

DOI: 10.26730/1999-4125-2020-4-30-35

УДК 621.762

**МАГНИТОВИБРИРУЮЩИЙ СЛОЙ В ТЕХНОЛОГИИ ДИСПЕРСНЫХ
МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ****MAGNETIC VIBRATING LAYER IN THE TECHNOLOGY OF DISPERSED
MAGNETIC MATERIALS**

Вернигоров Юрий Михайлович,
доктор техн. наук, профессор, e-mail: jvernigorov@donstu.ru
Yuri M. Vernigorov, Dr. Sc. in Engineering, Prof.,

Лебедев Валерий Александрович,
канд.техн. наук, профессор, e-mail: va.lebidev@yandex.ru
Valery A. Lebedev, C. Sc. in Engineering, Prof.,

Демин Георгий Вячеславович,
аспирант, e-mail: .georgijdstu@yandex.ru,
Demin George V., Postgraduate

Донской государственный технический университет, 344002, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл.
Гагарина, 1
Don State Technical University, 1 Gagarin square, Rostov-on-don, 344002, Russia Federation

Аннотация:

Попытки интенсификации процессов получения порошков с определенным успехом реализованы в установках с аэрокипящим слоем, а также в установках химического плакирования с наложением ультразвука, отжига в виброкипящем слое и пр. Задачей таких технологических приемов является получение максимальной порозности частиц за счет псевдооживления свободно насыпанных частиц для интенсификации процессов. Основным параметром, ограничивающим применимость того или иного способа в порошковых технологиях, является размер частиц. Например, при использовании порошков с размерами 0,5-5 мкм перечисленные способы неэффективны. Другим ограничивающим фактором является температура. Так, химико-термическая обработка порошков железа в вибрирующем слое эффективна до температур порядка 500°C. При более высоких температурах виброслой порошка резко изменяет свои реологические свойства, что приводит к виброуплотнению и в итоге к блокированию процесса. Использование в технологии плакирования добавок в виде порошков кристаллогидратов солей легирующих металлов еще больше снижает эффективную температуру, а присутствие жидкой фазы приводит к образованию плотных гранул и окатышей. Это требует создания установок, позволяющих в течение цикла изменять параметры вибрационного процесса (частоту, амплитуду, направление вибраций), что технологически не всегда оправдано. Целью работы является анализ возможностей технологических процессов в порошковой металлургии ферромагнитных материалов, основанных на формировании магнитовибрирующего слоя в электромагнитном поле.

Ключевые слова: виброкипящий слой, псевдооживление, магнитовибрирующий слой, магнитное поле, прессование.

Abstract:

Attempts to intensify the processes of obtaining powders with a certain success have been implemented in installations with an air-boiling layer, chemical coating with ultrasound, annealing in a vibro-boiling layer, and so on. The task of such technological techniques is to obtain the maximum porosity of particles by fluidizing freely poured particles to intensify the processes. The main parameter limiting the applicability of a particular method in powder technologies is the particle size. For example, when using powders with a size of 0.5 - 5 microns, these methods are not effective. Another limiting factor is temperature. Thus, chemical-thermal treatment of iron powders in a vibrating layer is effective up to temperatures of the order of 500 °C. At higher temperatures, the vibration layer of the powder abruptly changes its rheological properties leading to vibration compaction and, as

a result, to the process blocking. The use of additives in the cladding technology in the form of powders of crystallohydrates of alloying metal salts further reduces the effective temperature, and the presence of the liquid phase leads to the formation of dense granules and pellets. This requires the creation of installations that allow you to change the parameters of the vibration process (frequency, amplitude, direction of vibrations) during the cycle, which is not always technologically justified. Purpose of work is analysis of the possibilities of technological processes in the powder metallurgy of ferromagnetic materials based on the formation of a magnetovibrating layer in an electromagnetic field.

Key words: *vibro-boiling layer, fluidization, magnetovibrating layer, magnetic field, pressing.*

Основная часть. Ни один из традиционных способов вибротехнологий не позволяет обеспечить пространственную устойчивость псевдооживленной полидисперсной массы частиц размером 1-50 мкм. Применение магнитовибрирующего слоя (МВС) просто и эффективно решает эту задачу, а опыт реализации этого способа открывает определенные возможности использования МВС в порошковой металлургии. МВС из ферромагнитных порошков позволяют создать условия для управляемого движения частиц в рабочем пространстве аппарата, наиболее характерными формами которого являются магнитокипение, магнитооживление, текстурированная система вибрирующих частиц и кластеров. Перечислим некоторые возможности применения МВС в порошковой металлургии.

1. Возможность переработки в порошкообразное состояние отходов металлургического и машиностроительного производств является важным преимуществом порошковых технологий. Отходы шлифовального производства – почти кондиционное сырье, но практически не используемое для получения порошковых материалов из-за абразивных частиц, удалить которые традиционными способами практически невозможно. Характерная особенность шлифовального шлама – повышенная способность стружкообразных частиц к образованию микроагрегатов за счет сил механического и магнитоэстатического взаимодействия, внутри которых заключены частицы немагнитной фракции. При соответствующем подборе параметров – амплитуды и градиента магнитной индукции, частоты электромагнитного поля и времени процесса – можно реализовать режимы, при которых происходит наиболее интенсивное разрушение агрегатов. Основными механизмами разрушения можно считать разрушение из-за магнитной неоднородности в высокоградиентном поле кластеров из частиц порошка и ударное разрушение при взаимодействии кластеров друг с другом.

Определим условия разрушения сферического магнитного кластера, движущегося в магнитном поле, образованном суперпозицией однородного постоянного и неоднородного переменного магнитных полей. Силовые линии однородного поля направлены вдоль оси ОХ, а

неоднородного – вдоль оси ОУ. Магнитный кластер совершает сложное движение, описываемое уравнениями

$$M\ddot{r} = \left[\vec{P}_m \frac{dB_v}{dy} \right] + \left[\vec{P}_m \vec{B}_c \right] - \mu\dot{\phi}, \quad (1)$$

где $B_{vo} = B_v \cos \omega t$ – индукция переменного магнитного поля, B_c – индукция постоянного поля, k и μ – коэффициенты сопротивления среды поступательному и вращательному движениям соответственно, M – масса, I – момент инерции, P_m – магнитный момент кластера.

Первое уравнение системы описывает возвратно-поступательное движение кластера, второе – колебательно-вращательное относительно собственной оси инерции. Начальные условия, предполагая, что при $t = 0$ кластер покоится и его смещение равно нулю, для системы запишем в виде:

$$\begin{aligned} r(0) &= \dot{r}(0) = 0, \\ v(0) &= \dot{v}(0) = 0. \end{aligned}$$

При составлении уравнений (1) принято, что монодисперсная система сферических частиц агрегирована адгезионными и магнитоэстатическими силами в кластеры с магнитным моментом $\vec{P}_m = \sum_{i=1}^n \vec{P}_i$, величина которого постоянна. Значение градиента индукции переменного поля вдоль оси ОУ существенно превышает значения градиента вдоль любого другого направления.

Учитывая условия отрыва частицы от кластера, получим значения градиента переменного поля, необходимого для его разрушения [1,2]

$$\frac{dB_v}{dy} \geq \frac{\mu_0 f_1 P_m}{4\pi r R (r+R)^2 \cos \phi} \quad (2)$$

где f_1 – коэффициент трения покоя между частицей и кластером, r , R – эквивалентные размеры частицы и кластера, моделируемые сферами, μ_0 – магнитная постоянная, ϕ – угол между вертикальной осью и магнитным моментом P_m частицы, dB/dy – изменение индукции переменного магнитного поля.

Оценка, проведенная по (2) для порошков феррита бария и стронция с удельной поверхностью в интервале $0,7 \dots 1 \text{ м}^2/\text{г}$, дает значение градиента индукции $2 \dots 60 \text{ мТл/м}$. При расчете предполагали, что размеры кластера и частицы отличаются на порядок [3,4,5].

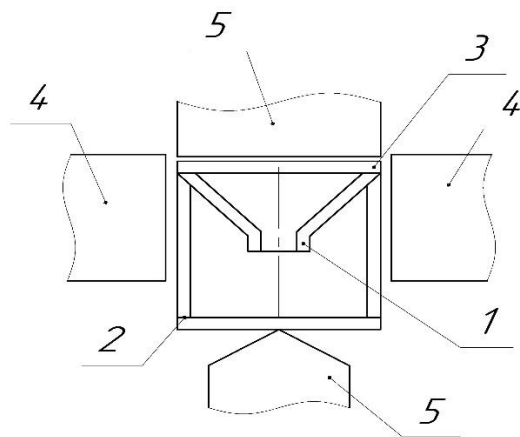


Рис. 1. Схема элемента экспериментальной установки для исследования текучести

Fig. 1. Diagram of the element of the experimental installation for the study of fluidity

- 1 – измерительная воронка; 2 – приемник; 3 – крышка; 4 – полюсные наконечники электромагнита постоянного тока; 5 – полюсные наконечники электромагнита переменного тока.

Полученные параметры поля удовлетворительно совпадают с экспериментальными результатами.

2. Другое перспективное направление в технологиях МВС, используемых в порошковой металлургии ферромагнитных материалов – термическая и химико-термическая обработка порошков. Эта технология позволяет реализовать практически все преимущества МВС при температурах до 700°C, в том числе управление процессами изменением параметров электромагнитных полей. Создание однородной порозности во всем объеме МВС повышает эффективность массообменных процессов до уровня, соответствующего полному устранению препятствий между поверхностью частиц и газовой (парогазовой) средой [6].

3. Большинство технологий производства наиболее востребованных порошков на основе железа, в том числе и ферритовых порошков, содержат операции высокотемпературного отжига или ферритизации, в результате чего полупродуктом являются массивные губчатые спеки, которые подвергаются интенсивному измельчению. Энергетические затраты на размол составляют 45-50% от общих затрат на производство, при этом порошок имеет высокие значения величин микронапряжений и плотности дислокаций в результате наклепа. Процессы отжига с применением МВС позволяют в значительной степени снизить энергозатраты на размол и повысить технологические свойства порошков. Схематично процесс можно представить следующим образом: на начальном этапе порошок-сырец (окалина, железорудный

концентрат) подвергаются интенсивному магнитокипению при температурах 250-300°C, при этом происходят процессы сушки, выгорания органических примесей и сепарация немагнитной фракции. Затем из МВС порошкообразная среда переводится в пространственно-устойчивое, жестко ориентированное (по магнитным силовым линиям) состояние, характеризующееся высокой направленной пористостью агрегатов частиц с точечными контактами конденсационной или кристаллизационной природы, сохраняющими свою пространственную устойчивость до температур ~1150°C. Реальные режимы отжига не превышают 950°C. Восстановленные в промышленных режимах агрегированные спеки легко размалываются до размеров частиц исходного порошка и имеют технологические свойства,

на 15-25% превышающие серийно-выпускаемые.

4. Высокоэффективное снижение внутреннего трения в порошках высококоэрцитивных материалов наблюдалось в высокоградиентных магнитных полях, в которых реализуется не только снижение внутреннего трения, но и достаточно эффективное управление процессом истечения этих порошков [7,8].

В соответствии с ГОСТом 20899-75 из немагнитного материала изготавливали воронку (1) (рис.1), уменьшенную по высоте до 35мм от нижнего края калибровочного отверстия. Воронку помещали в приемник (2) цилиндрической формы, сверху закрывали крышкой и всю систему располагали в общем межполюсном пространстве двух электромагнитов, создающих постоянное и переменное магнитные поля. При этом силовые линии переменного поля были коллинеарны вертикальной оси воронки.

Влияние на реологические характеристики индукции постоянного поля очевидно при анализе зависимости на рис. 2. Текучесть порошка SmCo_5 при градиенте индукции переменного поля 57мТл/м более активна с ростом индукции постоянного поля до 14мТл, затем уменьшается и при $B_c = 38,5\text{мТл}$ практически прекращается.

Изменение скорости истечения порошков в зависимости от индукции постоянного поля связано с изменением размеров кластеров, образующихся в порошке. Увеличение размеров кластеров приводит к снижению граничного значения градиента индукции переменного поля, соответствующего кажущемуся переходу в

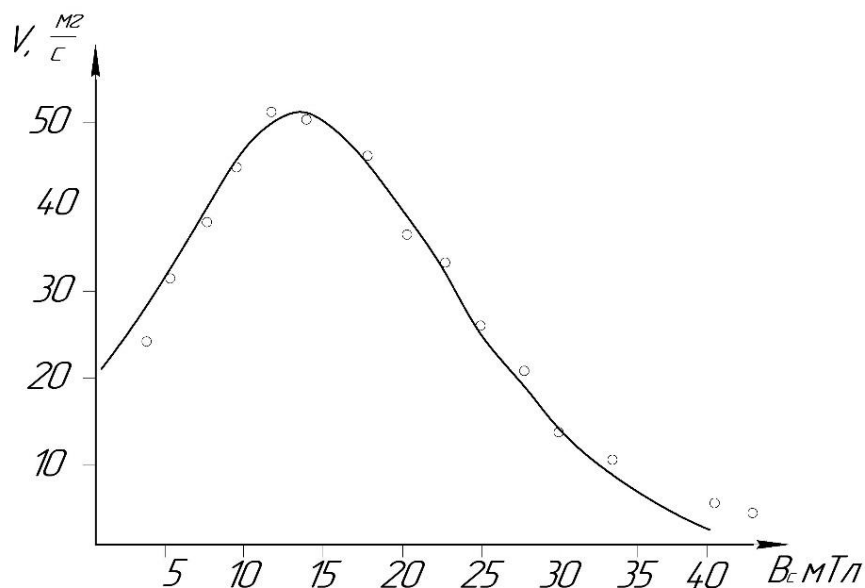


Рис. 2. Влияние индукции постоянного поля на скорость истечения порошка $SmCo_5$. $B_v = 2.23$ мТл
 Fig. 2. Impact of constant field induction on the flow rate of powder $SmCo_5$. $B_v = 2.23$ mt

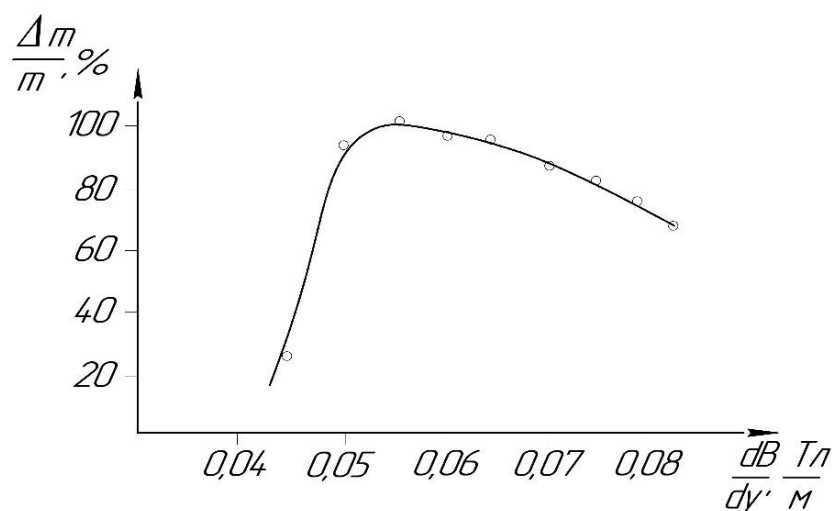


Рис. 3. Влияние градиента индукции переменного поля на массу просыпавшегося порошка $SmCo_5$, при $B_c = 13,3$ мТл
 Fig. 3. Impact of the variable field induction gradient on the mass of the spilled powder $SmCo_5$ at $B_c = 13.3$ mt

порошке к вязкому трению. Таким образом, для практической реализации эффективного истечения порошка необходимо индивидуально подбирать режим внешнего воздействия для каждого дисперсного материала заданного гранулометрического состава.

Зависимость скорости истечения порошков от градиента индукции переменного поля имеет максимум, представленный на рис. 3. ($B_c = 13,3$ мТл). После достижения максимума скорость истечения уменьшается с ростом градиента индукции медленно и при $0,12$ Тл/м для $SmCo_5$ ($0,15$ Тл/м для $BaFe_{12}O_{19}$) практически обращается в

нуль.

Неоднородность переменного поля усиливает процессы ориентации магнитных моментов кластеров в направлении индукции поля, что приводит к возникновению упорядоченного движения порошка. Однако дальнейшее повышение градиента индукции обуславливает создание структурированного состояния ферромагнитного порошка в виде кластеров вытянутой формы с преимущественной ориентацией магнитных моментов вдоль силовых линий поля, что приводит к уменьшению текучести порошка и объясняет наличие максимума

зависимости скорости истечения порошка от градиента индукции поля (рис. 3).

Сопоставление экспериментальных результатов позволяет утверждать, что градиент индукции переменного поля, соответствующий максимальной скорости истечения, для каждой дисперсной системы следует подбирать индивидуально. Однако практически для всех исследованных материалов градиент индукции переменного поля, соответствующий максимальной скорости истечения порошка, меняется в достаточно узкой области 50...90 мТл/м. Значение индукции постоянного поля при

максимальной текучести для порошка SmCo_5 примерно в 4-5 раз меньше, чем для $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$.

Выводы. Приведенные примеры применения магнитовибрирующего слоя в порошковой технологии магнитомягких материалов являются далеко не полными. Применяя МВС, можно реализовать технологию сухого прессования высококачественных изделий с высокой анизотропией магнитных свойств. Следует отметить, что применение МВС в технологии порошковых изделий предполагает не совершенствование существующих технологий, а создание принципиально новых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование разрушения агрегатов высококоэрцитивных дисперсных ферромагнетиков в магнитных полях различной топологии//Вернигоров Ю.М., Лелетко К.К./ Sciences of Europe . 2018. №21(21), vol.1, С. 43-46.
2. Энергетические условия управления гранулометрическим составом продуктов измельчения высококоэрцитивных ферромагнетиков в магнитовибрирующем слое// Вернигоров Ю.М., Лебедев В.А., Фролов Н.Н., Лелетко К.К. // Автоматизация. Современные технологии. - Москва: Инновационное машиностроение, 2019. Том 73, N 9.- С. 396-400.
3. Выделение немагнитной фракции из шламовых отходов металло-производства в электромагнитном поле// Вернигоров Ю.М., Лебедев В.А., Лелетко К.К., Ширин А.А. // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): мат-лы IX Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием (Иркутск, 24-26 апреля 2019 г.) / под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. С. 50-56.
4. Технология применения неметаллической фракции шлифовального шлама// Вернигоров Ю.М., Лебедев В.А., Лелетко К.К., Плотников Д.М.// Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, 2020 г.
5. Техничко-экономические аспекты перспективности применения методов порошковой металлургии для переработки металлоотходов// Вернигоров Ю.М., Лебедев В.А., Плотников Д.М. // Вестник РГАТУ им. Соловьева №2 (45) 2018, С. 143-147.
6. Поверхностное легирование и химико-термическая обработка ферромагнитных порошков в магнитовибрирующем слое Вернигоров Ю.М., Лелетко К. К.// Science, Technology and Life-2017: proceedings of articles the IV International scientific conference, Karlovy Vary - Moscow, 24-25 декабря 2017 г. – Киров: Междунар. центр науч.-исслед. проектов, 2018.- С. 28-36.
7. Магнитовибрационная технология дозирования порошков магнитомягких материалов// Вернигоров Ю.М., Лелетко К.К.// Вестник Брянского государственного технического университета .№4 (65), 2018, С.24-30.
8. Вернигоров, Ю.М. Механизм образования текучести дисперсных ферромагнетиков в однородном переменном магнитном поле / Ю.М. Вернигоров, К.К. Лелетко // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: сб. материалов XXXII междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2017. – С. 58-65.

REFERENCES

1. Vernigorov Yu.M., Leletko K.K. Modelirovanie razrusheniya agregatov vysokokoercitivnyh dispersnyh ferromagnetikov v magnitnyh polyah razlichnoj topologii. Sciences of Europe. 2018. №21(21), vol.1, S. 43-46.
2. Energeticheskie usloviya upravleniya granulometricheskim sostavom produktov izmel'cheniya vysokokoercitivnyh ferromagnetikov v magnitovibriruyushchem sloe.// Vernigorov Yu.M., Lebedev V.A., Frolov N.N. Leletko K.K. // Avtomatizaciya. Sovremennye tekhnologii. – Moskva: Innovacionnoe mashinostroenie, 2019. Tom 73, N 9. – S. 396-400.
3. Vydelenie nemagnitnoj frakcii iz shlamovyh othodov metallo-proizvodstva v elektromagnitnom pole// Vernigorov Yu.M., Lebedev V.A., Leletko K.K., Shirin A.A. // Zhiznennyj cikl konstrukcionnyh materialov (ot

polucheniya do utilizacii): mat-ly IX Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunarodnym uchastiem (Irkutsk, 24-26 aprelya 2019 g.) / pod red. S.A. Zajdesa. – Irkutsk: Izd-vo IRNITU, 2019. S. 50-56.

4. Tekhnologiya primeneniya nemetallicheskoj frakcii shlifoval'nogo shlama.// Vernigorov Yu.M., Lebedev V.A., Leletko K.K., Plotnikov D.M.// Donskoj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, Rostov-na-Donu, 2020 g.

5. Tekhniko-ekonomicheskie aspekty perspektivnosti primeneniya metodov poroshkovej metallurgii dlya pererabotki metalloothodov// Vernigorov Yu.M., Lebedev V.A., Plotnikov D.M. // Vestnik RGATU im. Solov'eva №2 (45) 2018, S. 143-147.

6/ Poverhnostnoe legirovanie i himiko-termicheskaya obrabotka ferromagnit-nyh poroshkov v magnitovibriruYushchem sloe Vernigorov Yu.M., Leletko K. K.// Science, Technologyand Lite-2017: proceedings of articles the IV International scientific onference, Karlovy Vary - Moscow, 24-25 dekabrya 2017 g. – Kirov: Mezhdunar. centr nauch.-issled. proektov, 2018.- S. 28-36.

7. Magnitovibracionnaya tekhnologiya dozirovaniya poroshkov magnitozhestkih materialov// Vernigorov Yu.M., Leletko K.K.// Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta .№4 (65), 2018, S.24-30

8. Vernigorov, Yu.M. Mekhanizm obrazovaniya tekuchesti dispersnyh ferromag-netikov v odnorodnom peremennom magnitnom pole / YU.M. Vernigorov, K.K. Leletko // Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty: sb. materialov HXXII mezhdunar. nauch. -prakt. konf. - Novosibirsk, 2017. - S. 58-65.

Поступило в редакцию 27.07.2020

Received 27 July 2020