А. В. Савич, А. С. Саргсян. Using calculus of approximation for creation of composite materials which work effectively in power frequency magnetic fields//Book of abstracts «Advanced processing for novel functional materials — APNFM 2008», 23–25 January 2008. Dresden, Germany.
28. П. А. Кузнецов, А. Ю. Аскинази, А. А. Воршевский, Фам Тхань Хьет, А. М. Агафонов. Экранирование магнитных полей импульсных микросекундных токов силового кабеля с помощью защитного экрана//Сборник докладов 9-й российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности «ЭМС-2006». СПб., 2006.
29. Интернет-сайт Всемирной организации здравоохранения. <http://www.who.int/ru>.
30. Ю. Г. Григорьев/ Электромагнитное загрязнение окружающей среды как фактор воздействия на человека и биоэкологии//Материалы научно-практической конференции «Электромагнитная безопасность. Проблемы и пути решения», г. Саратов, 28–30 августа 2000 г.
31. В. С. Кармашев. Электромагнитная совместимость технических средств: справочник. М., 2001.
32. Y. Seki, A. Kandori, D. Suzuki, M. Ohnuma. Open-type magnetocardiograph with cylindrical magnetic shield//APPLIED PHYSICS LETTERS 86, 243902. 2005.
33. J. Bork, H.-D. Hahlbohm, R. Klein, and A. Schnabel. The 8-layered magnetically shielded room of the PTB: Design and construction//Proceedings of 12-th International Conference on Biomagnetism, Helsinki University of Technology. Espoo, Finland. 2001.
34. F. Thiel, A. Schnabel, S. Knappe-Grüneberg, D. Stollfuß, and M. Burghoff. Demagnetization of magnetically shielded rooms//REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 78, 035106. 2007.
35. В. И. Копанев, А. В. Шакула. Влияние гипомангнитного поля на биологические объекты. Л.: Наука, 1985.
36. К. А. Труханов и др. Наземное моделирование гипомангнитных условий, характерных для межпланетного пространства, с целью формирования концепции обеспечения гипомангнитной безопасности человека в пилотируемых космических аппаратах//Сборник докладов Космического форума 2011, президиум РАН. Москва, 18–21 октября, 2011.

Magnetic shields based on amorphous alloys

P. A. Kuznetsov, PhD, Head of Research Department «Nanomaterials and Nanotechnology», CRISM «Prometey», St. Petersburg, Russia.

The paper presents the results of research and development in the field of amorphous magnetic alloys application to create magnetic shields to protect against the static and alternating magnetic fields, performed by author's team in the last 10 years. It is shown that the magnetic shields made of Co-based amorphous magnetic alloys passed the appropriate heat treatment to increase the source of the magnetic properties can be more efficient than permalloys magnetic shields. The design of the magnetic screen based on amorphous alloy ribbons has been developed and patented. Examples of the practical implementation of the research and development are given.

Keywords: screening, magnetic field, amorphous magnetic materials, rapid solidification, melt spinning, magnetic permeability, coercivity, unhyeresis magnetization curve, the magnetic shield, hypomagnetic chambers.