

трения качения от нагрузки  $P$ , показывают, что износ имеет нелинейный характер, а увеличение концентрации абразивных примесей в масле приводит к росту интенсивности изнашивания покрытий по зависимости близкой к линейной. Выявлено, что с уменьшением концентрации абразивных частиц в масле, влияние температуры масла в ванне на изнашивание покрытий, полученных ЭМН ФМП ФБХ-6-2 и Fe – 2 % V, увеличивается.

3. Установлено, что наибольшей износостойкостью обладают покрытия из ФМП Fe – 2 % V. Износостойкость этого покрытия при трении качения со смазкой при наличии частиц абразива в 1,7–1,8 раз выше износостойкости эталона. Износостойкость покрытий из ФМП ФБХ 6-2 по сравнению с эталоном больше в 1,3–1,5 раз.

#### Список использованных источников

1. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л.М. Акулович. — Полоцк : ПГУ, 1999. — 240 с.
2. Кожуро, Л.М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л.М. Кожуро, Б.П. Чемисов. — Минск : Наука и техника, 1995. — 232 с.
3. Ракомсин, А.П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / Ракомсин, А.П.; под ред. П.А. Витязя. — Минск : Парадокс, 2000. — 201 с.
4. Акулович, Л.М. Повышение качества покрытий при электромагнитной наплавке в постоянном магнитном поле / Л.М. Акулович, А.В. Миранович // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. — 2008. — № 8. — С. 58–65.
5. Использование постоянных магнитов в устройствах электромагнитной наплавки / Ж.А. Мрочек [и др.] // Теория и практика машиностроения. — 2004. — № 3. — С. 75–84.
6. Акулович, Л.М. Об устойчивости электромагнитной наплавки / Л.М. Акулович, А.В. Миранович, А.В. Линник // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. — Могилев : ГУ ВПО "Белорусско-российский университет", 2012 — С. 98–100.
7. Миранович, А.В. Повышение ресурсо- и энергосбережения процесса электромагнитной наплавки / А.В. Миранович, Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро // Тяжелое машиностроение. — 2006. — № 4. — С. 29–33.

Статья поступила в редакцию 18.04.2014 г.

УДК 621.923

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

## МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ С КРИВОЛИНЕЙНОЙ ОБРАЗУЮЩЕЙ

УО "Белорусский государственный аграрный технический  
университет"  
г. Минск, Беларусь

*В работе рассмотрена возможность магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей при использовании полюсных наконечников цилиндрической формы. Предложен способ решения задачи по определению силовой характеристики в рабочем зазоре магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей. Рассмотрен процесс магнитно-абразивной обработки пуансона, имеющего криволинейный контур рабочей части.*

*The paper considers the possibility of magnetic-abrasive surface treatment of complex profile using the pole pieces of cylindrical shape. We propose a way to solve the problem of determining the characteristics of the power in the air gap magnetic abrasive surface treatment of complex profile. The process of magnetic abrasive machining punch having curved contour of the working part.*

Растущие требования к повышению производительности, точности и качеству обработки сложнопрофильных поверхностей приводят к созданию новых высокоэффективных способов механической, в том числе и финишной обработки. В условиях высокой конкуренции необходима своевременная и быстрая подготовка производства к выпуску нового изделия. Применение систем с изменяющимися элементами режущего инструмента для сложнопрофильных деталей позволяет сократить сроки настройки оборудования на выпуск новой номенклатуры сложнопрофильных деталей.

Традиционно используемые формы инструмента с неизменяемой рабочей геометрией связаны с необходимостью создания многокоординатных моделей станочного оборудования, что резко усложняет кинематику процесса, требуют использования трудоемких методов анализа и синтеза оценки станочных систем. Известно, что, например,

на точность обработки деталей с применением ЧПУ влияет комплекс погрешностей на всем пути преобразования чертеж детали — готовое изделие, в том числе и программноносителя при разработке и записи программы управления. Основная доля погрешностей возникает при непосредственной обработке деталей, в реализации которой участвует вся технологическая система (ТС). На данную систему воздействуют внутренние и внешние факторы, которые приводят к отклонению хода технологического процесса и заключаются в возникновении упругих деформаций элементов ТС, их износе, и т.п. Использование CAD/CAM моделирования для адекватного управления ТС требует оснащения станочного оборудования со специализированно изменяемыми элементами в виде глобусных столов или поворотных инструментальных головок, что повышает стоимость обработки и самого станочного комплекса. Кроме того, автоматизация программирования связана с необходимостью описания геометрической информации, на основе новых методов типа сплайн-функций, которые обязательно должны быть экспериментально проверены. Также процесс обработки сложнопрофильных деталей характеризуется повышенными динамическим воздействием со стороны сил инерции, представляющих собой противодействие материальной точки изменению ее скорости из-за необходимости варьирования скоростями подач по координатным осям ввиду изменения припуска вдоль обрабатываемого контура детали [1].

Одним из путей решения данной проблемы является применение другого рода инструмента, а именно подвижно скоординированного, характерного для магнитно-абразивной обработки (МАО) [2–4]. Особенностью этого метода служит использование электромагнитного поля (ЭМП) для образования ферроабразивной “щеткой”, отличающейся способностью ориентированного резания различных материалов, рис. 1.

Однако проблемой для реализации процесса МАО сложнопрофильных поверхностей является необходимость создания равных величин давления рабочей технологической среды (РТС) на различных участках обрабатываемой поверхности, отличающихся формой и геометрическими размерами. Силовой характеристикой для МАО в условиях ЭМП служит напряженность  $H$ , и поэтому возникает необходимость установления ее величин в каждой точке топологического пространства зоны обработки, что обеспечивает управление обработкой различных видов сложнопрофильных поверхностей.

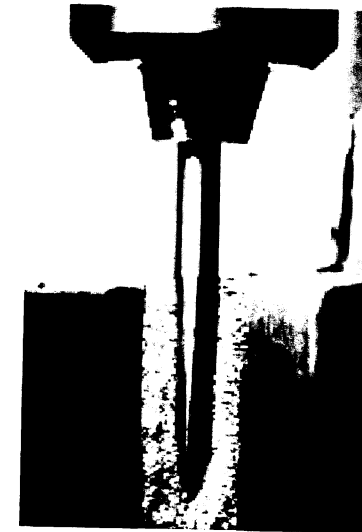


Рис. 1. Фотография пуансона в рабочей зоне при магнитно-абразивной обработке

Предложен ряд методов определения напряженности ЭМП для различного рода деталей, например, сплошных цилиндрических, полых и т.д., в результате использования которых выявляется величина напряженности на поверхности детали, но всякий раз эта величина зависит от напряженности внешнего по отношению к зоне обработки поля [5, 6].

В связи с вышеизложенным возникает необходимость в установлении значений напряженности внешнего поля, знание величины которой обеспечивает ее определение в зоне обработки в каждой точке поля. Известно, что в пределах областей с распределением тока магнитное поле описывается через векторный потенциал при учете его равномерной плотности по поперечному сечению магнитопровода [5]. Вид решения должен зависеть от конфигурации и магнитной проницаемости магнитопровода, что позволяет найти решение уравнения Пуассона

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu\mu_0 J,$$

где  $A$  — векторный потенциал, Т/м;  $x, y$  — координаты, м;  $\mu$  — относительная магнитная индукция;  $\mu_0$  — относительная магнитная проницаемость, Гн/м;  $J$  — плотность тока, А/м<sup>2</sup>.

Конфигурация границ, которая наиболее полно исследуется, аналитически представляет собой прямоугольник при наличии того, что противоположные стороны в первом случае являются эквипотенциалами, во втором — имеют конечную магнитную проницаемость. Поскольку сечение магнитопровода для электромагнитной системы (ЭМС) есть прямоугольник и только подобная форма поддается анализу, то именно присутствие этой формы обеспечивает решение задачи, в которых границы дают конечное число отображений и которое заключается в интегрировании векторной потенциальной функции линейного тока в пределах областей, занятых этим током.

В общем случае решение уравнения Пуассона достигается с большей трудоемкостью, чем уравнение Лапласа, и поэтому имеется возможность замены действительной пуассоновой области нитью (нитями) тока, то все поле приводится к лапласовому. Например, влияние распределенного тока во внешней по отношению к нему области можно представить введением одной или нескольких нитей тока с бесконечно малым поперечным сечением.

В качестве метода решения избирается аналитический, поскольку итогом является алгебраическое уравнение, в которое подставляют значения параметров, определяющих поле. Основное достоинство аналитического метода заключается в возможности получения общего решения, которое позволяет составить полное представление о влиянии различных параметров. Одним из условий служит равномерность распределения плотности тока  $J$  по поперечному сечению проводников различной конфигурации. Также поле распределенного тока определяется наличием полей бесконечно большого числа элементарных линейных токов согласно условию лапласовой области, в совокупности составляющих распределенный ток. Таким образом, распределение векторного потенциала  $A$  находится путем интегрирования векторной потенциальной функции линейного тока по сечению проводника.

Рассмотрим полюсный наконечник прямоугольного сечения с размерами  $2a$  и  $2b$ , рис. 2. Ток проходящий через данный наконечник равен  $I$ , его плотность  $J = I / 4ab$ , а ток протекающий по волокну с сечением  $dx' dy'$  ( $x'$  и  $y'$  — координаты произвольного волокна полюсного наконечника) равен  $i = \frac{J}{4ab} dx' dy'$ . Принимая во внимание, что начало отсчета  $A$  выбирается произвольно, то ее зависимость можно представить следующим образом:

$$A = \frac{\mu_0}{2\pi} i \ln r, \quad (1)$$

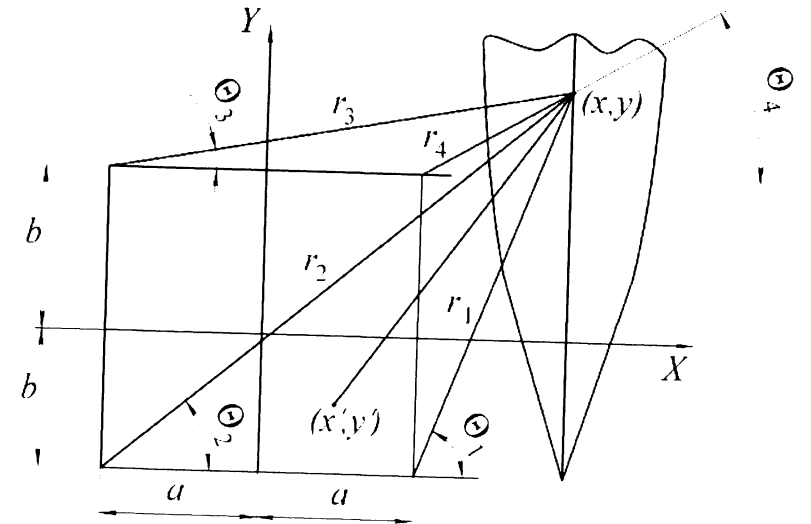


Рис. 2. Схема для определения напряженности внешнего магнитного поля

На основании формулы (1) определяется поле, создаваемое всеми элементами полюсного наконечника путем подстановки значения  $i$  и интегрирования по сечению прямоугольника. Главным результатом служит установление значения векторного потенциала в произвольной точке  $(x, y)$  на расстоянии  $r$  от поверхности полюсного наконечника с координатами  $(x', y')$ , которое описывается соотношением

$$A = \frac{\mu_0 I}{8\pi ab} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \ln r dx' dy'. \quad (2)$$

Практическим результатом данного соотношения служит то, что через это значение устанавливается значение  $H$  внешнего поля в уравнении (1) в зависимости от формы детали и удаленности обрабатываемой поверхности от полюсных наконечников, а, следовательно, и давление РТС в каждой точке сложнопрофильной поверхности детали. В свою очередь получение представления о наличии разницы

давления РТС на различных участках поверхности детали указывает на необходимость нивелирования этой разницы и последующей коррекции с целью обеспечения равномерности съема материала, что достигается варьированием профиля контура полюсного наконечника.

Выразив  $r$  через координаты точки, получим

$$A = \frac{\mu_0 I}{16\pi ab} \int_{-a-b}^a \int_{-a-b}^b \ln \left[ (x' - x)^2 + (y' - y)^2 \right] dx' dy'. \quad (3)$$

Данный интеграл определяется через элементарные функции и конечный результат имеет вид:

$$A = \frac{\mu_0 I}{16\pi ab} \left( \begin{aligned} & (a-x)(b-y) \ln[(a-x)^2 + (b-y)^2] + \\ & + (a+x)(b-y) \ln[(a+x)^2 + (b-y)^2] + \\ & + (a-x)(b+y) \ln[(a-x)^2 + (b+y)^2] + \\ & + (a+x)(b+y) \ln[(a+x)^2 + (b+y)^2] + \\ & + (a+x) \ln[(a+x)^2 + (b+y)^2] + \\ & + (a-x)^2 \times \left[ \operatorname{arctg} \frac{b-y}{a-x} + \operatorname{arctg} \frac{b+y}{a-x} \right] + \\ & + (a+x)^2 \times \left[ \operatorname{arctg} \frac{b-y}{a+x} + \operatorname{arctg} \frac{b+y}{a+x} \right] + \\ & + (b-y)^2 \times \left[ \operatorname{arctg} \frac{a-x}{b-y} + \operatorname{arctg} \frac{a+x}{b-y} \right] + \\ & + (b+y)^2 \times \left[ \operatorname{arctg} \frac{a-x}{b+y} + \operatorname{arctg} \frac{a+x}{b+y} \right] \end{aligned} \right). \quad (4)$$

Составляющие напряженности поля  $H_x$  и  $H_y$  определяются следующим образом:

$$H_x = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial A}{\partial y}, \quad H_y = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial A}{\partial x}.$$

Согласно рис. 2, путем введения расстояния  $r_1, r_2, r_3$  и  $r_4$  от рассматриваемой точки поля до вершин углов прямоугольного полюсного наконечника  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  и  $\theta_4$ , которые получены при пересечении линий, проведенных в вершины углов.

$$H_x = \frac{1}{8\pi ab} [(y+b)(\theta_1 - \theta_2) - (y-b)(\theta_3 - \theta_4) + (x+a) \ln \frac{r_2}{r_3} - (x-a) \ln \frac{r_1}{r_4}], \quad (5)$$

$$H_y = \frac{1}{8\pi ab} [(x+a)(\theta_2 - \theta_3) - (x-a)(\theta_1 - \theta_4) + (y+b) \ln \frac{r_2}{r_1} - (y-b) \ln \frac{r_3}{r_4}]. \quad (6)$$

При рассмотрении процесса МАО пуансона, имеющего криволинейный контур рабочей части, можно определить величины напряженности магнитного поля в зависимости от диаметральных и линейных размеров. В случае резкого отличия величины  $H$  в верхней и нижней точках криволинейного контура по всей длине или диаметру пуансона следует производить профилирование полюсного наконечника, но в результате проведенных экспериментальных исследованиях установлено, что профилирование полюсного наконечника в данном случае не требуется. Это связано с тем, что разница величин напряженности, следовательно, и отклонение давления в вышеуказанных точках составляет не более 15 % и оно является вполне допустимым для использования данной схемы обработки.

Параметры и режимы МАО: величина магнитной индукции  $B$  — 0,8–1,2 Т; скорость резания  $V_{\text{рез}}$  — 0,5–2,5 м/с; скорость перемещения  $V_{\text{пер}}$  — 2,0–4,5 × 10<sup>-3</sup> м/с; скорость осцилляции  $V_{\text{осц}}$  — 0,1–0,3 м/с; амплитуда осцилляции  $A$  — 1,5–2,5 мм; величина рабочего зазора  $\delta$  — 2,5 мм; коэффициент заполнения рабочего зазора  $K_z$  — 1; время обработки  $t$  — 30–90 с.

В качестве ФАП использовался Fe-TiC ТУ 88-147.002-75, смазочно-охлаждающее технологическое средство СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5 % водный раствор, шероховатость пуансонов до обработки составляла  $Ra = 1,2$ –1,6 мкм. Материал — Х12 ГОСТ 5950-2000 твердость 55–58 HRC. Массовый съем материала определяется взвешиванием пуансонов на весах аналитических ВЛА-1 с точностью до 0,001 г. Изменение шероховатости поверхности пуансонов до и после обработки производилось на профилографе-профилометре мод. 252 Калибр.

На рис. 3 представлены исследования величины съема материала пуансонов от величины магнитной индукции, амплитуды и времени обработки, а на рис. 4 и 5 соответственно величины шероховатости поверхности от величины магнитной индукции, амплитуды, времени обработки и скоростей обработки.

Анализ графиков, изображенных на рис. 3–5, показывает, что применение следующего параметра и режима МАО:  $B = 0,9$  Т; скорость резания,  $V_{\text{рез}} = 2,0$  м/с; скорость перемещения,  $V_{\text{пер}} = 3,5 \times 10^{-3}$  м/с; скорость осцилляции,  $V_{\text{осц}} = 0,25$  м/с; амплитуда осцилляции  $A = 1,75$  мм; время обработки,  $t = 45$  с, обеспечивает получение наилучших показателей шероховатости и съема материала пуансона.

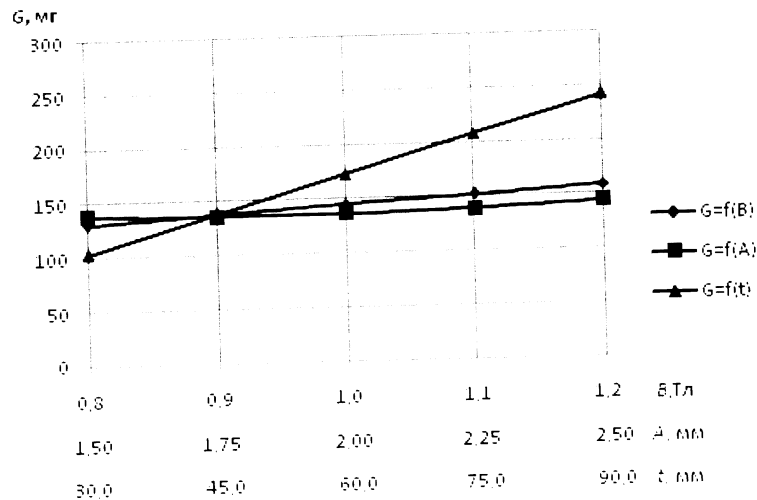


Рис. 3. Зависимость величины съема материала пуансонов ( $G$ ) от магнитной индукции ( $B$ ), амплитуды ( $A$ ) и времени обработки ( $t$ )

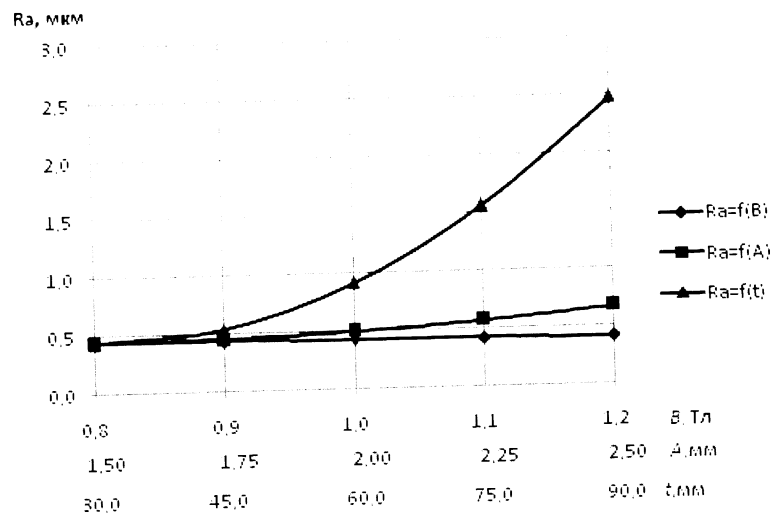


Рис. 4. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности ( $Ra$ ) от магнитной индукции ( $B$ ), амплитуды ( $A$ ) и времени обработки ( $t$ )

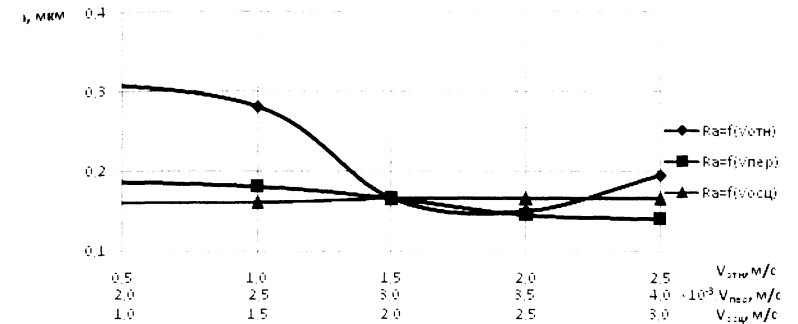


Рис. 5. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности ( $Ra$ ) от скорости резания ( $V_{\text{cut}}$ ), переносной ( $V_{\text{пер}}$ ) и осциллирующей ( $V_{\text{осц}}$ ) скоростей

Полученное в работе аналитическое решение задачи по нахождению силовой характеристики магнитно-абразивной обработки через напряженность магнитного поля позволяет прогнозировать возможность обработки сложнопрофильных поверхностей с использованием непрофилированных полюсных наконечников без потери выходных показателей процесса. Данный подход значительно сокращает номенклатуру и трудоемкость изготовления полюсных наконечников.

#### Список использованных источников

1. Радзевич, С.П. *Формообразование поверхностей деталей. Основы теории* / С.П. Радзевич. — Киев: Растан, 2001. — 592 с.
2. Акулович, Л.М. *Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки деталей различного профиля* / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. — Минск: БГАТУ, 2013. — 346 с.
3. Кожуро, Л.М. *Обработка деталей машин в магнитном поле*. / Л.М. Кожуро, Б.П. Чемисов — Минск.: Наука и техника, 1995. — 232 с.
4. Baron, Yu. *New Tendencies in Finishing Technologies* / Yu. Baron, A. Babichev, A. Baboshkin, Z. Kremen, E. Repnikova // *Proceedings of 2nd Asia-Pacific Forum on Precision Surfaces and Deburring Technology*, Seoul, Korea, 22–24 July 2002. — Vol. 2. — P. 54–64.
5. Куликовский, А.Г. *Магнитная гидродинамика* / А.Г. Куликовский, Г.А. Любимов. — М.: Логос, 2005. — 326 с.
6. Евдокимов, Ф.Е. *Теоретические основы электротехники* / Ф.Е. Евдокимов. — М.: ACADEMIA, 2004. — 560 с.

Статья поступила в редакцию 22.03.2014 г.