

УДК 621.762.002

DOI: 10.30987/article_5ca303087cba57.59333232

Ю.М. Вернигоров, д.т.н.,

В.А. Лебедев, д.т.н.,

К.К. Лелетко, аспирант,

А.А. Ширин, аспирант

(Донской государственной технической университет, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

E-mail: jvernigorov@donstu.ru

Наукоёмкая технология получения композиционных порошков в магнитовибрирующем слое

Представлен анализ современного состояния проблемы, связанной с получением высококачественных композиционных порошков. Предложено устройство, которое позволяет в условиях магнитовибрирующего слоя получить высокую однородность распределения легирующих добавок, а также металлополимерные композиционные порошки. Получена расчетная модель, позволяющая определить интервал градиента индукции магнитного поля, при котором происходит разрушение кластеров порошка и обеспечивается устойчивое магнитокипение порошка.

Ключевые слова: магнитовибрирующий слой; дисперсный ферромагнетик; электромагнитное поле; композиты.

Yu.M. Vernigorov, Dr.Sc.Tech.,

V.A. Lebedev, Dr.Sc.Tech.,

K.K. Leletko, Post graduate student,

A.A. Shirin, Post graduate student

(Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-upon-Don, 344010)

Science intensive technology for manufacturing composite powders in magnetic vibrating layer

The paper reports the analysis of a problem current state connected with manufacturing high-quality composite powders. There is offered a device which allows obtaining a high uniformity of alloy addition distribution under conditions of a magnetic vibrating layer, and also metal polymeric composite powders. A designed model allowing the definition of a gradient interval of magnetic field induction is obtained, at which powder cluster destruction takes place and powder stable magnetic boiling is supported.

Keywords: magnetic vibrating layer; dispersed ferro-magnetic; electromagnetic field; composites.

Введение

Важное место среди технологий, обеспечивающих формообразование деталей, занимает порошковая металлургия, которая позволяет создавать принципиально новые материалы. Методами порошковой металлургии можно получать уникальные свойства, которые другими методами обеспечить практически невозможно. Обычно композиции порошков получают механическим перемешиванием или

диспергированием расплава заданного состава. Такая технология применяется, если легирующими элементами являются металлы, удельная масса которых незначительно отличается от удельной массы основы. Получение однородной порошковой композиции представляет определенные трудности, если вводимые добавки, например – соединения неорганического происхождения либо неметаллы.

Дисперсные ферромагнетики магнито жестких материалов характеризуются сильным

межчастичным взаимодействием адгезионной и магнитоэлектрической природы. Связано это с тем, что даже агрегаты из нескольких частиц обладают результирующим магнитным моментом отличным от нуля. Развитая поверхность такого агрегата приводит к высоким адгезионным силам.

Для решения практических задач порошковой металлургии магнитоэлектрических ферромагнитных материалов применяют периодические поля разной физической природы: механические, акустические, электромагнитные, электрические, магнитные, а также специально подобранные комплексные суперпозиции различных способов.

При действии периодических сил на дисперсную среду, можно выделить следующие эффекты: появление новых положений равновесия и видов движения; изменение собственных частот малых колебаний; сепарация частиц материала по свойствам; превращения сухого трения в вязкое; разрыхление дисперсной среды; возникновение интенсивного механического взаимодействия между частицами и объемами многокомпонентных систем.

По ряду фундаментальных свойств и характеру взаимодействия с внешними электромагнитными полями гетерогенные дисперсные системы, в которых диспергированной фазой являются ферромагнитные частицы, можно разделить на два класса [1]. К первому относятся магнитные жидкости: ферроколлоиды и магнитоэлектрические суспензии. Второй класс – тонкодисперсные системы, в которых образование магнитоэлектрического слоя обеспечивается действием электромагнитного поля. Влияние внешнего электромагнитного поля на поведение системы связано с его ориентирующим действием на отдельные частицы и структуры (цепочки, кластеры), образующиеся за счет поверхностных, диполь-дипольных и лоренцевских взаимодействий.

Экспериментальные работы на моделях сферических шаров из магнитоэлектрических материалов показывают, что в естественных кластерах образуется макровихревое упорядочение магнитных моментов отдельных частиц и магнитный момент кластера оказывается меньше простой суммы магнитных моментов частиц в кластере из-за замыкания их магнитных потоков.

Образующиеся агрегаты (кластеры) можно рассматривать как пористые частицы, имеющие кроме внешней (геометрической) развитую внутреннюю поверхность. Размер пор зависит от формы и размеров самих частиц и

развитости их поверхности. Проблема зарождения и устойчивого существования пространственных образований – структур в начально нетекстурированных средах, является одной из наиболее принципиальных и в то же время трудных проблем теории неравновесных сред [2]. Эти особенности порошков магнитных материалов вызывают основные затруднения при измерении их физико-технологических характеристик и объясняют расхождения в результатах измерений, полученных различными методами.

С целью получения качественных композитов на основе ферромагнитных материалов разработано устройство и проведены исследования по обоснованию параметров электромагнитных полей, влияющих на реологические свойства магнитоэлектрического слоя и определяющих эффективное перемешивание компонентов.

Технологическое устройство получения композитов

Для получения композитов в условиях магнитоэлектрического слоя разработано опытно-экспериментальное электромагнитное устройство, блок-схема которого представлена на рис. 1.

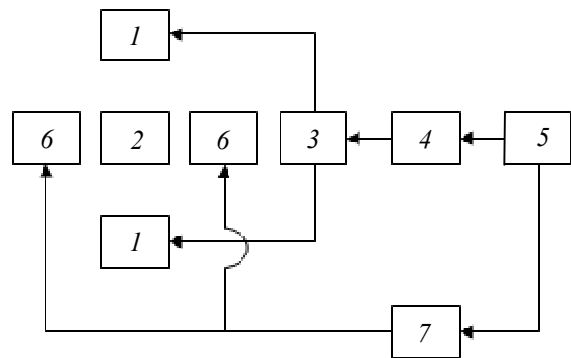


Рис. 1. Блок-схема электромагнитного устройства получения композитов:

1 – пермеаметр; 2 – рабочая кювета; 3 – усилитель; 4 – генератор; 5 – источник стабилизированного напряжения; 6 – электромагнит; 7 – выпрямитель

Неоднородное магнитное поле создается при помощи пермеаметра с разомкнутым магнитопроводом 1, между полюсами которого помещается рабочая кювета 2 с дисперсной системой, корпус которой изготавливается из непроводящего и немагнитного материала. Для получения устойчивого режима магнито-

кипения включается постоянное поле, создаваемое электромагнитом 6. Порошок в рабочей кювете переходит в режим магнитокипения, что и приводит к образованию композитов.

Моделирование взаимодействия частиц в магнитовибрирующем слое

Тонкодисперсные системы ферромагнитных частиц моделируют однодоменной структурой, в которой энергетически выгодно исчезновение энергии граничных слоев. В результате такая частица обладает внешним магнитным потоком, что и приводит к сильному межчастичному взаимодействию магнитостатической природы. Процесс образования кластеров может усиливаться за счет когезионного взаимодействия из-за сильно развитой поверхности частиц тонкодисперсных порошков.

В дисперсных гетерогенных системах ферромагнитных частиц с помощью электромагнитного поля образуется магнитовибрирующий слой [4], т.е. взвешивание частиц в жидкостях и в газе и приведение их в состояние интенсивного движения. Последнее возможно в переменных [2] и вращающихся магнитных полях для частиц магнитотвердых и магнитомягких материалов [3].

Получение магнитовибрирующего слоя (МВС) ферромагнитных материалов эффективно решает ряд практических задач, а опыт реализации МВС в аппаратах различного назначения открывает определенные возможности использования МВС в порошковой металлургии ферромагнитных материалов [3, 4]. В магнитовибрирующем слое ансамбль частиц, помещенных в межполюсную область электромагнита переменного тока [4], вводится в режим устойчивых колебаний, частота которых определяется частотой тока в обмотке электромагнита.

Движение кластера в магнитном поле заданной топологии можно представить как суперпозицию поступательного и вращательного движений. Учитывая особенности движения частиц ферромагнитного материала, можно предположить следующий механизм формирования композитов в магнитовибрирующем слое. На начальном этапе происходит разрушение кластеров до отдельных частиц, во-первых, за счет соударения кластеров друг с другом и, во-вторых, за счет относительного перемещения частиц в кластере под действием пондеромоторных сил. Далее отдельные час-

тицы ферромагнитного материала совершают под действием сил переменного магнитного поля колебательное движение, и при взаимодействии с частицами легирующих элементов формируется частица требуемого композита.

Рассмотрим разрушение кластеров ферромагнитного материала за счет соударения между ними при следующих допущениях:

- 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 $\vec{B}_c \perp \vec{B}_v$;

- диссипация энергии частиц в установившемся МВС компенсируется внешним полем;

- частицы и кластеры дисперсной среды моделируются сферами с «вмороженными» магнитными моментами;

- изменение ориентации магнитных моментов частиц между последовательными соударениями незначительно, что позволяет линеаризовать уравнения движения магнитного диполя [5].

Предположим, что при соударении разновеликих кластеров в магнитовибрирующем слое разрушается один из кластеров и топология магнитного поля такова, что энергия передается только на поступательные степени свободы:

$$E_{n-k} = \frac{1}{2\pi} \frac{(P \partial B_v / \partial y)^2}{m \omega}, \quad (1)$$

где P – магнитный момент кластера; $\partial B_v / \partial y$ – градиент индукции поля; m – масса кластера; ω – частота переменного магнитного поля.

Кроме того, процесс взаимодействия сферических кластеров примем происходящим в пределах половины периода, т.е. $T/2 = \pi/\omega$.

При разрушении способами раскалывания, удара затраты энергии E_p на разрушение сферического кластера при степени разрушения Z_u согласно [1] рассчитывают по формуле

$$E_p = \frac{\pi \sigma^2 D_k^3}{12 E} (Z_u^3 - 1), \quad (2)$$

где σ – предел прочности при разрушении кластера; D_n и D_k – начальный и конечный эквивалентные диаметры кластера; $Z_u = \frac{D_n}{D_k}$ – степень разрушения кластера; E – предел

прочности кластера

С учетом принятых допущений разрушение кластера происходит при выполнении следующего условия:

$$\frac{1}{2\pi} \frac{(P_m \partial B_v / \partial y)^2}{m \omega} \cdot \frac{\pi}{\omega} + \frac{1}{2\pi} \frac{(P_M \partial B_v / \partial y)^2}{M \omega} \cdot \frac{\pi}{\omega} = \frac{\pi \sigma^2 D_K^3}{12E} \left(\frac{D_H^3}{D_K^3} - 1 \right) \quad (3)$$

где $P_m = \frac{J \pi d^3}{6}$ – магнитный момент первого кластера; d – эквивалентный диаметр первого кластера; $m = \frac{\rho \pi d^3}{6}$ – масса первого кластера;

ρ – плотность материала; $P_M = \frac{J \pi D_H^3}{6}$ – магнитный момент второго кластера; D_H – начальный диаметр второго кластера; D_K – конечный диаметр второго кластера; $M = \frac{\rho \pi D_H^3}{6}$ – масса второго кластера; J – намагниченность материала.

В формуле (3) первое слагаемое есть энергия, передаваемая магнитным полем за половину периода первому кластеру, второе слагаемое – энергия, передаваемая второму кластеру. Преобразовав (3), найдем соотношения между начальными размерами разрушаемого кластера и градиентом индукции поля в виде:

$$D_H = 3 \sqrt[3]{\frac{d^3 \left(\frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 + K D_K^3}{K - \left(\frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2}} \quad (4)$$

где $K = \frac{\rho \sigma^2 \omega^2}{J^2 E}$ – константа, зависящая от механических и магнитных свойств материала и частоты переменного поля.

Соотношение (4) позволяет определить градиент индукции поля, при котором разрушается кластер с эквивалентным диаметром D_H до кластера диаметром D_K при условии,

что произошло соударение между кластерами с эквивалентными диаметрами D_H и d .

Задавая конечный размер кластера, из соотношения (4) определяем, при каких полях реализуется разрушение кластеров до отдельных частиц. Так, для феррита бария, в широком интервале кластеров размером 100 мкм, отделение частицы размером 0,5...10 мкм происходит в полях с одинаковым градиентом индукции (рис. 2, кривая 1).

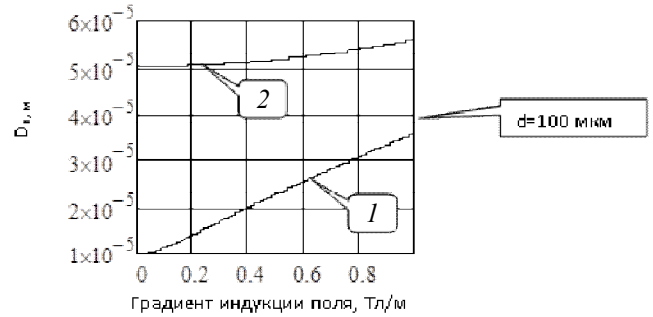


Рис. 2. Значения градиента индукции поля, при которых наступает отделение частиц феррита бария: кривая 1 – до размеров 0,5...10 мкм; кривая 2 – до размеров > 50 мкм

Взаимодействие кластеров размером 100 мкм с кластерами размером более 50 мкм приводит к отделению частицы от второго кластера (рис. 2, кривая 2).

Взаимодействие соизмеримых кластеров (рис. 3) приводит к отделению частиц в полях с градиентом индукции до 1,0 Тл/м.

Рассмотрим две частицы, отличающиеся размерами и удерживаемые, друг относительно друга, в кластере силой магнитостатического взаимодействия F_m (рис. 4).

Со стороны неоднородного переменного поля на кластер действует гармоническая сила F_V , коллинеарная G (случай 1):

$$\vec{F}_V = \vec{F}_0 \sin \omega t ; \quad \vec{F}_0 = P_m \frac{\partial B}{\partial y} \cos \varphi ,$$

где φ – угол между вертикальной осью и магнитным моментом P_m малой частицы; $\partial B / \partial y$ – изменение индукции магнитного поля вдоль вертикальной оси.

Частица большего размера обладает большей инерционностью, и при малых амплитудах F_0 или достаточно больших частотах электромагнитного поля ω не успевает за изменением поля.

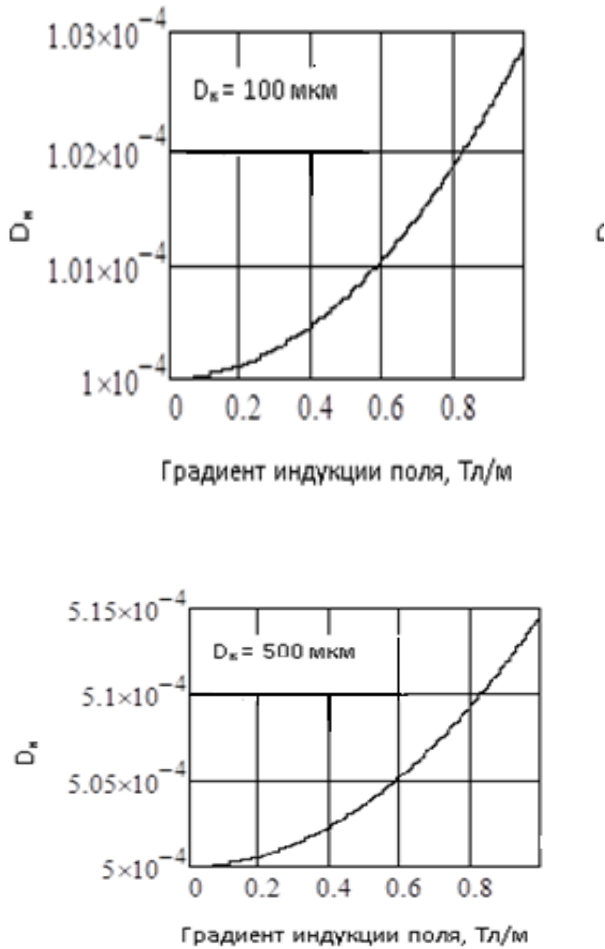


Рис. 3. Значения градиента индукции поля, при которых наступает разрушение соизмеримых кластеров феррита бария

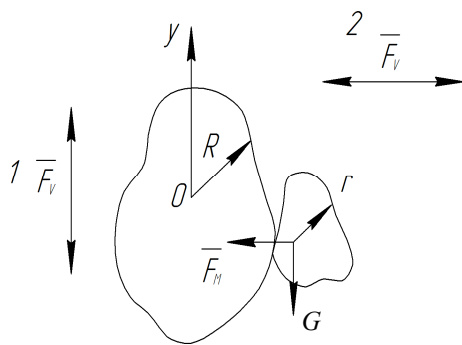


Рис. 4. Модель взаимодействия частиц порошка в кластере

Малая частица начнет перемещаться относительно большой, если выполняется следующее условие:

$$\vec{G} = f_1 \vec{F}_m - \vec{F}_0,$$

где f_1 – коэффициент трения покоя.

Коэффициент трения для взаимодействующих частиц для случаев вертикальной и горизонтальной ориентации переменной силы (обозначенных на рис. 4 цифрами 1 и 2) можно записать в виде:

$$f_{(1)} = \frac{G}{F_m} = f_1 \left[1 - \frac{F_0}{f_1 F_m} \right], \quad (5)$$

$$f_{(2)} = f_1 \left[1 - \frac{F_0}{F_m} \right].$$

Сила магнитостатического взаимодействия частиц в агрегате в рамках диполь-дипольного приближения определяется выражением:

$$F_m = \frac{\mu_0 P_1 P_2}{4\pi r R (r + R)^2}, \quad (6)$$

где P_1 и P_2 – магнитные моменты большой и малой частицы соответственно; r , R – эквивалентные размеры малой и большой частиц; μ_0 – магнитная постоянная.

Предполагая, что градиент индукции переменного поля направлен вдоль вертикальной оси, а также учитывая выражения (5) и (6), запишем:

$$f_{(1)} = f_1 \left[1 - \frac{4\pi r R (r + R)^2}{\mu_0 f_1 P_m} \frac{\partial B}{\partial y} \cos \varphi \right]. \quad (7)$$

Если гармоническая сила перпендикулярна G (случай 2, рис. 4), то эффективный коэффициент сухого трения определяется выражением (7), за исключением множителя f_1 в квадратной скобке. Соотношение (7) имеет смысл до тех пор, пока эффективный коэффициент трения остается положительным. При больших градиентах индукции поля происходит кажущееся изменение характера трения. При этом принято считать, что эффективные коэффициенты сухого трения обращаются в ноль.

Последнее положение позволяет из равенства (7) оценить значение градиента индукции поля, при котором происходит кажущийся переход трения из сухого в вязкое:

$$\frac{\partial B}{\partial y} \geq \frac{\mu_0 f_1 P_m}{4\pi r R (r + R)^2 \cos \varphi}. \quad (8)$$

Повышение индукции магнитного поля обуславливает создание структурированного состояния ферромагнитного порошка в виде агрегатов вытянутой формы с преимущест-

венной ориентацией магнитных моментов вдоль силовых линий поля. Оценка, проведенная для порошков феррита бария и стронция с удельной поверхностью в интервале 0,7...1,0 м²/г, дает значение градиента индукции 2...60 мТл/м. При расчете предполагали, что размеры большой и малой флюкул отличаются на порядок.

Магнитокипение порошка будет устойчивым, если удельная энергия диссипации равна удельной энергии, подводимой от переменного поля. Увеличение размеров агрегатов приводит к снижению граничного значения градиента индукции переменного поля, соответствующего кажущемуся переходу в порошок к вязкому трению, что следует из анализа соотношения (8).

Заключение

Предложенная расчетная модель позволяет определить интервал градиента индукции магнитного поля, при котором происходит разрушение кластеров порошка и обеспечивается устойчивое магнитокипение порошка.

Как показали экспериментальные исследования, использование магнитовибрирующего слоя позволяет получить высокую однородность распределения легирующих добавок, а также металлополимерные композиционные порошки с содержанием полимерной составляющей от 0,2 до 3,0 % от массы порошка основы. Кроме того, «теплое» прессование таких порошков повышает в 10 – 12 раз сырую прочность антифрикционных материалов при пористости 22...24 %.

Композиционные железо-медные порошки, полученные в магнитовибрирующем слое, обладают высокой однородностью распределения легирующего элемента, при этом обеспечивают требуемые физико-механические свойства медистых спеченных сталей, содержащих меди на 25...30 % меньше, чем при традиционных методах смешивания шихты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вернигоров, Ю.М., Лебедев, В.А., Лелегко, К.К., Фролова, Н.Н. Особенности технологического процесса

устройств помола ферромагнитных материалов на базе магнитовибрирующего слоя // Матер. Междунар. научн. симпозиума технологов-машиностроителей «Научно-технические технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий», Ростов-на-Дону, – 2016.

2. J.M. Vernigorov, B.G. Gasanov, S.S. Baev Magnetic Wave Technology of Grinding Slime Separation Solid State Phenomena, September 2017, Trans Tech Publications/DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.265.1020 Solid State Phenomena, Vol. 265, pp. 1020-1025, 2017.

3. Лебедев, В.А., Кочубей, А.А. Применение вращающегося электромагнитного поля в технологических целях // Сб. тр. междунар. научн.-техн. симпозиума «Интегрированные, виброволновые технологии в машиностроении и металлообработке», Ростов н/Д, – 2015.

4. Болога, М.К., Марта, И.Ф. Магнитооживление во вращающемся магнитном поле // Магнитная гидродинамика. – 1988. – №3. – С. 103-108.

5. Бувич, Ю.А., Сюткин, С.В., Тетюхин, В.В. К теории развитого магнитооживленного слоя // Магнитная гидродинамика. – 1984. – № 4. – С. 3-11.

REFERENCES

1. Vernigorov, Yu.M., Lebedev, V.A., Leletko, K.K., Frolova, N.N. Peculiarities of engineering process of ferromagnetic material grinding devices based on magnetic vibrating layer // *Proceedings of the Inter. Scientif. Symposium of Technologist-Mechanicians "Science Intensive and Vibration Wave Technologies for Parts Processing in Science Intensive Products"*, Rostov-upon-Don, - 2016.

2. J.M. Vernigorov, B.G. Gasanov, S.S. Baev Magnetic Wave Technology of Grinding Slime Separation Solid State Phenomena, September 2017, Trans Tech Publications/DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.265.1020 Solid State Phenomena, Vol. 265, pp. 1020-1025, 2017.

3. Lebedev, V.A., Kochubey, A.A. Rotating electromagnetic field application with technological purposes // *Proceedings of the Inter. Scientific-Tech. Symposium "Integrated Vibration Wave Technologies in Mechanical Engineering and Metalworking"*, Rostov-upon-Don, - 2015.

4. Bologa, M.K., Marta, I.F. Magnetoliquefaction in rotating magnetic field // *Magnetic Hydrodynamics*. – 1988. – No.3. – pp. 103-108.

5. Buevich, Yu.A., Syutkin, S.V., Tetyukhin, V.V. To theory of developed magnetoliquefied layer // *Magnetic Hydrodynamics*. – 1984. – No.4. – pp. 3-11.

Рецензент д.т.н. В.Н. Варавка

