

УДК 621.923

Д. А. Кунгуров, аспирант кафедры «АМО»
 Н. М. Филькин, доктор технических наук, профессор кафедры «АМО»
 А. Ф. Мкртчян, кандидат технических наук, доцент кафедры «АМО»
 ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛОСКОМ РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ТОРЦОВЫМ ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ИНДУКТОРОМ

Приведены аналитические зависимости магнитного потенциала и магнитного потока в рабочем околополюсном пространстве торцового магнитного индуктора на постоянных магнитах от высоты рабочего зазора, скорости главного движения и магнитной проницаемости материала заготовки. Данные зависимости описывают магнитное поле в рабочем зазоре, заполненном ферромагнитным абразивным порошком (ФМАП), и могут быть использованы для практических расчетов сил резания, возникающих в процессе воздействия ФМАП на поверхность заготовки.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, полирование, финишная обработка.

Известные методы механической обработки обеспечивают требуемое качество поверхностей большинства деталей машин. Вместе с тем в связи с повышением сложности конструкции вновь разрабатываемых изделий, требований к точности и качеству их изготовления происходит рост количества финишных операций.

К финишным операциям относится и магнитно-абразивная обработка (МАО) [1]. При МАО роль режущего инструмента выполняет порция ФМАП, а заготовку размещают вблизи полюсов магнитного индуктора. Рабочая зона околополюсного пространства индуктора частично или полностью заполняется ФМАП [2]. Под воздействием магнитного поля частицы ФМАП формируются в цепочки, образуя своеобразный гибкий инструмент. Такой инструмент удерживается силами магнитного поля в рабочем околополюсном пространстве и оказывается прижатым к обрабатываемой поверхности заготовки. При движении индуктора относительно заготовки осуществляется сьем припуска и формируется поверхность с новым микрорельефом и измененными физико-механическими свойствами поверхностного слоя.

Порция ФМАП в рабочем зазоре под действием сил трения смещается к выходу из рабочего зазора и уплотняется, встречая основное сопротивление со стороны магнитного поля. Силы трения между зернами и поверхностью полюса помогают магнитному полю удерживать порошок в рабочем зазоре [3].

Особенностью процесса МАО является формирование под действием внешнего магнитного поля особого инструмента в виде ферроабразивной щетки. Такой инструмента представляет собой среду в виде ФМАП и агентов поверхностно-активных веществ. Связкой этой среды является энергия магнитного поля индуктора. ФМАП представляет собой порошок определенной зернистости (40–315 мкм), обладающий одновременно высокими магнитными и режущими свойствами. Известны ФМАП на основе Fe-TiC, Fe-SiC, Fe-Al-Cr, Fe-KНБ, Fe-Al₂O₃, Fe-Cr₃O₂ и другие [4].

Известно, что давление ФМАП на поверхность заготовки существенно влияет на удельный сьем материала и достигаемую шероховатость. В свою очередь,

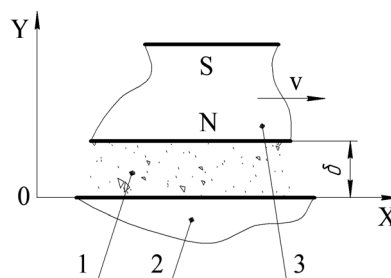
давление ФМАП зависит от магнитного потока в рабочем зазоре и составляет в среднем 0,2–0,4 МПа [5]. В связи с этим возникает необходимость определения величины магнитного потока в рабочем зазоре и его регулирования. При использовании электромагнитных индукторов это достигается несколькими приемами, главным из которых является изменение величины силы тока, питающего катушки соленоидов. В индукторах на постоянных магнитах с целью изменения магнитного потока изменяют рабочий зазор.

Приведем аналитический расчет магнитного поля в рабочем зазоре вращающегося торцового магнитного индуктора на постоянных магнитах при МАО плоской заготовки.

Примем, что в рабочем зазоре δ (пространство между торцевой поверхностью индуктора и поверхностью заготовки) имеется абсолютно однородное магнитное поле вдоль координат x , y и z . Тогда распределение магнитного скалярно потенциала U в рабочем зазоре подчиняется уравнению Лапласа [6]:

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = 0.$$

Рассмотрим расчетную схему для рабочего зазора индуктора, представленную ниже (рисунок). В данной схеме рабочий зазор δ заполнен ФМАП 1 вдоль координаты x . Плоскость XZ условно принята за поверхность заготовки 2. Магнитный индуктор 3 представлен в виде призмы. Область вокруг индуктора 3, заполненная воздухом, будет являться областью рассеивания магнитного потока. Магнитное поле неизменно в направлении X и изменяется в направлении Y .



Расчетная схема для рабочего зазора индуктора

Определим магнитный потенциал U и магнитный поток Φ методом разделения переменных. Функции U и Φ могут быть представлены следующими тригонометрическими рядами:

$$U = \sum_1^k m_{uk} \cos k\omega x + \sum_1^k n_{uk} \sin k\omega x; \quad (1)$$

$$\Phi = \sum_1^k m_{\phi k} \cos k\omega x + \sum_1^k n_{\phi k} \sin k\omega x, \quad (2)$$

где m и n – коэффициенты, представляющие собой следующие гиперболические функции:

$$m_{uk} = p_k e^{k\omega y} + p_{-k} e^{-k\omega y}; \quad (3)$$

$$n_{uk} = q_k e^{k\omega y} + q_{-k} e^{-k\omega y}; \quad (4)$$

$$m_{\phi k} = \mu (q_{-k} e^{-k\omega y} - q_k e^{k\omega y}); \quad (5)$$

$$n_{\phi k} = \mu (p_k e^{k\omega y} - p_{-k} e^{-k\omega y}). \quad (6)$$

Если известно распределение магнитного потенциала U , т. е. известны два значения m_{uk} при $y = \delta$ и $y = 0$ и два значения n_{uk} при $y = \delta$ и $y = 0$, то коэффициенты p_k, p_{-k}, q_k и q_{-k} вычисляются по следующим формулам:

$$p_k = \frac{m_{uk}(y = \delta) \times e^{-k\omega\delta} - m_{uk}(y = 0) \times e^{-k\omega\delta}}{1 - e^{-2k\omega\delta}},$$

$$p_{-k} = \frac{m_{uk}(y = 0) - m_{uk}(y = \delta) \times e^{-k\omega\delta}}{1 - e^{-2k\omega\delta}},$$

$$q_k = \frac{n_{uk}(y = \delta) \times e^{-k\omega\delta} - n_{uk}(y = 0) \times e^{-k\omega\delta}}{1 - e^{-2k\omega\delta}},$$

$$q_{-k} = \frac{n_{uk}(y = 0) - n_{uk}(y = \delta) \times e^{-k\omega\delta}}{1 - e^{-2k\omega\delta}}.$$

Если известно распределение функций U и Φ только при $y = 0$, эти же коэффициенты могут быть вычислены по следующим формулам:

$$p_k = \frac{1}{2} \left[m_{uk} + \frac{1}{\mu} n_{\phi k} \right],$$

$$p_{-k} = \frac{1}{2} \left[m_{uk} - \frac{1}{\mu} n_{\phi k} \right],$$

$$q_k = \frac{1}{2} \left[n_{uk} + \frac{1}{\mu} m_{\phi k} \right],$$

$$q_{-k} = \frac{1}{2} \left[n_{uk} - \frac{1}{\mu} m_{\phi k} \right].$$

На верхней границе заготовки при вращении магнитного индуктора возникают распределенные токи, создающие собственное магнитное поле.

В этом случае примем волновое уравнение векторного потенциала \vec{A} [7]:

$$\nabla^2 \vec{A} - \frac{1}{V_b^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\gamma \mu \vec{E} = \gamma \mu \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad (7)$$

где V_b – скорость распространения электромагнитных воздействий,

$$V_b = \frac{1}{\mu \epsilon},$$

где μ – магнитная проницаемость среды; ϵ – диэлектрическая постоянная; γ – удельная проводимость среды; \vec{E} – напряженность электрического поля,

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}.$$

Вектор плотности тока $-\gamma \vec{E}$ направлен вдоль оси Z , поэтому вместо уравнения (7) будем рассматривать аналогичное ему уравнение для проекции векторного потенциала \vec{A} на ось Z .

Поскольку $\frac{\partial A_z}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} V$ и $\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} V^2$ (где V – скорость главного движения), то после раскрытия лапласиана уравнение (7) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \mu \gamma V \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0. \quad (8)$$

Уравнение (8) описывает распределение магнитного потока Φ на обрабатываемой поверхности (плоскость XZ). Распределение магнитного потенциала на обрабатываемой поверхности найдем по следующей формуле:

$$U = \int H_x dx = \frac{1}{\mu} \int \frac{\partial \Phi}{\partial y} dx. \quad (9)$$

Совместное решение уравнений (3)–(6), (8) и (9) позволяет найти соотношения между коэффициентами в формулах (1) и (2), представленные следующими формулами:

$$m_{uk} = \frac{1}{\mu} \left(\sqrt{\frac{d_k + 1}{2}} n_{\phi k} - \sqrt{\frac{d_k - 1}{2}} m_{\phi k} \right),$$

$$n_{uk} = -\frac{1}{\mu} \left(\sqrt{\frac{d_k - 1}{2}} n_{\phi k} - \sqrt{\frac{d_k + 1}{2}} m_{\phi k} \right),$$

где d_k – подстановочный коэффициент,

$$d_k = \sqrt{1 + \left(\frac{\mu \gamma V}{k \omega} \right)^2}.$$

Изложенные формулы позволяют получить зависимости магнитного потенциала и магнитного потока на поверхности заготовки от высоты рабочего зазора δ , скорости главного движения V (скорости вращения индуктора) и магнитной проницаемости материала среды μ (заготовки). Определение оптимальных величин рабочего зазора и скорости главно-

го движения позволят обеспечить наибольшую производительность процесса МАО деталей машин. Приведенный аналитический расчет поля в рабочей зоне магнитного индуктора справедлив только для схемы полирования торцовым индуктором плоской поверхности заготовки.

Библиографические ссылки

1. Скворчевский Н. Я., Федорович Э. Н., Яцерицын П. И. Эффективность магнитно-абразивной обработки. – Минск : Наука і тэхніка, 1991. – 216 с.
2. Барон Ю. М. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса обработки деталей машин в магнитном поле. – Л. : ЛПИ, 1969. – 16 с.
3. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущего инструмента. – Л., 1986.
4. Там же.
5. Хомич Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий : монография. – Мн. : БНТУ, 2006. – 218 с.
6. Нейман Р. Л., Демиргян К. С. Теоретические основы электротехники. – Т. 2. – Л. : Энергия, 1975. – 407 с.
7. Там же.

* * *

Kungurov D. A., Post-graduate, Kalashnikov ISTU;
Filkin N. M., DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU;
Mkrtychyan A. F., PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

Analysis of magnetic field in flat working gap at magnetic-abrasive machining by face rotating magnetic inductor

The present article shows analytical dependences of magnetic potential and magnetic flux in the working near-pole area of the face magnetic inductor with permanent magnets on the height of working gap, speed of main motion and magnetic permeability of workpiece material. These dependences describe magnetic flux in the working gap filled with ferromagnetic abrasive powder and can be used for practical evaluation of the cutting forces that occur when the ferromagnetic abrasive powder effects on the workpiece surface.

Keywords: magnetic abrasive machining, polishing, finishing.

Получено: 06.07.15