

Магнитно-абразивная обработка конических поверхностей деталей машин

Л.М. Акулович, д.т.н., профессор, Л.Е. Сергеев, к.т.н., доцент, В.Е. Бабич, к.т.н., Е.В. Сенчуров, ассистент кафедры «Технология металлов», В.В.Падаляк, аспирант.

(Белорусский государственный аграрный технический университет)

Приведены результаты математического моделирования, теоретического и экспериментального исследования процесса МАО конических поверхностей; определены параметры полюсных наконечников; установлены режимы их обработки, которые обеспечивают шероховатость поверхности по параметру $Ra - 0,12$ мкм, величину размерного съема 20 мкм.

Детали с коническими поверхностями широко применяются в машинах и механизмах, работающих в различных отраслях народного хозяйства. К ним относятся пальцы шаровых опор и рулевого управления автомобилей, пробки кранов сантехнической арматуры, инструментальные оправки, шпиндели станков, центры для металлорежущего оборудования, дроссельные клапаны гидроаппаратуры и т.п. Обусловлено это тем, что в отличие от цилиндрических, конические поверхности при прочих равных условиях обеспечивают высокую точность фиксации и отсутствие зазоров при работе в паре с сопрягаемой деталью, что снижает динамические нагрузки [1]. Однако изготовление деталей с коническими поверхностями связано с необходимостью достижения степени точности не менее 7-го качества, что требует в технологическом процессе применения дорогостоящего металлорежущего инструмента, специального оборудования и оснастки. Поэтому актуальным является разработка высокоэффективных способов механической обработки конических поверхностей, снижающих себестоимость выпускаемой продукции, что является важным с позиции ее конкурентоспособности.

Одним из перспективных способов финишной обработки является магнитно-абразивная обработка (МАО) [2, 3]. В роли рабочей технологической среды при МАО выступают ферроабразивный порошок (ФАП) и смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС). Абразивная щетка из ФАП в зазоре между обрабатываемой поверхностью и полюсным наконечником электромагнита формируются силами электромагнитного поля (ЭМП), образуемого соленоидом электромагнитной системы (ЭМС).

Поскольку передача магнитного потока в ЭМС осуществляется по магнитопроводу, выполненному из стали, то его магнитная проницаемость резко отличается от магнитной проницаемости воздушного зазора, в котором помещается порция ФАП. Ввиду того, что магнитный поток стремится двигаться по наиболее энергетически выгодному пути, то при обработке конической поверхности, находящейся в вышеуказанном зазоре возникает разница в плотности магнитного потока по ее длине. Данная разница важна при выборе тех или иных конструктивных решений, связанных с пространственной геометрией как самой детали, так и формы зазора, что уже при современных условиях обработки не может базироваться на интуитивном подходе, обусловленной высокой квалификацией исполнителя. Инвариантность решения такой задачи заключается в топографии магнитного поля при МАО, т.е. в обеспечении геометрических параметров полюсных наконечников и конфигурации обработанной поверхности. Интуитивно предсказать степень изменения плотности магнитного потока в различных точках зазора невозможно, а определение ее экспериментально, путем изменения геометрических параметров по всей области поля, весьма трудоемко. Поэтому применение математического моделирования обладает преимуществами, которые позволяют произвести оценку с допустимой погрешностью, а также возможность корректирования процесса решения задачи. Тождественность математического описания этого физического процесса выдвигает ряд проблем, связанные с отбором его наиболее важных закономерностей и оценкой погрешности, неизбежной при пренебрежении тех или иных сторон данного процесса.

Технологическая проблема МАО конических поверхностей заключается в обеспечении одинакового значения магнитной индукции B на всех участках конуса детали. Формообразование полюсных наконечников связано с созданием такой их формы, которая эквидистантно копирует конфигурацию детали. Поскольку конусность деталей варьируется в широких пределах, то и растет количество полюсных наконечников как технологической оснастки. Поэтому математическое моделирование процесса МАО конических поверхностей приводит к возможности снижения номенклатуры технологической оснастки.

На рис. 1 представлена расчетная схема определения электромагнитного поля на конических элементах ступеней деталей машин при следующих допущениях:

- отсутствие учёта радиальной и осевой составляющих тока, поскольку первая имеет слишком маленькое значение в сравнении с тангенциальной, а вторая не создает аксиальной составляющей магнитной индукции в рабочей зоне;
- зависимость магнитной проницаемости от напряженности ЭМП производится при использовании эквивалентных магнитных проницаемостей при наложении полей по оси y и при пересечении их по оси z ;
- геометрия детали представляется в виде полосы с равномерно распределенным током, поскольку поверхность полосы является координатной.

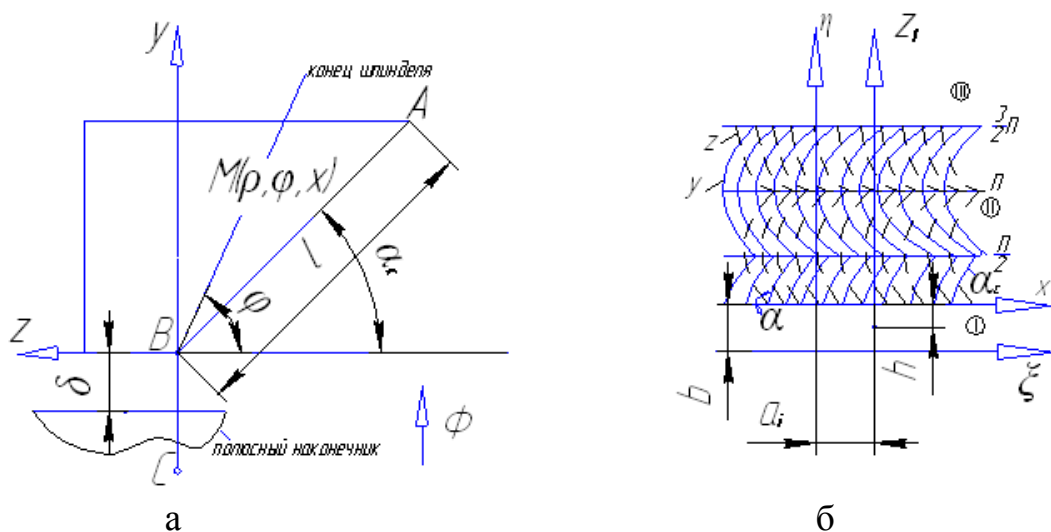


Рис.1. Схема определения в конической части детали: а - графическое изображение; б- после преобразования в полосу.

Рассмотрим распределение магнитного потока, проходящего через рабочую зону, в перпендикулярном и осевом направлениях. Вдоль пути аксиального потока магнитная проницаемость имеет значение μ_z , а вдоль материала детали — значение μ_y . С целью проведения анализа преобразуем угол ABC (рис. 1 а) в полосу (рис 1 б.) с помощью соотношений $\rho = R_1 \alpha^\xi$; $\varphi = \alpha \eta$, где R_1 – радиус детали, ρ , φ — полярные координаты; ξ , η — соответствующие им прямоугольные координаты. Из рис. 1, б следует, что оси y , z не совпадают с геометрическими осями (ξ , η), образуя переменный по глубине материала ФАП угол $\alpha = f(\xi, \eta)$, который в данном случае равен $\alpha = a\eta$.

Для определения электромагнитного поля в полосе (рис. 1, б) необходимо выразить μ_η и μ_ξ в функции известных величин μ_y , μ_z и α . Поскольку осуществляется обработка деталей с анизотропными свойствами, также как и ФАП – это приводит к несовпадению направления магнитного потока с осями анизотропии, что требует введения взаимной проницаемости $\mu_{\eta\xi}$ и собственных проницаемостей $\mu_{\eta\eta}$, $\mu_{\xi\xi}$:

$$\left. \begin{aligned} \mu_{\eta\eta} &= \mu_y \cos^2 \alpha + \mu_z \sin^2 \alpha \\ \mu_{\xi\xi} &= \mu_y \sin^2 \alpha + \mu_z \cos^2 \alpha \\ \mu_{\eta\xi} &= \mu_{\xi\eta} = (\mu_y - \mu_z) \cos \alpha \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Таким образом, имея представление об изменениях магнитной проницаемости материала ФАП, находящегося в рабочем зазоре между полюсным наконечником и деталью можно осуществить процесс прогнозирования и управления методом МАО конических поверхностей, обладающих определенным диапазоном значений угла α_c .

Взаимная магнитная проницаемость и переменный по глубине материала угол между выбранными геометрическими осями оказывают кооперативное воздействие и влияют на угол конусной части детали, основным условием которого имеет место равенство $\mu_\eta = \mu_\xi$. Например, при $\alpha_c = 45^\circ$ магнитные проницаемости $\mu_{\eta\eta}$ и $\mu_{\xi\xi}$ равны между собой, однако взаимная магнитная проницаемость $\mu_{\eta\xi}$ вносит коррекцию в это равенство и изменяет значение

данного угла, при котором имеет место это равенство. Для того чтобы выбрать угол α_c при котором $\mu_\eta = \mu_\xi$, необходимо предварительно определить значение длины конусной части детали, поскольку возникает изменение, во - первых градиента магнитной индукции по данной конусности ступени детали, во - вторых, магнитной проницаемости по оси ξ , (рис. 2). При увеличении длины конусной ступени μ_ξ растёт в большей степени, чем μ_η , поэтому результирующий вектор H отклоняется от оси η и располагается под определенным углом к этой конической ступени детали. Согласно рис 2 видно, что рост длины конической ступени детали сопровождается необходимостью использовать меньший угол для удовлетворения равенству $\mu_\eta = \mu_\xi$. При падении размера длины конической ступени угол α_c должен быть в противоположность предшествующему выбору увеличен.

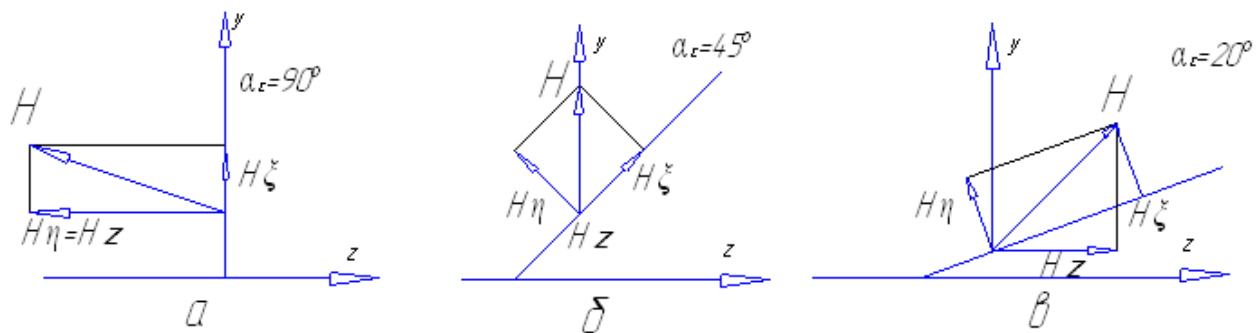


Рис.2. Определение геометрии конической ступени детали при различных углах конуса

Согласно[4], на основании принципа эквивалентности следует перейти к магнитно - динамическому решению уравнения:

$$j = \text{rot} \{ \hat{\mu}^{-1} \text{rot} A \} , \quad (2)$$

где: j – плотность тока, A/m^2 ; A – векторный потенциал, $A \cdot m$; $\hat{\mu}^{-1} = \begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{vmatrix}$

- матрица, обратная матрице типа $\begin{vmatrix} \mu_{\rho\rho} & \mu_{\rho\phi} \\ \mu_{\phi\rho} & \mu_{\phi\phi} \end{vmatrix}$, т.к. при используемом преобразовании координат ρ переходит в ξ , а ϕ в η .

При введении цилиндрических координат ρ, ϕ, x , при которых поверхности

цилиндрической и конической ступеней детали становятся координатными и в этом случае коэффициенты обратной матрицы равны:

$$\left. \begin{aligned} M_{11} &= \frac{\mu_y \cos^2 \alpha + \mu_z \sin^2 \alpha}{\mu_y \mu_z} \\ M_{22} &= \frac{\mu_y \sin^2 \alpha + \mu_z \cos^2 \alpha}{\mu_y \mu_z} \\ M_{33} &= \frac{(\mu_y - \mu_z) \sin \alpha \cos \alpha}{\mu_y \mu_z} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Выполнив ряд вычислений, можно получить составляющие напряженности магнитного поля:

$$\begin{aligned} H_z &= -H_{z1} \sin \alpha_c + H_{x1} \cos \alpha_c \\ H_y &= H_{z1} \cos \alpha_c + H_{x1} \sin \alpha_c \end{aligned} \quad (4)$$

Виду того, что при заданном значениях тока и соблюдении условий непрерывности магнитного поля на границах раздела сред

$$\begin{aligned} H_{x1} &= -\frac{j}{2\pi} \frac{2\mu_\xi}{\mu_\xi + 1} \frac{1}{\mu_\xi} \frac{z_1 + h}{[x_1^2 + (z_1 + h)^2]} \\ H_{z1} &= \frac{j}{2\pi} \frac{2\mu_\xi}{\mu_\xi + 1} \frac{1}{\mu_\xi} \frac{z_1 + h}{[x_1^2 + (z_1 + h)^2]} \end{aligned},$$

$$\text{где } x_1 = \frac{1}{a} \ln \frac{\rho}{R_1} - a_i; \quad z_1 = \frac{\varphi}{a'} - b; \quad a' = a \sqrt{\frac{\mu_\eta}{\mu_\xi}}.$$

В результате математического моделирования топографии магнитного поля и численных расчетов на основе проведенных исследований получены зависимости напряженности данного поля от конусности рабочего зазора и величины магнитной индукции магнитного поля. Измерение магнитной индукции производилось на тесламетре Т-3 и представлены в таблице. 1.

Были проведены экспериментальные исследования двух способов финишной обработки шпинделей 30 ГОСТ 836 – 72 с конусностью 7:24 по ГОСТ 15945 – 82 (рис.3), 50...54 HRC₃, с технологическими требованиями для станков класса точности В, с шероховатостью Ra=0,16 мкм.:1)шлифование,

2)МАО. Шлифование проводили на круглошлифовальном станке модели 3131. Режимы шлифования: скорость шлифовального круга $v_k=25$ м/с; величина подачи шлифовальной бабки $S_{пр}=0,04$ мм; величина поперечной подачи $S_n=0,01$ мм; число оборотов детали $n_d=400$ об/мин. Инструмент – круг абразивный $D \times d \times h=256 \times 76 \times 20$ мм, электрокорунд ГОСТ 2424 – 84.

Таблица 1. Рекомендуемые формы полюсных наконечников для МАО конических поверхностей.

Диапазон диаметров обрабатываемых деталей, мм (большой диаметр конуса)	Размер обрабатываемой поверхности, мм	Форма полюсного наконечника	Отклонения величины магнитной индукции при увеличении длины конусной части детали, % *	
			теоретическое	экспериментальное
Конус 10-25 (15,87-25,4)	$L=21,8-39,8$	Цилиндрическая, эквидистантная зазору	6-9	7-10
Конус 30-40 (31,75-44,45)	$L=49,2-65,6$	Коническая с углом 8°	12-16	10-15
Конус 45-55 (57,15-88,9)	$L=84,8-131,6$	Коническая с углом 8°	18-24	15-20

*Примечание величина зазора $\delta=0,8$ мм на большем диаметре конуса

МАО проводилась на станке СФТ 2.150 00 00 000. Параметры и режимы МАО: магнитная индукция $B=1$ Тл; скорость резания $V_p=2,5$ м/с; скорость осцилляции $V_0=0,2$ м/с; амплитуда осцилляции $A=1$ мм; коэффициент заполнения зазора $k_z=1$; величина рабочего зазора $\delta=1$ мм; время обработки $t=60$ с. ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81, зернистость порошка $\Delta=100/160$ мкм; СОТС СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5%-ный водный раствор. Исходная шероховатость поверхности $Ra_1=0,8-1,2$ мкм. Шероховатость поверхности до и после МАО измеряли на профилографе-профилометре 252 – Калибр. Проверку точности конических базирующих поверхностей шпинделей производили контрольным калибром – втулка 30 АТ6 ГОСТ 20305 – 80, степень точности 6 на длине конуса 50 мм. Припасовка конических поверхностей шпинделей и втулки 30 АТ6 ГОСТ 20305 – 80 производилась путем нанесения типографской краской №2513 – 26 при условии разведения ее машинным маслом. Толщина краски контролировалась визуально по образцу интенсивности окраски

согласно ГОСТ 2848 – 75. Прилегание конусных поверхностей калибра и детали по ГОСТ 20305 – 80 составило 95% при контакте по малому диаметру, а толщина слоя краски – 4 мкм.



Рис.3. Вид конической поверхности шпинделя

В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что разница величин магнитной индукции на малом и большом диаметрах концов шпинделей 30 ГОСТ 836 – 72 с конусностью 7:24 по ГОСТ 15945 – 82 составляет не менее 15%, что позволяет произвести качественную обработку поверхности концов шпинделей. Результаты обработки конической поверхности шпинделей представлены в таблице. 2.

Таблица 2. Сравнительные показатели обработки поверхностей при шлифовании и МАО.

Вид обработки	Величина размерного съема, мкм	Шероховатость после обработки, Ra ₂ , мкм	Прилегание конусных поверхностей, %
Шлифование	120-180	0,4	90
МАО	20-40	0,12	95

Вывод: Таким образом, исходя из полученных результатов теоретического и экспериментального исследования процесса МАО, установлена возможность ее эффективного использования для финишной обработки конических поверхностей деталей машин.

Список литературы:

1. Горохов В.А. Технология обработки металлов. Мн.: Беларуская навука, 2000, С. 438.
2. Скворчевский Н.Я., Федорович Э.Н., Ящерицын П.И. Эффективность магнитно-абразивной обработки. Мн.: Навука і тэхніка, 1991, С. 216.
3. Kodacsy Janos. Apparatus for cleaning debarring and polishing parts in magnetic field // Proc. of 7-th international conference on debarring and surface finishing. Berkeley USA, 2004, P. 375-378.
4. Брынский Е.А., Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Электромагнитные поля в электрических машинах. Л.: Энергия, 1979, С.176.

Аннотация

Магнитно-абразивная обработка конических поверхностей деталей машин

Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, В.Е. Бабич, Е.В. Сенчуров, В.В. Падаляк

Приведены результаты математического моделирования, теоретического и экспериментального исследования процесса МАО конических поверхностей; определены параметры полюсных наконечников; установлены режимы их обработки, которые обеспечивают шероховатость поверхности по параметру R_a – 0,12 мкм, величину размерного съема 20 мкм.

Abstract

Magnetic-abrasive machining of conical surfaces of machine parts

L.M Akulovich, L.E Sergeev, V.E. Babich, E.V. Senchurov, V.V. Padalyak

The results of mathematical modeling, theoretical and experimental investigation of MAM conical surfaces; defined by the parameters of pole pieces; established modes of treatment, which provide a surface roughness 0,12 microns, the size of 20 microns size pickup.