

УДК 621.923

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

## **МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ**

*Белорусский государственный аграрный технический университет*

*(Поступила в редакцию 15.03.2014)*

Тонкостенные детали часто встречаются не только в машино- и приборостроении, но и в изделиях бытового пользования. Существует проблема финишной обработки поверхностей тонкостенных деталей, вызванная неблагоприятными условиями теплоотвода при обработке резанием, недостаточной их жесткостью, ограничивающей использование прогрессивных методов закрепления заготовок. Поэтому для достижения высоких показателей точности и шероховатости поверхностей тонкостенных деталей необходимо отдавать предпочтение электрофизическим методам обработки, основанным на концентрации энергетического воздействия в пространстве и во времени. При этом целесообразно использовать те методы, при которых происходит процесс самоорганизации, в результате формируется контур режущего инструмента. Это особенно актуально, если поверхность тонкостенной детали является сложнопрофильной (например, корпусы и крышки автоматических перьевых ручек).

Перьевые автоматические ручки начали производить в XIX в. Их корпусы и крышки изготавливали из определенных видов каучука, имеющего высокие механические свойства, а для придания декоративных свойств на поверхности корпусов и крышек наносили различный орнамент или накатывали пластины золота или серебра. Однако, несмотря на устойчивость каучука к механическим повреждениям, длительное атмосферное воздействие приводит к потере товарного вида продукции, а регулярные динамические воздействия – к достаточно быстрому выходу из строя и разрушению основных деталей ручек.

В настоящее время для изготовления перьевых автоматических ручек используют стали, латуни и другие сплавы, в том числе благородные металлы (серебро, золото, палладий, платина и т. п.) (рис. 1), поскольку их применение гарантирует прочные, устойчивые к механическим повреждениям корпусы и крышки.

В массовом производстве корпусов и крышек автоматических перьевых ручек наиболее распространены нержавеющие стали. Способность последних противостоять атмосферной коррозии



Рис. 1. Крышки автоматических перьевых ручек

и воздействию различных сортов чернил обусловила их широкое использование в отличие от изделий из латуни, требующей обязательного лакового или хромового покрытия по причине потемнения.

Для получения товарного вида и высокой светоотражательной способности полируют поверхности корпусов и крышек перьевых автоматических ручек. Однако обработка нержавеющей стали по причине высокого содержания в ней хрома и никеля является проблематичной при таких финишных операциях, как шлифование и полирование. В первом случае из-за высокой пластичности и вязкости данной стали шлифовальный круг засаливается и быстро теряет свои режущие свойства, во втором случае процесс является низкопроизводительным из-за химических реакций окислительно-восстановительного характера, сопровождающих процесс полирования.

Перспективными являются технологии электрохимических методов обработки, обеспечивающие матовую поверхность корпуса и крышки, и магнитно-абразивная обработка (МАО) [1–3], гарантирующая их зеркальную поверхность. Однако сложный профиль поверхностей крышек ручек создает проблемы обработки методом МАО, которые заключаются в необходимости определения топографии электромагнитного поля (ЭМП) в зоне обработки. Напряженность  $\vec{H}$  магнитного поля (МП) на различных участках обрабатываемой поверхности обуславливает величину сил резания, обеспечивающих эффективность размерного и массового съема материала.

ЭМП в каждой точке пространства и в каждый момент времени характеризуется вектором его напряженности, поскольку оно рассматривается как самостоятельный материальный объект [4]. Применение графических методов определения топографии ЭМП и соответственно напряженности не позволяет провести строгий анализ динамического воздействия. По этой причине не удалось получить положительного результата при МАО беговых дорожек обойм шариковых подшипников [5]. В связи с вышеизложенным грамотное конструктивное решение должно основываться не на интуитивном подходе, а на учете геометрии исследуемой области и анализе картины сил резания, определяемых вектором напряженности  $\vec{H}$ . Системный подход является базой для решения комплексной задачи проблемы интенсификации МАО поверхностей крышек автоматических перьевых ручек в области формообразования и средств его реализации. Повышение эффективности МАО обеспечивается геометрическими и кинематическими методами оценки и реализации процесса съема материала при условии равномерности силового воздействия рабочей технологической среды на обрабатываемую поверхность. Расчет и создание необходимой напряженности ЭМП, основанной на геометрическом и силовом изменении параметров МАО, необходимы для конструирования технологической оснастки и оборудования, обеспечивающих стабильность давления рабочей технологической среды по всей площади обрабатываемой поверхности.

Тождественность математического описания и моделирование топографии МП позволяют учитывать его параметры и управлять режимами МАО при обработке сложнопровильных поверхностей тонкостенных деталей.

Расчет производился в системе цилиндрических координат. Значения векторного потенциала МП, связанного с током  $I$  в определенной точке  $M$ , находящейся на расстоянии  $r_1$  и  $r_2$  от осей проводников с током, определяются по формуле [6]

$$A_z = -\frac{M_0 I}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_2} + C$$

с использованием метода наложения через выражение ротора  $\text{rot } \vec{A}$  в цилиндрических координатах. Вектор  $\vec{A}$  направлен вдоль оси проводника и поэтому имеет только осевую составляющую  $\vec{A}_z$ . Считая, что в точке 0  $A_z = 0$ , имеем

$$A_z = \frac{M_0 I}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (1)$$

Ротор ( $\text{rot } \vec{A}$ ) равен магнитной индукции  $\vec{B}$ , а сам векторный потенциал является векторной величиной, плавноизменяющейся от точки к точке при учете того, что его дивергенция  $\text{div } \vec{B} = 0$ .

По причине возможности нахождения вектора  $\vec{A}$  как функции координат индукция  $B$  в любой точке МП определяется путем нахождения ротора от  $\vec{A}$ . Преимуществом использования векторного потенциала является то, что его применяют как для областей, занятых током, так и для областей, не занятых током. Поскольку вектор  $\vec{A}$  является расчетной функцией, имеющей пространственные производные, и подчиняется условию, что его линии замкнуты на себя ( $\text{div } \vec{A} = 0$ ), то формула (1) как частный случай имеет вид

$$\vec{A} = \frac{M_0}{4\pi V} \int \frac{\vec{\delta} dV}{R}, \quad (2)$$

где  $\vec{\delta}$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $V$  – объем, м<sup>3</sup>;  $R$  – расстояние от точки приложения, м, и позволяет определить векторный потенциал в любой точке МП.

Анализ ЭМП для MAO показывает, что магнитная система имеет вихревой характер ввиду соленоидального типа ее конструкции. Поскольку

$$\text{div}(\text{rot } \vec{A}) = \nabla(\nabla \vec{A}),$$

где  $\nabla$  – дифференциальный оператор, то его скалярное произведение равно нулю. Однако ротор вектора  $\vec{A}$  в целом ряде точек поля не равен нулю.

При помещении в рабочую зону  $I$  (рис. 2) крышек автоматических перьевых ручек, представляющих собой полукубическую деталь, обладающую переносным и вращательными движениями, придаваемыми ей механизмами станка, происходит искажение линий магнитной индукции (рис. 3).

Линии магнитной индукции непосредственно у поверхности детали имеют вид окружностей, центр которых находится внутри детали. По мере удаления от нее эти линии искажаются. Однако для обработки методом MAO необходимо знать величины и направления  $\vec{A}$  на наружной поверхности детали, поскольку  $\vec{A}$  определяет силу резания и давления ферроабразивного порошка (ФАП) для реализации размерного и массового съема материала.

Таким образом, в зоне обработки методом MAO существует ось ветвления, проходящая через точку  $M$  с координатами  $r = \mu_0 I / 2\pi B_{\text{вн}}$  и  $\theta = 180^\circ$ , где значение  $\vec{A}$  во всех точках равно нулю, но в других точках на поверхности детали оно не равно нулю, поскольку поле имеет вихревой характер. Следовательно, используя принцип постоянства кривых вектора  $\vec{A}$  ( $A_z = \text{const}$ ), линии магнитной индукции можно представить в виде окружностей с центрами, лежащими на оси  $x$ . Согласно [6], в любой области пространства, где существует ток, имеется вихревое МП. Используя метод наложения, внутри окружностей можно поместить на одну линию два проводника (рис. 4) и расчет по определению значения  $\vec{A}$  в точке  $M$ , лежащей на наружной поверхности детали, произвести вышеуказанным методом.

Двухпроводная линия при учете нахождения проводников на расстоянии  $2L$  расположена во внутреннем пространстве детали, имеющей наружный  $R_1$  и внутренний  $R_2$  радиусы:

$$r_2^2 = r^2 + L^2 - 2Lr \cos \theta. \quad (3)$$

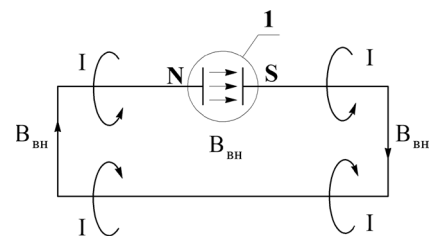


Рис. 2. Схема электромагнитной системы для MAO наружных поверхностей

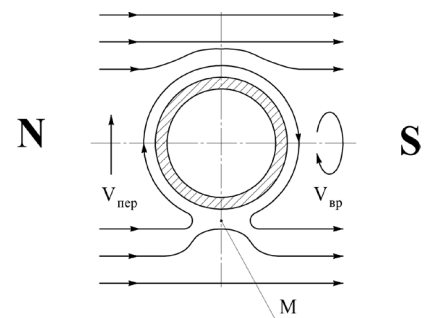


Рис. 3. Схема электромагнитного поля при MAO поверхностей крышек автоматических перьевых ручек

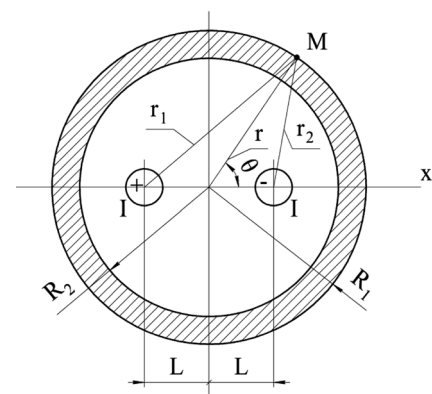


Рис. 4. Схема расчета магнитного поля

Поскольку  $2 \cos \theta = e^{j\theta} + e^{-j\theta}$ , то

$$r_2^2 = r^2 \left(1 - \frac{L}{r} e^{j\theta}\right) \left(1 - \frac{L}{r} e^{-j\theta}\right). \quad (4)$$

Аналогично

$$r_1^2 = r^2 + L^2 + 2Lr \cos \theta = r^2 \left(1 + \frac{L}{r} e^{j\theta}\right) \left(1 + \frac{L}{r} e^{-j\theta}\right). \quad (5)$$

Следовательно, логарифм в формуле (1) имеет четыре слагаемых:

$$\begin{aligned} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 = \frac{1}{2} \left[ \ln \left(1 - \frac{L}{r} e^{j\theta}\right) + \right. \\ \left. + \ln \left(1 - \frac{L}{r} e^{-j\theta}\right) - \ln \left(1 + \frac{L}{r} e^{j\theta}\right) - \ln \left(1 + \frac{L}{r} e^{-j\theta}\right) \right], \end{aligned} \quad (6)$$

каждое из которых разлагается в ряд. Члены рядов с четными степенями сокращаются и после  $e^{jK\theta} + e^{-jK\theta} = 2 \cos K\theta$  следует

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = - \left[ \frac{L}{r} \cos \theta + \frac{1}{3} \left(\frac{L}{r}\right)^3 \cos(3\theta) + \frac{1}{5} \left(\frac{L}{r}\right)^5 \cos(5\theta) + \dots \right], \quad r > L. \quad (7)$$

Этот ряд сходится при  $r > L$ , что соответствует размерной цепи детали, и во внешней области по отношению к крышкам автоматических перьевых ручек в выражении векторного потенциала присутствуют члены, содержащие  $1/r^n$ , поскольку при  $r \rightarrow \infty$  значение  $A_z$  для внешней области обращается в нуль, что вытекает из формулы (1). Тогда

$$A_z = - \frac{M_0 I}{\pi} \sum \frac{P_n}{r^n} \cos n\theta \quad \text{при } r \geq R_2, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (8)$$

В соответствии с выражением ротора в цилиндрических координатах магнитная индукция имеет радиальную  $B_r$  и координатную  $B_\theta$  составляющие:

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{dA_z}{d\theta}; \quad B_\theta = - \frac{dA_z}{dr}. \quad (9)$$

Для определения постоянной  $P_n$  используются граничные условия в виде непрерывности радиальных составляющих магнитной индукции, которые сохраняют свое значение при любых величинах координатного угла  $\theta$  для каждой пары членов рядов, получаемых путем дифференцирования выражений векторного потенциала по формуле (8) согласно закономерности (9). После подстановки постоянных в формулы магнитной индукции получаются сходящиеся ряды, когда во внешней области при  $r > 5L$  второй член оказывается меньше 1% от первого члена, остальные члены отбрасываются.

Для определения возможности применения MAO при обработке крышек автоматических перьевых ручек ( $D \times t = 10 \times 0,25$  мм,  $L = 50$  мм) проведены экспериментальные исследования. На рис. 5 представлена схема установки обрабатываемых изделий в рабочей зоне области станка

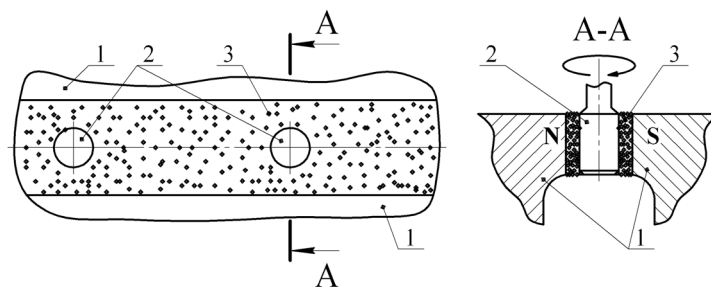


Рис. 5. Схема установки для MAO поверхностей крышек автоматических перьевых ручек: 1 – полюса электромагнита; 2 – обрабатываемые изделия; 3 – рабочая технологическая среда

МАРС-15 для МАО поверхностей деталей из немагнитных материалов. Рабочую зону между полюсами N и S электромагнитной системы  $I$  заполняют рабочей технологической средой, состоящей из ФАП и смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС), и помещают в нее обрабатываемые крышки автоматических перьевых ручек. Крышкам сообщают поступательное, вращательное и осциллирующее движения по кольцевому зазору. Внедряясь в порошкообразную массу рабочей технологической среды, крышки обрабатываются до момента начала затухания процесса массового и размерного съема материала.

Поскольку, согласно приведенному расчету напряженности  $\vec{H}$  на поверхности крышек, ее наибольшее значение при  $\theta = 0$  или  $\theta = \pi$  будет равно  $\vec{H} = -2\vec{H}_0$ , то основными показателями эффективности МАО этих крышек являются кинематические и динамические характеристики процесса. Для реализации МАО приняты следующие режимы и параметры: магнитная индукция  $B = 0,9$  Тл; частота осцилляции полюсных наконечников  $n = 280$  дв. ход/мин; амплитуда осцилляции обрабатываемых деталей  $A = 0,8$  мм; скорость резания  $V_p = 2-3$  м/с; величина силы тока, подаваемого на катушки электромагнитной системы,  $I = 5$  А; величина рабочего зазора  $\delta = 1$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора  $k_3 = 1$ ; время обработки  $t = 60$  с; ФАП: 1) Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81; 2) Р6М5 ТУ 27-104-02-86; 3) 100Ф5 ТУ 232-130-004-90, размерность  $\Delta = 0,1-0,16$  мм; СОТС: 1) СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5%-ный водный раствор; 2) Аквапол-1 ТУ 38.1011061-86, 3%-ный водный раствор; 3) Пенол-2 ТУ 38.591218-90, 1%-ный водный раствор; расход СОТС 200 мл/мин.

Величину размерного съема ( $\Delta D$ , мкм) определяли на микроскопе МИМ-201, массового съема ( $\Delta G$ , мг) – на весах лабораторных ВЛТ-1; шероховатость поверхности до ( $Ra_1$ , мкм) и после МАО ( $Ra_2$ , мкм) – на профилографе-профилометре мод. 252 «Калибр», светоотражательную способность – на блескомере ФБ-1. Величину магнитной индукции в рабочем зазоре ( $B$ , Тл) измеряли тесламетром Т-3. Исходная шероховатость составляла  $Ra_1 = 0,6-0,8$  мкм.

Результаты исследований представлены на рис. 6. Особенностью обработки методом МАО является то, что для рабочей технологической среды I (ФАП – Ж15КТ и СОТС – СинМА-1) по сравнению

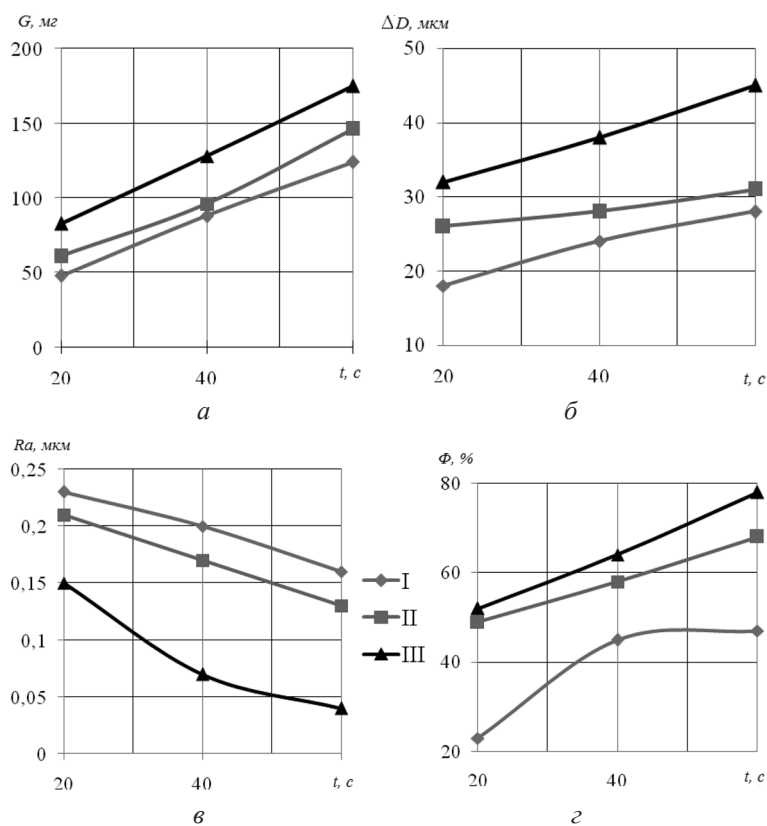


Рис. 6. Зависимость массового ( $G$ , мг) и размерного ( $\Delta D$ , мкм) съема материала ( $a$ , б), шероховатости поверхности ( $Ra$ , мкм) ( $в$ ) и светоотражательной способности ( $\Phi$ , %) ( $г$ ) от времени ( $t$ , с) при МАО с применением различных рабочих технологических сред: I – Ж15КТ и СинМА-1; II – Р6М5 и Аквапол-1; III – 100Ф5 и Пенол-2

с рабочей технологической средой II (ФАП – Р6М5 и СОТС – Аквапол-1) значения показателей светоотражающей способности после МАО оказались ниже, а с параметрами шероховатости наблюдается совершенно противоположная картина. Однако достаточным и полным объяснением этого факта служит высокая степень насыщения поверхностного слоя крышек автоматических перьевых ручек мелкодисперсным остаточным углеродом, что существенно повышает степень поглощения света поверхностью черного цвета, образованной его внедрением.

### Выводы

1. Определены аналитические зависимости величины напряженности ЭМП от геометрических параметров детали, что позволяет выявить динамику процесса МАО и силовое воздействие частиц ФАП на обрабатываемую поверхность.

2. Установлено, что при использовании рабочей технологической среды III (100Ф5 и Пенол-2) достигаются наилучшие показатели качества поверхностного слоя (шероховатость поверхности по параметру  $Ra$  составляет 0,15–0,04 мкм, светоотражательная способность – 50–80%).

### Литература

1. Акулович Л. М., Сергеев Л. Е. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки поверхностей различного профиля. Мн., 2013.
2. Благодарная О. В. Технологическое обеспечение качества рабочих поверхностей швейных игл магнитно-абразивным полированием: Дис. ... канд. техн. наук. Могилев, 2012.
3. Yamaguchi H., Shinmura T., Takenada M. // Prec. eng. 2003. N 27. P. 51–58.
4. Куликовский А. Г. Магнитная гидродинамика. М., 2005.
5. Сакулевич Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. Мн., 1981.
6. Говорков В. А. Электрические и магнитные поля. М., 1968.

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

### MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING OF COMPLEX FORM SURFACES OF THIN-WALLED PARTS

### Summary

An analytical dependence of electromagnetic field intensity on the geometrical parameters of details is established. Quality parameters of the surface layer (surface roughness  $Ra$  of the parameter is 0.15–0.04 microns, light reflectivity of – 50–80%) when using different working technological environments are defined.