

УДК 621.762.002

Ю.М. ВЕРНИГОРОВ, И.Н. ЕГОРОВ, С.И. ЕГОРОВА

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ ПОРОШКОВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Рассматривается способ повышения эффективности и качества сухого помола в бильной мельнице при помощи создания в области вращающихся бил магнитовибрирующего слоя. Показано, что степень измельчения и средний размер частиц получаемого порошка при измельчении зависят от времени помола и режимов электромагнитного воздействия.*

**Ключевые слова:** механическое измельчение, магнитовибрирующий слой, электромагнитное воздействие.

**Введение.** При производстве порошков хрупких металлов и сплавов широко применяется механическое измельчение. Выбор способа измельчения определяется требованиями, предъявляемыми к конечной продукции, а также свойствами и состоянием исходного материала. Измельчение в барабанных, вибрационных, струйных, шаровых, ударных, планетарных центробежных мельницах и атриторах осуществляется за счет истирающего, ударного и раздавливающего действия мельющих тел. При сухом помоле с возрастанием дисперсности порошка дробящий эффект становится все менее ощутимым, а также при достижении определенной дисперсности интенсифицируются процессы агрегирования [1] и часть приложенной энергии расходуется на разрушение агрегатов.

Одним из способов повышения эффективности сухого помола при изготовлении порошков магнитотвердых материалов в ударной мельнице является создание в области измельчения устойчивого магнитовибрирующего слоя [2, 3]. Для увеличения ударных воздействий при соударении частиц с билами последние имеют в сечении форму прямоугольной трапеции, нижняя и ударная поверхности которой образуют острый угол.

Цель данной работы – исследование эффективности применения электромагнитного поля при помоле в бильной мельнице.

**Экспериментальная часть.** Исходная шихта феррита бария имела средний размер частиц 81,3 мкм; дисперсию 97,6 мкм; медиану 55 мкм. Гистограмма распределения частиц исходной шихты по размерам показана на рис.1. Максимальный размер частиц порошка 550 мкм, частицы, имеющие размеры 20 – 40 мкм, составляют 31,5% от общего числа частиц в порошке. Исследование проводилось на лабораторной установке с объемом мельницы 100 см<sup>3</sup> и массой загрузки порошка 0,2 кг.

При измельчении материала в бильной мельнице без электромагнитного воздействия (режим 1) перемешивание порошка происходит только вращающимися билами. Мельница помещалась в межполюсное пространство электромагнитов, создающих постоянное магнитное поле с индукцией  $B_c = 15,4$  мТл и переменное с градиентом индукции  $\partial B / \partial y = 27,6$  мТл/м (режим 2) и 90 мТл/м (режим 3). Силовые линии постоянного и переменного магнитных полей взаимно перпендикулярны. Плоскость вращения бил мельницы параллельна силовым линиям постоянного и переменного магнитных полей. В таком поле в области вращения бил образуется магнитовибрирующий слой (МВС), в котором частицы и агрегаты порошка совершают поступательное и вращательное движения, что способствует их интенсивному разрушению. Таким образом, измельчение материала в МВС происходит за счет соударений частиц с вращающимися билами и между собой (самоизмельчение) [4].

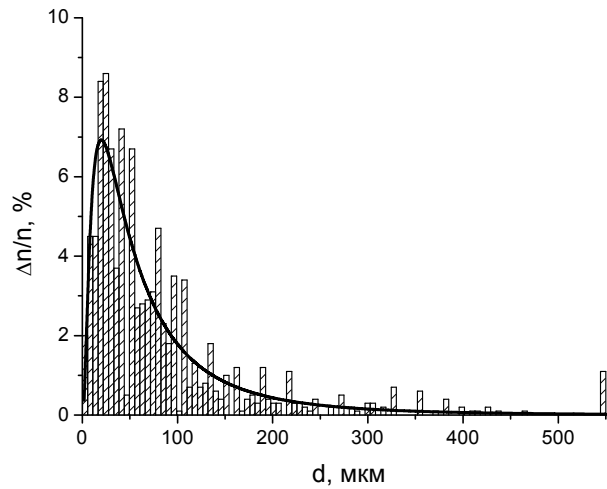


Рис.1. Гистограмма и кривая логарифмически нормального распределения частиц по размерам исходного порошка феррита бария

Для оценки эффективности применения электромагнитного поля и качества измельчения исследовались статистические характеристики гранулометрического состава (средний размер частиц, выборочная дисперсия, максимальный размер частиц) порошковых проб, которые отбирались через определенные промежутки времени из мельницы.

Средний размер частиц дает общую характеристику гранулометрического состава шихты и ее пригодность для изготовления постоянных магнитов. После 20 минут измельчения в режиме 1 средний размер частиц порошка уменьшается с 81,3 до 19,2 мкм. При создании в области измельчения устойчивого магнитовибрирующего слоя в режиме 2 средний размер частиц уменьшается до 9 мкм; в режиме 3 – до 2,8 мкм (рис.2,а). Из полученных результатов следует, что значения среднего размера частиц обусловлены не только механическими условиями измельчения, но и режимами электромагнитного воздействия [5].

С целью оценки отклонения размеров частиц порошка от средней величины в зависимости от времени измельчения определялась выборочная дисперсия  $S_d$  (рис.2,б). Значение выборочной дисперсии порошка после измельчения в мельнице в течение 20 минут в режиме 1 – 21,6 мкм; в режимах: 2 – 7,7 мкм и 3 – 3,7 мкм (см.рис.2,б). Таким образом, измельчение в режиме 3 обеспечивает степень отклонения от среднего в 5,8 раза меньшую, чем при помоле без электромагнитного воздействия.

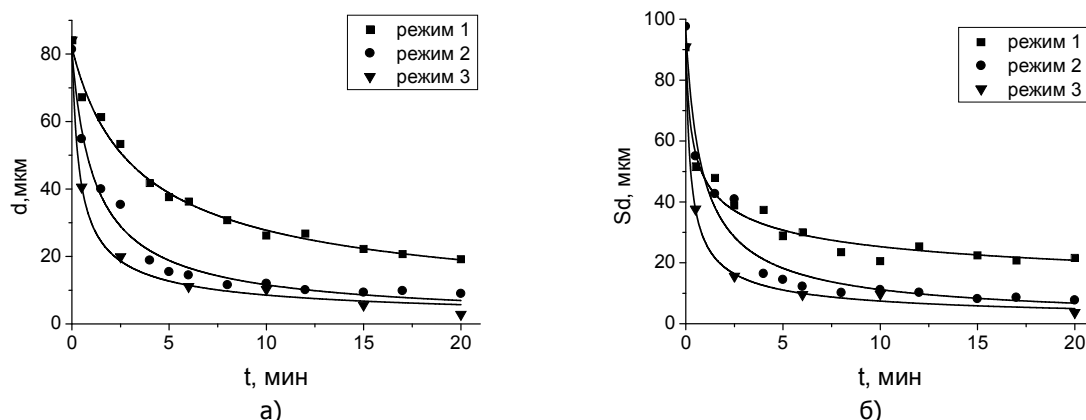


Рис. 2. Зависимость среднего размера частиц (а), дисперсии (б) от времени измельчения феррита бария

На качество порошкового изделия влияет большое количество факторов, в том числе максимальный размер частиц порошка. Так как при построении кумулятивных (интегральных) кривых (рис.3) содержание каждой последующей фракции прибавляют к содержанию предыдущей, то из рис.3,а видно, что через 6 мин помола максимальный размер частиц в режимах 1, 2 и 3 составляет 162, 114 и 78 мкм соответственно. После измельчения в течение 20 мин максимальный размер частиц в порошке уменьшился в режиме 1 до 158 мкм, в режиме 2 – до 78 мкм и в режиме 3 – до 40 мкм (см. рис.3,б). Из полученных результатов видно, что за 20 мин помола без электромагнитного воздействия максимальный размер частиц уменьшился в 3,4 раза, а в режиме 3 – в 13,5 раза.

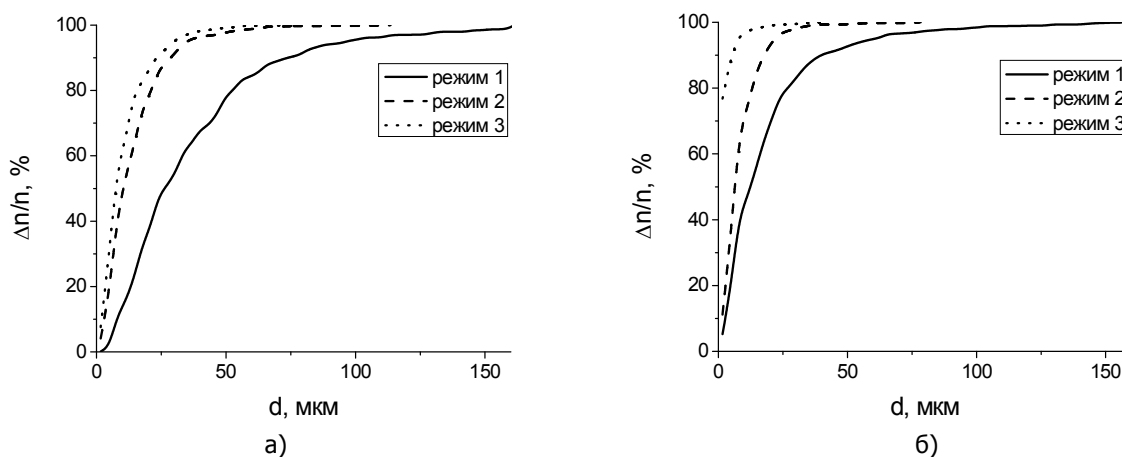


Рис.3. Кумулятивная зависимость распределения частиц феррита бария по размерам после измельчения в течение 6 мин (а) и 20 мин (б)

Степень измельчения – одна из количественных характеристик процесса, показывающая, во сколько раз уменьшился средний размер измельчаемого материала [6]. При увеличении времени помола с 10 до 20 мин в режиме 1 степень измельчения возрастает с 3,2 до 4,4; в режиме 2 – с 7,0 до 9,3; а в режиме 3 – с 8,7 до 29,4. Степень измельчения при помоле в течение 25 мин в режиме 3 увеличивается до 43,9, а в режиме 1 даже через 120 мин помола увеличивается только до 14,9. С ростом градиента переменного магнитного поля возрастает интенсивность движения частиц и агрегатов в магнитовибрирующем слое, что приводит к возрастанию роли процесса самоизмельчения и интенсификации помола.

**Выводы.** При помоле грубодисперсных ферромагнитных материалов в магнитовибрирующем слое качество помола (однородность шихты) и производительность повышаются за счет дезагрегации, разрушения частиц при их соударениях друг с другом (самоизмельчения) и удержания порошка в зоне вращающихся бил. Параметрами электромагнитного поля при помоле в мельнице можно задавать не только средний размер частиц, но и степень однородности порошка.

### Библиографический список

1. Летюк Л.М. Технология ферритовых материалов магнитоэлектроники / Л.М. Летюк, В.Г. Костюшин, А.В. Гончар. – М.: МИСИС, 2005. – 352 с.
2. Авторское свидетельство РФ № 2306180. Способ измельчения магнитных материалов и устройство для его осуществления / И.Н. Егоров, Ю.М. Вернигоров, С.И. Егорова. Кл. 6 В02С 13/00. Опубл. 2007.09.20.
3. Vernigorov Yu.M., Egorov I.N., Egorova S.I. The application of a magnetovibrating layer to the milling of ferromagnetic materials // Euro PM2005 Powder Metallurgy Congress and Exhibition: Proceedings, Vol. 1, 2-5 October, Prague, Czech Republic, 2005. – P. 451-455.

4. Егорова С.И. Измельчение магнитных материалов в магнитовибрирующем слое / С.И. Егорова // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2009. – № 4. – С. 5-10.

5. Вернигоров Ю.М. Динамика состояния ферромагнитного порошка при измельчении в магнитовибрирующем слое / Ю.М. Вернигоров, И.Н. Егоров, С.И. Егорова // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2006, № 1. – С. 29-32.

6. Андреев С.Е., Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. 3-е изд., перераб. и доп. / С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич. – М.: Недра, 1980. – 415 с.

Материал поступил в редакцию 22.03.10.

**Y.M. VERNIGOROV, I.N. EGOROV, S.I. EGOROVA**

### **THE EFFICIENCY OF MAGNETIC FIELD APPLICATION IN FERROMAGNETIC POWDER MILLING PROCESS**

The method of efficiency and quality increase of dry milling in impact mill by creating the magnetovibrating layer in rotating beater area is considered. It is shown that the milling degree and average particle size of produced powder depend not only of milling time, but also of magnetic field regimes.

**Key words:** mechanical milling, magnetovibrating layer, electromagnetic fields.

**ВЕРНИГОРОВ Юрий Михайлович** (р. 1941), доктор технических наук (1995), профессор (1998) кафедры «Физика» ДГТУ. Окончил РГУ (1964) по специальности «Радиофизика».

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

Имеет более 100 научных публикаций.

[jvernigorov@dstu.edu.ru](mailto:jvernigorov@dstu.edu.ru)

**ЕГОРОВ Иван Николаевич** (р. 1982), кандидат технических наук (2007), доцент кафедры «Физика» ДГТУ. Окончил РГУ (2004) по специальности «Физика».

Область научных интересов: применение магнитовибрационных технологий в порошковой металлургии.

Имеет более 40 научных публикаций.

[Stork@rspu.edu.ru](mailto:Stork@rspu.edu.ru)

**ЕГОРОВА Светлана Ивановна**, кандидат технических наук (1992), доцент (1998) кафедры «Физика» ДГТУ. Окончила РГУ (1978) по специальности «Физика».

Область научных интересов: применение магнитовибрационных технологий в порошковой металлургии.

Имеет более 100 научных публикаций.

[svyegorova@yandex.ru](mailto:svyegorova@yandex.ru)