

роховатость поверхности до ( $Ra_1$ , мкм) и после МАО ( $Ra_2$ , мкм) – на профилографе-профилометре мод. 252 «Калибр».

Размеры поршневых пальцев компрессора  $D = 15$  мм,  $L = 35$  мм. Исходная шероховатость составляла  $Ra_1 = 0,6–0,8$  мкм. Шероховатость после обработки –  $Ra_2 = 0,05$  мкм. Величина размерного съема составила  $\Delta D = 45$  мкм, массового съема –  $\Delta G = 150$  мг за 60 с. Величину магнитной индукции в рабочем зазоре (В, Тл) определяли тесламетром Т-3, который должен соответствовать требованиям ( $Ra = 0,08$  мкм,  $HRC$  60,  $\Delta D$ , мкм,  $\Delta G$ , мг).

В результате проведенных исследований установлены аналитические зависимости для определения величины напряженности ЭМП, что обеспечивает определение динамики процесса и степень силового воздействия на обрабатываемые детали. Экспериментально определена шероховатость поверхности, величина массового и размерного съема.

#### Список использованных источников

1. ГОСТ Р ИСО 18669-1-2018. Двигатели внутреннего сгорания. Поршневые пальцы. Часть 1. Общие технические требования; введ. 2019–06–01. – Москва: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»; Москва: Стандартинформ, 2018. – 12с.
2. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 326с.
3. Говорков, В.А. Электрические и магнитные поля / В.А. Говорков. – Москва: Энергия, 1968. – 328с.

УДК 621.923

## РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Студент – Залуцкий М.А., 33 тс, 4 курс, ФТС*

*Научные*

*руководители – Сергеев Л.Е., к.т.н., доцент<sup>1</sup>*

*Мендалиева С.И., к.т.н.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*«Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина», г. Нур-Султан, Республика Казахстан*

**Аннотация:** проведен анализ и исследование электромагнитной системы, рассчитаны основные параметры для электромагнитной системы, на основе полученных данных создана установка для реализации процесса магнитно-абразивной обработки внутренних поверхностей.

**Ключевые слова:** электромагнитная система, магнитно-абразивная обработка, магнитное поле, ферроабразивный порошок, внутренние поверхности.

Известно, что проектирование технически совершенной электромагнитной системы (ЭМС) с требуемыми выходными параметрами возможно при наличии точной научно обоснованной методики расчета. Однако объем требований, предъявляемых к данным системам, характеризуется большим многообразием конструктивных форм магнитных цепей. Это приводит к значительным трудностям при их разборке и создании. В связи с указанным выше правильный расчет магнитной цепи сокращает трудоемкие и продолжительные эксперименты при подборе необходимых параметров. В ходе протекания процесса обработки деталей в магнитном поле, это поле играет роль не только связки, удерживающей зерна ферроабразивного порошка (ФАП) в рабочем воздушном зазоре, но выступает как сила, обеспечивающая прижим зерен к обрабатываемой поверхности [1, 2]. Исходя из этого обстоятельства, следует осуществлять и проектирование электромагнитной системы для оборудования, реализующего данный процесс. Также необходимо отметить, что, хотя магнитное поле изменяется на межатомном уровне, как в пространстве, так и во времени, для решения инженерных задач это поле усредняют и считают неизменным. Определение электромагнитного поля, используемого для магнитно-абразивной обработки (МАО), и связь электрического и магнитного полей выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} B &= \frac{4\pi J}{c}; & \operatorname{rot} E &= 0; \\ \operatorname{div} B &= 0 & \operatorname{div} E &= 4\pi\rho \end{aligned}$$

где  $B$  – магнитное поле;

$E$  – электрическое поле;

$J$  – объемная плотность тока,  $\text{А} \cdot \text{м}^{-2}$ ;

$c$  – скорость света в вакууме,  $2,998 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;

$\rho$  – плотность заряда,  $\text{Кл} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Первоочередной задачей при конструировании оборудования для МАО является определение сечения магнитопроводов с учетом их магнитного насыщения при получении заданной величины индукции к рабочей зоне. Все элементы, составляющие магнитную цепь, должны быть выполнены из магнитных материалов с высокими значениями магнитной проницаемости  $\mu$  и индукции  $B_s$ . Однако следует учесть, что чем ближе по величине магнитная индукция в сечении магнитопровода  $B_m$  к индукции насыщения  $B_s$ , тем большую долю составляют потоки утечки. Это связано с тем, что индукцию  $B_i$  можно считать пропорциональной напряженности магнитного поля  $H_i$  только в узком диапазоне их значений, а так как эта связь по существу является нелинейной, еще более усложняет задачу. Например, если неко-

торый участок магнитной цепи достиг насыщения, значение  $\mu$  понижается, и цепь фактически оказывается разорванной, иначе говоря, теряет смысл само представление о цепи. Кроме того, индукция  $B_1$  не представляет собой однозначную функцию напряженности  $H_1$  из-за наличия гистерезиса.

Более точный расчет магнитных цепей с учетом потоков рассеяния можно получить, используя общее дифференциальное уравнение. Для этого рассмотрим элементы магнитной цепи  $x$  и  $x+dx$ , рисунок 1. Элементу  $x+dx$  соответствует магнитный поток  $\Phi_x-d\Phi_x$ . На участке магнитной цепи  $dx$  проходит элементарный поток рассеяния  $d\Phi_{sx}$ .

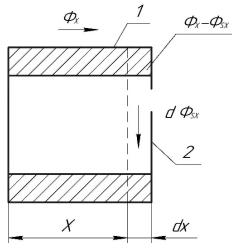


Рисунок 1 – Элементы магнитной цепи

Определим величину приращения разности магнитных потенциалов на элементе  $dx$ :

$$dU_{mx} = \Phi_x' r_{mx}' dx - q dx$$

$$dU_{mx} = -(q - \Phi_x \times r_{mx}') dx$$

где  $r_{mx}$  – суммарное магнитное сопротивление магнитной цепи;

$\theta$  – удельная намагничивающая сила обмотки ЭМС.

Приращение потока при переходе от сечения  $x$  к сечению  $x+dx$  составляет

$$d\Phi = d\Phi_{sx}.$$

Определим величину элементарного потока рассеяния:

$$\frac{d\Phi_{sx}}{dx} = U_{mx} \times g_s,$$

где  $g_s$  – магнитная проводимость потока рассеяния между сердечником и корпусом.

Поскольку

$$d\Phi_x = d\Phi_{sx}, \text{ то}$$

$$\frac{d\Phi_x}{dx} = U_{ms} \times g_s \quad (1)$$

$$\frac{dU_{mx}}{dx} = -(q - \Phi_x \times dx) \quad (2)$$

Следовательно, уравнения 1 и 2 являются исходными для расчета магнитной цепи.

Дифференцируя полученные выражения

$$\begin{aligned}\frac{d^2\Phi_x}{dx^2} &= g_x \times \frac{dU_{mx}}{dx}, \\ \frac{d^2U_{mx}}{dx^2} &= r_x \times \frac{d\Phi_x}{dx}, \\ \frac{d^2U_{mx}}{dx^2} - U_{ms} \times g_s \times r_{mx} &= 0,\end{aligned}$$

Поскольку

$$\begin{aligned}\frac{d\Phi_x}{dx} &= U_{ms} \times g_s, \\ \frac{d^2\Phi_x}{dx^2} - g_s [-(q - \Phi_x \times r_{mx})] &= \frac{d^2\Phi_x}{dx^2} + q \times g_s - \Phi_x \times r_x \times g_s;\end{aligned}$$

в результате имеем

$$\frac{d^2\Phi_x}{dx^2} - \Phi_x \times r_{mx} \times g_s + q \times g_s = 0.$$

Это уравнение является общим дифференциальным уравнением магнитной цепи, которое определяет собой закон изменения величины магнитного потока по длине магнитопровода. Трудность решения данного уравнения заключается в том, что в общем случае магнитное сопротивление  $r_{mx}$  представляет собой сложную нелинейную функцию потока  $\Phi_x$ .

В связи с указанным выше данный расчет магнитной цепи осуществляется аналитическим методом как для внутренней, так и наружной МАО путем определения полной магнитодвижущей силы (м.д.с.).

Закон полного тока для практического расчета магнитных цепей выражается следующей зависимостью:

$$F_0 = \mathring{a} H_k \mathcal{A}_k,$$

где  $F_0$  – полная магнитодвижущая сила (м.д.с.);

$H_k \mathcal{A}_k$  – падение м.д.с. на данном участке магнитопровода.

Для определения величины  $F_0$ , необходимой для преодоления сопротивления магнитной цепи и создания в рабочих зазорах заданной магнитной индукции, табличные значения напряженности, определяемые согласно кривых намагничивания материала рассматриваемого участка цепи, умножаются на длину соответствующего участка.

Согласно указанного выше положения, в первом случае:

$$F_0 = 2H_1 \mathcal{A}_{1-2} + 2H_2 \mathcal{A}_{2-3} + 2H_3 \mathcal{A}_{3-4} + 2H_4 \mathcal{A}_{4-5} + H_5 \mathcal{A}_{5-6} + H_{10} \mathcal{A}_{10-1}$$

во втором:

$$F_0 = 3H_1 \mathcal{X}_{1-2} + 3H_2 \mathcal{X}_{2-3} + 2H_3 \mathcal{X}_{3-4} + 2H_4 \mathcal{X}_{4-5} + 2H_5 \mathcal{X}_{5-6} + 2H_6 \mathcal{X}_{6-7} + 2H_7 \mathcal{X}_{7-8} + 2H_{10} \mathcal{X}_{10-1}$$

Проведенный анализ показывает, что при MAO внутренних поверхностей магнитная цепь обладает большей протяженностью, чем при наружной. Следовательно, если не обеспечить снижение магнитного сопротивления, то для создания в цепи магнитной индукции заданной величины потребуется резкое повышение м.д.с. Также требуется максимально уменьшить магнитные потоки рассеивания. Необходимым условием обеспечения эффективности оборудования MAO внутренних поверхностей является минимизация расстояния между ЭМС и рабочей зоной. Основное допущение при расчете магнитной цепи заключается в том, что пренебрегают потоками выпучивания, поскольку они значительно меньше потоков, проходящих через рабочий зазор. На основании этого расчета была разработана ЭМС для MAO внутренних поверхностей.

В качестве деталей, которые используются для MAO внутренних поверхностей, служат втулки, гильзы, кольца как цилиндрические, так и конические и фасонной формы. Материал – конструкционные и легированные стали, а также цветные сплавы. Магнитно-абразивная обработка внутренних поверхностей в машиностроении представляет более сложную задачу, чем наружных, что вызвано целым рядом причин. Недостаточность опыта эксплуатации оборудования для MAO внутренних поверхностей требует исследования расчета электромагнитных систем и основной задачей процесса является создание работоспособной схемы обработки. В настоящее время практическое значение имеют следующие способы реализации энергии магнитного поля, которые можно классифицировать таким образом:

- использование бегущего магнитного поля;
- индукторы на постоянных магнитах;
- применение ЭМС с постоянными и импульсными магнитными полями, образованными электромагнитными индукторами.

Вместе с тем существует ряд особенностей, обусловленных спецификой каждого способа и их конструктивным оформлением. Поэтому для полноты оценки недостаточно приведенных выше характеристик. В настоящей работе предложены новые размерные критерии, позволяющие более объективно оценить эффективность процесса MAO внутренних поверхностей. Они позволяют методом сравнения двух или более способов прогнозировать целесообразность их применения и выбрать оптимальные.

Для осуществления этого положения можно использовать следующие показатели.

1. Критерий размерности обрабатываемого отверстия

$$a_1 = \frac{Lt}{DS_{н.н.}} (\text{мм}^{-1})$$

где  $L$  – длина обрабатываемого отверстия, мм;  $t$  – толщина стенки, мм;  $D$  – диаметр, мм;  $S_{н.н.}$  – площадь рабочей поверхности полюсных наконечников, мм<sup>2</sup>.

2. Критерий эффективности магнитной системы

$$a_2 = \frac{BV_{\text{рез}}}{dV_{н.н.}} (\text{Тл/мм}),$$

где  $B$  – величина магнитной индукции, Т;  $\delta$  – величина рабочего зазора, мм;  $V_{\text{рез}}$  – скорость вращения обрабатываемого изделия, м/с;  $V_{н.н.}$  – скорость перемещения полюсных наконечников, м/с.

3. Комплексный критерий  $\eta$  характеризует оптимальность магнитно-абразивного оборудования

$$h = a_1 a_2 = \frac{LtBV_{\text{рез}}}{DdS_{н.н.}V_{н.н.}} (\text{Тл/мм}^2).$$

4. Критерий относительной стоимости оборудования

$$Z = \frac{\Pi_1}{\Pi_2},$$

где  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  – цена магнитной системы соответственно 1-го и 2-го типов.

Анализ показывает, что наиболее эффективной моделью ЭМС является третий способ реализации энергии магнитного поля, при котором обеспечивается его максимальная величина в рабочих зазорах при уменьшенных габаритах системы. Конструкция ЭМС для MAO внутренних поверхностей определяется замкнутостью магнитопровода, оппозиционным расположением внешних полюсов, размещением внутреннего полюса в обрабатываемом отверстии и синхронным относительным движением или детали, или внутреннего полюса рисунок 2.

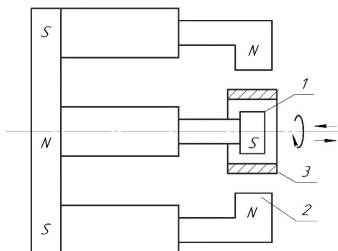


Рисунок 2 – Схема электромагнитной системы магнитно-абразивной обработки внутренних поверхностей: 1 – внутренний полюсной наконечник; 2 – внешние полюсные наконечники; 3 – обрабатываемая деталь; N, S – полюса электромагнитной системы

Основой конструкции служит тороидальный соленоид, который, согласно положениям теории электромагнетизма, обеспечивает минимальные магнитные потери. В результате проведенных исследований, расчета и проектирования разработана и создана ЭМС для МАО внутренних поверхностей, а на ее основе установка для реализации этого процесса, при воздействии которого на обрабатываемую поверхность ее шероховатость уменьшается с  $Ra_1 = 1,6-2$  до  $Ra_2 = 0,1-0,2$  мкм согласно ГОСТ 2789-73.

#### **Список использованных источников**

1. Барон, Ю.М. Технология абразивной обработки в магнитном поле / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1975. – 128 с.

2. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын [и др.]; под общ. ред. П.И. Ящерицына. – Мн.: Физико-технический ин-т, 1997. – 416 с.

УДК 621.923

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОАБРАЗИВНОГО ПОРОШКА ДЛЯ МАГНТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ АМОРФНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ**

*Студент – Залуцкий М.А., 33 тс, 4 курс, ФТС*

*Научные*

*руководители – Сергеев Л.Е., к.т.н., доцент;*

*Сенчуров Е.В., ст. преподаватель*

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация:** Перспективное направление создания ферроабразивного порошка (ФАП) как однородных и одновременно с высокой степенью магнитных и режущих свойств заключается в использовании аморфных металлических сплавов. Данные сплавы не имеют кристаллического строения, и технология их получения связана со сверхскоростной закалкой из жидкого или газообразного состояния в твердое. Ферроабразивный порошок для магнтно-абразивной обработки (МАО) на основе аморфных металлических сплавов обладает высоким уровнем экологической безопасности и низкой стоимостью в сравнении с Ж15КТ.

**Ключевые слова:** магнтно-абразивная обработка, ферроабразивный порошок, аморфный металлический сплав, шероховатость поверхности.