

УДК 621.923

Л. М. АКУЛОВИЧ, Л. Е. СЕРГЕЕВ, В. Е. БАБИЧ, Е. В. СЕНЧУРОВ, В. В. ШАБУНЯ

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАФОНОВ*Белорусский государственный аграрный технический университет**(Поступила в редакцию 13.03.2013)*

Плафон – основная часть светильника, выполняющая функции распределения, отражения и направления света. Материалы для изготовления подобных технических изделий – хрусталь, фарфор, пластик, стекло, цветные металлы и реже натуральный камень [1]. Из цветных металлов часто используют бронзу и латунь. Бронза хорошо поддается обработке, но стоимость ее выше, чем у латуни. Поэтому в настоящее время элементы осветительной аппаратуры в массовом производстве изготавливают из латуни. После качественной финишной обработки латунь по своему внешнему виду вполне сопоставима с бронзой, а в случае нанесения лака на обработанную поверхность визуально неотличима от золота.

Плафоны функционально должны обеспечивать высокий коэффициент отражения падающего светового потока, что накладывает повышенные требования к шероховатости поверхности при ее финишной обработке.

Одним из перспективных способов, обеспечивающих получение поверхности с высоким параметром шероховатости, является магнитно-абразивная обработка (МАО) [2–4]. Суть способа МАО заключается в абразивном воздействии на обрабатываемую поверхность частиц ферроабразивного порошка (ФАП), ориентированных энергией электромагнитного поля, при наличии смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) (рис. 1). Диапазон температур на поверхности детали в процессе обработки составляет 50–70 °С, что обусловлено сингулярностью потоков теплоты, образующейся при срыве материала пористым ФАП. Проблема реализации процесса МАО поверхности плафонов, изготовленных из латуни (например, Л63 ГОСТ 15527–2004), вызвана тонкостенностью обрабатываемых поверхностей (толщина стенки 0,25–1,0 мм). Несмотря на относительно невысокую температуру на обрабатываемой поверхности, градиент температуры в зоне резания имеет максимальное значение, что отрицательно влияет на отражательную способность поверхности плафона. Следовательно, для осуществления МАО поверхности плафонов, изготовленных из латуни, необходимо, во-первых, исследовать термодинамический процесс, связанный с распределением температуры в зоне обработки, во-вторых, управлять температурным режимом обработки, что возможно на основе создания теплофизической модели.

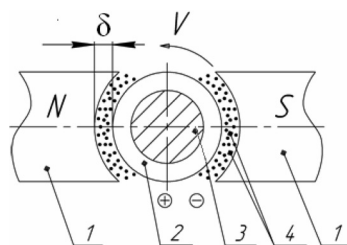


Рис. 1. Схема МАО: 1 – полусферические наконечники; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – ферромагнитная оправка; 4 – ФАП; δ – рабочий зазор; V – скорость вращения заготовки

Известно [5], что тепловой поток от точечного источника образования тепла распространяется как на обрабатываемый материал детали, так и на ФАП.

Температура T на обрабатываемой поверхности определяется по формуле [5]:

$$T - T_0 = \frac{q}{0,5\lambda \left(\frac{\pi}{\alpha t} \right)^{0,5} + \frac{F}{Pt} \rho_d C_d}, \quad (1)$$

где T_0 – начальная температура на поверхности детали, К; q – поток теплоты, возникающий при обработке, Дж; λ – коэффициент тепло-

проводности абразивной среды, Вт/(м·К); α – коэффициент температуропроводности абразивной среды, м²/с; P – периметр сечения детали, м; F – площадь поперечного сечения детали, м²; t – время обработки, с; ρ_d – плотность материала детали, кг/м³; C_d – массовая теплоемкость материала детали, Дж/(кг·К).

Латунь является идеальным проводником теплового потока ($\lambda = 85,5\text{--}111$ Вт/(м·К)) [6], а теплопроводность ФАП составляет $\lambda = 0,25\text{--}0,35$ Вт/(м·К). Так как температура на поверхности детали имеет различные значения в точках всего теплового поля и является функцией координат и времени $T = f(x, y, z, t)$, то необходимо учитывать степень нагрева и охлаждения поверхности детали и ФАП.

Уравнение теплового баланса в данном случае имеет вид [7]

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (2)$$

где Q – количество теплоты, выделяемое при обработке детали в единицу времени, Дж/с; Q_1 – количество теплоты, поглощенное деталью; Q_2 – количество теплоты, поглощенное ФАП за счет теплопроводности; Q_3 – количество теплоты, отведенное путем теплообмена между поверхностью детали и СОТС; Q_4 – количество теплоты, отведенное путем теплообмена между поверхностью ФАП и СОТС.

В уравнении (2)

$$Q_1 = V_d C_d \rho_d dT; \quad (3)$$

$$Q_2 = \rho_a C_a S dt \int_0^\infty \frac{\partial T_a(x, t)}{\partial t} dt; \quad (4)$$

$$Q_3 = SHdt(T - T_{\text{СОТС}}), \quad (5)$$

где V_d – объем детали, м³; S – площадь боковой поверхности детали, м²; ρ_a – плотность ФАП, кг/м³; C_a – массовая теплоемкость ФАП, Дж/(кг·К); T_a – температура ФАП, К; H – коэффициент теплообмена при обтекании потоком СОТС поверхности детали, Вт/(м²·К); $T_{\text{СОТС}}$ – температура СОТС, К.

Для определения теплоты Q_4 , отводимой потоком СОТС от ФАП, выделим в объеме рабочей технологической среды элементарный участок частицы ФАП размером $dy \times dx$ (рис. 2).

С одной стороны, в выделенном участке $dy \times dx$ СОТС получает приращение количества теплоты, равное

$$\Delta_{xy} = w \rho_{\text{СОТС}} C_{\text{СОТС}} l dy dT_{\text{СОТС}}, \quad (6)$$

где w – скорость прохождения СОТС через ФАП, м/с; $\rho_{\text{СОТС}}$ – плотность СОТС, кг/м³; $C_{\text{СОТС}}$ – теплоемкость, Дж/К; l – длина поверхности детали, контактирующая с ФАП, м.

С другой стороны, это приращение равно

$$\Delta_{xy} = H_1 S_0 l (T_a - T_{\text{СОТС}}), \quad (7)$$

где H_1 – коэффициент теплообмена между СОТС и ФАП, Вт/(м²·К); S_0 – площадь тепловоспринимающей поверхности, м².

Учитывая, что $dy \times dx = 1$, после преобразования получаем

$$w \rho_{\text{СОТС}} C_{\text{СОТС}} dT_{\text{СОТС}} = H_1 S_0 (T_a - T_{\text{СОТС}}) dx. \quad (8)$$

При начальном условии $T_{\text{СОТС}}$ находим

$$T_a - T_{\text{СОТС}} = (T_a - T_{\text{СОТС}}) \exp\left(-H_1 S_0 \frac{x}{w \rho_{\text{СОТС}} C_{\text{СОТС}}}\right). \quad (9)$$

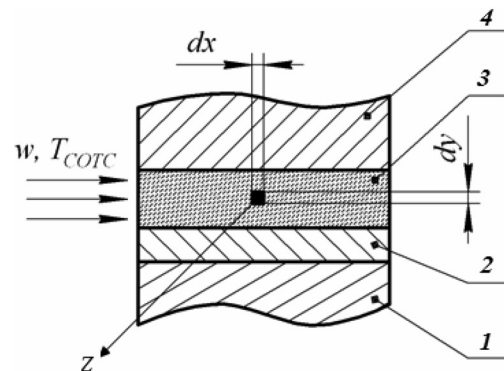


Рис. 2. Схема теплообмена рабочей технологической среды: 1 – оправка; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – рабочая технологическая среда; 4 – полюсный наконечник; $dy \times dx$ – элементарный участок ФАП

Подставляя данное выражение в уравнение (7) и интегрируя по x , определяем количество теплоты, поглощаемое слоем ФАП толщиной dy в единицу времени:

$$\Delta_y = \omega \rho_{\text{сотс}} C_{\text{сотс}} l \left[1 - \exp \left(-H_1 S_0 \frac{P}{2\omega \rho_{\text{сотс}} C_{\text{сотс}}} \right) \right] (T_a - T_{\text{сотс}}) dy. \quad (10)$$

Интегрируя данное выражение по y в пределах от $-\infty$ до $+\infty$ и умножая его на dt , получаем

$$Q_4 = 2\omega \rho_{\text{сотс}} C_{\text{сотс}} l \left[1 - \exp \left(-H_1 S_0 \frac{P}{2\omega \rho_{\text{сотс}} C_{\text{сотс}}} \right) \right] \int_0^{\infty} (T_a - T_{\text{сотс}}) dy. \quad (11)$$

Для решения задачи используем выражение для расчета температуры бесконечного полупространственного тела, температура которого измеряется по закону $T = T(t)$ [5]:

$$T_a - T_{\text{сотс}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{y}{2\sqrt{\alpha t}}}^{\infty} T \left(t - \frac{y^2}{4\alpha z^2} \right) e^{-z^2} dz. \quad (12)$$

Подставляя выражения (3)–(5), (11), (12) в уравнение (2) и учитывая соотношение $Q = qS$, получаем

$$q = H(T - T_{\text{сотс}}) + C_d \rho_d \frac{F}{P} \frac{dT}{dt} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} dy \int_{\frac{y}{2\sqrt{\alpha t}}}^{\infty} e^{-z^2} \left\{ \rho_a C_a \left(t - \frac{y^2}{4\alpha z^2} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \right. \\ \left. + \frac{2\omega \rho_a C_a}{P} \left[1 - \exp \left(-H_1 S_0 \frac{P}{2\omega \rho_{\text{сотс}} C_{\text{сотс}}} \right) \right] T \left(t - \frac{y^2}{4\alpha z^2} \right) \right\} dz. \quad (13)$$

Решение интегрально-дифференциального уравнения производится методом Эйлера в случае обыкновенных дифференциальных уравнений. Графически зависимость $T=T(t)$ представим в виде линии, состоящей из отрезков прямых:

$$T = \frac{T_{i+1} - T_i}{h} (t - t_i) + T_i \text{ при } t \in [t_i; t_i + h],$$

где $T_i = T(t_i)$, $T_{i+1} = T(t_i + h)$. После подстановки приведенного выражения в (9) при $t = t_i + h/2$ получим рекуррентное выражение

$$T_{i+1} = T_i + \frac{q + HT_{\text{сотс}} - \left(H + D \sqrt{t_i + \frac{h}{2}} \right) T_i}{B + H \frac{h}{2} + \sqrt{t_i + \frac{h}{2}} \left(C + D \frac{(h - t_i)}{3} \right)} h, \quad (14)$$

где $D = 4 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \frac{\omega \rho_{\text{сотс}} C_{\text{сотс}}}{P} \left[1 - \exp \left(-H_1 S_0 \frac{P}{2\omega \rho_{\text{сотс}} C_{\text{сотс}}} \right) \right]$; $B = C_d \rho_d \frac{F}{P}$; $C = 2 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \rho_a C_a$. Используя уравнение (14), можно определить температуру на поверхности детали в последующей точке на основе предыдущего значения.

Таким образом, предполагаемый математический подход позволяет теоретически определять величины температур при МАО поверхности плафонов без проведения дополнительных экспериментов.

Проведены экспериментальные исследования МАО поверхности плафонов (материал Л63 ГОСТ 15527–2004) для достижения высокой светоотражательной способности Φ (75–80%). Параметры и режимы МАО: величина магнитной индукции $B = 0,5–1,0$ Тл; частота вращения детали $n = 1–3$ м/с; скорость осцилляции $V_0 = 0,10–0,25$ м/с; величина рабочего зазора $\delta = 1–4$ мм;

коэффициент заполнения рабочего зазора $k_3 = 1$; размерность частиц ФАП $\Delta = 63/100$ мкм; ФАП – Полимам-Т ТУ 06459–81 и магнитно-абразивный порошок АСМ (ГОСТ 9206–70) – керметная технология, абразив – алмаз; СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3%-ный водный раствор; расход СОТС 50 мл/мин, 100, 150 мл/мин, 200, 250 мл/мин; скорость подачи СОТС $w = 0,55$ м/с; время обработки $t = 120$ с. Черновая обработка плафонов производилась путем использования ФАП Полимам-Т в течение 60 с, а окончательная обработка проводилась с применением магнитно-абразивного порошка АСМ также в течение 60 с.

Размеры обрабатываемого плафона $D \times d \times l = 55 \times 100 \times 90$ мм, толщина стенки составляет 0,25–1,0 мм. Волнообразность образующей профиль плафона не превышает 3 мм, при проведении численных расчетов и экспериментальных исследований она принята путем корреляции как прямая по максимальному размеру диаметра плафона. Величину светоотражательной способности Φ определяли блескомером БФ5–20/20 по ГОСТ 896–69. Изменение величины магнитной индукции производилось варьированием силы тока, подаваемого на электромагнитные катушки соленоидов электромагнитной системы.

Результаты исследований представлены на рис. 3–6.

При малых значениях величины магнитной индукции ($B = 0,5$ Тл) (рис. 3) осуществляется меньший съем вершин микронеровностей на поверхности детали. При $B = 0,75$ Тл достигается максимальная отражающая способность. При дальнейшем увеличении магнитной индукции B жесткость ферроабразивной щетки повышается, снижаются проникаемость ФАП и уровень теплоотвода СОТС, что приводит к уменьшению светоотражательной способности плафонов.

Повышение скорости резания $V_{рез}$ (рис. 4) не приводит к существенному изменению светоотражательной способности. Увеличение скорости осцилляции V_o (рис. 5) не оказывает значительного влияния на светоотражательную способность, однако требуется интенсивная подача СОТС, в противном случае на поверхности плафонов появляются цвета побежалости, что снижает светоотражательную способность плафонов.

При увеличении величины рабочего зазора δ (рис. 6) образуется пространство за зоной резания по направлению вращения детали, куда устремляется поток СОТС, что требует его повышенного расхода для более эффективного охлаждения.

При чрезмерной подаче СОТС (более 150 мл/мин) в рабочем зазоре величиной $\delta = 4$ мм и при магнитной индукции $B = 1,2$ Тл образуется противоток жидкости, т. е. поток СОТС устремляется в направлении, противоположном вращению плафона, и в сторону меньшего по размеру конуса. Это указывает на то, что увеличение подачи СОТС не обеспечивает его полное проникновение в зону резания, а при увеличении скорости резания наблюдается рост пенного столба и моющей способности [8]. При этом светоотражательная способность плафона

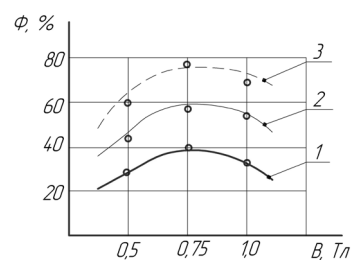


Рис. 3. Зависимость светоотражательной способности Φ плафонов от величины магнитной индукции B при различном расходе СОТС: 1, 2, 3 – 50; 100; 150 мл/мин соответственно

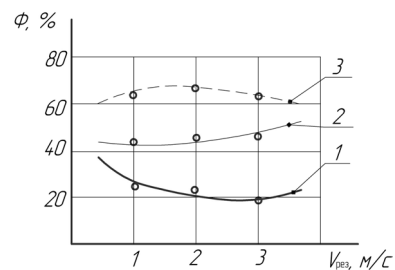


Рис. 4. Зависимость светоотражательной способности Φ плафонов от скорости резания $V_{рез}$ при различном расходе СОТС: 1, 2, 3 см. рис. 3

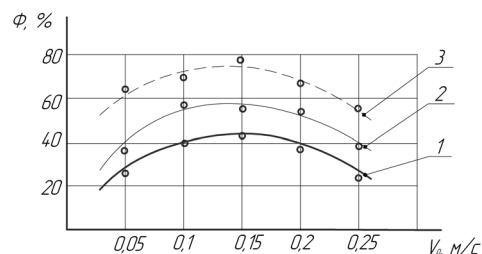


Рис. 5. Зависимость светоотражательной способности Φ плафонов от скорости осцилляции V_o при различном расходе СОТС: 1, 2, 3 см. рис. 3

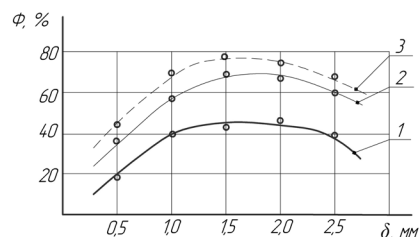


Рис. 6. Зависимость светоотражательной способности Φ плафонов от величины рабочего зазора δ при различном расходе СОТС: 1, 2, 3 см. рис. 3

ухудшается. При высоких значениях скоростей резания, осцилляции и магнитной индукции, несмотря на обильное охлаждение рабочей зоны, образуются «штриховые» прижоги поверхностного слоя плафонов. Это объясняется созданием фильтрационного эффекта или закупоривания рабочей технологической среды паровоздушными пузырьками, препятствующими прохождению СОТС через каналы щетки и реализации процесса «полусухого» резания.

В результате проведенных экспериментальных исследований определены оптимальные режимы МАО: $B = 0,75$ Тл; $V_0 = 0,15$ м/с; $\delta = 1,5$ мм, которые обеспечивают высокую светоотражательную способность плафонов (75–80%).

Литература

1. ГОСТ 17677–82. Светильники. Общие технические условия.
2. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Л., 1986.
3. Скворчевский Н. Я., Федорович Э. Н., Ящерицин П. И. Эффективность магнитно-абразивной обработки. Мн., 1991.
4. Хомич Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий. Мн., 2006.
5. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М., 1964.
6. Нордлинг К., Остерман Д. Справочник по физике для ученого и инженера. СПб, 2011.
7. Мартынов А. Н., Федосеев В. М. // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента. 1987. Вып. 15. С. 90–94.
8. Сакулевич Ф. Ю., Скворчевский Н. Я. Роль смазывающе-охлаждающих жидкостей при магнитно-абразивной обработке. Мн., 1981.

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

TECHNOLOGY FEATURES OF MAGNETIC ABRASIVE MACHINING OF LAMPSHADE SURFACES

Summary

A mathematical calculation to determine a temperature on the surface of lampshades at magnetic abrasive machining is presented. The optimal mode of magnetic abrasive machining, which provides high-capacity reflector shades is proposed.