

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА СТЕРЖНЕВОГО СЛОЖНОПРОФИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

Л.М. Акулович, докт. техн. наук, профессор, Л.Е. Сергеев, канд. техн. наук, доцент, В.Е. Бабич, канд. техн. наук, Е.В. Сенчуров, ассистент, В.В. Шабуня, аспирантка (БГАТУ)

Аннотация

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования топографии магнитного поля при магнитно-абразивной обработке стержневого сложнопрофильного инструмента, определены технологические параметры и режимы обработки.

The results of theoretical and experimental study of the topography of the magnetic field in magnetic abrasive machining of multi-core tool are given, process parameters and modes of treatment are defined.

Введение

В машиностроении широко применяют высокопроизводительные процессы изготовления деталей холодным деформированием. В качестве инструментов для осуществления этих процессов используется стержневой инструмент, как правило, сложного профиля (пуансоны), отличающегося от цилиндрического. Установлено [1], что основными причинами выхода из строя пуансонов являются: адгезия контактной части материала пуансона к материалу обрабатываемой поверхности (30%), деформация (35%) и скалывание рабочей части пуансона (35%). При этом практика показывает, что на долговечность пуансонов существенное влияние оказывает качество их рабочих поверхностей.

Показатели качества поверхности стержневого инструмента формируются в процессе изготовления, в основном на заключительных операциях, и поэтому этим операциям в технологических процессах должно уделяться особое внимание. Форма сложнопрофильного пуансона предопределила в качестве отделочной операции полирование. Наибольшее применение получило полирование на настольношлифовальных бабках (НШ-01) с ручной подачей наждачной шлифовальной бумаги (ГОСТ 5009-82 М40) к обрабатываемой поверхности. Качество поверхности при такой обработке зависит от квалификации рабочего. Поэтому недостатком полирования является низкая производительность и высокий процент брака (до 10%) [1].

Для обработки инструментов со сложным профилем рабочей части наиболее эффективными являются способы, основанные на использовании эластичной связки абразивных частиц. После проведения анализа отечественных и зарубежных источников, установлено, что одним из таких способов является технология магнитно-абразивной обработки (МАО) [1-4], обеспечивающая высокое качество рабочей поверхности. Согласно [3, 4], при использовании МАО была решена задача финишной обработки внутренних поверхностей колец прецизионных подшипников и удаление заусенцев после механической обработки ступенчатых длинномерных валов. При МАО режущим инструментом является ферроабразивный поро-

шок (ФАП), который находится в рабочем зазоре в подвижно-скоординированном состоянии. Роль связки между абразивными зёрнами выполняет магнитное поле, обладающее упругими силами воздействия на зёрна порошка (рис. 1).

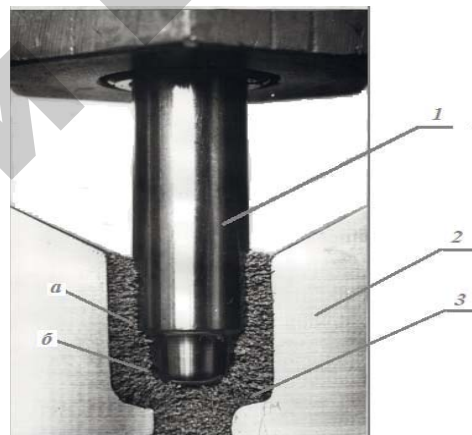


Рисунок 1. Зона МАО пуансона:
1 – пуансон; 2 – полюсный наконечник; 3 – ферроабразивная щетка; а, б – исследуемые участки

Однако технологические закономерности распределения магнитных потоков при обработке стержневого инструмента сложного профиля недостаточно изучены, что не позволяет обеспечить равномерную обработку поверхности и сдерживает применение этого способа при обработке пуансонов. Интенсивность МАО зависит от того, как сформируется рабочая среда в виде ФАП и смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) и как силы магнитного поля воздействуют на нее [5]. В связи с этим, для интенсификации МАО поверхностей сложного профиля необходимо знать топографию магнитного поля в рабочем зазоре, произвести ее формирование и осуществить процесс управления параметрами магнитного поля. В соответствии с этим, в данной работе поставлены и решены следующие задачи: исследовать топографию магнитного поля в рабочем зазоре для различных составов ФАП; исследовать изменение топографии магнитного поля при различной степени

заполнения рабочей зоны ФАП; исследовать зависимость производительности МАО и шероховатости обработанной поверхности от времени обработки.

Основная часть

В настоящей работе приводится вариант построения и анализа топографии магнитного поля при МАО поверхностей сложного профиля, заключающийся в разработке математической модели на основе матричного представления уравнений Максвелла с учетом физических явлений, сопровождающих процесс МАО, и сопоставление этой модели с полученными экспериментальными данными.

На основе обобщения эмпирических данных, Дж. К. Максвеллом были сформулированы фундаментальные уравнения классической макроскопической электродинамики, описывающие электромагнитные явления, имеющие в современных обозначениях (система СИ) вид [6, 7]:

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}, \text{rot } \vec{H} = 4\pi \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$

$$\vec{E} = -[\vec{B}, u] - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad } \varphi, \quad \vec{E} = \frac{4\pi}{\varepsilon} \vec{D},$$

$$\sigma \vec{E} = \vec{j}, \vec{j}_{\text{полн}} = \vec{j} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$

$$\text{div } \vec{D} = 4\pi \rho, \text{div } \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0,$$

где \vec{B} – магнитная индукция магнитного поля; \vec{H} – напряженность магнитного поля; \vec{E} – напряженность электрического поля; \vec{D} – электрическое смещение; \vec{A} – векторный магнитный потенциал; φ – скалярный магнитный потенциал; \vec{j} – плотность электрического тока; ρ – плотность электрического заряда; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; u – мгновенное значение напряжения индукции; σ – удельная проводимость.

На сегодняшний день основной формой представления системы уравнений Максвелла является дифференциальная форма, предложенная Г. Герцем и О. Хевисайдом [6, 7]:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} + \vec{j}^{cm},$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho + \rho^{cm}, \text{div } \vec{B} = 0.$$

Используя математические преобразования для векторов \vec{E} и \vec{H} , определяем \vec{D} и \vec{B} через тензоры электрической и магнитной проницаемости [6, 7]:

$$D_{x_1} = \varepsilon_{x_1 x_1} E_{x_1} + \varepsilon_{x_1 x_2} E_{x_2} + \varepsilon_{x_1 x_3} E_{x_3},$$

$$D_{x_2} = \varepsilon_{x_2 x_1} E_{x_1} + \varepsilon_{x_2 x_2} E_{x_2} + \varepsilon_{x_2 x_3} E_{x_3},$$

$$D_{x_3} = \varepsilon_{x_3 x_1} E_{x_1} + \varepsilon_{x_3 x_2} E_{x_2} + \varepsilon_{x_3 x_3} E_{x_3},$$

$$B_{x_1} = \mu_{x_1 x_1} H_{x_1} + \mu_{x_1 x_2} H_{x_2} + \mu_{x_1 x_3} H_{x_3},$$

$$B_{x_2} = \mu_{x_2 x_1} H_{x_1} + \mu_{x_2 x_2} H_{x_2} + \mu_{x_2 x_3} H_{x_3},$$

$$B_{x_3} = \mu_{x_3 x_1} H_{x_1} + \mu_{x_3 x_2} H_{x_2} + \mu_{x_3 x_3} H_{x_3}.$$

Рассмотрим следующую задачу. Имеется стационарный магнитопровод с магнитной проницаемостью μ_2 . В магнитопроводе сделан разрез для создания рабочего зазора с оппозитным расположением границ $f(x_1)$ и $g(x_1)$, соответственно (рис. 2). Среда в разрезе имеет относительную магнитную проницаемость μ_1 .

Считая относительную магнитную проницаемость в магнитопроводе и разрезе однородной, рассмотрим уравнение Максвелла для стационарных

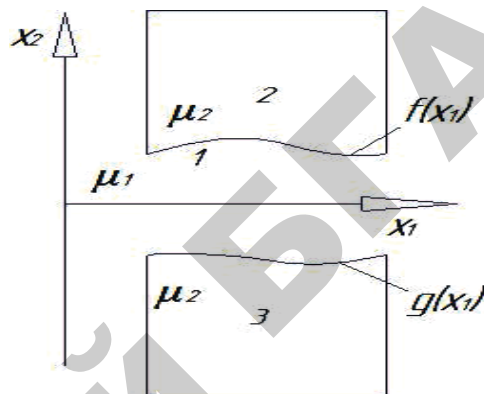


Рисунок 2. Схема магнитопровода с разрезом сложного профиля

полей как двумерную задачу путем использования явного вида матрицы-столбца Φ .

$$\partial \xi^1 \Phi_{12} + \partial \xi^2 \Phi_{12} = 0, \quad (1)$$

где ξ^1, ξ^2 – матрицы следующего вида:

$$\xi^1 = \begin{pmatrix} 0^4 & \gamma^1 \\ -\gamma^1 & 0^4 \end{pmatrix}, \xi^2 = \begin{pmatrix} 0^4 & \gamma^2 \\ \gamma^2 & 0^4 \end{pmatrix}, 0^4 = \begin{pmatrix} 0^2 & 0^2 \\ 0^2 & 0^2 \end{pmatrix},$$

$$\gamma^1 = \begin{pmatrix} 0^2 & \alpha^1 \\ -\alpha^1 & 0^2 \end{pmatrix}, \gamma^2 = \begin{pmatrix} \alpha^2 & 0^2 \\ 0^2 & -\alpha^2 \end{pmatrix}, 0^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\alpha^1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \alpha^2 = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Следуя алгебраическому методу разделения переменных, Φ_{12} представим в виде произведения матриц от соответствующих переменных:

$$\Phi_{12} = \Phi_1 \Phi_2, \quad (2)$$

для которых справедливы следующие соотношения:

$$\Phi_1 = \Phi_1^k + \Phi_1^a, [\Phi_1^k, \xi^2] = 0, [\Phi_1^a, \xi^2]^+ = 0, \quad (3)$$

$$\Phi_2 = \Phi_2^k + \Phi_2^a, [\Phi_2^k, \xi^1] = 0, [\Phi_2^a, \xi^1]^+ = 0, \quad (4)$$

$$[\Phi_1, \Phi_2] = 0. \quad (5)$$

С учетом формул (3, 4), путем дифференцирования, уравнения Максвелла в матричной формулировке приобретают вид:

$$\partial \xi^1 \Phi_1 = \Phi_1 K_{12} \partial \xi^2 \Phi_2 = \Phi_2 K_{12}. \quad (6)$$

Полагая электрическую составляющую поля постоянной, получаем частное решение уравнения:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ H_{0y} + \{C_{11} \sin(\lambda x_1) + C_{12} \cos(\lambda x_1)\} \{C_{21} e^{\lambda x_2} + C_{22} e^{-\lambda x_2}\} \\ H_{0x} + \{-C_{12} \sin(\lambda x_1) + C_{11} \cos(\lambda x_1)\} \{C_{21} e^{\lambda x_2} - C_{22} e^{-\lambda x_2}\} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Здесь λ представляет собой константу разделения сред.

Направим ось x_2 вдоль центральной линии магнитопровода, и пусть границы зазора (верхняя и нижняя) задаются функциями $f(x_1)$ и $g(x_1)$ соответственно. Поле на i -той границе внутри ограниченной ими области в векторной форме можно описать следующим образом:

$$H_1^i = H_n^i(x_1) \sin(\alpha) + H_\tau^i(x_1) \cos(\alpha) = \rho_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}}, \quad (8)$$

$$H_2^i = H_n^i(x_1) \cos(\alpha) + H_\tau^i(x_1) \sin(\alpha) = \rho_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}}. \quad (9)$$

Причем, справедливы соотношения в комплексной форме на основании инвариантности уравнений:

$$F(-x_1 + ix_2) = \frac{H_2(x_1, x_2) - iH_1(x_1, x_2)}{2},$$

$$G(x_1 + ix_2) = \frac{H_2(x_1, x_2) + iH_1(x_1, x_2)}{2}. \quad (10)$$

Определяя $F(-x_1 + ix_2)$, $G(x_1 + ix_2)$ на i -той границе через нормальные составляющие поля, получим:

$$F_i(-x_1 + if_i(x_1)) = \frac{1}{2} \left[\rho_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} - i\rho_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} - iq_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} \right],$$

$$G_i(x_1 + if_i(x_1)) = \frac{1}{2} \left[\rho_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + i\rho_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + iq_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} \right].$$

Опустив достаточно громоздкие вычисления для поля внутри разрыва магнитопровода, напряженность магнитного поля представим в виде:

$$\begin{aligned} \tilde{H}_1(x_1, x_2) &= \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \{i\tilde{C}_{\lambda 1} e^{\lambda(-x_1+ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 4} e^{-i\lambda(-x_1+ix_2)} - i\tilde{C}_{\lambda 2} e^{\lambda(x_1+ix_2)} - i\tilde{C}_{\lambda 3} e^{-i\lambda(x_1+ix_2)}\} = \\ &= i\tilde{F}(-x_1 + ix_2) - i\tilde{G}(x_1 + ix_2), \\ \tilde{H}_2(x_1, x_2) &= \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \{\tilde{C}_{\lambda 1} e^{\lambda(-x_1+ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 4} e^{-\lambda(-x_1+ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 2} e^{\lambda(x_1+ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 3} e^{-\lambda(x_1+ix_2)}\} = \\ &= \tilde{F}(-x_1 + ix_2) - \tilde{G}(x_1 + ix_2), \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\tilde{F}(-x_1 + ix_2) = \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \{\tilde{C}_{\lambda 1} e^{\lambda(-x_1+ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 4} e^{-\lambda(-x_1+ix_2)}\},$$

$$\tilde{G}(x_1 + ix_2) = \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \{\tilde{C}_{\lambda 2} e^{\lambda(x_1+ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 3} e^{-\lambda(x_1+ix_2)}\}$$

В качестве исходных материалов применялись ФАП: 1 – $Fe - TiC$; 2 – $Fe - Al_2O_3$; 3 – $Fe - Al_2O_3 + (Ni-Co)$. Согласно произведенным расчетам по вышеуказанной методике для рабочей зоны по обработке пуансонов способом МАО, установлено, что величина напряженности для участка a (рис. 1) составляет 115 А/м, для участка b (рис. 1) – 104 А/м. Поскольку μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость ФАП 1 – $Fe - TiC$ $\mu_0 = 9,8$ мкГ/м; 2 – $Fe - Al_2O_3$ $\mu_0 = 7,8$ мкГ/м; 3 – $Fe - Al_2O_3 + (Ni-Co)$ $\mu_0 = 8,6$ мкГ/м [2], то результаты показывают, что величина магнитной индукции должна составлять на участке a для порошков: 1 – $Fe - TiC$ $B = 1,127$ Тл; 2 – $Fe - Al_2O_3$ $B = 0,897$ Тл; 3 – $Fe - Al_2O_3 + (Ni-Co)$ $B = 0,989$ Тл; на участке b : 1 – $Fe - TiC$ $B = 1,019$ Тл; 2 – $Fe - Al_2O_3$ $B = 0,811$ Тл; 3 – $Fe - Al_2O_3 + (Ni-Co)$ $B = 0,894$ Тл.

Для подтверждения правильности расчета магнитного поля были проведены экспериментальные исследования. Режимы обработки: окружная скорость $V_{окр} = 1,5$ м/с; скорость осцилляции $V_o = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции $A=2$ мм, напряженность $H = 104$ А/м, магнитная индукция в рабочем зазоре (B) при наличии порошка: 1 – $Fe - TiC = 1,1$ Тл; 2 – $Fe - Al_2O_3 = 0,85$ Тл, 3 – $Fe - Al_2O_3 + (Ni-Co) = 0,95$ Тл; коэффициент заполнения рабочего зазора $k_3=1$; величина рабочего зазора $\delta = 1,2$ мм; зернистость порошка $\Delta = 160/125$ мкм; СОТС - СинМА-1 (ТУ 38.5901176 - 91), 3-% водный раствор. Массовый съем металла определялся взвешиванием образцов до и после обработки на аналитических лабораторных весах ВЛТ – 1 с точностью до 0,0001г. Исследование шероховатости поверхности образцов выполнялось на профилографе-профилометре модели 252 «Калибр». Измерение магнитной индукции производилось на тесламетре Т-3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований величины магнитной индукции в зоне b отличаются до 15 %, что указывает на возможность применения предложенной методики расчета магнитных полей.

На рис. 3 представлена топография магнитного поля участка b рабочей зоны для обработки пуансонов способом МАО, на котором показаны векторы магнитной индукции, вектор градиента поля, вектор сил, действующих на ферромагнитные зерна.

В результате экспериментальных исследований установили, что наибольший съем металла осуществляет порошок $Fe - TiC$ (рис. 4 а). Графическая зависимость массового съема металла от времени обработки представлена на рис. 4 б, из которого следует, что после 15 секунд обработки зависимость $D=f(\tau)$ для исследуемых порошков носит возрастающий характер.

На рис. 5 приведены результаты исследований влияния продолжительности обработки на шероховатость поверхности. При МАО формирование микропрофиля происходит первые 15 секунд, в отличие от операции полирования. В пределах исследованного диапазона с увеличением длительности обработки шероховатость поверхности уменьшается, что обусловлено удалением исходных микронеровностей обрабатываемой поверхности ФАП.

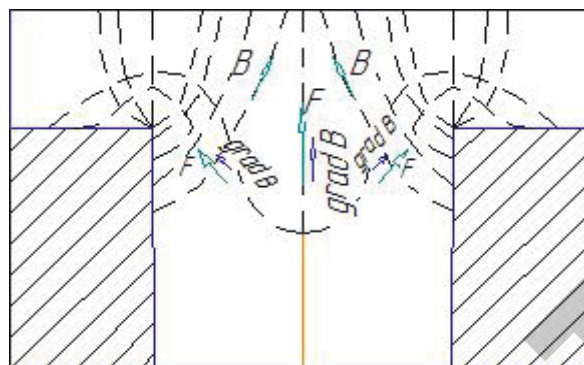


Рисунок 3. Схема топографии магнитного поля в рабочей зоне на участке b :

B – вектор магнитной индукции поля; $grad B$ – вектор градиента поля; F – вектор сил, действующих на ферромагнитные зерна

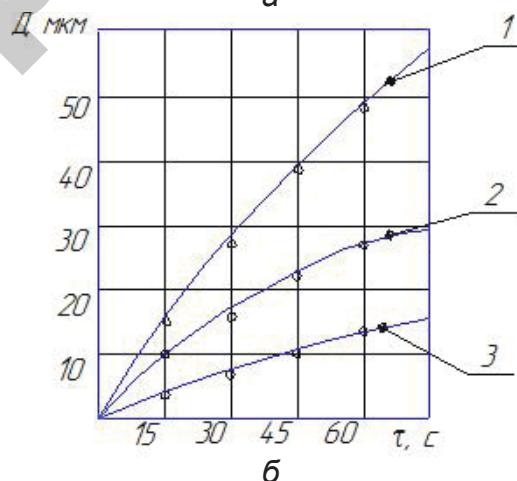
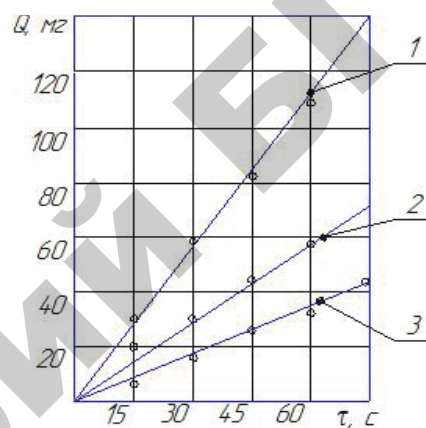


Рисунок 4. Зависимость величины массового съема металла Q (а) и размерного съема металла D (б) от времени τ обработки: (1 – $Fe - TiC$; 2 – $Fe - Al_2O_3$; 3 – $Fe - Al_2O_3 + (Ni-Co)$)

На рис. 6 представлены результаты исследования заполнения рабочей зоны ФАП на величину размерного съема металла. При степени заполнения рабочей зоны ФАП, равной 1, осуществляется реализация наибольшего съема металла.

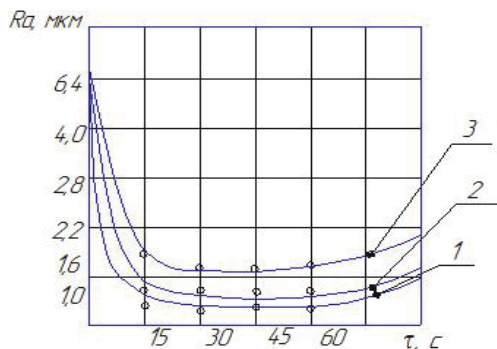


Рисунок 5. Зависимость шероховатости (Ra) поверхности от времени (τ) обработки: (1 – $Fe - TiC$; 2 – $Fe - Al_2O_3$; 3 – $Fe - Al_2O_3 + (Ni-Co)$)

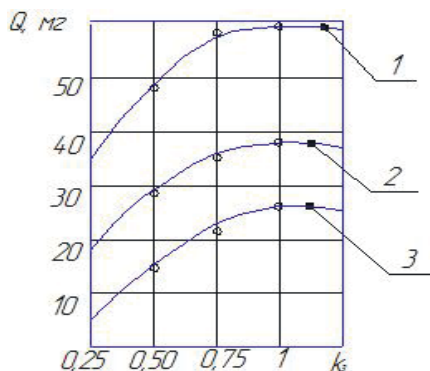


Рисунок 6. Влияние степени заполнения (K_3) рабочей зоны ФАП на величину массового съема металла (Q): (1 – $Fe - TiC$; 2 – $Fe - Al_2O_3$; 3 – $Fe - Al_2O_3 + (Ni-Co)$)

Выводы

На основе построения и анализа топографии магнитного поля, полученных результатов экспериментальных исследований, установлены параметры магнитного поля и определены технологические

режимы магнитно-абразивной обработки стержневого сложнопрофильного инструмента, обеспечивающие при использовании порошка $Fe - TiC$ шероховатость поверхности $Ra = 0,32$ мкм и производительность 2 мг/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иконников, А.М. Совершенствование технологии магнитно-абразивной обработки фасонных поверхностей: автореф. дис. канд. техн. наук:05.03.01 / А.М. Иконников; Алтайский политехнический институт им. Ползунова. – Барнаул, 2004 – 18 с.
2. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 172 с.
3. Yamaguchi Hitomi, Shinmura Takeo, Kanuko Takehiro. Development of a new internal finishing process applying magnetic abrasive finishing by use of pole rotation system // Bull. Jap. Soc. Precis. Eng. V. – 3. – № 4, 1996. – P. 32-37.
4. Dehof, A. Magnetabrasives Entgarden der Zahnstimmanten von Zahnradern / A. Dehof, R. Krull, W. Mattke // Werkstatt und Betrieb. – 2004 – V. 117. – S. 21-26.
5. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын [и др.]; под общ. ред. П.И. Ящерицына. – Мн.: Физико-технический ин-т, 1997. – 416 с.
6. Акулович, Л.М. Моделирование магнитостатических полей при магнитно-абразивной обработке деталей/ Л.М. Акулович, И.Е. Андрушкевич, Л.Е. Сергеев // Докл. II Междунар. конф. «Математическое моделирование и фундаментальные уравнения». – Мн., 2009. – С. 31-33.
7. Андрушкевич, И.Е. Методы разделения переменных в волновых уравнениях / И.Е. Андрушкевич. – Новополоцк: ПГУ, 2010. – 239 с.

Малогабаритная система очистки рабочих жидкостей гидравлических систем

Предназначена для профилактической очистки рабочих жидкостей гидравлических приводов мобильной сельскохозяйственной техники.

Основные технические данные

Производительность	Не менее 24 л/мин
Давление на входе в блок центрифугирования	0,8 МПа
Давление на входе в блок фильтрации	0,2-0,3 МПа
Давление на выходе из блока фильтрации	0,15 МПа
Тонкость очистки	15-40 мкм

Применение системы позволяет при обкатке двигателей расходовать масло без остатка, не снижать качество повторно используемого моторного масла, постоянно добавляя а него свежее товарное масло (гомогенизировать), полностью устранить расход электроэнергии, необходимой для подогрева масла, отказаться от необходимости хранения и утилизации масла. Она может применяться на ремонтно-обслуживающих предприятиях, а также непосредственно в хозяйствах для технического обслуживания машинно-тракторного парка.