

УДК 621. 787  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ШАРА С ИСТОЧНИКОМ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСКАТНИКА

А. М. ДОВГАЛЕВ, В. В. ГЛУЩЕНКО, Д. М. СВИРЕПА  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Могилев, Беларусь

Большой научно-практический интерес представляет метод магнитно-динамического раскатывания отверстий деталей технических систем деформирующими шарами, имеющими магнитный привод [1].

В систему уравнений, описывающих кинематику и динамику деформирующихся шаров в процессе упрочняющей обработки, входит сила взаимодействия деформирующего шара с источником магнитного поля. Однако, как показывает анализ литературы, отсутствуют аналитические зависимости для расчета величины магнитной силы, действующей на деформирующий шар. Данная работа посвящена решению поставленной задачи.

При расчете величины силы магнитного притяжения ферромагнитного деформирующего шара к источнику магнитного поля инструмента введем следующие допущения: постоянный магнит и деформирующий шар считаем магнитными диполями – системами с ярко выраженными магнитными полюсами; постоянный магнит и деформирующий шар обладают магнитными моментами  $p_{m1}$  и  $p_{m2}$  соответственно; система с магнитным моментом  $p_{m1}$  создает магнитное поле, а объект с магнитным моментом  $p_{m2}$  в нем находится; расстояние между геометрическими центрами постоянного магнита и деформирующего шара превышает размеры постоянного магнита.

Векторный потенциал магнитного поля определяем по зависимости:

$$\vec{U}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 [\vec{p}_m; \vec{r}]}{4 \pi r^3},$$

где  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $\vec{r}$  и  $r$  – соответственно радиус-вектор и расстояние между геометрическими центрами постоянного магнита и деформирующего шара.

Индукцию магнитного поля, как функцию потенциала, определяем по формуле [2]:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \nabla \times \vec{U} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{3\vec{r}(\vec{p}_m; \vec{r})}{r^5} - \frac{\vec{p}_m}{r^3} \right).$$

Находим выражения для определения модуля проекций вектора индукции магнитного поля на оси координат  $x$ ,  $y$  [3]:

$$B_x(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} p_{m1} \left( \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{r^3} \right), \quad B_y(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} p_{m1} \left( \frac{3 \cos \theta \sin \theta}{r^3} \right),$$

где  $\theta$  – угол смещения деформирующего шара относительно координатной оси  $Ox$ .

Вектор магнитной силы, действующей на деформирующий шар, обладающий магнитным моментом  $p_{m2}$ , равен [4]:

$$\vec{F} = (\vec{p}_{m2} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{B}_1.$$

В соответствии с [5] после преобразований имеем:

$$\vec{F}(\vec{r}, \vec{p}_{m1}, \vec{p}_{m2}) = \frac{3\mu_0}{4\pi r^5} \left[ (\vec{p}_{m1}; \vec{r}) \cdot \vec{p}_{m2} + (\vec{p}_{m2}; \vec{r}) \cdot \vec{p}_{m1} + (\vec{p}_{m1}; \vec{p}_{m2}) \cdot \vec{r} - \frac{5(\vec{p}_{m1} \cdot \vec{r})(\vec{p}_{m2} \cdot \vec{r})}{r^2} \cdot \vec{r} \right].$$

Определяем проекцию магнитной силы на оси координат  $x, y$ :

$$F_x(r, \theta, \alpha) = -\frac{3\mu_0 \cdot p_{m2} \cdot p_{m1}}{4\pi r^4} [2 \cos\theta \cdot \cos(\theta - \alpha) - \sin\theta \cdot \sin(\theta - \alpha)];$$

$$F_y(r, \theta, \alpha) = -\frac{3\mu_0 \cdot p_{m2} \cdot p_{m1}}{4\pi r^4} \cdot \sin(\theta - \alpha),$$

где  $\alpha$  – угол, определяющий положение вектора  $\vec{p}_{m2}$ .

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{3 \cos\theta \sin\theta}{3 \cos^2\theta - 1}.$$

Находим значение  $p_{m1}$  по формуле:

$$p_{m1} = \frac{4\pi B \left(\frac{h}{2}\right)^3}{2\mu_0},$$

где  $B$  и  $h$  – соответственно величина индукции магнитного поля и высота постоянного магнита.

Магнитный момент  $p_{m2}$  деформирующего шара находим из выражения:

$$p_{m2} = \frac{(\mu - 1) \cdot H \cdot r^3}{\mu + 2},$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля в точке, определяемой радиус-вектором  $\vec{r}$ ;  $\mu$  – магнитная проницаемость.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Довгалеv, А. М.** Математическое моделирование процесса магнитно-динамического раскатывания / А. М. Довгалеv, И. И. Маковецкий, Д. М. Свирепа // Вестн. БрГТУ. – 2010. – № 4. – С. 26–30.
2. **Тамм, И. Е.** Основы теории электричества / И. А. Тамм.– М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.
3. **Leupold, H. A.** Multi-tesla permanent magnet field sources / H. A. Leupold, A. S. Tilak, and P. E. Potenziani, // Journal of Applied Physics Appl. Phys. № 73(10). – 1993. – P. 6861–6863.
4. **Furlani, E. P.** Permanent Magnet and Electromedical Devices: Materials, Analysis and Applications / E. P. Furlani – Academic Press, 2001. – 518 p.
5. **Furlani, E. P.** A three-dimensional field solution for bipolar cylinders / E. P. Furlani, S. Reznik, and W. Sanson // IEEE Trans. Mag. № 30 (5) – 1994. – P. 2916–2919.