

УДК 66.067.124:537.811

ФОРМОВАНИЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Л.П. ПИЛИНЕВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6 Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 7 апреля 2015

Приведены результаты исследования процесса получения высокоэффективных пористых материалов из металлических порошков методом формования в электромагнитном поле. Определены оптимальные режимы формования пористых материалов, применяемых в качестве фильтрующих элементов.

Ключевые слова: электромагнитное поле, пористый материал, частица, фильтрующий элемент.

Введение

Одним из перспективных направлений создания высокоэффективных пористых материалов является использование в процессе формования электромагнитного поля [1–3]. К настоящему времени накоплен определенный теоретический и экспериментальный материал о влиянии параметров электромагнитного поля на процессы формования ферромагнитных порошков и на их физико-механические характеристики. Однако отсутствует научно-обоснованный выбор параметров электромагнитного поля при формовании пористых материалов, используемых в качестве фильтрующих элементов.

Поэтому целью данной работы является проведение теоретических и экспериментальных исследований процесса формования ППМ в электромагнитном поле и установлении основных закономерностей взаимодействия частиц порошка с электромагнитным полем, позволяющих прогнозировать эксплуатационные характеристики получаемых пористых материалов.

Теоретическое описание процесса формования ферромагнитных частиц под воздействием электромагнитного поля

Рассмотрим возникновение сил магнитного поля, действующих на ферромагнитные частицы порошка. При заполнении формы для спекания, расположенной на сердечнике электромагнита, ферромагнитным порошком, согласно законам ферромагнетизма возникают силы взаимодействия между частицами и формой, которые стремятся прижать ферромагнитные частицы к основанию формы для спекания. Магнитное поле в области его действия (расстояние между поверхностью слоя порошка и рабочей поверхностью полюсного сердечника) в направлении силы тяжести неоднородно, а вектор магнитной индукции направлен по нормали к рабочей поверхности полюсного сердечника. При этом частицы порошка наибольшей осью l_{\max} могут быть расположены как вдоль силовых линий, так и под углом α к магнитным силовым линиям (рис. 1).

Находясь в зоне действия магнитного поля, частицы намагничиваются, при этом наибольший магнитный момент будет в плоскости, проходящей через наибольшую ось металлической частицы.

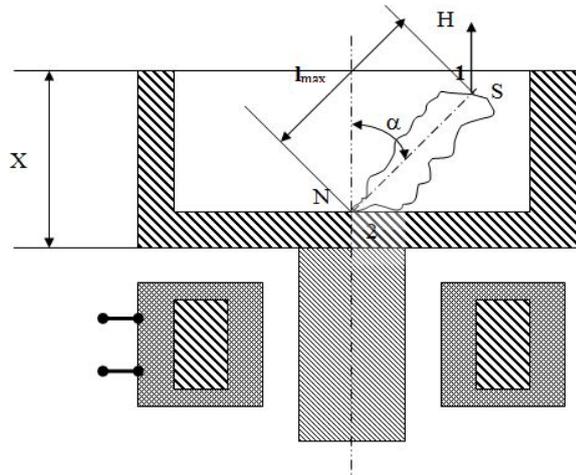


Рис. 1. Схема сил, действующих на частицу и ориентирующих ее в магнитном поле

Если напряженность в точке 1 будет H_1 , то напряженность в точке 2, где расположен противоположный полюс

$$H_2 = H_1 + \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) x, \quad (1)$$

где $\frac{\Delta H}{\Delta x}$ – градиент магнитного поля; x – расстояние действия магнитного поля от поверхности слоя порошка до дна формы.

Магнитные силы, действующие на частицу, соответственно будут равны

$$F_{M1} = mH; \quad (2)$$

$$F_{M2} = mH + m \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) x, \quad (3)$$

где m – магнитная масса ферромагнитной частицы.

При положительном градиенте $F_{M2} > F_{M1}$ и на ферромагнитную частицу действует пара сил с моментом

$$M = M_r H \sin \alpha, \quad (4)$$

где $M_r = ml$ – магнитный момент ферромагнитной частицы.

Следовательно, ферромагнитная частица в неоднородном магнитном поле, действующем в радиальном направлении рабочего зазора, будет поворачиваться, стремясь занять такое положение, при котором его наибольшая ось будет параллельна внешнему магнитному полю. Магнитный момент ферромагнитной частицы зависит от ее размеров и магнитных свойств материала. С учетом того, что форму частиц металлического порошка в первом приближении можно представить в виде эллипсоида вращения, их магнитный момент будет равен

$$M_r = \frac{4}{3} \pi a b^2 k_M H, \quad (5)$$

где $a = l_{\max}/2$; $b = l_{\min}/2$ – полуоси эллипсоида l_{\max} и l_{\min} наибольший и наименьший размеры частицы; k_M – магнитная восприимчивость; H – напряженность магнитного поля.

Уравнение для расчета силы, действующей вдоль магнитного поля можно представить в следующем виде:

$$F_{Mr} = \frac{4}{3} \pi a b^2 k_M \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) \cos \alpha. \quad (6)$$

Необходимо отметить, что внешнее магнитное поле, создаваемое катушками электромагнитной системы, наводит в ферромагнитных частицах свое локализованное

магнитное поле, которое взаимодействует с магнитными полями формы и полями ферромагнитных частиц порошка.

Магнитный поток, созданный локализованным магнитным полем, стремится замкнуться через контур, имеющий наименьшее магнитное сопротивление. Если по соседству окажутся две ферромагнитные частицы, то их магнитные поля замкнутся взаимно через эти частицы. Если же ферромагнитные частицы окажутся возле оснастки, то их локализованные поля замкнутся через поверхность оснастки. В первом случае частицы окажутся прижатыми друг у другу, а во втором прижатыми к поверхности формы для спекания. В прижатых друг к другу ферромагнитных частицах наводится новое магнитное поле и соответственно возникает магнитный момент. Наведенное новое локализованное поле взаимодействует с полями новых ферромагнитных частиц, и таким образом происходит формирование цепочек, состоящих из частиц, сориентированных по направлению силовых линий электромагнитного поля.

Исследование влияния параметров электромагнитного поля и свойств исходных порошков на процесс их ориентации вдоль силовых линий

К факторам, влияющим на процесс электромагнитного формирования порошка, можно отнести магнитную восприимчивость, частоту и напряженность электромагнитного поля, размер частиц, влажность, температуру материала и т.д. Эффективность магнитной ориентации металлических частиц главным образом определяется магнитной восприимчивостью частиц порошка, которая при прочих равных условиях определяет величину магнитной силы, необходимой для ориентации вдоль силовых линий. Размер частиц порошка существенно влияет на процесс их ориентации в магнитном поле, так как от размеров частиц зависит величина и роль сил, участвующих в процессе ориентации. Влияние размеров частиц на характер силового режима ориентации можно определить принципиально для трех основных диапазонов:

- 1) для порошков с размером частиц более 500 мкм, когда силы тяжести значительно превышают силы адгезионного слипания;
- 2) для порошков с размером частиц от 50 до 500 мкм, когда адгезионные силы приблизительно равны силам тяжести;
- 3) для порошков с размером частиц менее 50 мкм, когда адгезионные силы превышают силы тяжести и металлический порошок состоит из отдельных конгломератов. На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований влияния размеров частиц порошка ($D_{\text{ч}}$) на их магнитную восприимчивость (χ). Измерения проводили при напряженности электромагнитного поля, равном 30,0 Э.

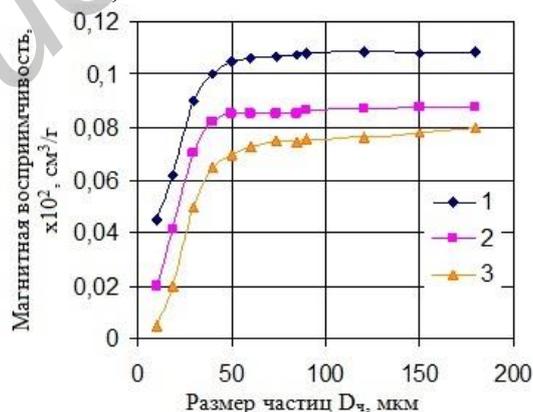


Рис. 2. Зависимость величины магнитной восприимчивости от размеров частиц металлического порошка: 1 – ПЖ-3; 2 – ПН-1; 3 – ШХ-15

Снижение магнитной восприимчивости происходит особенно резко в области размеров частиц, близких к доменным размерам. Из рис. 2 видно, что в области размеров частиц менее 30 мкм кривая $\chi = f(D_{\text{ч}})$ резко падает. Эта зависимость отражает изменения энергии намагничивания на единицу объема ферромагнетика. На основании полученных результатов исследований можно сделать вывод, что для формирования анизотропных поровых структур с

помощью электромагнитного поля необходимо использовать порошки с размером частиц более 30 мкм.

Ориентация частиц порошка с размером менее 30 мкм значительно сложнее, чем крупных, это обусловлено тем, что высокоразвитая поверхность частиц мелкого порошка имеет большие значения удельной свободной поверхностной энергии, что приводит к адгезионному слипанию отдельных частиц, т.е. к их агломерации. Для разделения агломератов необходимо приложить силовое поле, которое должно быть выше адгезионных сил, и в зависимости от начального положения частиц, больше сил тяжести.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований зависимости длины агломератов сорентированных частиц от их размеров и частоты магнитного поля.

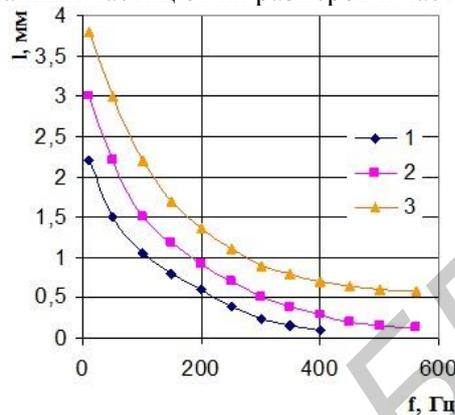


Рис. 3. Зависимость длины магнитной флоккулы от частоты магнитно поля порошка ПЖ-3 с размерами частиц: 1 – (50–100); 2 – (100–160); 3 – (200–315) мкм

Зависимости рис. 3 показывают, что с увеличением частоты магнитного поля длина сформованных флоккул уменьшается. Поэтому для формирования анизотропных поровых структур наиболее предпочтительно применять электромагнитную систему постоянного тока, или переменный ток низкой частоты, причем частицы с большим размером имеют большую длину магнитных флоккул.

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований зависимости напряженности электромагнитного поля (H), способного сорентировать частицы порошка вдоль силовых линий, от толщины слоя порошка (h).

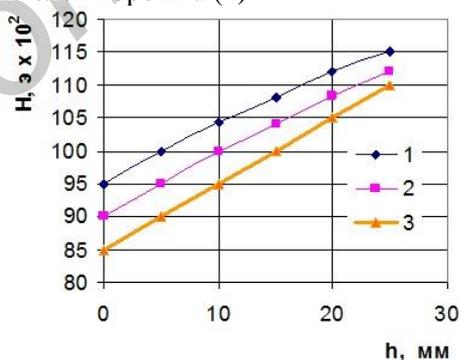


Рис. 4. Зависимость величины напряженности электромагнитного поля H , способного сорентировать частицы от толщины слоя порошка марки ПЖ-3 с размерами частиц: 1 – (0,315–0,2); 2 – (0,16–0,1); 3 – (0,1–0,063) мм

Результаты экспериментальных исследований подтверждают ранее сделанные расчеты и сделанные выводы, что наиболее трудно сорентировать частицы с малым размером, которые удалены от поверхности формы.

Исследование процесса получения пористых материалов с помощью электромагнитного поля

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований процесса ориентации частиц порошка в электромагнитном поле была рассчитана и изготовлена установка для формования ППМ с анизотропной поровой структурой.

Установка включает однородный соленоид, оптимальные размеры которого были определены расчетным путем и проверены экспериментально. Внутренний диаметр составил 80 мм. Пределы регулировки напряженности были выбраны от 0 до 1000 э. Внутри соленоида помещен магнитный стержень длиной 65 мм и диаметром 75 мм. Форма для спекания была изготовлена из биметалла, нижний слой которого был изготовлен из ферромагнитного материала (сталь 45), а верхний – из коррозионностойкой стали марки X18H9T. При установке на сердечник, форма притягивалась к сердечнику, и не отрывалась в процессе формования.

Исследования процесса формования пористых материалов состояли в проведении экспериментов по определению влияния величины электромагнитного поля, размеров частиц, на пористость, размеры пор и проницаемость полученных материалов. На рис. 5. приведены результаты экспериментальных исследований влияния напряженности электромагнитного поля на пористость для железного порошка марки ПЖ-3.

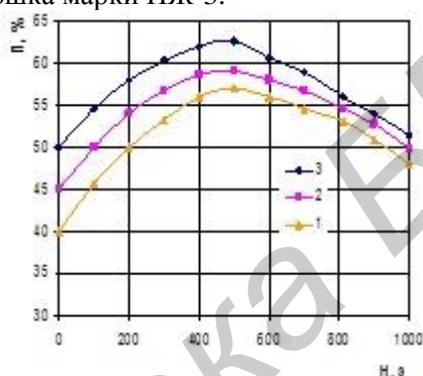


Рис. 5. Зависимость пористости образцов от напряженности магнитного поля при формовании порошка марки ПЖ-3: 1 – (0,2–0,315); 2 – (0,1–0,16); 3 – (0,063–0,1) мм

Данные результатов исследований показывают, что наименьшая пористость образцов достигается при напряженности магнитного поля, равном 400 э. Результаты экспериментальных исследований влияния напряженности магнитного поля на величину коэффициента проницаемости и средних размеров пор представлены на рис. 6.

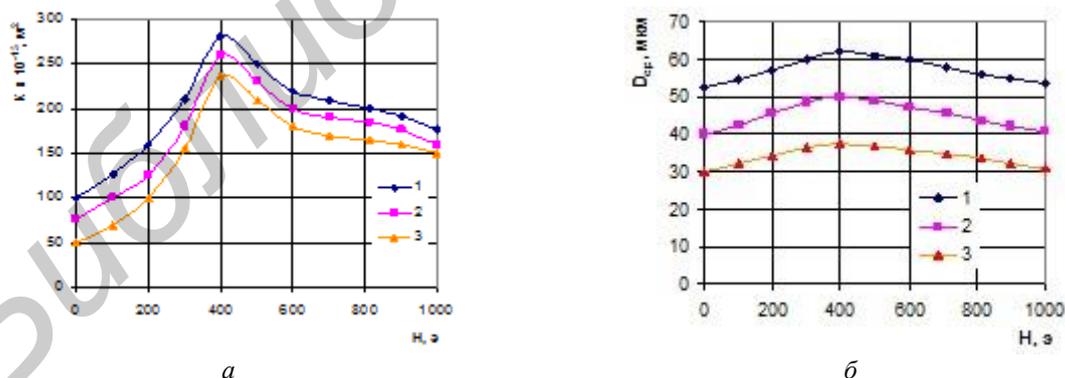


Рис. 6. Зависимость коэффициента проницаемости K (а) и средних размеров пор (б) от напряженности магнитного поля при формовании из порошков марки ПЖ-3: 1 – (0,2–0,315); 2 – (0,1–0,16); 3 – (0,063–0,1) мм

На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что существуют определенные значения величин напряженности электромагнитного поля, при которых достигаются наиболее высокие эксплуатационные характеристики пористых материалов, применяемых в качестве фильтрующих элементов. Так, например, для железного порошка марки ПЖ-3 оптимальная величина напряженности электромагнитного поля составляет 400 э, т.к. при данной величине достигается максимальная проницаемость пористых материалов. Структура образца пористого материала, полученного формованием в электромагнитном поле представлена на рис. 7.



Рис. 7. Микроструктура пористого материала из порошка железа марки ПЖ-3, полученного методом формования в электромагнитном поле $\times 25$

Заключение

В работе выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований процесса получения пористых материалов из металлических порошков методом формования в электромагнитном поле при наложении вибрации.

На основании проведенных исследований получены выражения, позволяющие рассчитать основные параметры электромагнитного поля, а также конструкционные параметры устройства, способного сориентировать заданный слой частиц порошка вдоль силовых линий.

MOLDING OF POROUS MATERIALS BY MEANS OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD

L.P. PILINEVICH

Abstract

The researching results of receiving process of highly effective porous materials from metal powders by molding in an electromagnetic field are given. Molding optimal regime of the porous materials used as filter elements are defined.

Список литературы

1. *Ilyuschenko A.F., Pilinevich L.P., Rak A.L. et al.* // Proceedings of 15th International plansee seminar «Powder metallurgical high performance materials». 2001. Vol. 3. P. 248–261.
2. *Пилиневич Л.П., Тарновский И.Э.* // Матер. конф. «Новые материалы и технология их обработки». Минск, 22–23 апреля 2003 г. С. 122–123.
3. Пористые порошковые материалы с анизотропной структурой методы получения / Под ред. П.А. Витязя. Минск, 2005.