

УДК 621.927.08

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-1-11-17

Оптимизация процесса автоматического дозированного заполнения пресс-форм порошками ферромагнитных материалов

© 2018 г. И.Н. Егоров, С.И. Егорова

Донской государственный технический университет (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

Статья поступила в редакцию 26.12.16 г., доработана 10.07.17 г., подписана в печать 12.07.17 г.

Экспериментально обоснована эффективность методики автоматического дозированного заполнения пресс-форм тонкодисперсными порошками ферромагнитных материалов, не имеющими естественной текучести. В рассматриваемом устройстве для обеспечения устойчивой текучести порошков на дисперсную систему в бункере воздействуют переменным (частотой 50 Гц) неоднородным магнитным полем, силовые линии которого расположены вертикально с более высоким градиентом индукции в области образования принудительной текучести, и постоянным магнитным полем с горизонтальными силовыми линиями. При определенных параметрах магнитных полей дисперсная система переходит в динамически устойчивое взвешенное состояние, т.е. образуется магнитооживленный слой и порошок перетекает в дозатор. Представлены результаты экспериментального исследования влияния индукции постоянного и градиента индукции переменного магнитных полей на массовую скорость истечения порошков феррита бария (средний размер частиц $d_{cp} = 1$ мкм) и феррита стронция ($d_{cp} = 1, 9$ и 50 мкм) через отверстие диаметром 2 мм. Из приведенных экспериментальных зависимостей следует, что для порошков ферритов бария и стронция, имеющих $d_{cp} = 1$ мкм, массовая скорость транспортировки порошков в дозатор достигает максимума при индукции постоянного магнитного поля $15,7$ мТл и градиенте индукции переменного магнитного поля 593 мТл/м и составляет $96,9$ и $181,1$ мг/с соответственно. На основе анализа экспериментальных данных показано, что минимальная относительная погрешность массы порошка феррита стронция с $d_{cp} = 1$ мкм, просыпавшегося в дозатор, наблюдается при режимах электромагнитного воздействия, обеспечивающих наибольшую текучесть дисперсного материала, и составляет $2,1$ – $2,3$ %.

Ключевые слова: магнитооживленный слой, порошки ферромагнитных материалов, текучесть, дозированное заполнение пресс-форм.

Егоров И.Н. – канд. техн. наук, доцент кафедры физики ДГТУ (344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1). E-mail: jstork@yandex.ru.

Егорова С.И. – докт. техн. наук, профессор кафедры физики ДГТУ. E-mail: svyegorova@yandex.ru.

Для цитирования: Егоров И.Н., Егорова С.И. Оптимизация процесса автоматического дозированного заполнения пресс-форм порошками ферромагнитных материалов // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2018. No. 1. С. 11–17. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-1-11-17.

Egorov I.N., Egorova S.I.

Optimisation of automatic dosed mould filling with ferromagnetic powders

The effectiveness of the technique for automatic dosed mould filling with fine ferromagnetic powders without natural fluidity is experimentally proved in the paper. In order to obtain steady powder fluidity, disperse medium in the hopper of the considered device is affected by variable 50 Hz gradient magnetic field with vertical induction lines and higher gradient in the area of stimulated fluidity formation and constant magnetic field with horizontal induction lines. At certain magnetic fields parameters, disperse medium passes to a dynamically steady suspended state thus forming a magnetic fluidized bed, and powder flows into a dispenser. The paper provides the results obtained in experimental studies of constant magnetic field induction and variable magnetic field gradient influence on the mass flowrate of barium ferrite powders with an average particle size d_{av} of 1 μm and strontium ferrite powders with $d_{av} = 1, 9$ and 50 μm through a 2 mm hole. Presented experimental dependencies show that for $d_{av} = 1$ μm barium and strontium ferrite powders the speeds of powder transportation to the dispenser reach their maximum values at a constant magnetic field induction of $15,7$ mT and a variable magnetic field induction gradient of 593 mT/m and are equal to $96,9$ and $181,1$ mg/s, respectively. According to experimental data, the minimal relative mass error of $d_{av} = 1$ μm strontium ferrite powder flowed in the dispenser is observed at electromagnetic effect modes providing maximal disperse material fluidity and equals to $2,1$ – $2,3$ %.

Keywords: magnetic fluidized bed, ferromagnetic powders, fluidity, dosed mould filling.

Egorov I.N. – Cand. Sci. (Tech.), assistant professor, Department of physics, Don State Technical University (344010, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin square, 1). E-mail: jstork@yandex.ru.

Egorova S.I. – Dr. Sci. (Tech.), professor, Department of physics, Don State Technical University. E-mail: svyegorova@yandex.ru.

Citation: Egorov I.N., Egorova S.I. Optimizatsiya protsesssa avtomaticheskogo dozirovannogo zapolneniya press-form poroshkami ferromagnitnykh materialov. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2018. No. 1. P. 11–17. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-1-11-17.

Введение

Использование порошков ферромагнитных материалов в различных отраслях техники непрерывно расширяется. По мере уменьшения размера частиц возрастает их взаимодействие, что приводит к изменению технологических характеристик дисперсной среды [1]. Накоплен значительный теоретический и экспериментальный материал о влиянии магнитных полей на реологическое состояние магнитных жидкостей [2–4], дисперсных материалов, находящихся в псевдооживленном состоянии [5–7], порошков магнитных материалов при сепарации, измельчении и прессовании [8–10]. Специфика поведения порошков на различных этапах обработки и целесообразность технологического процесса, обеспечивающего выпуск продукции с заданными конечными свойствами, во многом определяются физико-технологическими свойствами порошков [11–15]. Результативность электромагнитного воздействия на дисперсные материалы зависит от параметров магнитных полей и физико-технологических характеристик дисперсной системы.

С производственной точки зрения для выбора наиболее рациональных режимов электромагнитного воздействия важной технологической характеристикой порошков является текучесть [16]. Порошки ферромагнитных материалов из-за их склонности к агрегированию обладают низкой текучестью, что ограничивает производительность процесса дозированного заполнения пресс-форм, особенно при автоматическом прессовании [17].

Для заполнения пресс-форм применяют различные способы механического разрыхления в бункере [18], воздействия на дисперсную среду электрическим [19] и переменным магнитным [20, 21] полями. Дозировку осуществляют весовым или объемным способами. Для организации принудительной текучести с заданной скоростью при автоматическом заполнении пресс-форм тонкодисперсными порошками магнитотвердых материалов наиболее эффективно воздействие на дисперсную среду переменным неоднородным и постоянным магнитными полями [22].

Цель настоящей работы заключалась в разработке методики определения наиболее рациональных режимов электромагнитного воздействия на порошки ферромагнитных материалов для обеспечения их стабильной текучести при автоматическом заполнении пресс-форм.

Методика исследований

Для проведения исследований дозированное заполнение пресс-форм порошками ферромагнитных материалов, не имеющими естественной текучести, осуществлялось с помощью устройства, схема которого приведена на рис. 1. Порошок из бункера-накопителя 1 посредством привода 2, обеспечивающего вращение шнека 3, поступает в полость цилиндрического бункера 4 с отверстием по центру дна. Под бункером в направляющих стола 5 находится дозатор 6, снабженный обмоткой 7. Бункер 4 и дозатор 6 расположены между полюсами электромагнитов 8 и 9, создающих, соответственно, постоянное (с горизонтальным расположением силовых линий) и неоднородное переменное частотой 50 Гц (с вертикальным расположением силовых линий) магнитные поля.

Магнитные поля оказывают непосредственное воздействие на ориентацию частиц дисперсной среды ферромагнитных материалов. При определенных параметрах магнитных полей из частиц дисперсного материала в бункере образуется магнитооживленный слой [23]. Интенсивность, преимущественное направление движения частиц и агрегатов, процессы структурообразования в магнитооживленном слое зависят от параметров электромагнитного воздействия и топологии магнитных полей. В неоднородном магнитном поле на частицы порошка действует сила, пропорциональная величине градиента индукции. Так как более высокий градиент индукции переменного неоднородного магнитного поля создается в области ниже емкости дозатора 6, то порошок перетекает в дозатор.

Для предотвращения забивания агрегатами выходного отверстия бункера 4 в нижней его части расположена сетка 10. По истечении времени дозирования заданной массы порошка отсекающий лист 11 перекрывает выходное отверстие бункера и дозатор перемещается по направляющим стола 5 с помощью толкателя 12 к матрице пресс-формы. Заслонка 13 обеспечивает совмещение отверстия дозатора и входного отверстия матрицы пресс-формы 14. При подаче на обмотку 7 импульса тока в объеме дозатора создается магнитное поле, вектор индукции которого направлен вертикально вниз, и порошок транспортируется в полость пресс-формы. После заполнения пресс-формы порошком дозатор перемещается в положение загрузки, и происходит дозированная подача новой порции

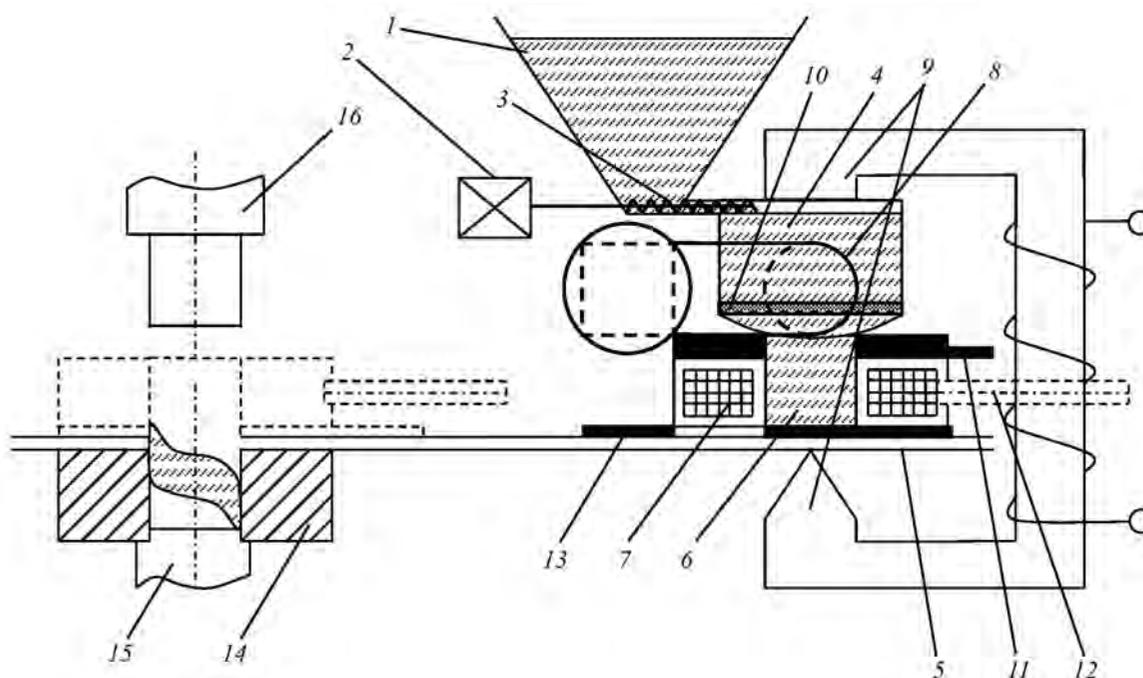


Рис. 1. Схема устройства для заполнения пресс-форм порошками ферромагнитных материалов
 1 – бункер-накопитель; 2 – привод; 3 – шнек; 4 – бункер; 5 – направляющие стола; 6 – цилиндрический дозатор; 7 – катушка, навитая на дозатор; 8 – полюса электромагнита постоянного тока; 9 – полюса электромагнита переменного тока; 10 – сетка; 11 – отсекающий лист; 12 – толкатель; 13 – заслонка; 14 – матрица пресс-формы; 15, 16 – пуансоны

порошка. В то же время после загрузки порошка в пресс-форму осуществляются процессы одностороннего или двустороннего прессования порошка и выталкивание спрессованной заготовки.

Результаты и их обсуждение

Для изучения закономерностей скорости истечения порошка из бункера в дозатор от режимов электромагнитного воздействия выбраны порошки ферритов бария и стронция со средним размером частиц $d_{cp} = 1$ мкм, медианой 0,75 и 0,76 мкм, наиболее вероятным размером частиц 0,51 и 0,49 мкм соответственно, а также порошки феррита стронция, имеющие $d_{cp} = 9$ и 50 мкм, медианы 6,4 и 44 мкм, наиболее вероятные размеры частиц 2,18 и 27,6 мкм соответственно. Используемые для проведения исследований порошки не обладали способностью вытекать из отверстия диаметром 2 мм.

При определенном режиме электромагнитного воздействия на дисперсную среду, способствующем формированию стимулированной текучести через отверстие в бункере, скорость истечения порошка определяли по массе порошка, просыпавшегося в единицу времени (массовой скорости v , мг/с). Результаты экспериментальных исследо-

ваний скорости истечения порошка в зависимости от индукции (B_0) постоянного и градиента индукции ($\Delta B/\Delta y$) переменного магнитных полей приведены на рис. 2 и 3.

Из зависимостей, представленных на рис. 2 и 3, а, следует, что для порошков ферритов бария

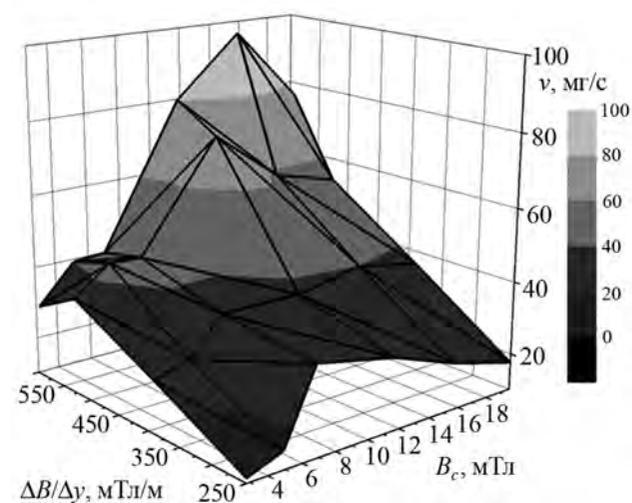


Рис. 2. Зависимость скорости истечения порошка феррита бария с $d_{cp} = 1$ мкм через отверстие диаметром 2 мм от градиента индукции переменного и индукции постоянного магнитных полей

и стронция со средним размером частиц 1 мкм массовая скорость транспортировки порошков в дозатор возрастает при увеличении индукции

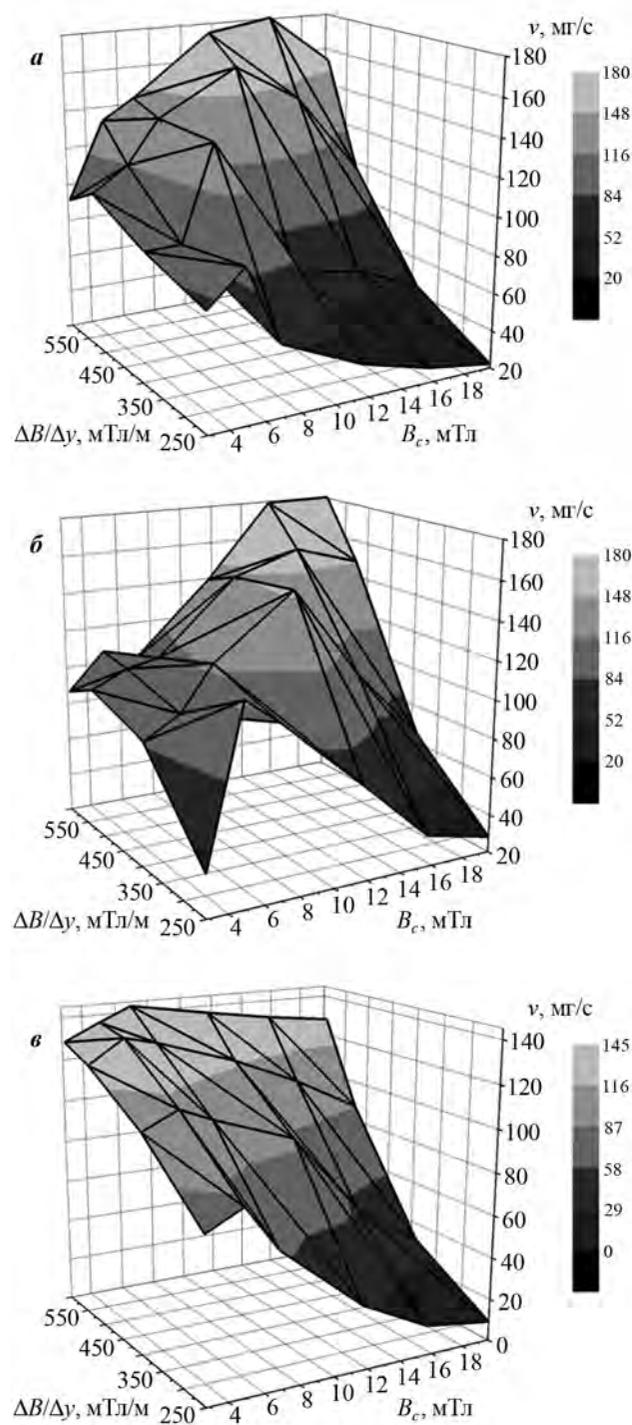


Рис. 3. Зависимости скорости истечения порошков феррита стронция, имеющих $d_{cp} = 1$ (а), 9 (б) и 50 (в) мкм, через отверстие диаметром 2 мм от градиента индукции переменного и индукции постоянного магнитных полей

постоянного и градиента индукции переменного магнитных полей, достигая максимума при $B_c = 15,7$ мТл и $\Delta B/\Delta y = 593$ мТл/м. Дальнейшее повышение B_c и $\Delta B/\Delta y$ приводит к уменьшению массовой скорости. Максимальные значения v для порошков ферритов бария и стронция составляют $96,9 \pm 3,8$ и $181,1 \pm 3,5$ мг/с соответственно. Возрастание только величины индукции постоянного магнитного поля до 19,7 мТл приводит к снижению массовой скорости истечения порошков ферритов бария и стронция на 26,8 и 17,6 % соответственно, что связано с интенсификацией процессов вторичного агрегирования и образования цепочек из частиц вдоль силовых линий постоянного магнитного поля. При градиенте индукции 525 мТл/м наибольшие значения v наблюдаются при $B_c = 11,6$ мТл и составляют для порошков ферритов бария и стронция $72,8 \pm 2,2$ и $161,5 \pm 3,7$ мг/с соответственно. Из полученных результатов видно, что с уменьшением градиента индукции переменного магнитного поля, создаваемого в рабочем объеме для формирования стимулированной текучести, снижается и величина индукции постоянного магнитного поля.

Из сопоставления результатов эксперимента, приведенных на рис. 3, видно, что для порошков феррита стронция со средним размером частиц 1 и 9 мкм зависимости массовой скорости истечения из отверстия диаметром 2 мм от параметров электромагнитного воздействия аналогичны. Максимальное значение v для этих порошков достигается при $\Delta B/\Delta y = 593$ мТл/м. Однако для порошка с $d_{cp} = 1$ мкм индукция постоянного магнитного поля равна 15,6 мТл, а для порошка с $d_{cp} = 9$ мкм — 19,7 мТл. Значения массовых скоростей для этих порошков приблизительно одинаковые и составляют $181,1 \pm 3,5$ мг/с ($d_{cp} = 1$ мкм) и $181,0 \pm 4,5$ мг/с ($d_{cp} = 9$ мкм). Значительное изменение характера зависимостей наблюдается для порошка, имеющего $d_{cp} = 50$ мкм. Так, максимальное значение скорости транспортировки порошка в дозатор достигается при $B_c = 6,8$ мТл и $\Delta B/\Delta y = 593$ мТл/м и составляет $143,4 \pm 6,2$ мг/с. Снижение градиента индукции до 525 мТл/м и индукции постоянного магнитного поля до 4,9 мТл приводит к уменьшению массовой скорости всего на 7 %.

Из полученных результатов следует, что наиболее интенсивное истечение порошка феррита стронция со средним размером частиц 1 мкм осуществляется в переменном неоднородном магнитном поле с градиентом индукции 593 мТл/м. Для

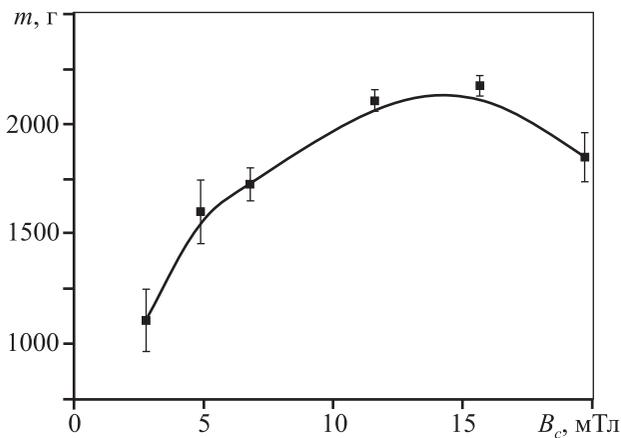


Рис. 4. Зависимость массы порошка феррита стронция со средним размером частиц 1 мкм, просыпавшегося за 12 с через отверстие диаметром 2 мм в переменном магнитном поле с градиентом индукции 593 мТл/м, от индукции постоянного магнитного поля

определения наиболее рационального режима, обеспечивающего повышение точности автоматического заполнения пресс-формы, измеряли массу порошка, просыпавшегося в дозатор за время 12 с, при фиксированной величине градиента индукции переменного магнитного поля и различных значениях индукции постоянного магнитного поля. На рис. 4 представлена зависимость изменения массы (m) порошка, просыпавшегося за фиксированное время, от индукции постоянного магнитного поля. Видно, что величина m возрастает с ростом индукции постоянного магнитного поля, достигает максимального значения $m = 2173$ мг при $B_c = 15,7$ мТл и при дальнейшем увеличении индукции снижается. Наименьшая относительная погрешность массы просыпавшегося порошка (2,1–2,3 %) наблюдается в области наибольшей скорости истечения дисперсного материала. Из экспериментальной зависимости, приведенной на рис. 4, следует, что при $B_c = 10,6$ мТл и $\Delta B/\Delta y = 593$ мТл/м из бункера в дозатор за время 12 с должно просыпаться 2000 мг порошка. Результаты испытаний показали, что масса порошка, транспортированного в пресс-форму, составила 2000 ± 40 мг.

Заключение

На основании проведенных исследований показана перспективность применения электромагнитного воздействия при формировании стабиль-

ной текучести и управлении скоростью истечения дисперсной среды в условиях производства постоянных магнитов. В значительной степени массовая скорость истечения порошка из отверстия определяется топологией неоднородного магнитного поля и режимами электромагнитного воздействия. Установление рациональных режимов электромагнитного воздействия на тонкодисперсные порошки ферромагнитных материалов позволит осуществить их автоматическую дозировку по массе с точностью не хуже $\pm(2,1\div 2,3)$ %.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-38-00365.

Литература

1. Jose Manuel Valverde Millan. Fluidization of fine powders: Cohesive versus dynamical aggregation. Netherlands: Springer Science and Business Media, 2012.
2. De Vicente J., Klingenberg D.J., Hidalgo-Alvarez R. Magnetorheological fluids: A review // *Soft Matter*. 2001. Vol. 7. No. 8. P. 3701–3710.
3. See H. Field dependence of the response of a magnetorheological suspension under steady shear flow and squeezing flow // *Rheologica Acta*. 2003. Vol. 42. No. 1. P. 86–92.
4. Gadipelly Thirupathi, Rajender Singh. Magneto-viscosity of MnZn-ferrite ferrofluid // *Phys. B: Condensed Matter*. 2014. Vol. 448. P. 346–348. DOI: 10.1016/j.physb.2014.03.042.
5. Hristov J.Y. Rheology of magnetizable powders related to the mechanics of magnetically stabilized beds (gas-solid systems) // *Proc. 5th Europ. Rheology Conf. / Eds. I. Emri, R. Cvelbar*. Portoroz, Slovenia, 1998. P. 133–134.
6. Espin M.J., Quintanilla M.A.S., Valverde J.M. Effect of particle size polydispersity on the yield stress of magnetofluidized beds as depending on the magnetic field orientation // *Chem. Eng. J*. 2015. Vol. 277. P. 269–285. DOI: 10.1016/j.cej.2015.04.124.
7. Espin M.J., Valverde J.M., Quintanilla M.A.S. Stabilization of fluidized beds of particles magnetized by an external field: effects of particle size and field orientation // *J. Fluid Mech*. 2013. Vol. 732. P. 282–303. DOI: 10.1017/jfm.2013.403.
8. Егоров И.Н., Егорова С.И., Вернигоров Ю.М. Способ измельчения магнитных материалов и устройство для его осуществления: Пат. 2306180 (РФ). 2007.
9. Chou T., Nishizawa G., Hatakeyama M., Ishizaka C. Method for compacting powder in magnetic field, and method for producing rare-earth sintered magnet: Pat. 7416613 (US). 2008.

10. Okumura S., Nakamura A. Method for manufacturing rare earth magnet and powder compacting apparatus: Pat. 2003/0209842 (US). 2003.
11. Федорченко И.М., Францевич И.Н., Радомысльский И.Д. и др. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник / Под ред. И.М. Федорченко. Киев: Наук. думка, 1985.
12. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1987.
13. Im Doo Junga, Jang Min Parkb, Ji-Hun Yuc, Tae Gon Kangd, See Jo Kime, Seong Jin Parka. Particle size effect on the magneto-rheological behavior of powder injection molding feedstock // Mater. Charact. 2014. Vol. 94. P. 19–25. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.05.004.
14. Sagava M. Development and prospect of the Nd–Fe–B sintered magnets // Proc. 21st Int. Workshop on REPM and their Applications (Bled, Slovenia, 2010). P. 183–410.
15. Popov A.G., Shitov A.V., Gerasimov E.G., Vasilenko D.Yu., Govorkov M.Yu., Bratushev D.Yu., Vyatkin V.P., Shunyaev K.Yu., Mikhailova T.L. Preparation of sintered Nd–Fe–B magnets by pressless process // Phys. Met. Metallogr. 2012. Vol. 113. No. 4. P. 331–340.
16. Андрианов Е.И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов. М.: Химия, 1982.
17. Левин Б.Е., Третьяков Ю.Д., Летюк Л.М. Физико-химические основы получения, свойства и применение ферритов. М.: Металлургия, 1979.
18. Тышковский Б.С., Блохин Г.В. Бункер для подачи порошковой шихты: А.с. 1177053 (СССР). 1985.
19. Машек А.У., Ходкин В.М., Сеутин В.И. Устройство для дозирования порошка: А.с. 935212 (СССР). 1982.
20. Биткина Н.С., Вернигоров Ю.М., Егорова С.И., Лемешко Г.Ф. Устройство для заполнения пресс-форм магнитожестким материалом: А.с. 1801784 (РФ). 1993.
21. Юматов А.И., Гладков Г.И., Тихонов В.С. Устройство для прессования порошков феррита бария: А.с. 535142 (СССР). 1976.
22. Егоров И.Н., Егорова С.И., Черный А.И. Способ заполнения пресс-форм тонкодисперсными порошками магнитожестких материалов и устройство для его осуществления: Евраз. пат. 022640. 2016.
23. Egorov I.N., Egorova S.I. Effect of electromagnetic action on dispersed composition on milling ferromagnetic materials in a hammer mill // Rus. J. Non-Ferr. Met. 2014. Vol. 55. No. 4. P. 371–374.

References

1. Jose Manuel Valverde Millan. Fluidization of fine powders: Cohesive versus dynamical aggregation. Netherlands: Springer Science and Business Media, 2012.
2. De Vicente J., Klingenberg D.J., Hidalgo-Alvarez R. Magnetorheological fluids: A review. *Soft Matter*. 2001. Vol. 7. No. 8. P. 3701–3710.
3. See H. Field dependence of the response of a magnetorheological suspension under steady shear flow and squeezing flow. *Rheologica Acta*. 2003. Vol. 42. No. 1. P. 86–92.
4. Gadipelly Thirupathi, Rajender Singh. Magneto-viscosity of MnZn-ferrite ferrofluid. *Phys. B: Condensed Matter*. 2014. Vol. 448. P. 346–348. DOI: 10.1016/j.physb.2014.03.042.
5. Hristov J.Y. Rheology of magnetizable powders related to the mechanics of magnetically stabilized beds (gas-solid systems). In: *Proc. 5th Europ. Rheology Conf.* Eds. I. Emri, R. Cvelbar. Portoroz, Slovenia, 1998. P. 133–134.
6. Espin M.J., Quintanilla M.A.S., Valverde J.M. Effect of particle size polydispersity on the yield stress of magneto fluidized beds as depending on the magnetic field orientation. *Chem. Eng. J.* 2015. Vol. 277. P. 269–285. DOI: 10.1016/j.cej.2015.04.124.
7. Espin M.J., Valverde J.M., Quintanilla M.A.S. Stabilization of fluidized beds of particles magnetized by an external field: effects of particle size and field orientation. *J. Fluid Mech.* 2013. Vol. 732. P. 282–303. DOI: 10.1017/jfm.2013.403.
8. Egorov I.N., Egorova S.I., Vernigorov Yu.M. Sposob izmel'cheniya magnitnykh materialov i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Method of magnetic materials milling and device for its implementation]: Pat. 2306180 (RF), 2007.
9. Chou T., Nishizawa G., Hatakeyama M., Ishizaka C. Method for compacting powder in magnetic field, and method for producing rare-earth sintered magnet: Pat. 7416613 (US). 2008.
10. Okumura S., Nakamura A. Method for manufacturing rare earth magnet and powder compacting apparatus: Pat. 2003/0209842 (US). 2003.
11. Fedorchenko I.M., Frantsevich I.N., Radomysel'skii I.D. et al. Poroshkovaya metallurgiya. Materialy, tekhnologiya, svoystva, oblasti primeneniya: Spravochnik [Powder metallurgy. Materials, technology, properties, application fields: Handbook]. Kiev: Nauk. dumka, 1985.
12. Kouzov P.A. Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pylei i izmel'chennykh materialov [Basics of disperse compound analysis of industry dusts and milled materials]. Leningrad: Khimiya, 1987.
13. Im Doo Junga, Jang Min Parkb, Ji-Hun Yuc, Tae Gon Kangd, See Jo Kime, Seong Jin Parka. Particle size effect on the

- magneto-rheological behavior of powder injection molding feedstock. *Mater. Charact.* 2014. Vol. 94. P. 19–25. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.05.004.
14. *Sagava M.* Development and prospect of the Nd—Fe—B sintered magnets. In: *Proc. 21st Int. Workshop on REPM and their Applications* (Bled, Slovenia, 2010). P. 183–410.
 15. *Popov A.G., Shitov A.V., Gerasimov E.G., Vasilenko D.Yu., Govorkov M.Yu., Bratushev D.Yu., Vyatkin V.P., Shunyaev K.Yu., Mikhailova T.L.* Preparation of sintered Nd—Fe—B magnets by pressless process. *Phys. Met. Metallogr.* 2012. Vol. 113. No. 4. P. 331–340.
 16. *Andrianov E.I.* Metody opredeleniya strukturno-mekhanicheskikh kharakteristik poroshkoobraznykh materialov [Methods of definition of structure-mechanical characteristics of powder materials]. Moscow: Khimiya, 1982.
 17. *Levin B.E., Tret'yakov Yu.D., Letyuk L.M.* Fiziko-khimicheskie osnovy polucheniya, svoystva i primeneniye ferritov [Physical and chemical basics of production, properties and application of ferrites]. Moscow: Metallurgiya, 1979.
 18. *Tyshkovskii B.S., Blokhin G.V.* Bunker dlya podachi poroshkovoi shikhty [Powder charge feeding hopper]: Certificate of authorship 1177053 (SU). 1985.
 19. *Mashek A.U., Khodkin V.M., Seutin V.I.* Ustroistvo dlya dozirovaniya poroshka [Powder dozing device]: Certificate of authorship 935212 (SU). 1982.
 20. *Bitkina N.S., Vernigorov Yu.M., Egorova S.I., Lemeshko G.F.* Ustroistvo dlya zapolneniya press-form magnitozhestkim materialom [Device for press mould filling with magneto hard material]: Certificate of authorship 1801784 (RF). 1993.
 21. *Yumatov A.I., Gladkov G.I., Tikhonov V.S.* Ustroistvo dlya pressovaniya poroshkov ferrita bariya [Device for pressing barium ferrite powders]: Certificate of authorship 535142 (SU). 1976.
 22. *Egorov I.N., Egorova S.I., Cherny A.I.* Sposob zapolneniya press-form tonkodispersnymi poroshkami magnitozhestkikh materialov i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya [Method of press mould filling with fine powders of magneto hard materials and device for its implementation]: Pat. 022640 (EA). 2016.
 23. *Egorov I.N., Egorova S.I.* Effect of electromagnetic action on dispersed composition on milling ferromagnetic materials in a hammer mill. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2014. Vol. 55. No. 4. P. 371–374.