

УДК 621.923

*Л. М. АКУЛОВИЧ, Л. Е. СЕРГЕЕВ, В. В. ШАБУНЯ***ФИНИШНАЯ ОБРАБОТКА КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ПЛАФОНОВ СВЕТИЛЬНИКОВ***Белорусский государственный аграрный технический университет**(Поступила в редакцию 12.07.2014)*

Детали с коническими наружными и внутренними поверхностями широко применяются в машино-, приборостроении и в других отраслях техники. К ним относятся пальцы шаровых опор и рулевого управления автомобилей, инструментальные оправки, шпиндели станков, центры для металлорежущего оборудования, дроссельные клапаны гидроаппаратуры, плафоны светильников и т. д. Из указанной номенклатуры деталей специфичными являются плафоны светильников, к поверхностям которых помимо таких показателей качества, как шероховатость поверхности, предъявляются требования высокой светоотражательной способности. Плафоны функционально должны гарантировать высокий коэффициент отражения падающего светового потока. Параметры качества поверхностного слоя являются определяющим фактором при формировании требуемых эксплуатационных свойств изделий на стадии их изготовления.

Перспективный способ финишной обработки, обеспечивающий высокое качество поверхности, – магнитно-абразивная обработка (МАО) [1, 2]. Контур режущего инструмента (ферроабразивная щетка) в зазоре между обрабатываемой поверхностью и полюсным наконечником электромагнита формируется из ферроабразивного порошка (ФАП) силами электромагнитного поля (ЭМП), образуемого соленоидами электромагнитной системы (ЭМС). Рабочую технологическую среду образуют магнитная индукция B , ФАП и смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС).

Известно [3], что плотность магнитного потока определяется величиной магнитной индукции и площадью поперечного сечения поверхности, через которую проходят магнитные силовые линии. Технологическая проблема МАО конической поверхности плафонов заключается в том, что на участках с меньшим диаметром при применении обычной для цилиндрических поверхностей схемы обработки будет меньшая величина градиента плотности магнитного потока, которая является силовой характеристикой процесса МАО. Плотность магнитного потока зависит также и от магнитной проницаемости материала ФАП, находящегося в рабочем зазоре между полюсным наконечником и деталью. Управлять градиентом магнитной индукции можно изменением профиля (профилированием) поверхности полюсных наконечников, что позволяет легко адаптировать ЭМС к конкретным размерам и форме обработки внешних поверхностей. Полюсные наконечники являются сменными, однако увеличение их количества как технологической оснастки приводит к повышению себестоимости выпускаемой продукции.

Поэтому для снижения номенклатуры технологической оснастки должен быть создан универсальный тип полюсного наконечника для обработки нескольких видов поверхностей. При этом необходимо учитывать давление ФАП в процессе обработки деталей, величина которого варьируется в определенных пределах для обеспечения требуемых выходных показателей по производительности обработки и качеству поверхности. Следовательно, если выявить эти пределы для МАО деталей с коническими поверхностями, то можно уменьшить номенклатуру необходимой технологической оснастки за счет использования полюсных наконечников с определенной конусностью для обработки методом МАО некоторой группы деталей. Так, например, целе-

сообразно при небольшой конусности поверхности использовать полюсные наконечники, предназначенные для цилиндрических поверхностей.

Коническая поверхность детали, помещенной в магнитное поле, согласно закону Ампера, окружена кольцевыми токами. На более удаленных от конической поверхности окружностях с кольцевым током величина магнитной индукции уменьшается. Это приводит к снижению давления ФАП на коническую поверхность детали и ухудшению качества обработанной поверхности.

Поскольку давление ФАП, являющееся силовой характеристикой процесса МАО, зависит от величины магнитной индукции, то ее необходимо определить аналитически, а затем рассчитать профиль полюсного наконечника. При МАО конических поверхностей деталей машин (например, шпинделя станка) [4] требуются максимально приближенная эквидистантность профиля полюсного наконечника к конфигурации детали и соответственно более точные методы расчета топографии магнитного поля – типа коллокаций или преобразований Фурье [5]. Для плафонов светильников главным требованием является декоративный вид изделия. Поэтому при МАО плафонов топографию ЭМП и границы профиля полюсного наконечника можно рассчитать с использованием методов, допускающих большую степень погрешности (например, применение степенных рядов с неопределенными коэффициентами, используя функции Бесселя, в которых они затабулированы).

Решение предполагает наличие двумерной задачи при учете влияния осевого и радиального полей. Приближенный расчет распределения плотности тока приведен в [5] при условии, что представлен соленоид бесконечной длины, токовый контур характеризуется сплошностью и не является разделенным, как в реальном масштабе. Подобные условия приводят к тому, что нелинейность распределения тока учитывается только в радиальном направлении. Для проводника малого сечения и зоны небольших геометрических размеров данное представление дает допустимую погрешность. Однако с увеличением размеров этой зоны указанный расчет приведет к значительным погрешностям. Следовательно, обязательным является определение плотности тока в отдельных витках, что позволит учитывать фактор осевого направления напряженности магнитного поля (МП). Исходя из основного уравнения Максвелла

$$rdH = \delta$$

(H – напряженность МП, А/м) и используя цилиндрическую систему координат, можно получить дифференциальное уравнение для плотности тока в отдельном витке:

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \delta}{\partial r} - \left(\mathbf{jk}^2 + \frac{1}{r^2} \right) \delta = -\frac{\partial^2 \delta}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где δ – плотность тока, А/м², \mathbf{j} и \mathbf{k} – единичные векторы декартовой системы координат.

Напряженность МП можно представить в виде уравнения $H = \mathbf{i}H_x + \mathbf{j}H_y + \mathbf{k}H_z$, в котором необходимо учитывать знак, отражающий приращение или уменьшение функции на элементарных площадках. Выбор цилиндрической системы координат обусловлен тем, что из-за наличия симметрии плотность тока имеет только тангенциальную, а напряженность МП – осевую и радиальную составляющие:

$$H_r = \frac{1}{\mathbf{jk}^2} \frac{\partial \delta}{\partial z}, \quad (2)$$

$$-H_z = \frac{1}{\mathbf{jk}^2} \left[\frac{\partial \delta}{\partial z} + \frac{1}{\gamma} \delta \right], \quad (3)$$

где γ – удельная электрическая проводимость. При учете $\text{div}H = 0$ можно получить дифференциальные уравнения для обеих составляющих напряженности МП.

Исходя из предположения, что плотность тока распределена в осевом направлении симметрично относительно оси витка с током, можно получить решение в форме произведения:

$$\delta = f(r) \cos mz . \quad (4)$$

Если подставить уравнение (4) в дифференциальное уравнение (1) и обозначить

$$a^2 = \mathbf{jk}^2 + m^2 , \quad (5)$$

то получим дифференциальное уравнение Бесселя

$$\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df}{dz} - \left(a^2 + \frac{1}{r^2} \right) f = 0, \quad (6)$$

которое в рассматриваемой области имеет конечное решение

$$f = A' I_1(jar) + B' Y_1(jar), \quad (7)$$

где $I_1(jar)$ и $Y_1(jar)$ – функции Бесселя мнимого аргумента, A', B' – постоянные интегрирования.

Разделительная постоянная m может иметь любое значение, которое будет определено из решения краевой задачи. С учетом уравнения (4) плотность тока будет иметь следующий вид:

$$\delta = \sum_n \left[A'_n I_1(jar) + B'_n Y_1(jar) \right] \cos mz . \quad (8)$$

Напряженности МП в осевом направлении получаем из уравнений (3), (8):

$$H_z = -\frac{a}{k^2} \sum_n \left[A'_n I_0(jar) + B'_n Y_0(jar) \right] \cos mz. \quad (9)$$

Аналогично для радиальной составляющей

$$H_r = -\frac{m}{jk^2} \sum_n \left[A'_n I_1(jar) + B'_n Y_1(jar) \right] \sin mz . \quad (10)$$

Для определения постоянных интегрирования A'_n и B'_n необходимо решить краевую задачу, в которой предполагаем, что осевая составляющая МП H_z , соответствующая участкам r_p и r_{p+1} рассматриваемого p -го уровня, постоянна по высоте витка. Осевая составляющая напряженности МП линейно уменьшается в направлении поверхности (рис. 1), где ее с достаточной степенью точности можно принять равной 0.

Для p -го значения напряженности МП осевая составляющая будет иметь следующее выражение:

на участке r_p

$$H_z(r = r_p) = H_0 \frac{g - p + 1}{g},$$

на участке r_{p+1}

$$H_z(r = r_{p+1}) = H_0 \frac{g - p}{g},$$

где g – число слоев.

Тогда для конической поверхности в слое от r_p до r_{p+1} из уравнения (9) следует

$$H_0 \frac{g - p + 1}{g} = \frac{4}{\pi k^2} \sum_n \left[A'_n I_0(jar_p) + B'_n Y_0(jar_p) \right] a \cos mz, \quad (11)$$

$$H_0 \frac{g - p}{g} = \frac{4}{\pi k^2} \sum_n \left[A'_n I_0(jar_{p+1}) + B'_n Y_0(jar_{p+1}) \right] a \cos mz \quad (12)$$

Рис. 1. Распределение напряженности МП в зоне обработки конических поверхностей плафонов светильников

при условии, что $A'_n = \frac{4}{\pi} A_n$, $B'_n = \frac{4}{\pi} B_n$.

Выразим напряженность МП в осевом направлении по всей высоте витка $-\frac{t}{2} < z < +\frac{t}{2}$ путем сопоставления левых частей уравнений (11) и (12):

$$H_0 \frac{g-p_1+1}{g} = \frac{4}{\pi} H_0 \frac{g-p+1}{g} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{j^{n-1}}{n} \cos \frac{n\pi}{t} z, \quad (13)$$

$$H_0 \frac{g-p}{g} = \frac{4}{\pi} H_0 \frac{g-p}{p} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{j^{n-1}}{n} \cos \frac{n\pi}{t} z, \quad (14)$$

Сопоставив правую и левую части уравнений (13) и (14), получим

$$m = \frac{n\pi}{t},$$

а для постоянных A_n и B_n будем иметь

$$A_n = \frac{k^2 H_0 (g-p+1) (g-p+1) Y_0(ja_n r_{p+1}) - (g-p) Y_0(ja_n r_p)}{ga_n I_0(ja_n r_p) Y_0(ja_n r_{p+1}) - I_0(ja_n r_{p+1}) Y_0(ja_n r_p)}, \quad (15)$$

$$B_n = \frac{k^2 n H_0 (g-p) I_0(ja_n r_p) - (g-p+1) I_0(ja_n r_{p+1})}{ga_n I_0(ja_n r_p) Y_0(ja_n r_{p+1}) - I_0(ja_n r_{p+1}) Y_0(ja_n r_p)}, \quad (16)$$

где a_n – комплексная постоянная, которая из уравнения (5) равна

$$a_n^2 = \mathbf{jk}^2 + \left(\frac{n\pi}{t} \right)^2.$$

Для больших величин аргумента можно использовать приближенные значения функций Бесселя:

$$I_0(jx) \approx \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}},$$

$$I_1(jx) \approx j \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}},$$

$$Y_0(jx) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2x}} e^{-x},$$

$$Y_1(jx) \approx -j \sqrt{\frac{\pi}{2x}} e^{-x}.$$

Используя данные соотношения в уравнениях (15), (16) и (8), получаем уравнение плотности тока в виде

$$\delta = \frac{4k^2 H_0}{\pi g} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{j^n}{na_n} \left[\frac{(g-p+1) \text{cha}_n(r_{p+1}-r)}{\text{sha}_n v} \sqrt{\frac{r_p}{r}} - \frac{(g-p) \text{cha}_n(r_p-r)}{\text{sha}_n v} \sqrt{\frac{r_{p+1}}{r}} \right] \cos \frac{n\pi}{t} z. \quad (17)$$

Аналогично получим уравнения для осевой и радиальной составляющих напряженности МП:

$$H_z = \frac{4H_0}{gt} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{j^n}{n} \left[\frac{(g-p+1) \text{cha}_n(r_{p+1}-r)}{\text{sha}_n v} \sqrt{\frac{r_p}{r}} - \frac{(g-p) \text{cha}_n(r_p-r)}{\text{sha}_n v} \sqrt{\frac{r_{p+1}}{r}} \right] \cos \frac{n\pi}{t} z, \quad (18)$$

$$H_r = \frac{4H_0}{gt} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left[\frac{(g-p+1) \text{cha}_n(r_{p+1}-r)}{\text{sha}_n r} \sqrt{\frac{r_p}{r}} - \frac{(g-p) \text{cha}_n(r_p-r)}{\text{sha}_n v} \sqrt{\frac{r_{p+1}}{r}} \right] \sin \frac{n\pi}{t} z. \quad (19)$$

По уравнениям (18), (19) можно представить численные расчеты напряженности МП для конусной формы рабочего зазора.

Для экспериментального подтверждения достоверности полученных результатов расчета проведены исследования МАО поверхности плафонов (материал Л63 ГОСТ 15527–2004). Конусообразность плафонов составляет 1:0,5 (что соответствует углу конуса $\alpha = 45^\circ$). Параметры и режимы МАО следующие: величина магнитной индукции $B = 0,25–1$ Тл; скорость резания $V_{рез} = 0,75–3$ м/с; скорость осцилляции $V_0 = 0,1$ м/с; амплитуда осцилляции $A = 1–5$ мм; величина рабочего зазора $\delta = 1$ мм при эквидистантном профиле по отношению к детали; коэффициент заполнения рабочего зазора $K_3 = 1$; размерность частиц ФАП $\Delta = 63/100$ мкм; ФАП – Полимам–Т ТУ 06459–81 и МАП АСМ; СОТС – СинМА-1 ТУ 38.59.01176–91, 3%-ный водный раствор; скорость подачи СОТС $w = 0,55$ м/с; время обработки $t = 120$ с (черновая обработка плафонов производилась ФАП Полимам–Т в течение 60 с, чистовая обработка плафона – МАП АСМ также в течение 60 с).

Величину светоотражательной способности определяли блескомером БФ5-20/20 по ГОСТ 896–69. Углы конусов плафонов и профилированных полюсных наконечников определяли синусной линейкой ГОСТ 4046–80. Изменение величины магнитной индукции измерялось тесламетром Т-3.

Конфигурация плафона (полый усеченный конус) позволяет использовать три варианта схемы рабочей зоны для его обработки. Они связаны с профилированием полюсных наконечников, в первом варианте угол данного профиля $\alpha = 15^\circ$, во втором варианте $\alpha = 30^\circ$, в третьем варианте $\alpha = 45^\circ$.

Результаты исследований представлены на рис. 2. При их анализе, установлено, что при использовании профилированного полюсного наконечника с углом конуса 15° обработка происходит не по всей площади поверхности конуса плафона. Часть ФАП концентрируется и уплотняется в зоне с меньшей величиной рабочего зазора, чему способствует увеличение скорости резания и амплитуды осцилляции. Измерения магнитной индукции показывают, что уменьшение величины B приводит к снижению качества обработки при применении данного варианта схемы.

При использовании второго варианта схемы ($\alpha = 30^\circ$) разница величины рабочего зазора по краям полюсного наконечника составляет от 3 до 5 мм, в результате достигается равномерность обработки по всей поверхности плафона и светоотражательная способность составляет 65–70%.

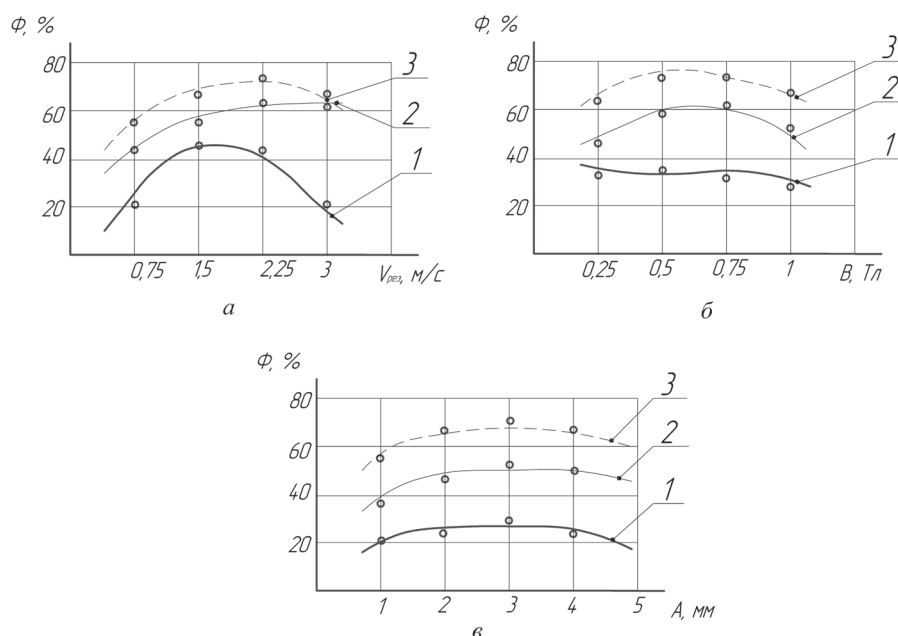


Рис. 2. Зависимость показателя светоотражательной способности Φ плафонов от скорости резания $V_{рез}$ (а), величины магнитной индукции B (б), амплитуды осцилляции A (в) при различных значениях угла профилирования полюсных наконечников: 1, 2, 3 – $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ соответственно

Однако при увеличении скорости резания и магнитной индукции возрастает и значение давления ферроабразивной щетки в области с меньшим показателем величины рабочего зазора. Это приводит к снижению подвижности частиц ФАП и светоотражательной способности на данных участках в среднем на 20%.

Процесс обработки методом МАО плафонов при профилировании полюсных наконечников по третьему варианту ($\alpha = 45^\circ$) производится на требуемом качественном уровне, но при обязательном условии использования «мягких» режимов.

По результатам теоретического и экспериментального исследований определена эффективность использования процесса МАО для финишной обработки конических поверхностей плафонов светильников. Установлены режимы МАО поверхности плафонов ($V_{\text{рез}} = 2,25$ м/с, $B = 0,75$ Тл, $A = 3$ мм), при которых светоотражательная способность составляет 75–80%.

Литература

1. Сковорчевский Н. Я., Федорович Э. Н., Ящерицын П. И. Эффективность магнитно-абразивной обработки. Мн., 1991.
2. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущего инструмента. Л., 1986.
3. Евдокимов Ф. Е. Теоретические основы электротехники. М., 2004.
4. Акулович, Л. М. и др // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. 2012. Вып. 122. С. 204–212.
5. Ламмеранер И, Штафль М. Вихревые токи. М.; Л., 1967.

L. M. AKULOVICH, L. E. SERGEEV, V. V SHABUNIA

FINISHING OF CONICAL SURFACE OF LAMPSHADES

Summary

A variant of the gradient calculation of the magnetic induction at magnetic abrasive machining of taper lampshades and manner of its exercise, by changing profiles (profiling) of the surface of the pole pieces. The optimal regimes of magnetic abrasive machining, which provide high light reflectivity of surfaces of lampshades, are determined.