

Повышение производительности порошковых сердечников

Магнитные порошковые сердечники на основе распыленных частиц Fe-Si-Al широко используются для производства индукторов благодаря низким потерям, хорошим характеристикам DC-смещения и другим факторам. Однако частицы Fe-Si-Al имеют слишком большую твердость, что препятствует их формовке с высокой плотностью. Включение органических добавок позволяет улучшить свойства формования и стабилизировать текучесть порошка, что обеспечивает высокую результирующую плотность и прочность магнитных сердечников.

Янчжун Ду
(Yangzhong Du)

Чжунву Ни (Junwu Nie)

Юнпин Ли (Yongping Li)

Перевод:
Евгений Карташев

Введение

Порошковые магнитопроводы на основе металлических сплавов, таких как Fe-Si-Al (альсифер), представляют собой разновидность магнитомягких материалов, или так называемых магнитомягких композитов (SMCs — Soft Magnetic Composites). Они изготавливаются путем прессования смеси смолы или другого немагнитного порошка и порошка из магнитного сплава, покрытого тонкой изоляционной пленкой. К достоинствам таких композитов можно отнести изотропные магнитные свойства и высокое электрическое сопротивление, что обуславливает их особые магнитные и электрические характеристики. Магнитомягкий композит альсифер широко представлен во многих электромагнитных устройствах, — например, в реакторах, дросселях, фильтрах, инверторах и т. д. [1, 2].

Исследования показали, что распределение частиц по размерам оказывает большое влияние на магнитные свойства сердечника. Был изготовлен новый вид сплава Fe-Si-Al с мелкими частицами, отличающийся улучшенными характеристиками в отношении постоян-

ной составляющей и очень низкими потерями за счет сферичности и повышенного процентного содержания мелких частиц [3]. Однако если их количество слишком велико, это создает трудности при изготовлении сердечников высокой плотности, обладающих необходимыми магнитными свойствами. Введение органических или неорганических добавок в магнитный порошок значительно улучшает плотность, прочность и магнитные свойства порошковых сердечников.

Проверка магнитных свойств

При исследованиях использовались распыленные порошки Fe-Si-Al с размером частиц <75 мкм и фосфатным изоляционным покрытием. Порошки пассивировались в растворе, содержащем 2,5% фосфорной кислоты и 3,5% спирта, в течение 40 мин и далее сушились при температуре +85 °С в течение 20 мин. Затем их смешивали с 1–10%-ным стеаратом цинка и добавками, представленными в таблице 1, и прессовали под давлением 1628 МПа в тороидальные сердечники размером 26,92 мм (наружный диаметр) × 14,73 мм (внутренний диаметр) × 11,00 мм (высота).

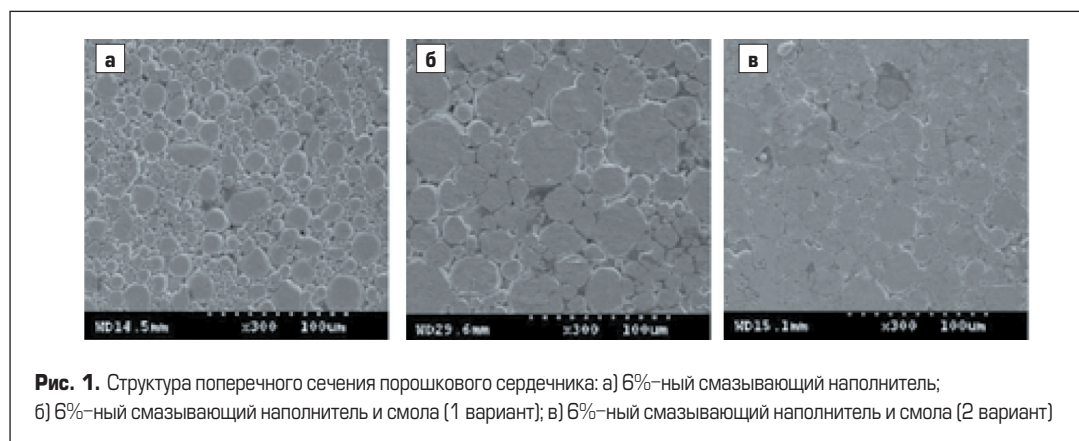


Рис. 1. Структура поперечного сечения порошкового сердечника: а) 6%-ный смазывающий наполнитель; б) 6%-ный смазывающий наполнитель и смола [1 вариант]; в) 6%-ный смазывающий наполнитель и смола [2 вариант]

Для изготовления сравниваемых образцов в порошок добавлялись три вида формальдегидной смолы (табл. 1), затем состав перемешивался до высыхания с использованием растворителя. На последнем этапе сердечники отжигались в азотистой атмосфере при +730 °С в течение 30 мин.

Структура образцов исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM; Phenom Pro X). Индукция сердечника, обычно характеризующая его проницаемость (μ_e), на частоте 20 кГц и процентная индукция (% μ_e) в постоянном намагничивающем поле 100 Ое (100 Эрстед [Ое] \cong 7958 А/м) измерялись с помощью LCR-метра (Chroma). Потери сердечника на частоте 50 кГц при максимальной плотности магнитного потока $B_m = 1000$ Гс оценивались тестером BST-2. Прочность сердечников определялась с помощью измерителя натяжения. Все работы проводились при комнатной температуре.

Микроструктура магнитного материала

При металлургической обработке порошковых магнитомягких материалов их пористость обычно регулируется давлением прессования. При фиксированном давлении контроль пористости осуществляется за счет состава магнитомягкого порошка и добавок (обычно это немагнитные материалы). На рис. 1 показана микроструктура сердечника из Fe-Si-Al, частицы которого в основном имеют сферическую форму.

Первым был представлен образец только со смазывающим наполнителем (добавка 1 = L, рис. 1а), в котором границы частиц сплошные и четкие, поскольку наполнитель полностью сгорает во время термообработки. Структура двух других сердечников, где в качестве добавки использовалась силиконовая смола 1 (добавка 2 = S1) и 2 (добавка 3 = S2), демонстрирует уплотненные частицы и небольшое количество оставшихся материалов, поскольку в процессе термообработки добавки S1, S2 могли оставаться на полюсах, увеличивая таким образом прочность сердечников. Тем не менее очевидно, что добавление немагнитных материалов уменьшает магнитную проницаемость, как показывают многие исследования [3, 5].

Различия, обусловленные смолами (S1, S2, табл. 1), объясняются особенностями меха-

Таблица 1. Материалы добавок и их массовое процентное содержание

Код	Материал	Состав материала				Описание
		1	2	3	4	
Добавка 1 (L)	Стеарат цинка	4%	6%	8%	10%	Белый легкий мелкий порошок. Смазывающий наполнитель: $Zn(C_{17}H_{35}COO)_2$.
Добавка 2 (S1)	Силиконовая смола 1	4%	6%	8%	10%	Вид силового связующего агента, жидкость. Используется в качестве средства для модификации поверхности.
Добавка 3 (S2)	Силиконовая смола 2	4%	6%	8%	10%	Силиконовая смола, жидкость. Используется как адгезив для модификации поверхности.
Добавка 4 (S3)	Силиконовая смола 3	2%	4%	6%	8%	Силиконовая смола, белый порошок. Используется как адгезив, обладает высокой термостойкостью.

Таблица 2. Состав добавок

Состав:	Наполнитель (L)				Смола 1 (S1)				Смола 2 (S2)				Смола 3 (S3)			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Содержание, %	26	26	22	22	28	26	22	20	26	23	20	16	29	26	23	23

низмов упрочнения, в частности, добавка S1 представляет собой разновидность высокотемпературной силиконовой смолы, в то время как смола S2 считается низкотемпературной. Когда наполнители были сожжены при температуре +730 °С и разложены на составляющие, стала понятна их роль в упрочнении или разрушении микроструктуры сердечников [5]. Эта относительная технологическая переменная влияет на изменение давления уплотнения и величину пластической деформации в частицах, а также на величину гистерезисных потерь.

Влияние добавок на свойства магнитного материала

Некоторые добавки, представленные в таблице 1, оказывают непредсказуемое влияние на свойства сердечников, что связано с разбросом их качественных характеристик. На рис. 2а показано, как после термической обработки меняется плотность образцов в различных условиях, соответствующих содержанию немагнитных материалов (наполнитель и смола). Очевидно, что добавка 2 (S1) оказывает сильное влияние на плотность сердечника, особенно при большом начальном соотношении. Например, наблюдается заметное снижение плотности сердечника S1 (4 и 6%) — почти на 0,23 г/см³ (или на 3,6%), в то время как изменение содержания смолы в варианте 3 (S2) имеет незначительный эффект (с 5,85 до 5,79 г/см³). Также видно, что другие добавки оказывают слабое воздействие на снижение плотности

по сравнению с вариантом 2 (S1), что обусловлено малым объемом, занимаемым этими материалами, исчезающими при сжигании при высокой температуре (S3).

Плотность сердечника заметно влияет на индукцию, что показывает кривая на рис. 2б для сердечника только со смазывающим наполнителем. В противоположность этому добавка 3 (S2) способствует повышению плотности, что приводит к росту индукции (рис. 2а, б). С увеличением содержания каждой немагнитной добавки ее величина уменьшается, что соответствует общим правилам. Также следует отметить, что сердечники в варианте 3 (S2) демонстрируют более очевидное снижение индукции, чем 2 (S1), хотя их плотность почти не меняется. Это может объясняться особенностями процесса прессования, поскольку смола 3 (S2) добавляется в порошки SMCs в растворенном (жидком) состоянии, в котором она занимает очень небольшой объем.

При наличии постоянной составляющей характеристики сердечника имеют большое значение для использования в индукторах. Особенно это относится к металлическим порошковым материалам, обладающим особыми свойствами, к которым можно отнести большой допустимый постоянный ток и малое снижение индукции, что очень важно для DC/DC-приложений [3]. На рис. 2в показана зависимость между уменьшением индукции в условиях DC-смещения и содержанием добавок. Отметим, что с добавкой 2 (S1) и без нее начальное снижение составляет 27,9 и 25,8%, это свидетельствует о негативном

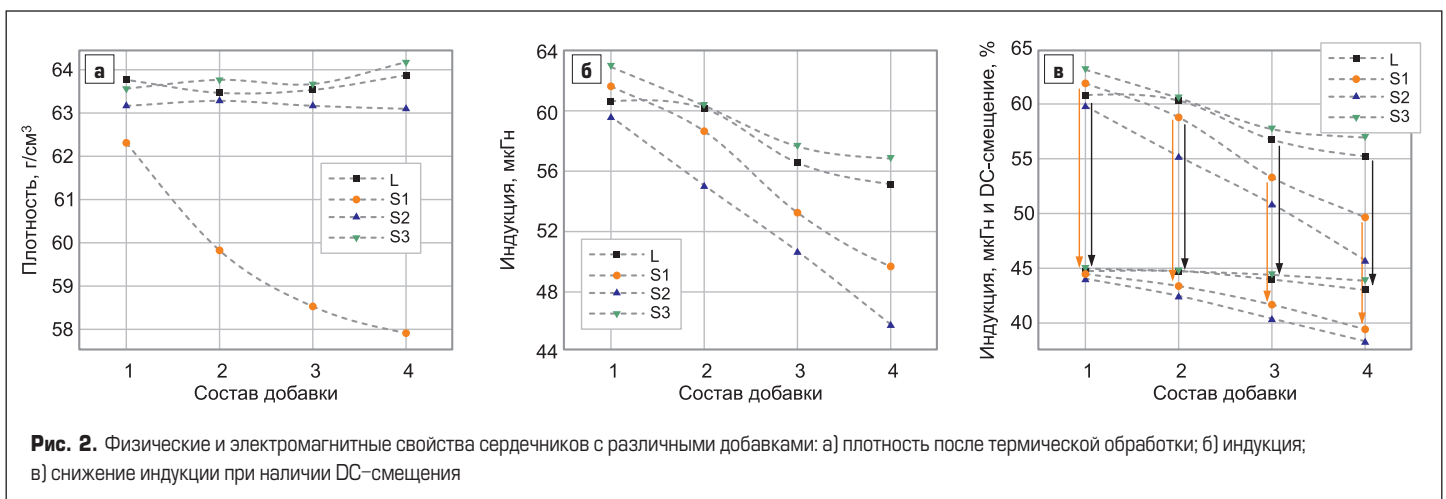


Рис. 2. Физические и электромагнитные свойства сердечников с различными добавками: а) плотность после термической обработки; б) индукция; в) снижение индукции при наличии DC-смещения

влиянии смолы S1 на свойства сердечника при наличии постоянной составляющей.

Несмотря на то что степень влияния DC-смещения у разных вариантов сближается с увеличением процентного соотношения добавок, сердечники 2 (S1), ориентированные на изготовление дросселей, демонстрируют меньшее значение индукции. Таким образом, для достижения хороших свойств магнитопровода при наличии постоянной составляющей следует внимательно относиться к выбору материала и процентного соотношения добавок.

Еще одним важным показателем сердечников, используемых для производства индукторов, являются общие потери, которые уменьшаются с увеличением объемной доли немагнитного материала. Однако эта зависимость содержит «поворотные точки», соответствующие примерно 8% доли смазывающего наполнителя (добавка L), смолы 1 (S1) и 2 (S2). Было обнаружено интересное явление, заключающееся в том, что эти «поворотные точки» могут смещаться случайным образом, что требует более детального анализа. Данные о содержании добавок приведены в таблице 2, эта информация помогает сделать правильный выбор при проектировании индуктора [6].

Добавки влияют не только на электромагнитные свойства сердечников, но и на их физические характеристики, такие как прочность. Добавление смолы 2 (S1) позволяет заметно улучшить этот показатель, который оказывается почти в три раза выше, чем в остальных трех случаях. Обычно окончательная прочность формируется в ходе прессования и отжига, поскольку эти технологические процессы определяют зазор между частицами (по-

ристость) и качество их взаимной связи. Как говорилось выше, в порошковой металлургии пористость магнитомягких материалов контролируется давлением прессования.

В данной работе три вида смолы (S1, S2, S3, табл. 1) были использованы для увеличения прочности или заполнения зазоров, то есть получения более высокой плотности сердечников. В качестве материалов покрытия применялись органические адгезивы — полипропилен, эпоксидные смолы и фенольные смолы. Однако из-за плохой термостойкости материалы из фосфатирующей смолы нельзя отжигать при температуре выше +600 °С. Второй вариант смолы, показанной в таблице 1, имеет более высокую термостойкость, что позволяет снимать механическое напряжение при более высоких температурах (+700 °С) без значительного увеличения вихревых токов. Если предположить, что поры представляют собой просто немагнитные области в материале, то можно контролировать их объемную долю путем добавления немагнитных частиц к порошку SMCs.

Заключение

В статье представлены результаты исследований характеристик магнитопроводов из Fe-Si-Al (альсифер), изготовленных из сферических распыленных порошков. Изучено влияние состава добавок на электрические и магнитные свойства сердечников. Обнаружено, что увеличение их процентного содержания приводит к уменьшению индукции (эффективной проницаемости) и улучшению характеристик DC-смещения. С ростом содержания добавок потери в сердечнике

на частоте 50 кГц непрерывно уменьшаются. Рост гистерезисных потерь, скорее всего, является причиной ухудшения магнитных характеристик при увеличении зазора.

Новые порошковые сердечники Fe-Si-Al демонстрируют отличные магнитные характеристики, а именно лучшие параметры DC-смещения (100 Ое) — 74% и наименьшие потери (50 кГц/1000 Гс) — 120 мВт/см³.

Литература

1. Liu H. J., Sun H. L., Geng W. B., Sun Z. G. et al. Effect of Particle Size Distribution on the Magnetic Properties of Fe-Si-Al Powder Core // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2016. Vol.29. Iss. 2.
2. Ding W., Jiang L. T., B. Li Q. et al. Microstructure and Magnetic Properties of Soft Magnetic Composites with Silicate Glass Insulation Layers // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2014. Vol. 27.
3. M. M. Dias, H. J. Mozetic, J. S. Barboza, et al. Influence of Resin type and Control on Electrical and Magnetic Properties of soft magnetic composites(SMCs). *Powder Technology*. 2013. Vol. 237.
4. Gilbert I., Bull S., Evans T. Effects of Processing upon the properties of Soft Magnetic Composites for Low Loss Applications // *Journal of Materials Science*. 2004. Vol. 39.
5. Liu D., Wu C., Yan M. Investigation on Sol-gel Al₂O₃ and Hybrid Phosphate-alumina Insulation Coatings for FeSiAl Soft Magnetic Composites // *Journal of Materials Science*. 2015. Vol. 50.
6. www.dmegc.com.cn/en