

УДК 621.762.002

Ю.М. ВЕРНИГОРОВ, И.Н. ЕГОРОВ, Н.Я. ЕГОРОВ

СТРУКТУРИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ В МАГНИТОВИБРИРУЮЩЕМ СЛОЕ

На основе анализа зависимости ЭДС индукции, наведенной в индуктивном датчике порошком ферромагнитного материала, исследованы особенности процесса структурирования от параметров электромагнитного воздействия.

Ключевые слова: электромагнитное поле, порошки магнитных материалов, магнитовибрирующий слой, ферромагнетик.

Введение. При изготовлении анизотропных порошковых изделий применяются порошки с размером частиц, близких к однодоменному. Анизотропию изделия можно сформировать, ориентируя отдельные частицы в направлении определенной кристаллографической оси в магнитном поле [1]. Однако во внешнем магнитном поле ориентируются магнитные моменты агрегатов, а не отдельных частиц. Дисперсные ферромагнетики, помещенные в постоянное и переменное неоднородное магнитные поля, образуют магнитовибрирующий слой (МВС) [2]. Подбором режимов электромагнитного поля можно регулировать интенсивность движения агрегатов и частиц порошка и разрушать агрегаты вплоть до отдельных частиц [3]. При увеличении индукции постоянного магнитного поля до некоторого значения, характерного для каждого порошка, начинается интенсификация процессов вторичного агрегирования и формирования анизотропной слоистой структуры. Исследование динамики процессов структурирования в МВС проводилось по измерению зависимости сигнала ЭДС, наведенного в индуктивном датчике частицами магнитного материала, от параметров электромагнитного воздействия [4].

Результаты эксперимента. Особенности структурирования дисперсной ферромагнитной системы исследовали индуктивным датчиком. Он представляет собой цилиндрическую катушку, имеющую 100 витков провода на картонном каркасе высотой 13 мм и диаметром, равным внешнему диаметру стеклянной измерительной ячейки с исследуемым порошком. Индуктивный датчик и измерительную ячейку с порошком феррита бария со средним размером частиц 3 мкм помещали в межполюсное пространство электромагнитов постоянного и переменного магнитных полей с взаимно перпендикулярными силовыми линиями. Индукцию постоянного поля $\hat{A}_N$ меняли в пределах от 2 до 44 мТл, индукцию переменного поля $\hat{A}_V$ — от 1,0 до 7,0 мТл, градиент индукции $\partial B_V / \partial y$ — от 2,7 до 22,3 мТл/м.

Полученные зависимости наведенного в датчике сигнала ЭДС $\Delta \varepsilon$ от индукции постоянного магнитного поля при различных значениях индукции переменного магнитного поля (рис. 1) имеют немонотонный характер. При фиксированном значении индукции переменного магнитного поля с ростом постоянной составляющей поля до 10 мТл увеличивается сигнал $\Delta \varepsilon$, следовательно, происходит рост магнитного момента, наводящего ЭДС в индуктивном датчике. Этот рост может быть обусловлен как преимущественностью процессов разрушения агрегатов с макровихревым упорядочением магнитных моментов, так и образованием агрегатов с ферромагнитным упорядочением магнитных моментов. При дальнейшем увеличении индукции постоянного магнитного поля магнитостатическое взаимодействие между частицами приводит к интенсификации процессов вторичного агрегирования и формирования анизотропной структуры — магнитных цепочек, которые совершают колебания в переменном магнитном поле. Дальнейшее

увеличение индукции постоянного магнитного поля приводит к уменьшению амплитуды колебаний, что и вызывает снижение сигнала ЭДС.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- процессы, протекающие в МВС при различных значениях градиента индукции переменного магнитного поля, аналогичны;
- перевод дисперсной системы в магнитокопьящее состояние, в котором совершается интенсивное разрушение агрегатов, происходит при наличии постоянного магнитного поля с индукцией $B_C \leq B_V$.

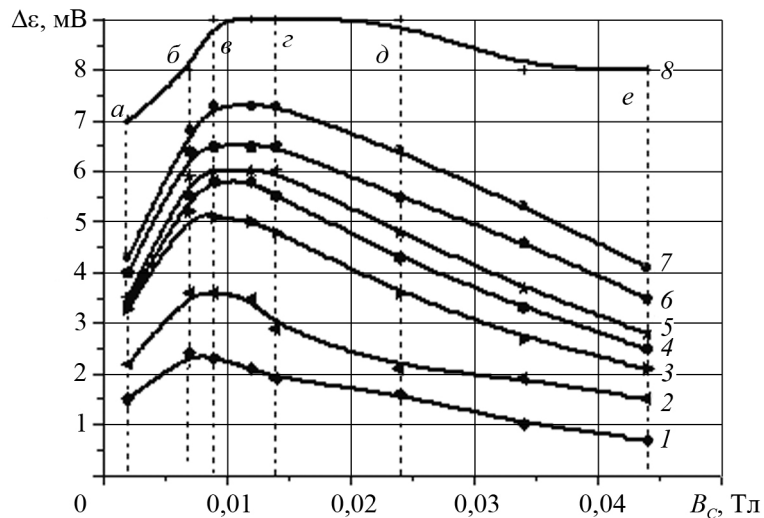


Рис. 1. Зависимость ЭДС, наведенной в индуктивном датчике порошком феррита бария со средним размером частиц 3 мкм, от индукции постоянного магнитного поля:

- | | |
|--|--|
| 1 — $B_V = 1,0$ мТл; $\partial B_V / \partial y = 2,7$ мТл/м; | 2 — $B_V = 1,7$ мТл; $\partial B_V / \partial y = 4,5$ мТл/м; |
| 3 — $B_V = 2,3$ мТл; $\partial B_V / \partial y = 6,2$ мТл/м; | 4 — $B_V = 3,0$ мТл; $\partial B_V / \partial y = 8,0$ мТл/м; |
| 5 — $B_V = 3,7$ мТл; $\partial B_V / \partial y = 9,8$ мТл/м; | 6 — $B_V = 4,4$ мТл; $\partial B_V / \partial y = 11,6$ мТл/м; |
| 7 — $B_V = 5,0$ мТл; $\partial B_V / \partial y = 13,4$ мТл/м; | 8 — $B_V = 7,0$ мТл; $\partial B_V / \partial y = 22,3$ мТл/м |

Фотографии (рис. 2) позволяют оценить изменение состояния дисперсной системы в МВС при $\hat{A}_V = 1,7$ мТл и $\partial B_V / \partial y = 4,5$ мТл/м в зависимости от индукции постоянного магнитного поля. На рис. 2, а при B_C равном 2 мТл порошок находится в магнитокопьящем состоянии (точка а на кривой 2, см. рис. 1). Увеличение $\hat{A}_N$ до 7 мТл приводит к возрастанию $\Delta\epsilon$ (точка б на кривой 2, см. рис. 1), что можно объяснить образованием локальных цепочечных агрегатов с ферромагнитным упорядочением магнитных моментов отдельных частиц (рис. 2, б). При $\hat{A}_N = 9$ мТл $\Delta\epsilon$ растет незначительно (точка в на кривой 2, см. рис. 1), так как увеличение размера цепочечных агрегатов снижает скорость их движения относительно индуктивного датчика (рис. 2, в). Дальнейший рост индукции постоянного магнитного поля до 14 мТл приводит к увеличению длины цепочек вплоть до размеров кюветы (рис. 2, г) и уменьшению амплитуды колебания, что вызывает снижение наведенного сигнала $\Delta\epsilon$ (точка д на кривой 2, см. рис. 1). При $B_C = 24$ мТл происходит образование структуры, состоящей из магнитных цепочек (рис. 2, д), которые совершают колебания в переменном неоднородном магнитном поле по закону струны с закрепленными концами, что соответствует уменьшению $\Delta\epsilon$ (точка д на кривой 2, см. рис. 1). Возрастание B_C до 44 мТл ведет к нарушению однородности образованной структуры (рис. 2, е)

и увеличению жесткости магнитной струны и, как следствие, падению сигнала $\Delta\varepsilon$ (точка *е* на кривой 2, см. рис. 1).

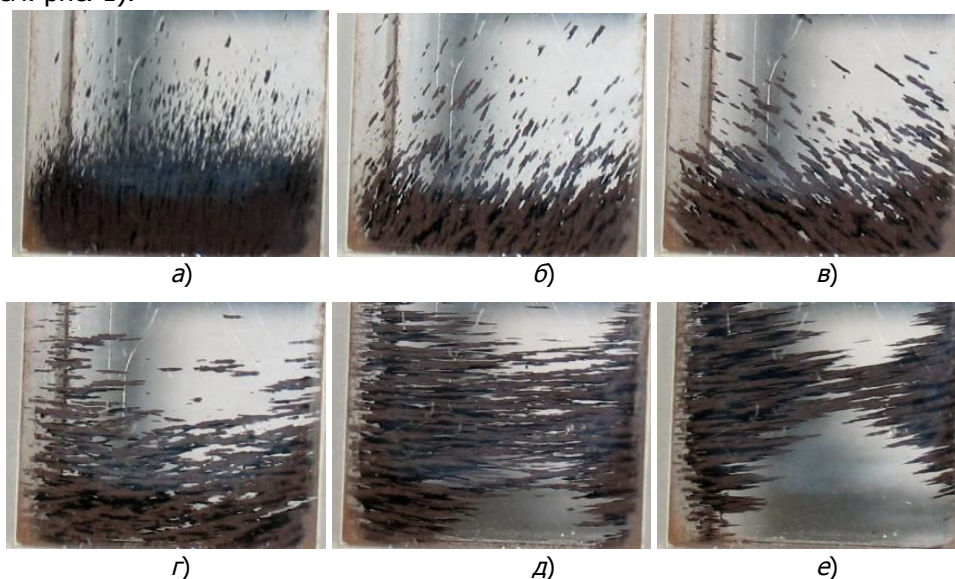


Рис. 2. Фотографии МВС для порошка феррита бария со средним размером частиц 3 мкм при $\hat{A}_V = 1,7$ мТл, $\partial B_V / \partial y = 4,5$ мТл/м:

а — $B_C = 2$ мТл; *б* — $B_C = 7$ мТл; *в* — $B_C = 9$ мТл; *г* — $B_C = 14$ мТл;

д — $B_C = 24$ мТл; *е* — $B_C = 44$ мТл

Из рис. 1 следует, что максимальное значение ЭДС, наведенной порошком, увеличивается на 6,6 мВ при возрастании $\hat{A}_V$ от 1,0 до 7,0 мТл и $\partial B_V / \partial y$ от 2,7 до 22,3 мТл/м. При сравнении фотографий состояний магнитокипения при $B_C = 7$ мТл (рис. 3), соответствующих экспериментальным точкам *б* на кривых 1, 2, 3, 5, 7 (см. рис. 1), видно, что с увеличением градиента индукции переменного поля наблюдается рост ЭДС $\Delta\varepsilon$ за счет возрастания амплитуды колебательного движения частиц и агрегатов в МВС.

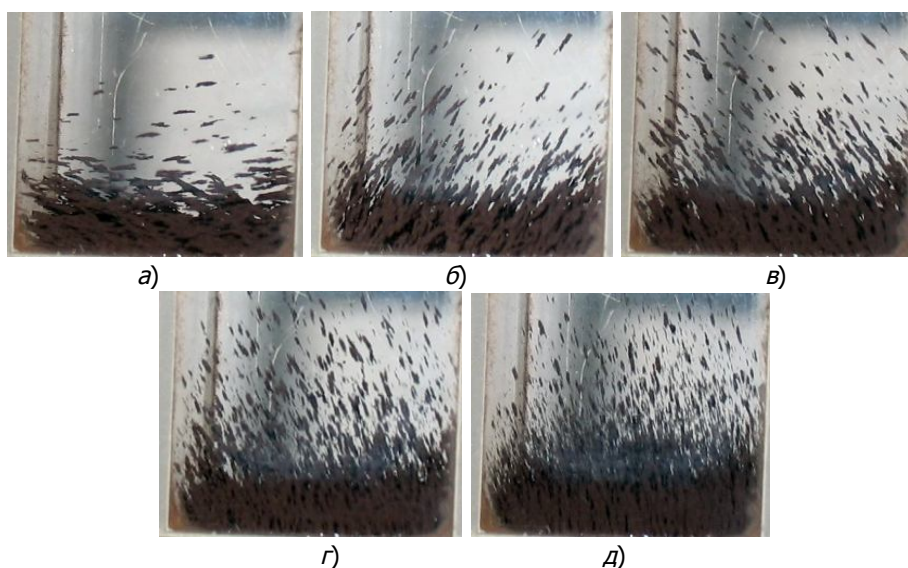


Рис. 3. Фотографии порошка феррита бария со средним размером частиц 3 мкм в состоянии МВС при $\hat{A}_V = 7$ мТл и параметрах переменного магнитного поля:

а — $B_V = 1,0$ мТл, $\partial B_V / \partial y = 2,7$ мТл/м; *б* — $B_V = 1,7$ мТл, $\partial B_V / \partial y = 4,5$ мТл/м;

в — $B_V = 2,3$ мТл, $\partial B_V / \partial y = 6,2$ мТл/м; г — $B_V = 3,7$ мТл, $\partial B_V / \partial y = 9,8$ мТл/м;
 д — $B_V = 5,0$ мТл, $\partial B_V / \partial y = 13,4$ мТл/м

Из сравнения фотографий (рис. 4), полученных при тех же режимах, при которых измерены $\Delta\varepsilon$, соответствующие экспериментальным точкам d на кривых 1, 2, 4, 6, 7, 8 (см. рис. 1), следует, что в постоянном магнитном поле $B_C = 24$ мТл при малых градиентах переменного магнитного поля формируется магнитная структура (рис. 4, а), степень однородности которой повышается при достижении индукции 3,0 мТл и градиента индукции 8,0 мТл/м переменного поля (рис. 4, в). При этом возрастание $\Delta\varepsilon$ (точка d на кривых 1, 2, 4, см. рис. 1) связано с увеличением амплитуды колебания магнитных цепочек. При дальнейшем возрастании градиента индукции сила, действующая со стороны неоднородного магнитного поля, увеличивается и образованная структура разрушается (рис. 4, г—е), что объясняет увеличение $\Delta\varepsilon$ (точка d на кривых 6, 7, 8, см. рис. 1).

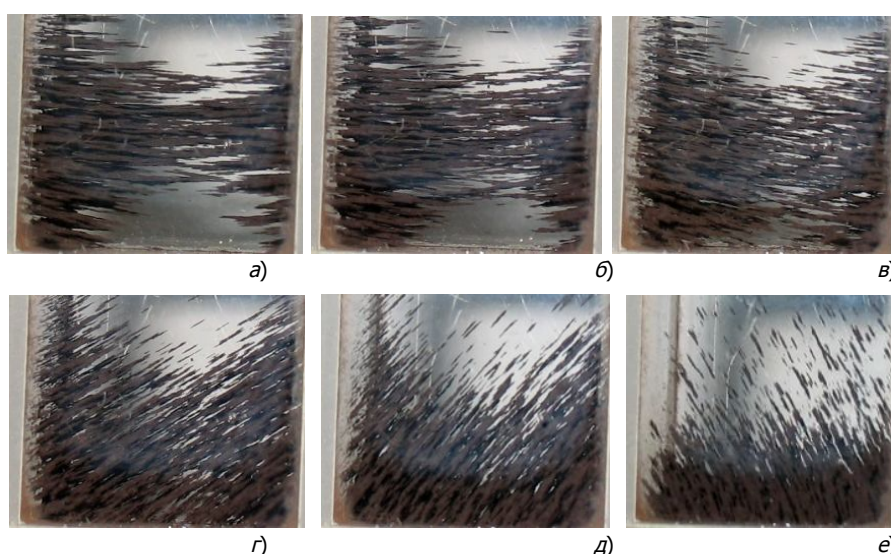


Рис. 4. Фотографии порошка феррита бария со средним размером частиц 3 мкм в состоянии МВС при $\hat{A}_N = 24$ мТл и параметрах переменного магнитного поля:

а — $B_V = 1,0$ мТл, $\partial B_V / \partial y = 2,7$ мТл/м; б — $B_V = 1,7$ мТл, $\partial B_V / \partial y = 4,5$ мТл/м;
 в — $B_V = 3,0$ мТл, $\partial B_V / \partial y = 8,0$ мТл/м; г — $B_V = 4,4$ мТл, $\partial B_V / \partial y = 11,6$ мТл/м;
 д — $B_V = 5,0$ мТл, $\partial B_V / \partial y = 13,4$ мТл/м; е — $B_V = 7,0$ мТл, $\partial B_V / \partial y = 22,3$ мТл/м

Выводы. Анализ зависимости ЭДС, наведенной МВС дисперсного ферромагнетика в индуктивном датчике, показывает, что порошки ферромагнитных материалов в МВС могут находиться в различных реологических состояниях, зависящих от параметров магнитного воздействия. Возрастание $\Delta\varepsilon$ на первом этапе связано с разрушением агрегатов, а на втором — с формированием вторичных агрегатов, имеющих ферромагнитное упорядочение магнитных моментов частиц.

Библиографический список

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. — М. : Наука, 1984. — 208 с.
2. Диагностика дисперсных магнитных материалов / Ю.М. Вернигоров [и др.] // Вестник ДГТУ. — 2002. — Т. 2, № 3. — С. 287—297.
3. Вернигоров Ю.М., Егоров И.Н., Егорова С.И. Особенности флокуляции полидисперсных порошков магнитотвердых материалов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. — 2006. — № 2. — С. 64—68.

4. Егорова С.И. Магнитовибрационное ожигение. — Ростов н/Д : Издательский центр ДГТУ, 2009. — 162 с.

References

1. Vonsovskii S.V. Magnetizm. — M. : Nauka, 1984. — 208 s. — in Russian.
2. Diagnostika dispersnyh magnitnyh materialov / Yu.M. Vernigorov [i dr.] // Vestnik DGTU. — 2002. — Т. 2, № 3. — С. 287—297. — in Russian.
3. Vernigorov Yu.M., Egorov I.N., Egorova S.I. Osobennosti flokulyacii polidispersnyh poroshkov magnitotverdyh materialov // Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tehn. nauki. — 2006. — № 2. — С. 64—68. — in Russian.
4. Egorova S.I. Magnitovibracionnoe ojijenie. — Rostov n/D : Izdatel'skii centr DGTU, 2009. — 162 s. — in Russian.

Материал поступил в редакцию 23.03.10.

Y.M. VERNIGOROV, I.N. EGOROV, N.Y. EGOROV

DISPERSE FERROMAGNET STRUCTURING IN MAGNETOVIBRATING LAYER

Structuring process features from electromagnetic field parameters are investigated by analyzing emf induction dependence induced by the ferromagnetic powder in the inductive sensor.

Key words: *electromagnetic field, magnetic powders, magnetovibrating layer, ferromagnetic.*

ВЕРНИГОРОВ Юрий Михайлович (р. 1941), профессор кафедры «Физика» Донского государственного технического университета, доктор технических наук (1995), профессор (1998). Окончил Ростовский государственный университет (1964).

Область научных интересов — порошковая металлургия, взаимодействие дисперсных магнитных систем в электромагнитном поле.

Автор более 100 научных работ.

jvernigorov@dstu.edu.ru

ЕГОРОВ Иван Николаевич (р. 1982), доцент кафедры «Физика» Донского государственного технического университета, кандидат технических наук (2007). Окончил Ростовский государственный университет (2004).

Область научных интересов — применение магнитовибрационных технологий в порошковой металлургии.

Автор более 40 научных работ.

Stork@rspu.edu.ru

ЕГОРОВ Николай Яковлевич (р.1955), доцент кафедры экономики и прикладной математики ПИ ЮФУ, кандидат технических наук (2004), доцент (2006). Окончил Ростовский государственный университет (1977).

Область научных интересов — применение магнитовибрационных технологий в порошковой металлургии.

Автор более 50 научных работ.

yegorovnick@yandex.ru

Yury M. Vernigorov (1941), Professor of the Physics Department, Don State Technical University. Ph.D. in Science (1995), Professor (1998). He graduated from Rostov State University (1964).

Research interests — powder metallurgy, disperse magnetic systems interactions in magnetic fields.

Author of more than 100 scientific publications.

jvernigorov@dstu.edu.ru

Ivan N. Egorov (1982), Associate Professor of the Physics Department, Don State Technical University. Candidate of Science in Engineering (2007). He graduated from Rostov State University (2004).

Research interests — application of magnetovibrating technology in powder metallurgy.

Author of more than 40 scientific publications.

Stork@rspu.edu.ru

Nikolay Y. Egorov (1955), Associate Professor of the Economics and Applied Mathematics Department, Pedagogical Institute of South Federal University. Candidate of Science in Engineering (2004), Associate Professor (2006). He graduated from Rostov State University (1977).

Research interests — application of magnetovibrating technology in powder metallurgy.

Author of more than 50 scientific publications.

yegorovnick@yandex.ru