## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

# Исследование потерь в магнитомягких магнитопластах в переменных магнитных полях

Е.В. Милов, И.А. Сипин, В.Н. Милов, А.С. Андреенко<sup>*a*</sup>, И.А. Балан

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики и физики конденсированного состояния. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: <sup>a</sup>asa@phys.msu.ru

Статья поступила 08.08.2016, подписана в печать 24.10.2016.

Проведены экспериментальные исследования потерь энергии при частотном перемагничивании в магнитомягких магнитопластах и промышленно выпускаемых электротехнических сталях. Исследования проводились на ряде образцов магнитопластов, отличающихся технологией изготовления и образцах листовой электротехнической стали различной толщины. Статические и динамические магнитные свойства образцов измерялись на вибрационном магнитометре и специально изготовленной установке соответственно. Установлено, что исследованные в работе образцы магнитопластов имели относительно высокий уровень гистерезисных потерь, связанных с высокой коэрцитивной силой, достигающей 4–5 Э, по сравнению с электротехническими сталями. В то же время потери на перемагничивание вследствие токов Фуко в магнитопластах существенно ниже, чем в электротехнических сталях. Результаты измерений показали, что при высоких частотах перемагничивания, в частности при использовании в высокооборотных электродвигателях, магнитопласты могут быть конкурентоспособны в сравнении с электротехническими сталями.

*Ключевые слова*: магнитопласты, частотное перемагничивание, намагниченность, потери энергии, токи Фуко, коэрцитивная сила, потери при гистерезисе.

УДК: 537.623, 537.624. РАСS: 75.50.Вb, 75.60.Еj.

## Введение

На современном этапе развития техники одной из основных задач является разработка энергоэффективных устройств, позволяющих существенно экономить энергетические ресурсы планеты. В частности, ключевое значение приобретает разработка электрических машин (ЭМ) различного назначения с широким диапазоном выходной мощности и с высоким коэффициентом полезного действия (КПД). Для достижения высокого КПД необходимо решать ряд конструкторских задач и разрабатывать новые технологии изготовления электрических машин.

Одним из путей повышения КПД является уменьшение потерь энергии при периодическом перемагничивании элементов конструкции электрических машин (роторов или статоров) при их работе. Можно выделить три основные причины, определяющие основные потери при работе ЭМ: механические потери, потери, обусловленные намоткой статоров и роторов, и потери непосредственно в магнитных материалах, из которых изготовлены ЭМ. Первые два источника в основном обусловлены конструкцией ЭМ, а потери в магнитных материалах, естественно, обусловлены их магнитными и электрическими свойствами. В настоящей работе первые два источника потерь в ЭМ не рассматриваются,

Количественное соотношение между источниками потерь существенно зависит от мощности ЭМ, и по экспертным оценкам [1, 2] потери непосредственно в магнитных материалах находятся в интервале 29–59% от общей величины потерь. Потери в электротехническом железе, из которого, как правило, изготавливают статоры и роторы, включают потери энергии за счет гистерезиса и в результате возникновения дополнительных токов (токов Фуко) в результате периодического перемагничивания.

Обычно при производстве ЭМ потери в сердечниках роторов и статоров стремятся уменьшить за счет использования электротехнической стали с повышенными магнитными свойствами и уменьшением толщины листов, из которых собирается сердечник. Однако есть альтернативный вариант, заключающийся в применении в качестве сердечников магнитопластов из магнитомягких порошков на основе железа, в которых априори можно ожидать увеличения электросопротивления и, следовательно, уменьшения токов Фуко, при незначительном ухудшении магнитных свойств. Именно исследованию магнитных и электрических свойств магнитомягких магнитопластов в сравнении с аналогичными свойствами электротехнической стали посвящена настоящая работа.

### 1. Экспериментальные методики и образцы

Для измерения магнитных свойств магнитомягких материалов использовался вибрационный магнитометр, позволяющий проводить измерения намагниченности в магнитных полях до 21 кЭ при комнатной температуре. Схема и описание магнитометра приведены в работе [3].

Не останавливаясь подробно на рабочих параметрах магнитометра, отметим, что для проведения измерения магнитомягких материалов и точного определения коэрцитивной силы в них в магнитометре был предусмотрен режим нелинейного изменения поля. Зависимость изменения поля от времени состояла из участков функции  $\cos(x)$ , скомбинированных на интервале фаз  $(0-\pi/2)$  таким образом, чтобы при приближении поля к нулю его производная по времени также стремилась к нулю. Иными словами, для точного измерения малых значений коэрцитивной силы на критических участках скорость развертки магнитного поля уменьшается без потери монотонности изменения магнитного поля.

Для исследования процессов перемагничивания и измерения магнитных потерь в магнитомягких материалах была разработана и создана установка, позволяющая измерять эти характеристики в замкнутой магнитной цепи, изготовленной из исследуемого материала. Блок-схема измерительной установки приведена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема измерительной установки: 1 - два параллельно соединенных блока питания Mastech HY3040Y,  $U_{\text{max}} = 30$  B,  $J_{\text{max}} = 40$  A; 2 - усилитель PH2500M,  $U_{\text{max}} = 55$  B,  $J_{\text{max}} = 30$  A; 3 - нагрузочное сопротивление,  $R_{\text{load}} = 1.25$  Ом; 4 -шунт,  $R_{\text{shunt}} = 0.1$  Ом; 5 -двухканальный АЦП разрядностью 16 бит и частотой 2.5 МГц; 6 - IBM PC на базе Intel Pentium 4, 3.00 ГГц; 7 -трансформатор развязки сети; 8 -гальваническая развязка, подключенная по интерфейсу USB; 9 -ЦАП 16 бит PCM2704; 10 -блок обратной связи; 11 -исследуемый образец

Установка создавалась с расчетом на измерение материалов с низкой магнитной проницаемостью. Как следствие, возникала необходимость в достижении высокого уровня напряженности магнитного поля. Для этого был использован линейный аудио усилитель низких частот PH2500M 2, подвергшийся значительной модификации. Были изменены фильтрующие цепи и цепи обратной связи, что позволило увеличить коэффициент усиления и расширить частотный диапазон до 30 кГц. В процессе доработки были заменены комплементарные пары транзисторов на выходе усилителя на 2SC5200 (n-p-n) 2SA1943 (p-n-p). Всего на выходе используется четыре комплементарные пары в параллельном включении. Таким образом, учитывая, что паспортная рассеиваемая мощность каждого транзистора 150 Вт, максимальная рассеиваемая мощность усилителя составила 600 Вт при постоянном выходном токе и 1200 Вт при переменном. Питание осуществлялось двумя параллельно соединенными блоками питания Mastech НY3040E, это позволило получить на выходе усилителя максимальный ток 30 А и напряжение 55 В.

Сигнал на усилитель приходит с 16-битного ЦАП 9 на базе PCM2704, подключенного по интерфейсу USB через гальваническую развязку 8 к IBM PC. Управление сигналом с помощью компьютера позволило реализовать процедуру предварительного размагничивания образца, а также подавать сигнал определенной продолжительности, амплитуды и частоты. Это позволяет проводить измерения при больших токах, невозможных в стационарном режиме из-за перегрева образца или усилителя.

Усилитель подключен к исследуемому образцу 11 через нагрузочное сопротивление мощностью 1.5 кВт и токовый шунт (1% 0.1 Ом). Образец представляет собой тороид, на который намотана катушка (100–200 витков), создающая напряженность магнитного поля H, и измерительная катушка (5–12 витков), а также катушка обратной связи (2–5 витков).

Измерительная катушка и токовый шунт подключены к двухканальному АЦП 5 разрядностью 16 бит и частотой 2.5 МГц. Данное устройство представляет собой PCI-плату производства компании «Инструментальные системы», подключенную к IMB PC. Это решение позволяет проводить все операции по обработке сигналов в цифровом виде. В силу нелинейной зависимости B(H) в измеряемых материалах временные зависимости индукции, ЭДС индукции и напряженности поля становятся несинусоидальными даже при строго синусоидальной зависимости напряжения от времени на выходе генератора. Наличие высших гармоник в сигнале ЭДС ведет к увеличению мощности потерь в материале за счет токов проводимости, поэтому измерения магнитных потерь должны вестись при строго синусоидальной временной зависимости ЭДС индукции. Только в этом случае можно говорить об измерениях величины потерь на определенно заданной частоте. Для того чтобы обеспечить измерения при синусоидальной зависимости индукции от времени, в установку был введен специально сконструированный блок отрицательной обратной связи, который позволил контролировать величину индукции в образце, передавая на ЦАП сигнал, пропорциональный производной по времени задаваемой временной зависимости индукции.

Для работы установки была разработана программа, позволяющая снимать амплитудно-частотные характеристики образца в автоматическом режиме.

Электросопротивление кольцевых образцов определялось четырехконтактным методом, при этом токовые контакты подключались к диаметрально противоположным точкам кольца, а падение напряжения измерялось на двух четырехсантиметровых отрезках хорд с помощью нановольтметра Agilent 34420A. Результаты двух измерений на хордах усреднялись. Величина пропускаемого тока составляла от 20 мА до 0.1 А и контролировалась мультиметром Keithley 2000.

Образцы прессованного металлопласта для измерения на вибрационном магнитометре вырезались с помощью электроэрозии и имели форму вытянутых прямоугольных параллелепипедов, для уменьшения влияния размагничивающего фактора. Для исследования свободного порошка, не подвергнутого прессованию, изготавливались образцы, имеющие насыпную плотность. Для этого частицы металлического порошка склеивались эпоксидной смолой в форме дисков диаметром 3 мм и высотой 1 мм. Для крупных металлических порошков имелась возможность также изучения отдельных частиц.

Образцы для измерения в замкнутой магнитной цепи создавались методом прессования, которое осуществлялось с помощью гидравлического пресса с использованием твердосплавной оснастки. Давление прессования могло контролироваться и устанавливалось от 1 до 10<sup>4</sup> кг/см<sup>2</sup>. В табл. 1 представлены изготовленные образцы из двух видов железного порошка Fe № 1 и Fe № 2. Оба порошка были получены методом газового распыления чистого железа. Средняя величина частиц обоих порошков составляла 100 мкм, максимальная величина частиц — 200 мкм. Частицы второго порошка после изготовления покрывались полимерным слоем в слабых растворах полиэфирных смол. Весовая доля этих смол в получившемся изолированном порошке не превышала 0.2%. Кроме того, для изготовления образцов применялся промышленно выпускаемый порошок Fe + 6.5%Si + 4.5%Cr со средним размером частиц 142 мкм. Для улучшения механических характеристик порошки смешивались с полиэфирной связкой с весовым содержанием от 0 до 3%. После прессования все образцы подвергались термической обработке при 200°C.

Все образцы имели форму тороидальных колец с одинаковым внешним и внутренним диаметрами, но имели разброс порядка 20% по высоте, что учитывалось при дальнейших измерениях, средняя высота составляла 5 мм.

## 2. Экспериментальные результаты 2.1. Измерения плотности и электросопротивления в магнитопластах

Магнитные и электрические свойства магнитопластов зависят от технологии их изготовления, в частности от количества полимерной связки и усилия прессования. На рис. 2 приведена зависимость плотности порошка железа № 1 (см. табл. 1) от усилия прессования при весовой концентрации полимерного связующего 2%. Из рисунка видно, что при усилии прессования от 0 до 5.10<sup>3</sup> кг/см<sup>2</sup> наблюдается линейный рост плотности, а при усилии прессования от 5 до 10<sup>4</sup> кг/см<sup>2</sup> плотность образцов практически не меняется.

Таблица 1

Магнитомягкий порошок	Количество полимерной связки, %	Давление прессования, 10 <sup>3</sup> кг/см <sup>2</sup>	Количество образцов	Внутренний диаметр, мм	Внешний диаметр, мм
Fe № 1	1.5	8	2	36.9	40.9
	2	1	2		
		3	2		
		4	2		
		5	2		
		6	2		
		8	4		
		10	2		
	2.5	8	3		
	3 (+10% TiO <sub>2</sub> )		2		
Fe № 2	0		2		
	2		2		
Fe + 6.5% Si + 4.5% Cr	2		2		

Изготовленные образцы



Рис. 2. Зависимость плотности магнитопласта от усилия прессования

В то же время эксперимент показал, что количество связующего полимера практически не влияет на плотность прессуемых при давлении  $8 \cdot 10^3$  кг/см<sup>2</sup>. Как видно из табл. 2, зависимость удельного электросопротивления образца железа № 1, частицы которого предварительно не были покрыты изолирующим слоем, от усилия прессования в пределах от 5 до 10<sup>4</sup> кг/см<sup>2</sup> также отсутствует, за исключением существенного падения сопротивления при максимальном усилии прессования в 10<sup>4</sup> кг/см<sup>2</sup>.

При использовании порошка железа № 2, частицы которого изначально покрыты изолирующим слоем, образец, спрессованный без связки, имеет сопротивление в 2–3 раза большее, чем у лучших образцов из порошка железа № 1 с 2%-й связкой. При увеличении количества связки до 2% при изготовлении образцов из порошка железа № 2,

Таблица 2

Nº	Марка	Давление, 10 <sup>3</sup> кг/см <sup>2</sup>	Образец	Macca, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	R <sub>spec</sub> , Ом∙см
1	Fe № 1 + 1.5% ЭП	8	1.1	7.61	6.34	0.74
			1.2	7.89	6.34	0.71
		1	2.4.1	6.04	4.91	_
			2.4.2	5.72	4.93	_
		3	2.5.1	6.63	5.66	_
			2.5.2	6.88	5.65	_
		4	2.6.1	6.98	6.02	—
			2.6.2	7.05	6.05	—
2	Fe №1 2% ЭП	5	2.7.1	7.26	6.26	_
			2.7.2	7.32	6.25	_
		6	2.1.1	8.02	6.26	1.94
			2.1.2	7.93	6.19	1.57
		8	2.2.1	7.88	6.33	2.04
			2.2.2	6.39	6.32	1.22
			2.2.3	7.20	6.28	2.20
			2.2.4	8.04	6.40	2.88
		10	2.3.1	8.04	6.34	0.71
			2.3.2	8.19	6.46	1.51
3	Fe № 1 + 2.5% ЭП	8	3.1	7.49	6.27	2.22
			3.2	7.88	6.57	2.04
			3.3	7.41	5.84	2.44
4	Fe № 1 + 3% лак + 10% TiO <sub>2</sub>	8	4.1	6.06	5.21	22.21
			4.2	8.17	5.27	3.77
5	FeSiCr + 2% ЭП	8	5.1	6.47	5.41	26.62
			5.2	6.55	5.44	40.13
6	Fe №2 + 2% ЭП	8	6.1	8.31	6.43	1058.00
			6.2	7.97	6.34	1762.20
7	Fe № 2	8	7.1	8.01	7.06	6.67
			7.2	8.31	7.02	38.33

Состав, плотность и удельное сопротивление образцов металлопластов

сопротивление вырастает более чем на 2 порядка.

Наибольшее сопротивление было зафиксировано на образце № 6.2 и составило 1762 Ом.см при плотности 6.34 г/см<sup>3</sup>.

## 2.2. Магнитные потери в тонколистовых электротехнических сталях

Для проведения сравнительного анализа магнитных потерь в магнитомягких магнитопластах и в промышленно выпускаемых электротехнических сталях были измерены магнитные потери в двух образцах электротехнических сталей марок 2412 (толщина листа 0.35 мм, ГОСТ 21427.2-83, производства ЛНМК, г. Липецк) и 2421 (толщина листа 0.18 мм, производства Ашинского завода, Челябинская обл., г. Аша).

На рис. З показаны петли гистерезиса двух упомянутых марок электротехнических сталей, измеренные на частоте 10 Гц. Из рисунка видно, что петля гистерезиса для образца стали толщиной 0.35 мм находится внутри петли гистерезиса образца стали толщиной 0.18 мм. Соответственно потери перемагничивания для стали толщиной 0.35 мм существенно меньше, чем для тонколистовой стали 0.18 мм. Следует отметить, что петли гистерезиса, измеренные на частоте 10 Гц, можно считать квазистатическими, так как потери на гистерезис на этой частоте намного превышают индукционные потери. Коэрцитивные силы, определенные из данных петель, близки к величинам коэрцитивной силы материалов согласно ГОСТ.

На рис. 4 представлены петли гистерезиса для тех же образцов, измеренные на частоте 800 Гц. В этом случае определяющую роль играют потери, связанные с индукционными токами. В этом случае напряженность магнитного поля H в образце является суммой приложенного магнитного поля  $H_{\rm ext}$ и поля, порожденного индукционными токами  $H_{\rm ind}$ .

Как видно из рис. 4, петля гистерезиса, построенная в координатах  $B(H_{\rm ext})$ , уже не совпадает со статической петлей гистерезиса, а определенные из нее коэрцитивные силы существенно превышают истинные коэрцитивные силы, присущие материалу образца. Площадь петель гистерезиса соответствует энергии потерь на цикл перемагничивания с учетом джоулевых потерь на токи проводимости в образце. Как и следовало ожидать, высокочастотные потери в образцах из тонколистовой стали 0.18 мм существенно меньше, чем потери в образцах стали с толщиной листа 0.35 мм.

В процессе выполнения настоящей работы было проведено исследование 9 образцов магнитопластов, отличающихся усилием прессования, концентрации



Рис. 3. Петли гистерезиса для образцов сталей 2412 и 2421 (*a*), части петель гистерезиса вблизи нулевого магнитного поля и точного определения коэрцитивной силы (*б*, *в*). Сплошная линия — сталь 2421, 0.18 мм, пунктир — сталь 2412, 0.35 мм



Рис. 4. Петли гистерезиса образцов сталей 2412 (сплошная линия) и 2421 (штриховая), измеренных на частоте 800 Гц



Рис. 5. Петли гистерезиса образца Fe № 2 без полимерной связки на частоте 10 Гц



Рис. 6. Зависимость магнитной проницаемости образцов: *а* — от величины магнитной индукции (кривая 1 — Fe № 2 без связки, 2 — Fe № 2+2% ЭП, 3 — FeSiCr +2% ЭП, 4 — Fe № 1+2.5% ЭП, 6 — Fe № 1+2% ЭП, 8 — Fe № 1+1.5% ЭП, 9 — Fe № 1+3% ЭП+10% TiO<sub>2</sub>, 5 — Fe № 1+2% ЭП, 7 — Fe № 1+2% ЭП; образцы 1-4, 6, 8, 9 получены при усилии прессования 8 · 10<sup>3</sup> кг/см<sup>2</sup>, 5 — при 10<sup>4</sup> кг/см<sup>2</sup>, 7 — при 6 · 10<sup>3</sup> кг/см<sup>2</sup>); 6 — от весовой концентрации связки для образцов металлопласта на основе Fe № 1, при усилии прессования 8 · 10<sup>3</sup> кг/см<sup>2</sup>

связки и маркой использованного порошкового железа (см. табл. 2). Наибольшей магнитной проницаемостью обладает образец Fe № 2, частицы которого покрыты изолирующим слоем, спрессованный без дополнительного полимерного связующего при давлении 8 · 10<sup>3</sup> кг/см<sup>2</sup>. Его петля гистерезиса представлена на рис. 5, *а*.

Из рис. 5 видно, что коэрцитивная сила равняется 3.9 Э, а магнитная индукция достигает значения 16 кГс в поле 200 Э, что практически совпадает с соответствующими значениями для шихтованной электротехнической стали.

Из измерений намагниченности были определены зависимости магнитной проницаемости от величины магнитной индукции для всех образцов магнитопластов (рис. 6, *a*). Максимальная магнитная проницаемость изменяется в пределах от 20 до 500. Для всех зависимостей характерен быстрый спад проницаемости при возрастании индукции.

Для образцов, полученных при одинаковом усилии прессования  $8\cdot 10^3$  кг/см<sup>2</sup>, изготовленных на основе железного порошка № 1, можно проследить зависимость проницаемости от весовой концентрации связки, изображенную на рис. 6, *б*, где сплошная линия — это аппроксимирующая экспонента.

#### 3. Обсуждение результатов

Как уже отмечалось выше, потери при частотном перемагничивании магнитомягких материалов определяются двумя основными причинами — потерями за счет магнитного гистерезиса и потерями за счет Джоулева тепла, индуцированного токами Фуко. Оба вклада определяются разными условиями перемагничивания. Так, потери за счет гистерезиса, как следует из рассмотрения петли гистерезиса, определяются амплитудой внешнего магнитного поля. Потери же в результате действия токов Фуко линейно увеличиваются с ростом частоты перемагничивания, и уменьшаются с увеличением электросопротивления магнитомягкого материала. На рис. 7, а, б приведены зависимости удельной энергии потерь перемагничивания магнитопластов и стали 2412



*Рис.* 7. Зависимость удельной энергии потерь перемагничивания за период от частоты при амплитуде индукции: 5 кГс (*a*) (кривая *1* — Fe № 1 + 2% ЭП, *2* — Fe № 1 + 2% ЭП, *3* — Fe № 1 + 2% ЭП, *4* — сталь 2412, 0.35 мм, *5* — Fe № 2 + 2% ЭП, *6* — Fe № 2 без ЭП, образцы *2*, *5*, *6* получены при усилии прессования 8 · 10<sup>3</sup> кг/см<sup>2</sup>, *1* — при 6 · 10<sup>3</sup> кг/см<sup>2</sup>, *3* — при 10<sup>4</sup> кг/см<sup>2</sup>); 10 кГс (*6*) (кривая *1* — Fe № 2 без ЭП, *2* — сталь 2421, 0.18 мм, *3* — сталь 2412, 0.35 мм, *4* — Fe № 2 + 2% ЭП, *5* — Fe № 1 + 2% ЭП, 8 · 10<sup>3</sup> кг/см<sup>2</sup>, *6* — Fe № 1 + 2% ЭП, 10<sup>4</sup> кг/см<sup>2</sup>)

с толщиной листа 0.18 и 0.35 мм от частоты при амплитудах индукции магнитного поля 5 и 10 кГс соответственно.

Как видно из рис. 7, *a*, наименьшие магнитные потери среди образцов металлопластов наблюдаются в образцах порошкового железа № 2 без эпоксидного связующего. Более высокими потерями обладает железо № 2 с 2% эпоксидного связующего. Образцы, изготовленные из порошкового железа № 1, обладают очень близкими значениями магнитных потерь, которые слабо зависят от усилия прессования и количества связующего.

Такие же тенденции отмечаются и на рис. 7, б. Образцы электротехнической стали имеют существенно меньшие потери на исследуемых частотах до 1.5 кГц за счет существенно меньших гистерезисных потерь. Это согласуется с измеренными значениями коэрцитивной силы порядка 5 Э для металлопластов и 0.5 Э для электротехнических сталей. Что касается частотно зависимой части удельной энергии потерь перемагничивания, все металлопласты имеют меньшую долю индукционных потерь, чем сталь с толщиной листа 0.35. Металлопласт из порошкового железа № 2 без использования полимерной связки имеет значительно меньшие частотно-зависимые потери, чем представленный образец электротехнической стали с толщиной листа 0.18 мм. Следует отметить, что величина частотно зависимых потерь образцов металлопластов не находится в очевидной корреляции с их удельным электросопротивлением. Так, образец из железа № 2 при отсутствии связующего компонента имеет на порядок более низкое сопротивление, чем такой же образец с 2% связующего, однако он же обладает меньшими частотно-зависимыми потерями. Среди образцов изготовленных их порошкового железа № 1 также не выявляется очевидной зависимости между удельным сопротивлением и величиной энергии частотно-зависимых магнитных потерь. Объясняется это, по-видимому, тем, что тепловые потери, обусловленные протеканием по объему образца вихревых токов, намного меньше, чем тепловые потери на вихревые токи, протекающие в пределах каждой частицы порошка. В этом случае дальнейшее увеличение среднего удельного электросопротивления образца уже не снижает частотно-зависимую часть энергии потерь на перемагничивание, а частицы порошка могут считаться абсолютно электроизолированными.

Следует отметить, что при экстраполяции кривых 4 и 3 на рис. 7, a, b в область высоких частот есть критические частоты перемагничивания, при которых удельные потери в электротехническом железе толщиной 0.35 мм становятся равными потерям в магнитопластах. При более высоких частотах потери при перемагничивании в электротехническом железе начинают превышать потери в магнитопластах.

## Заключение

Подводя итоги проведенной работы, можно сделать вывод о возможности получения изотропных металлопластовых магнитомягких материалов для электротехнического применения, обладающих рабочим диапазоном индукции, характерным для электротехнических сталей известных марок, магнитной проницаемостью, достигающей 500, и высоким удельным электросопротивлением, достигающим десятков Ом.см, обеспечивающим относительно низкий уровень индукционных потерь на частотах порядка единиц килогерц.

Исследованные в работе образцы имели относительно высокий уровень гистерезисных потерь, связанный с высокой коэрцитивной силой, достигающей 4–5 Э, тогда как в электротехнических сталях коэрцитивная сила меньше 1 Э. В то же время в настоящее время известны технологические методы, позволяющие существенно улучшить магнитные свойства магнитопластов. Это оптимизация размеров зерен магнитопластов. Это оптимизация размеров зерен магнитопластов. В любом случае магнитомягкие магнитопластов. В любом случае магнитомягкие магнитопласты при использовании в конкретных устройствах могут быть конкурентоспособными по сравнению с промышленными электротехническим сталями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по комплексному проекту № 02.G25.31.0145 и Российского научного фонда по проекту № 16-19-10508.

## Список литературы

- Aglen O. // IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Madison, USA, 2003.
  P. 1117.
- Krings A., Nategh S., Stening A. et al. // 5<sup>th</sup> International Conference on Magnetism and Metallurgy (WMM). Gent, Belgium, 2012. P. 101.
- Проселков О.Г. Исследование высококоэрцитивного состояния в быстрозакаленном интерметаллиде Nd<sub>2</sub> Fe<sub>14</sub> B: Дипломная работа. МГУ, физический факультет, 2008.

## Investigation of energy losses in low-coercivity resin-bonded magnets in alternating magnetic fields

## E. V. Milov, I. A. Sipin, V. N. Milov, A. S. Andreenko<sup>a</sup>, I. A. Balan

Department of General Physics and Physics of Condensed State, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia. E-mail: <sup>a</sup> asa@phys.msu.ru.

Energy losses during alternating remagnetization of low-coercitivity resin-bonded magnets and commercially produced electrical steels were studied experimentally. The studies were conducted on several samples of resin-bonded magnets with different manufacturing technologies and samples of electrical steel sheets of various thicknesses. The static and dynamic magnetic properties of the samples were measured on a vibration magnetometer and a specially designed apparatus, respectively. It was found that the studied samples of bonded magnets have a relatively high level of hysteresis losses associated with high coercivity, which reaches a value of 4–5 Oe. At the same time, the remagnetization losses due to the Foucault currents in the bonded magnets are considerably lower than in electrical steels. The measurement results show that bonded magnets at high frequencies of remagnetization, especially in high-rpm motors, can be competitive in comparison with electrical steels.

*Keywords*: bonded magnets, magnetic reversal frequency, magnetization, energy losses, Foucault currents, coercitivity, hysteresis losses. PACS: 75.50.Bb, 75.60.Ej. *Received 8 August 2016*.

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2017. 71, No. 1. Pp. 80-87.

## Сведения об авторах

1. Милов Евгений Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел. (495) 939-33-13, e-mail: evmilov@mail.ru.

2. Сипин Иван Александрович — аспирант; тел. (495) 939-33-13, e-mail: ivansipin@gmail.com.

- 3. Милов Владимир Николаевич канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел. (495) 939-33-13, e-mail: milov@plms.phys.msu.ru.
- 4. Андреенко Александр Степанович доктор физ.-мат. наук, профессор; тел. (495) 939-33-13, e-mail: asa@phys.msu.ru.
- 5. Балан Игорь Артурович студент, тел.(495) 939-33-13.