

УДК 621.927

Ю. М. Вернигоров, д-р техн. наук, проф., **К. К. Лелетко**, аспирант
Донской государственной технической университет, Россия
Тел.: +7 928 229 15 08; E-mail: vernigorov@donstu. ru

УПРУГИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ В МАГНИТОВИБРИРУЮЩЕМ СЛОЕ

Реализация вибрационных технологий в порошковой металлургии предполагает широкий спектр способов передачи энергии порошковому материалу. Особая роль в развитии таких технологий принадлежит технологиям порошковой металлургии, реализующим магнитовибрирующий слой диспергированной твердой фазы. В статье исследуются упругие свойства «магнитных струн» из частиц мелкодисперсного ферромагнитного порошка, сформированного в переменном магнитном поле, для создания высокой анизотропии магнитных свойств порошковых компактов.

Ключевые слова: магнитовибрирующий слой, магнитное поле, дисперсные ферромагнетики.

Yu. M. Vernigorov, K. K. Leletko

ELASTIC PROPERTIES OF DISPERSE FERROMAGNETS IN A MAGNETIC-VIBRATION LAYER

The implementation of vibration technologies in powder metallurgy assumes a wide range of methods for energy transfer to the powder material. A special role in the development of such technologies belongs to technologies that realize the magneto-vibration layer of the dispersed solid phase. The paper investigates the elastic properties of "magnetic strings" from particles of finely dispersed ferromagnetic powder formed in an alternating magnetic field in order to create a high anisotropy of the magnetic properties of powder compacts.

Keywords: magnetic-vibration layer, magnetic field, dispersed ferromagnets

1. Введение

Попытки интенсификации вибрационных процессов с определенным успехом реализованы в установках с аэрокипящим слоем [1], химико - термической обработки и поверхностного плакирования в вибрирующем слое [2], отжига в виброкипящем слое [3], химического плакирования с наложением ультразвука [4]. Основной задачей, которую решают перечисленные способы, является получение максимальной порозности путем оживления или псевдокипения свободно насыпанной массы частиц для интенсификации процессов происходящих в системе газ (жидкость) - твердое тело.

Основным промышленным приемом получения анизотропных изделий с максимальными значениями магнитных характеристик является ориентирование магнитного момента частиц постоянным магнитным полем и обеспечение высокой плотности прессовки. Прессуют магниты из суспензии, содержащей 35 - 40 % влаги, в магнитном поле. После загрузки мокрой шихты в пресс-форму включается магнитное поле для ориентации магнитных моментов частиц и производится прессование. Практически все недостатки мокрого прессования порошковых магнитов могут быть устранены переходом к прессованию сухого порошка. Однако магнитные характеристики изделий, полученных из сухого порошка, оказываются существенно ниже, чем при мокром прессовании.

Магнитовибрирующий слой (МВС) - особое физическое состояние дисперсной ферромагнитной системы, частицы которой осциллируют в межполюсном пространстве электромагнита переменного тока под действием электромагнитных сил. Такая система при определенных условиях может быть введена в режим устойчивых параметрических колебаний. МВС представляет собой систему, описание которой исходит из представлений непривычных в технологической практике. Разработка технологических процессов, основанных на применении магнитовибрирующего слоя, сводится не к мо-

дернизации или совершенствованию действующей технологии, а к разработке совершенно новых процессов [5,6,7,8].

Разработанная магнитовибрационная технология состоит из нескольких этапов воздействия на тонкодисперсную среду переменным и постоянным магнитными полями [8]. На первом этапе тонкодисперсный порошок ферромагнитного материала переводится в состояние интенсивного магнитокипения, при котором происходит разрушение флоккул. На втором этапе за счет увеличения индукции постоянного поля из частиц магнитокипящей среды формируется система эквидистантных тонких магнитных цепочек с высокой степенью ферромагнитного упорядочения, которые совершают резонансные колебания.

Цель работы.

Исследование упругих свойств «магнитных струн» из частиц тонкодисперсного ферромагнитного порошка, образованных в переменном магнитном поле с целью создания высокой анизотропии магнитных свойств порошковых прессовок.

1. Основная часть.

При определенном соотношении параметров электромагнитного поля в дисперсной ферромагнитной среде формируется система эквидистантных цепочек, ориентированных вдоль силовых линий поля. Образовавшиеся цепочки совершают в неоднородном магнитном поле поперечные колебания. Силы магнитостатического и адгезионного взаимодействия, удерживающие частицы в цепочке, играющей роль квазиупругих сил, что позволяет считать эти цепочки упругими струнами [9,10]. Вынуждающая сила, действующая со стороны неоднородного поля, меняется одновременно по всей длине «магнитной струны», и, следовательно, возбуждает поперечные колебания только основного тона. Подобный эффект наблюдался в магнитной гидродинамике, заключающийся в том, что силовая линия ведет себя как натянутая струна [11,12].

Эффект возникновения в магнитном поле упругих свойств в порошковых структурах наблюдался нами в ферромагнитных даже слабо проводящих материалах [13,14]. При неравновесных фазовых переходах в порошковой системе формируется структура. Условия, вызывающие фазовый переход, вынуждающий систему к кооперативному поведению микрочастиц в противоположность обычной тенденции к хаотическому поведению [15]. За точкой фазового перехода энергия системы проявляется, по крайней мере, частично, как энергия макроскопического регулярного движения. Дисперсная среда может образовывать упорядоченные высококооперативные структуры вследствие того, что внешние ограничения удерживают систему вдали от равновесия. При этом проявляется новый принцип упорядочения, отличный от больцмановского принципа хаотизации [16].

В модели были сделаны некоторые допущения, основные из которых следующие:

- частицы и агрегаты дисперсной среды моделируются сферами с замороженными магнитными моментами;
- диссипация энергии частиц в установившемся МВС компенсируется внешним полем;
- индукция магнитного поля меняется по гармоническому закону с частотой ω и задается выражением $\vec{B} = \vec{B}_c + \vec{B}_v \cos \omega t$, где \vec{B}_c и \vec{B}_v - индукции постоянной и переменной составляющих полей соответственно, причем $\vec{B}_c \perp \vec{B}_v$.

Считая, что в положении равновесия магнитная струна совпадает с осью OX и направлением силовых линий поля, уравнение малых поперечных колебаний запишем в виде:

$$m\ddot{y} + \beta\dot{y} - F(B_c) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = P \frac{\partial B_v}{\partial y} \sin \varphi \cos \omega t,$$

где m и P – масса и магнитный момент элемента струны dl , β – коэффициент сопротивления движению струны, $F(B_c)$ – сила натяжения струны, φ – угол между \vec{P} и осью OY . \vec{B}_c и \vec{B}_v – индукции постоянной и переменной составляющих магнитного поля.

С учетом граничных и начальных условий $y(0,t) = y(l,t) = 0$; $y(t)|_{t=0} = y'(t)|_{t=0} = 0$ решение для основной моды колебаний имеет вид [17]

$$y(t) = \frac{2D_0 \sin(\omega t - \alpha)}{l\delta\omega \sqrt{1 + Q_1^2 \gamma_1^2}},$$

где $D_0 = \frac{P}{m} \frac{\partial B_v}{\partial y} \sin \varphi$; $\delta = \frac{\beta}{m}$; $Q_1 = \frac{\omega_1}{2\delta}$; $\gamma_1 = \frac{\omega}{\omega_1} - \frac{\omega_1}{\omega}$; ω_1 – частота собственных колебаний магнитной струны, l – длина струны, $\alpha = \text{arctg}(Q_1 \gamma_1)$.



Рисунок 1. Упругие «струны» из ферритового порошка

Для оценки характера движения ферромагнитных частиц в МВС была использована экспериментальная установка, принцип работы которой основан на регистрации эдс наведенной в индуктивном датчике частицами исследуемой среды в зависимости от магнитного момента частиц, скорости, амплитуды и частоты их колебания [18]. Индуктивный датчик имел 200 витков провода ПЭТВ – 0,14, намотанных на цилиндрический каркас из диэлектрического материала, внутренняя полость которого заполнялась исследуемым порошком. Датчик помещался в межполюсном пространстве электромагнита. При неизменных значениях всех параметров установки индукционная эдс измерялась дважды: без исследуемого порошка (ϵ_0) и с исследуемым порошком (ϵ). Динамика поведения ферромагнитного порошка и характер взаимодействия между его частицами в магнитном поле могут быть оценены по изменению относительного сигнала [19]:

$$\Delta\epsilon/\epsilon_0 = (\epsilon - \epsilon_0) / \epsilon_0.$$

Зависимость индукционной эдс от частоты переменного магнитного поля для порошка $\text{Sm}[\text{Co}_{0,85}\text{Cu}_{0,15}]_{7,2}$ с размером частиц 4 ... 8 мкм приведена на рис. 2. Считая,

что сила взаимодействия частиц обеспечивает силу натяжения струны [20], можно записать

$$F = \frac{\omega_2^2 \varepsilon_2^2 - \omega_1^2 \varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2} \cdot \frac{l^2 \tau}{\pi^2 n^2},$$

где ω_1 , ω_2 и ε_1 , ε_2 – резонансные частоты и соответствующие значения индукционной эдс, наведенной в датчике колеблющейся струной при двух значениях индукции постоянного поля, l – длина струны, τ – погонная масса, n – мода колебаний

В соответствии с приведенным выражением и данными рис. 2 рассчитывали силу взаимодействия, которая для исследуемого порошка имела значение $2 \dots 2,5 \cdot 10^{-7}$ Н.

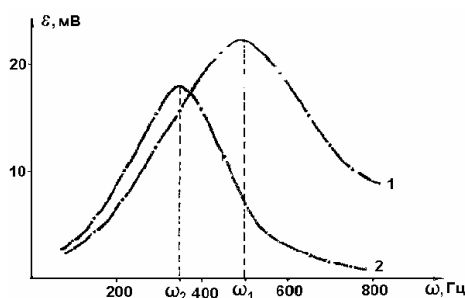


Рисунок 2. Зависимость индукционной эдс от частоты переменного магнитного поля для порошка $\text{Sm}[\text{Co}_{0,85}\text{Cu}_{0,15}]_{7,2}$. B_c : 1 – 30 мТ, 2 – 90 мТ.

Повышение индукции постоянной составляющей магнитного поля уменьшает значение наведенной эдс и смещает резонанс в область низких частот, что можно объяснить возрастанием “кажущейся вязкости” среды за счет увеличения взаимодействия частиц струны с магнитным полем [21].

2. Заключение

Обработка сухих порошков предоставляет широкие возможности для автоматизации производства, что особенно важно при работе с тонкодисперсными порошками ферромагнитных металлов и окислов. Прессование сухих порошков позволяет исключить этап естественной сушки сырых прессовок, длительность которого составляет 24 – 50 часов, в 2-3 раза уменьшить затраты на финишную обработку, полностью исключить процессы резки спеченных заготовок. Технологические возможности резонансного текстурирования позволяют существенно снизить требования к качеству шихты и повысить эксплуатационные свойства магнитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвиненко, В. И. Исследование и разработка способа получения легированного железного порошка методом контактного осаждения меди: автореф. дис. ...канд. техн. наук / В. И. Литвиненко. – Ростов-н / Д: 1972.
2. Гордин, Ю. А. Технологическая схема химико-термической обработки порошков в вибрирующем слое / Ю. А. Гордин, Л. В. Красниченко, В. Г. Люлько // Порошковая металлургия: тез. докл. XVI всесоюз. науч.-техн. конф., Свердловск, 1989.
3. Пархоменко, В. Д. Получение ферритовых порошков в потоках высокотемпературных теплоносителей / В. Д. Пархоменко, П. И. Сорока, Л. А. Голубков, П. В. Липатов, – Киев: Наукова думка, 1988.

4. Вернигоров, Ю. М. «Практическое применение отходов шлифовального производства» / Ю. М. Вернигоров, Н. Н. Фролова, Д. М. Плотников // Современные тенденции развития науки и технологий. – Белгород, 2017. – №3-4. – С. 17-23.
5. Вернигоров, Ю. М. Поверхностное легирование и химико-термическая обработка ферромагнитных порошков в магнитовибрирующем слое / Ю. М. Вернигоров, К. К. Лелетко // Science, Technology and Life – 2017: Proceedings of articles the IV International scientific conference. Czech Republic, Karlovy Vary – Russia, Moscow, December 24-25, 2017. – С. 28-37.
7. Vernigorov, Yu. M. Magnetic Wave Technology of Grinding Slime Separation / Yu. M. Vernigorov, B. G. Gasanov, S. S. Baev // Solid State Phenomena, September 2017, Trans Tech Publications. DOI: 0. 4028 / www. scientific. net/ssp. 265. 1020. SolidStatePhenomena, Vol. 265, pp. 1020-1025, 2017.
8. Вернигоров, Ю. М. Магнитовибрационная технология производства порошковых магнитов: дис. ... д-ра техн. наук / Ю. М. Вернигоров – Ростов-на-Дону, 1995. – 369 с.
9. Вернигоров, Ю. М. Влияние режимов магнитокипения на степень разрушения флокул тонкодисперсных порошков / Ю. М. Вернигоров, С. И. Егорова, Г.Ф. Лемешко // Порошковая металлургия. – 1990. – № 9. – С. 83 – 87.
10. Вернигоров, Ю. М. Разрушение частиц ферромагнитного материала в магнитовибрирующем слое с высокой порозностью. / Ю.М. Вернигоров, Н. Н. Фролова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 11. – №7 (58). – С. 1127-1131.
11. Половин, Р. В. Основы магнитной гидродинамики / Р. В. Половин, В. П. Демущкий. – Энергоатомиздат, 1987. – 208с.
12. Блум, Э. Я. Магнитные жидкости / Э. Я. Блум, М. М. Майоров, А. О. Цеберс. – Рига: Зинантне, 1989. – С. 101-104.
13. А. с. № 1432398 СССР. Способ определения средней силы взаимодействия частиц в магнитоожестком порошке и устройство для его осуществления / Н. С. Биткина, Ю. М. Вернигоров, С. И. Егорова, Г. Ф. Лемешко – Бюл. №39. – 1988. – 24 с.
14. Устройство для измельчения ферромагнитных порошков: пат. на полезную модель № 119644 РФ / Вернигоров Ю. М., Фролова Н. Н. – Бюл. № 24. – 2012.
15. Vernigorov, Yu. M. Disperse ferromagnet in the magnetovibrating layer / Yu. M. Vernigorov, I. N. Yegorov, S. I. Yegorova. – JEMS'04 Joint European Magnetic Symposia: Abstracts Book, 5-10 Sept. – Dresden, Germany, 2004. – P. 131.
16. Томпсон Дж. М. Т. Неустойчивость и катастрофы в науке и технике / Дж. М. Т. Томпсон. – М.: Мир, 1985.
17. Вернигоров, Ю. М. Диагностика дисперсных магнитных материалов / Ю. М. Вернигоров, И. Н. Егоров, С. И. Егорова, Н. С. Биткина // Вестник ДГТУ. – 2002. – Т. 2. – № 3. – С. 287-297.
18. Вернигоров, Ю. М. Особенности флокуляции полидисперсных порошков магнитотвердых материалов / Ю. М. Вернигоров, И. Н. Егоров, С. И. Егорова // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2006. – № 2. – С. 64-68.
19. Vernigorov, Y. The technology of receiving finely dispersed powders of magnetic materials in the screw drum / N. Frolova, Y. Vernigorov // MATEC Web of Conferences 132, 01002 (2017) DOI: 10. 1051/matecconf/201713201002 DTS-2017.
20. А. с. № 1359728 СССР: Способ определения средней силы взаимодействия частиц в магнитомягком порошке / Н. С. Биткина, Ю. М. Вернигоров, С. И. Егорова, Г. Ф. Лемешко – Бюл. № 46. – 1987. – С. 18.

Поступила в редколлегию 08.05.18