

**Металлургия и материаловедение**

УДК 621.9

DOI: 10.30987/article\_5b05328ae879f4.52048059

С.Л. Леонов, А.М. Иконников, Р.В. Гребеньков

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ РАВНОВЕСИЯ ЗЕРЕН  
МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ПОРОШКА**

Представлена методика исследования состояния равновесия зерен ферромагнитного порошка в процессе магнитно-абразивной обработки.

**Ключевые слова:** магнитно-абразивная обработка, равновесие зерен, статическая система сил, магнитная сила, контактная сила, механическая сила.

S.L. Leonov, A.M. Ikonnikov, R.V. Grebennikov

**GRAIN EQUILIBRIUM STATE RESEARCH OF MAGNETO-ABRASIVE POWDER**

Increasing requirements to parts surfaces cause the necessity to improve and create new methods of finishing which magneto-abrasive working belongs to. Depending on the size and magnetic induction distribution ferromagnetic mass will be distributed somehow in a working solution. Having the values of magnetic forces it is possible to define the grain location of a magneto-abrasive powder at the equilibrium state.

It is well-known that the computation complexity of magnetic forces affecting grains within a working solution is intensified with that they are different in form and size. Magnetic forces affecting the grains of ferromagnetic powder during magnetic-abrasive working are computed through the finite element method in the Ansys environment. In this research a flat problem is being solved, a continuum homogeneous in density and magnetic properties is divided into separate grains. At the same time there is accepted an assumption that the grains of a ferromagnetic powder are ordered and ball-shaped. The values are obtained of all magnetic

forces affecting all grains of a ferromagnetic powder located in a working gap at equilibrium.

Mechanical forces affecting the grains of a ferromagnetic powder are computed on the basis of grain equilibrium condition under magnetic force impact. At the mechanical force computation through the finite element method at the points of ferromagnetic powder grain contact there are formed stresses tending to infinity. Therefore for the computation of mechanical forces between grains of a magnetic powder it is necessary to solve a problem of static equilibrium. In contrast to the finite element method such a method of computation allows neglecting stresses arising at a point contact of powder grains at the state of equilibrium.

As a total of this problem solution will be the definition of grain configuration in a ferromagnetic powder at the state static equilibrium.

**Key words:** magnetic-abrasive working, grain equilibrium, static system of forces, magnetic force, contact force, mechanical force.

**Введение**

Магнитно-абразивная обработка является одной из эффективных операций отделочно-чистовой обработки [1]. Сущность магнитно-абразивной обработки заключается в воздействии на обрабатываемую деталь порошковой ферромагнитной массы, уплотненной силами магнитного поля. В зависимости от величины и распределения магнитной индукции ферромагнитная масса будет тем или иным образом распределяться в рабочем зазоре между магнитным индуктором и обрабатываемой поверхностью заготовки.

При магнитно-абразивной обработке роль режущего инструмента выполняет порция ферромагнитного порошка, а заготовку для обработки размещают на опре-

деленном расстоянии от магнитного индуктора. Данное пространство частично или полностью заполняют магнитно-абразивным порошком. Под воздействием магнитного поля зерна ферромагнитного порошка формируются в цепочки, образуя своеобразную «щетку». Данная «щетка» удерживается силами магнитного поля в рабочем пространстве и при движении заготовки относительно индуктора осуществляет съём металла с поверхности обрабатываемой детали [2].

Зная величины магнитных сил в рабочем зазоре, можно определить расположение зерен магнитно-абразивного порошка в состоянии равновесия.

## 1. Расчет магнитных сил в рабочем зазоре в процессе магнитно-абразивной обработки

Известно, что сложность расчета магнитных сил, действующих на зерна внутри рабочего зазора, усугубляется тем, что они имеют разные формы и размеры. Учитывать это многообразие не представляется возможным. Целесообразно принимать допущение о том, что рабочий зазор заполнен однородной по плотности и магнитным свойствам сплошной средой [1].

Магнитные силы, действующие на зерна ферромагнитного порошка в процессе магнитно-абразивной обработки, рассчитываются методом конечных элементов. В качестве программного обеспечения для этого будет использоваться среда

Ansys [3].

В данном исследовании решается плоская задача, при этом однородная по плотности и магнитным свойствам сплошная среда разбивается на отдельные зерна. Принимается допущение, что зерна ферромагнитного порошка упорядочены и имеют форму шара.

При магнитно-абразивной обработке постоянные магниты располагаются в индукторе таким образом, чтобы магнитная система индуктора состояла из магнитных ячеек, каждая из которых состоит из магнита и двух стальных магнитопроводов, размещенных у полюсных боковых поверхностей магнита (рис. 1) [4].

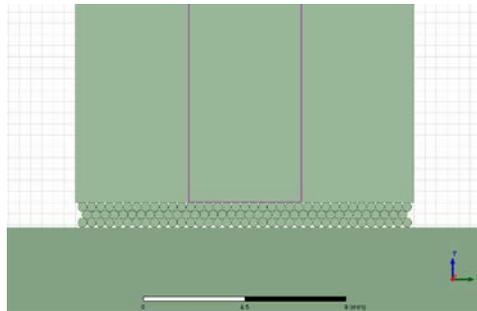


Рис. 1. Магнитная система

В данном исследовании был выполнен расчет магнитных сил в процессе магнитно-абразивной обработки заготовки из немагнитного материала, например алюминия. В качестве образца был взят именно немагнитный материал, так как он не влияет на действующие магнитные силы в

рабочем зазоре. При полировании немагнитной заготовки силовые линии проходят от одного полюса индуктора к другому преимущественно вдоль рабочего зазора под магнитом, концентрируясь у боковых кромок стальных магнитопроводов (рис. 2) [5].

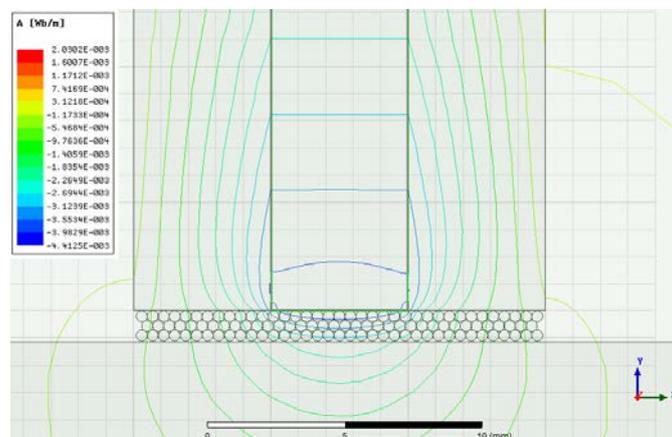


Рис. 2. Картина силовых линий магнитного поля

Из-за этого магнитно-абразивный порошок в рабочем зазоре концентрирует-

ся под магнитами (рис. 3).

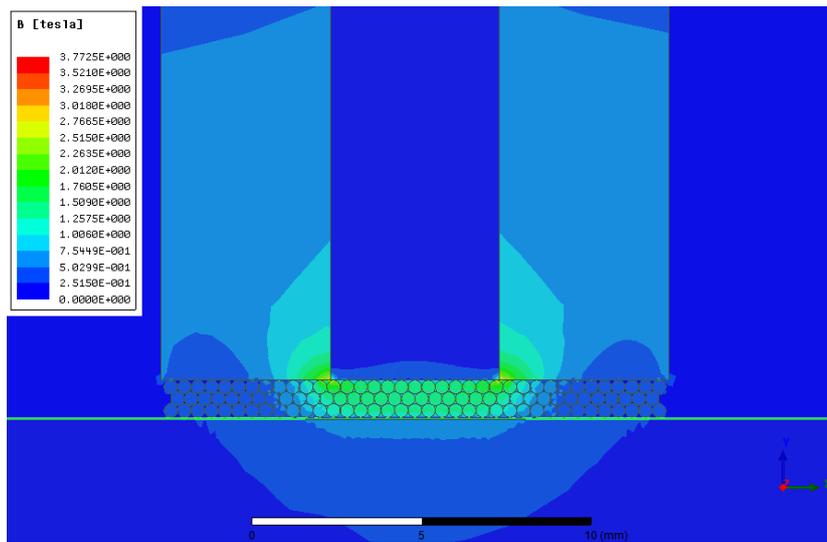


Рис. 3. Концентрация магнитно-абразивного порошка

Следующим шагом является расчет магнитных сил, действующих на зерна ферромагнитного порошка со стороны магнитного поля. Данные магнитные силы удерживают порошок на рабочей поверхности магнитного индуктора [6]. В зависимости от расположения каждого конкретного зерна в рабочем зазоре на него

действует соответствующая сила магнитного поля в состоянии равновесия.

В итоге получены значения всех магнитных сил, действующих на все зерна ферромагнитного порошка, расположенные в рабочем зазоре, в состоянии равновесия [7]. Каждое зерно имеет свой индивидуальный номер и свое значение магнитной силы.

## 2. Состояние равновесия произвольного количества зерен магнитно-абразивного порошка

Для расчета состояния равновесия зерен магнитно-абразивного порошка необходимо рассчитать два вида сил, действующих на зерна: магнитные и механические силы. Магнитные силы рассчитываются с помощью метода конечных элементов по методике, приведенной в п. 1. Механические силы, действующие на зерна ферромагнитного порошка, рассчитываются из условия равновесия зерен под действием магнитных сил [8]. При расчете механических сил методом конечных элементов в точках контакта зерен ферромагнитного порошка, смоделированных шарами, образуются напряжения, стремящиеся к бесконечности [9]. Поэтому для расчета механических сил между зернами магнитного порошка необходимо решать задачу статического равновесия. В отличие от метода конечных элементов такой способ расчета позволяет пренебречь напря-

жениями, возникающими при точечном контакте зерен порошка в состоянии равновесия.

Обозначим:  $n$  - количество рядов зерен ферромагнитного порошка,  $m$  - количество зерен ферромагнитного порошка в ряду, примыкающем к магнитному индуктору. Тогда в следующем от индуктора ряду будет  $m-1$  зерен, в следующем -  $m-2$  зерен и т.д.

Для получения статически разрешимой задачи рассмотрим систему контактных сил. Контактными называются силы, возникающие при соприкосновении тел и действующие со стороны одного тела на другое. При этом, конечно, возникают деформации, но они обычно невелики, тела рассматриваются как абсолютно твердые.

На зерна 1-го ряда (примыкающего к магнитному индуктору) действуют силы реакции от контакта с индуктором  $F_{Pi}$  и

сила трения  $F_{mp}$ , которая одинакова для всех зерен магнитно-абразивного порошка. Это связано с тем, что рассматривается состояние статического равновесия и все зерна неподвижны. Поэтому фактически рассматривается сила трения  $F_{mp}$  покоя, которая действует на каждое зерно порошка 1-го ряда. Тогда суммарная сила трения равна  $mF_{mp}$ . Итого мы имеем  $m+1$  силу:  $m$  сил реакции от контакта с индуктором  $F_{Pi}$  и одну (одинаковую для всех зерен первого ряда) силу трения  $F_{mp}$ .

Между зернами магнитного порошка 1-го ряда имеются контактные силы  $F_{ij}$ . Количество этих сил составляет  $m-1$ .

На зерна магнитного порошка 1-го ряда также воздействуют зерна порошка второго ряда. Расположение этих сил - наклонное: проекции сил на оси  $x$  и  $y$  находятся через коэффициенты  $0,5$  и  $\frac{\sqrt{3}}{2}$ . Количество этих сил учитывается при рассмотрении второго и последующих рядов зерен магнитно-абразивного порошка.

### Заключение

В итоге проделанной работы было исследовано состояние равновесия зерен магнитно-абразивного порошка в процессе магнитно-абразивной обработки.

Для этого сперва необходимо рассчитать значения магнитных сил в рабочем зазоре. Данный расчет выполняется методом конечных элементов, его результатом являются значения всех магнитных сил, действующих на все зерна ферромагнитного порошка, расположенные в рабочем зазоре. Зная величины магнитных сил, можно определить расположение зерен маг-

нитно-абразивного порошка второго и последующих рядов между собой в ряду не контактируют, а имеют контакт только с зернами предыдущего и последующего рядов. Для текущего ряда зерен порошка  $i$  количество контактов с предыдущим рядом зерен составляет  $2(m-i+1)$ . Тогда общее количество наклонных сил будет составлять  $2\sum_{i=2}^n (m-i+1) = (n-1)(2m-n)$ .

В итоге количество искомых сил будет составлять  $(m+1) + (m-1) + (n-1)(2m-n) = 2mn + n - n^2$ . Количество уравнений системы будет равно удвоенному количеству зерен магнитно-абразивного порошка (так как силы проецируются на оси  $x$  и  $y$ )  $2mn + n - n^2$ .

В итоге получим, что количество уравнений системы совпадает с количеством неизвестных сил [10]. Система контактных сил является разрешимой задачей статического равновесия.

нитно-абразивного порошка в состоянии равновесия.

Следующим шагом является расчет всех механических сил в рабочем зазоре путем решения задачи статического равновесия. В отличие от метода конечных элементов такой способ расчета позволяет пренебречь напряжениями, возникающими при точечном контакте зерен порошка в состоянии равновесия.

Итогом решения этой задачи будет выявление конфигурации зерен ферромагнитного порошка в состоянии статического равновесия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. - Л.: Машиностроение, 1986. - 176 с.
2. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. - Минск: Наука и техника, 1981. - 328 с.
3. Приходько, С.П. Моделирование процесса магнитно-абразивной обработки деталей машин на ЭВМ / С.П. Приходько // Отделочно-чистовые

- методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. - Барнаул, 1987. - С. 115-119.
4. Кульавик, А.А. Расчет магнитных сил, действующих на зерна ферромагнитного порошка в процессе магнитно-абразивной обработки / А.А. Кульавик, С.Л. Леонов, А.М. Иконников, Р.В. Гребеньков // Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении: сб. тр. III всерос. молодеж. науч.-практ. шк. (29-30 нояб. 2017 г.). - Кемерово: КузГТУ, 2017. - Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wp->

content/Events/School/utec/2017/school/pages/Articles/108.pdf.

5. Приходько, С.П. Магнитно-абразивное полирование индукторами на постоянных магнитах / С.П. Приходько, Ю.М. Барон // Автотракторное электрооборудование. - 1983. - № 5. - С. 11-14.
6. Оликер, В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки износостойких покрытий / В.Е. Оликер. - М.: Металлургия, 1990. - 175 с.
7. Леонов, С.Л. Автоматическое регулирование рабочего зазора при магнитно-абразивной обработке пространственно сложных поверхностей / С.Л. Леонов, А.М. Иконников, Р.В. Гребеньков // Актуальные проблемы в машиностроении:

материалы 1-й междунар. науч.-практ. конф. - Новосибирск, 2014. - С. 162-166.

8. Барон, Ю.М. Физические основы работы магнитно-абразивных материалов / Ю.М. Барон // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. - Киев, 1980. - С. 10-17.
9. Ящерицын, П.И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын, М.Т. Забавский. - Минск: Наука и техника, 1988. - 270 с.
10. Татаркин, Е.Ю. Методы творчества: учеб. пособие / Е.Ю. Татаркин, А.М. Марков, А.А. Ситников. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1998. - 84 с.

1. Baron, Yu.M. *Magnetic-Abrasive and Magnetic Working of Products and Cutters* / Yu.M. Baron. - L.: Mechanical Engineering, 1986. - pp. 176.
2. Sakulevich, F.Yu. *Fundamentals of magnetic-abrasive working* / F.Yu. Sakulevich. - Minsk: *Science and Engineering*, 1981. - pp. 328.
3. Prikhodko, S.P. *Computer simulation of machinery magnetic-abrasive working* / S.P. Prikhodko // *Finishing Working Methods and Tools in Engineering Techniques*. - Barnaul, 1987. - pp. 115-119.
4. Kuliavik, A.A. *Computation of magnetic forces affecting grains of ferromagnetic powder during magnetic-abrasive working* / A.A. Kuliavik, S.L. Leonov, A.M. Ikonnikov, R.V. Grebenkov // *Strengthening Technologies and Functional Coatings in Mechanical Engineering: Proceedings of the III-d All-Russian Youth Scientific-Practical Conf. of Schools (November 29-30, 2017)*. - Kemerovo: KuzSTU, 2017. - access mode: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/School/utec/2017/school/pages/Articles/108.pdf>.
5. Prikhodko, S.P. *Magnetic abrasive burnishing by inductors constant magnets* / S.P. Prikhodko, Yu.M.

Baron // *Motor Car and Tractor Electric Equipment*. - 1983. - No.5. - pp. 11-14.

6. Olikier, V.E. *Powders for Wear-Resistant Coating Magnetic Abrasive Working* / V.E. Olikier. - M.: Metallurgy, 1990. - pp. 175.
7. Leonov, S.L. *Working gap automated adjustment at spatial complex surface magnetic abrasive working* / S.L. Leonov, A.M. Ikonnikov, R.V. Grebenkov // *Actual Problems in Mechanical Engineering: Proceedings of the I-st Inter. Scientific Practical Conf.* - Novosibirsk, 2014. - pp. 162-166.
8. Baron, Yu.M. *Physical fundamentals of magnetic abrasive materials* / Yu.M. Baron // *Magnetic Abrasive Materials and Methods for Their Tests*. Kyev, 1980. - pp. 10-17.
9. Yashcheritsyn, P.I. *Diamond abrasive working and product strengthening in magnetic field* / P.I. Yashcheritsyn, M.T. Zabavsky. - Minsk: *Science and Engineering*, 1988. - pp. 270.
10. Tatarkin, E.Yu. *Creation Methods: manual* / E.Yu. Tatarkin, A.M. Markov, A.A. Sitnikov. - Barnaul: AltSTU Publishing House, 1998. - pp. 84.

Статья поступила в редколлегию 20.03.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Киричек А.В.

#### Сведения об авторах:

**Леонов Сергей Леонидович**, д.т.н., профессор Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, e-mail: [sergey\\_and\\_nady@mail.ru](mailto:sergey_and_nady@mail.ru).

**Иконников Алексей Михайлович**, к.т.н., доцент Алтайского государственного технического уни-

**Leonov Sergey leonidovich**, D. Eng., Prof. of Polzunov State Technical University of Altay, e-mail: [sergey\\_and\\_nady@mail.ru](mailto:sergey_and_nady@mail.ru).

**Ikonnikov Alexey Mikhailovich**, Can. Eng., Assistant Prof. of Polzunov State Technical University of Altay, e-mail: [iomagtu@mail.ru](mailto:iomagtu@mail.ru).

верситета им. И.И. Ползунова, e-mail: [iomagtu@mail.ru](mailto:iomagtu@mail.ru).

**Гребеньков Роман Вячеславович**, аспирант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, e-mail: [sigaset@yandex.ru](mailto:sigaset@yandex.ru).

**Grebennikov Roman Vyacheslavovich**, Post graduate student of Polzunov State Technical University of Altay, e-mail: [sigaset@yandex.ru](mailto:sigaset@yandex.ru).