

УДК 681.2.082

СДВИГОВАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ПОРОШКА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

канд. техн. наук Н.С. ХОМИЧ, О.П. КОРОГОДА
(Научно-инженерное предприятие «Полимаг», Минск);

канд. техн. наук В.А. МАНСУРОВ
(Белорусский государственный медицинский университет, Минск);
А.Ю. ЛУГОВИК
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Исследуется сдвиговая деформация ферромагнитного порошка в магнитном поле. Показано, что при магнитно-абразивной обработке в области контакта с обрабатываемой поверхностью сдвигается слой, где присутствует наибольшая интенсивность деформации. Плоскость сдвига при этом параллельна плоскости измерительного узла. Представлено моделирование напряженно-деформированного состояния цепочки частиц порошка. На основе модели идеально пластического тела развиты основные аспекты оптимального проектирования, приспособляемости, динамики упругопластичного и жестко-пластичного тела. Определены механические свойства ферромагнитного порошка, структурированного магнитным полем, на основе которых построены конститутивные соотношения, пригодные для расчета напряженно-деформированного состояния как функции напряжений, деформации, плотности и индукции магнитного поля.

Введение. В настоящее время представляет большой интерес использование магнитного поля в различных процессах обработки. При магнитно-абразивной обработке магнитное поле играет определяющую роль в формировании магнитно-абразивного инструмента, представляющего собой порошковую среду [1]. Для оптимизации работы магнитно-абразивного инструмента необходимо иметь представление о силах и давлениях, действующих на обрабатываемый материал со стороны инструмента [2]. Прямые измерения не дают качественного представления о процессах, происходящих в зоне контакта инструмента и поверхности. Это представление можно получить из расчета напряженно-деформированного состояния магнитно-абразивного инструмента [3].

Расчет напряженно-деформированного состояния неоднородных сред может быть выполнен с использованием феноменологической теории механики сплошных сред [4]. При этом подразумевается, что в данном случае среда является квазигомогенной. Термин «квазигомогенные среды» предполагает допущение, что за характерное время основного процесса не успевают произойти изменения в относительном движении фаз и компонентов. Направление магнитного поля задает и направление характерных структур данной среды. В этом случае уравнения равновесия сплошной среды выглядят следующим образом:

$$\nabla \sigma + \rho \cdot F = 0, \quad (1)$$

где σ – тензор напряжения; ρ – плотность; F – вектор единичной массовой силы.

Инерционные силы здесь не рассматриваются. Для решения этой задачи необходимо установить зависимость между механическими напряжениями σ и деформациями ε : $f \sigma, \varepsilon = 0$, так называемое конститутивное соотношение.

Фундаментальным свойством гранулированной (порошковой) среды, которое отличает ее от твердых и жидких сред, является сжимаемость, т.е. способность частиц изменять свою упаковку. Существует несколько специфических свойств гранулированных сред: 1) явление дилатансии – способность расширяться при сдвиге; 2) гистерезис напряжений по причине сил трения в среде. Гистерезис является причиной неопределенности расчета напряженно-деформированного состояния гранулированной среды.

Важной характеристикой гранулированной среды, определяющей ее прочность, является коэффициент бокового давления ζ – отношение приращения давления в направлении действия силы к приращению давления в направлении, перпендикулярном действию силы:

$$\zeta = \frac{d\sigma_{xx}}{d\sigma_{yy}}, \quad (2)$$

или в интегральной форме $\sigma_{xx} = \zeta \cdot \sigma_{yy} + c$. Среды, у которых константа интегрирования $c = 0$, называют сыпучими, $c \neq 0$ – связанными средами.

Экспериментальная установка и методика измерения. Согласно поставленной цели исследования особенности сдвиговой деформации порошковой среды в зазоре между параллельными плоскостями для различных величин зазора h , значений индукции магнитного поля, размера частиц порошка и плотности их размещения в зазоре.

Для исследования механических свойств магнитно-абразивного инструмента к измерительному узлу прибора предъявляется ряд специфических требований. Во-первых, измерительный узел должен обеспечивать в рабочей области магнитное поле требуемой величины и средства для его изменения. Во-вторых, конфигурация измерительного узла должна быть по возможности близка к реальным схемам магнитно-абразивной обработки. С учетом этих требований был спроектирован и изготовлен измерительный узел, состоящий из двух одинаковых элементов, реализующих известную схему механических измерений, реализующую деформацию сдвига при кручении типа плоскость – плоскость. Схема узла представлена на рисунке 1.

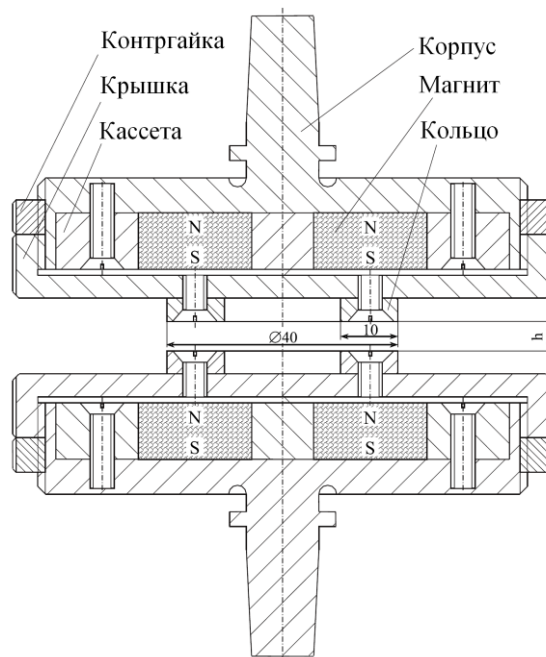


Рис. 1. Конструкция измерительного узла

В зазоре узла между кольцевыми стальными плоскостями создавалось однородное магнитное поле, в котором размещалась исследуемая среда. Для того чтобы избежать проскальзывания, плоскости выполнены шероховатыми. Постоянные магниты располагались в немагнитной кассете, которая размещалась в корпусе, присоединенном к измерительному прибору при помощи конусного соединения. Рабочие плоскости, образованные двумя стальными кольцами, концентрировали поле магнитов в исследуемой среде. Величина магнитной индукции в зазоре регулировалась изменением расстояния между магнитами, для чего стальные кольца были закреплены на крышках, перемещающихся относительно магнитов по резьбе. В нужном положении крышки жестко закреплялись при помощи контргайек.

Степень однородности магнитного поля соответствует однородности поля в катушке Гельмгольца. Направления магнитного поля и сдвига взаимно перпендикулярны.

Нижний элемент измерительного узла (см. рис. 1) поворачивался на угол α с постоянной угловой скоростью.

Напряжения, обусловленные сдвиговой деформацией порошковой среды в зазоре, вызывали поворот верхнего элемента на некоторый угол β , при этом происходило закручивание калиброванного торсиона с жесткостью $C = 0,197 \text{ Н·м/рад}$.

Результаты измерений и их обсуждение. Сдвиговая деформация вычислялась как $\varepsilon = (\alpha - \beta) r_2/h$, где $(\alpha - \beta)$ – разность углов поворота нижней и верхней плоскостей измерительного узла; r_2 – внешний радиус измерительного узла; h – расстояние между плоскостями измерительного узла. Тангенциальное напряжение сдвига рассчитывалось как $\sigma = 2C\beta r/\pi(r_2^4 - r_1^2)$; C – жесткость торсиона; r_1 – внутренний радиус измерительных плоскостей.

В качестве материала использовался ферромагнитный порошок зернистостью 160/100 мкм, магнитная индукция в рабочем зазоре составляла 0,2 Тл.

Исследования проводились при различной плотности частиц в инструменте. Результаты измерений представлены на рисунке 2.

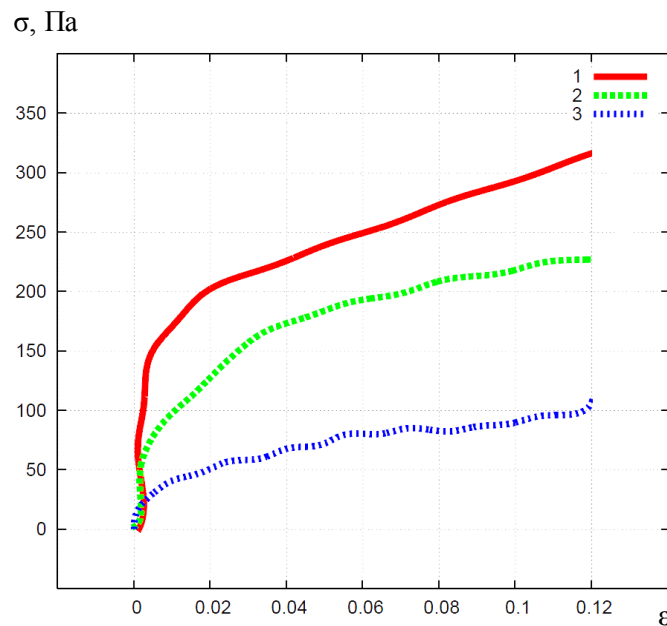


Рис. 2. Диаграмма напряжение – деформация при сдвиге при различных степенях заполнения измерительного узла:
1 – $V/V_0 = 1,6/1,6$; 2 – $V/V_0 = 1,6/2,7$; 3 – $V/V_0 = 1,6/5,3$;
 V – насыпной объем порошка; V_0 – объем рабочего зазора

Из рисунка 2 видно, что диаграмма напряжение – деформация имеет вид, характерный для пластической деформации с упрочнением. Диаграмма напряжение – деформация хорошо аппроксимируется схемой из двух участков:

- 1) отрезка, соответствующего упругому поведению;
- 2) отрезка, соответствующего пластическому состоянию.

Обычно в теории пластичности идеализируется сложное поведение реальных материалов в виде различных моделей. В данном случае имеет место модель упругопластического материала.

Постоянные величины, характеризующие развитие механических напряжений, при сдвиге показаны в таблице.

Механические свойства магнитно-абразивного порошка (индукция поля 0,2 Тл)

Степень заполнения измерительного узла	Модуль сдвига упругой деформации G_{xy} , КПа	Модуль упрочнения σ_u/ϵ_u , КПа	Предельное упругое напряжение σ' , Па	Предельная упругая деформация ϵ'
1	26	1,2	180	0,0004
0,6	5,6	1,0	84	0,0004
0,3	3,7	0,46	43	0,0004

Моделирование напряженно-деформированного состояния цепочки частиц порошка. Основной вопрос, возникающий при оценке условий достижения предела прочности, связан с установлением соотношения между пластическими напряжениями при различных схемах нагружения образца (сдвиг, растяжение и др.), т.е. в нахождении функций всех критических компонентов тензора напряжений (критерия текучести). В случае изотропного материала эти критические значения являются функциями инвариантов тензора напряжений.

На основе модели идеально пластического тела развиты основные аспекты оптимального проектирования, приспособляемости, динамики упругопластичного и жесткопластичного тела.

Согласно теории малых упругопластических деформаций зависимость модуля упругости [5] при сдвиге от текущей деформации:

$$\sigma_{xx} - \sigma = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} \cdot \varepsilon_{xx} - \varepsilon; \quad \tau_{xy} = \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} \varepsilon_{xy}; \quad \sigma_u = \Phi \varepsilon_u; \quad \sigma = 3K\varepsilon; \quad K = \text{const},$$

где $\sigma = \sigma_{ii}/3$; $\varepsilon = \varepsilon_{ii}/3$; $\sigma_u = \sqrt{\sigma_{ij} \cdot \sigma_{ij}}$; $\varepsilon_u = \sqrt{\varepsilon_{ij} \cdot \varepsilon_{ij}}$.

Отметим, что существуют различные подходы к описанию поведения упрочняющихся пластических тел. Теории скольжения рассматривают материал как полукристаллический агрегат с равновероятным распределением форм и размеров зерен в элементарном объеме тела, в котором выделяются преимущественно линии скольжения. Вклад отдельных поверхностей скольжения в пластическое деформирование определяется в некоторой интегральной форме [6].

Рассмотрим магнитно-абразивный инструмент. Наличие магнитного поля заставляет частицы среды выстраиваться вдоль силовых линий, образуя цепочки частиц, так называемую магнитно-абразивную щетку (рис. 3).

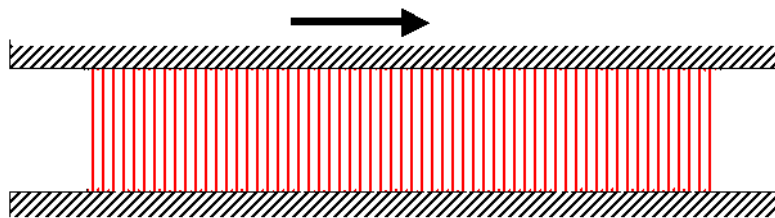


Рис. 3. Магнитно-абразивная щетка

Примечание. Стрелка показывает направление деформации. Направление магнитного поля перпендикулярно деформации.

Совокупное действие этих цепочек определяет макроскопические механические свойства порошковой системы. Такую среду можно отнести к связанной гранулированной среде. Деформация данной среды приведет к изгибу цепочек частиц. Очевидно, что при больших величинах деформации цепочка может разорваться. Поскольку магнитное поле является структурообразующим фактором, оборванная цепочка присоединится к ближайшей оборванной цепочке. В пользу такой гипотезы говорит наличие значительной шумовой составляющей в пластической области, причем чем выше уровень деформации, тем выше уровень шума. Следовательно, пластическая деформация в среде объясняется началом хаотического относительного перемещения частиц цепочки от одной к другой. Другой факт, подтверждающий данную гипотезу, основан на том, что предельная упругая деформация не зависит от степени заполнения рабочего зазора (см. таблицу).

Представляет интерес рассмотреть напряженно-деформированное состояние отдельной цепочки частиц в упругой постановке. Эта задача исследовалась при помощи пакета ELCUT, разработанной ПК TOP (Россия). Уравнения движения среды для этого случая записаны в терминах напряжений (1). Нормальное напряжение в направлении, перпендикулярном к плоскости модели, в задачах плосконапряженного состояния по определению равно нулю. В качестве условий закрепления использовалось жесткое закрепление с заранее заданным смещением, которое варьировалось в пределах области упругой деформации и немного превышало этот предел. Результатами расчета являлись: перемещения, деформации, координатные и главные компоненты тензора напряжений, эквивалентные напряжения по теории прочности Мизеса.

Критерий прочности Мизеса (потенциальная энергия формоизменения) записывается в виде

$$\sigma = \sqrt{0,5 \left[\sigma_1 - \sigma_2^2 + \sigma_2 - \sigma_3^2 + \sigma_3 - \sigma_1^2 \right]},$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные напряжения, упорядоченные по убыванию.

Геометрически цепочка представлялась бесконечно длинной пластиной высотой 1,2 мм и толщиной 0,2 мм. Цепочка характеризовалась упругими свойствами (см. таблицу). Коэффициент Пуассона являлся варьируемым параметром в пределах от 0,1 до 0,25. Основой для выбора такого диапазона явилось предположение о связанности данной порошковой среды.

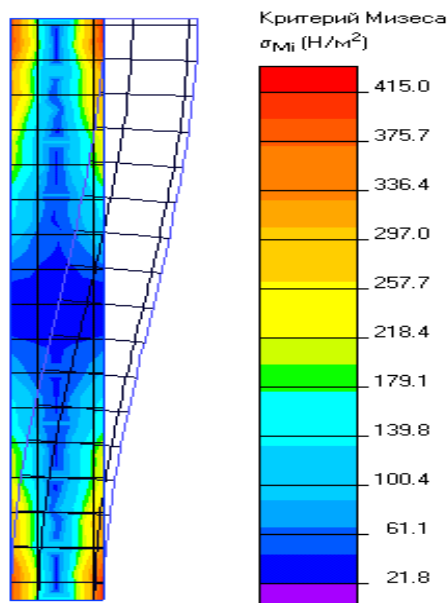


Рис. 4. Результаты моделирования

Заключение. При магнитно-абразивной обработке в области контакта с обрабатываемой поверхностью сдвигается слой, где присутствует наибольшая интенсивность деформации. Плоскость сдвига при этом параллельна плоскости измерительного узла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий: моногр. / Н.С. Хомич. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.
2. Коррекция формы плоских прецизионных поверхностей с использованием процесса программно-управляемого полирования на базе метода магнитно-абразивной обработки / Н.С. Хомич [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2010. – Т. 15, № 2. – С. 9 – 13.
3. Тарасова, А.Ю. Реодинамика магнитно-абразивного материала в зазоре между параллельными плоскостями / А.Ю. Тарасова, Н.С. Хомич, Б.М. Хусид // Весці Акадэміі навук Беларусі. – 1991. – № 1. – С. 100 – 107.
4. Победря, Б.Е. Основы механики сплошной среды / Б.Е. Победря, Д.В. Георгиевский. – М.: Физматлит, 2006. – 272 с.
5. Ильюшин, А.А. Некоторые вопросы теории пластических деформаций / А.А. Ильюшин // Прикладная математика и механика. – 1943. – Т. 7, № 4. – С. 245 – 272.
6. Кузнецов, Е.Е. К построению теории малых упругопластических деформаций / Е.Е. Кузнецов, И.Н. Матченко, Н.М. Матченко // Механика предельного состояния. – 2010. – Т. 8, № 2. – С. 288 – 295.

Поступила 07.02.2012

SHEAR DEFORMATION OF THE FERROMAGNETIC POWDER IN A MAGNETIC FIELD

N. HOMICH, O. KOROGODA, V. MANSUROV, A. LUGOVIK

In this paper, the mechanical properties of the ferromagnetic powder structured by a magnetic field are defined and the constructive decisions based on these properties are made. It is shown that under magnetic abrasive machining in the area of contact with the working surface the layer where the most intensity of deformation is found shifts. The shear area at that is parallel to the plane of the metrical unit. Modelling of the strain-stress distribution of the powder particles chains is presented. Based on the perfectly plastic body model focal points of optimal projecting, adaptability, dynamics elastic-plastic and hard-plastic body are developed. The achieved solution is suitable for a deflected mode calculation as the function of stress, deformation, density and magnetic induction.