

**Магнитные потери при частотном перемагничивании магнитопластов**

Е. В. Милов, В. Н. Милов, А. С. Андреев,\* И. А. Сипин  
 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  
 (Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

Проведены исследования величины магнитных потерь при частотном перемагничивании магнитомягких магнитопластов и промышленно выпускаемыми электротехническими сталями. Образцы магнитопластов изготавливались прессованием с добавлением 1,5-2,0% полимерной связки. В качестве образцов электротехнических сталей использовали промышленно выпускаемые стали толщиной 0.18 и 0.35 мм. Для измерения магнитных статических петель гистерезиса применяли вибрационный магнитометр. Для исследования процессов перемагничивания и измерения магнитных потерь в магнитомягких материалах была разработана и создана установка, позволяющая измерять эти характеристики в замкнутой магнитной цепи. Установлено, что в магнитопластах при увеличении частоты перемагничивания потери за счет токов Фуко существенно ниже, чем в электротехнических сталях, что делает их конкурентоспособными в ряде технических применений.

PACS: 75.50 Bb, 75.60 Ej

УДК: 537.623, 537.624

Ключевые слова: частотное перемагничивание, магнитные потери, магнитопласты, петли гистерезиса, электротехнические стали.

Эффективность работы ряда технических устройств, в которых используется периодическое перемагничивание магнитомягких элементов конструкции, определяется величиной потерь энергии в магнитных материалах. Потери энергии при перемагничивании определяются двумя основными причинами: за счет магнитного гистерезиса и вследствие возникновения дополнительных токов (токов Фуко) в результате периодического перемагничивания. Обычно коэффициент полезного действия (КПД) стремятся повысить за счет использования материалов с минимальной величиной коэрцитивной силы и уменьшения толщины набора перемагничиваемого устройства, что позволяет уменьшить токи Фуко. Альтернативным вариантом повышения КПД является использование высокотехнологичных магнитных материалов с хорошими магнитомягкими характеристиками и большим электросопротивлением для уменьшения токов Фуко, в частности, магнитопластов. Исследование потерь энергии при частотном перемагничивании магнитопластов проведено в настоящей работе.

Образцы прессованного магнитопласта 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.

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 т/см<sup>2</sup>. В табл. 1 представлены изготовленные образцы из 2-х 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 составляла 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 °С.

Все образцы имели форму тороидальных колец с одинаковым внешним и внутренним диаметрами.

Для исследования величины магнитных потерь в работе были проведены измерения статических петель гистерезиса при комнатной температуре в полях до 21 кЭ, процессов перемагничивания и определены магнитные потери, а также электросопротивление, для расчета Джоулева тепла за счет токов Фуко.

Для измерения магнитных свойств магнитомягких материалов использовался вибрационный магнитометр, позволяющий проводить измерения намагниченности в магнитных полях до 21 кЭ при комнатной температуре. Для исследования процессов перемагничивания и измерения магнитных потерь в магнитомягких материалах была разработана и создана установка, позволяющая измерять эти характеристики в замкнутой магнитной цепи. Электросопротивление кольцевых образцов определялось четырехконтактным методом, при

\*E-mail: [asa@phys.msu.ru](mailto:asa@phys.msu.ru)

Таблица I:

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

этом токовые контакты подключались к диаметрально противоположным точкам кольца, а падение напряжения измерялось на двух отрезках хорд длиной 4 см.

В результате проведенных исследований было установлено, что потери за счет гистерезиса определяются амплитудой внешнего магнитного поля, а потери в результате действия токов Фуко линейно увеличиваются с ростом частоты перемагничивания, и уменьшаются с увеличением электросопротивления магнитомягкого материала.

На рис. 1 приведены зависимости удельной энергии потерь перемагничивания магнитопластов и образцов серийно выпускаемой электротехнической стали с толщиной листа 0.18 и 0.35 мм от частоты при амплитуде индукции магнитного поля 10 кГс, соответственно.

Из рисунка видно, что образцы электротехнической стали имеют существенно меньшие потери на исследуемых частотах до 1.5 кГц, за счет существенно меньших гистерезисных потерь. Что касается частотно-зависимой части удельной энергии потерь перемагничивания, все магнитопласты имеют меньшую долю индукционных потерь, чем сталь с толщиной листа 0.35 мм. Магнитопласт 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.

Величина частотно-зависимых потерь образцов магнитопластов 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 из порошкового железа №1, также не выявляется очевидной зависи-

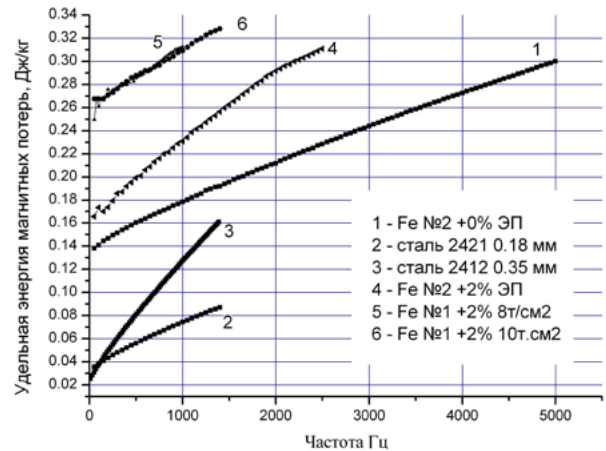


Рис. 1: Зависимость удельной энергии потерь перемагничивания за период от частоты при амплитуде индукции 10 кГс

мости 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 кривой 3 на рис. 1 в область высоких частот есть критическая частота 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.

Таким образом, на основании выполненных исследований можно сделать заключение о перспективности использования магнитопластов в устройствах, использующих частотное перемагничивание, особенно при высоких частотах. В то же время, для уменьшения потерь при перемагничивании необходимо провести ис-

следования по улучшению магнитных свойств магнитопластов, а также по технологии их изготовления, а именно, подбор оптимального размера порошка и методов компактирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Минобрнауки РФ № 03-2015/218 от «27» июля 2015 г. и Российского научного фонда по проекту №16-19-10508.

## Magnetic losses in bonded magnets under the influence of frequency magnetic field

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

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

The research value of magnetic losses in the magnetic reversal frequency magnetically bonded magnets and electrical steel industry produces. Samples of bonded magnets produced by pressing with the addition of 1.5-2.0% polymeric ligaments. As the samples of electrical steel were used commercially available steels with a sheet's thickness from 0.18 to 0.35 mm. To measure the static magnetic hysteresis loops was used vibrating magnetometer. To study the processes of magnetization reversal and measurement of magnetic losses in magnetic materials had been developed and created the installation, which allowed measuring these characteristics in a closed magnetic circuit. It was found that losses in the bonded magnets with increasing frequency of magnetic reversal due to Fourier currents are significantly lower than in electrical steels. This advantage makes bonded magnets competitive in a number of technical applications.

PACS: 75.50 Bb, 75.60 Ej

Keywords: Frequency magnetization, magnetic losses, magnetic bonded material, hysteresis loop, electrical steel.

Received 25.04.2016.

### 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. Милов Владимир Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-33-13, e-mail vnmilov@mail.ru.
3. Андреев Александр Степанович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-33-13, e-mail: asa@phys.msu.ru.
4. Сипин Иван Александрович — аспирант; тел.: (495) 939-33-13, e-mail ivansipin@gmail.com.