

6. Спиридонов, В.С. Фильтровальные перегородки из спеченных металлических сеток для встроенных фильтров авиационных гидросистем / В.С. Спиридонов, Ю.М. Новиков, В.А. Большаков // Безопасность в техносфере, №4. - 2015. - С. 39 – 45.

7. Кусин, Р.А. Оптимизация конструкции фильтров с ортотропной структурой на основе тканых сеток при ограниченных возможностях варьирования управляющими факторами / Р.А. Кусин, М.М. Дечко, И.Н. Черняк [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 234–241.

8. Пат. 4811 Респ. Беларусь, МПК 7 В 01D 29/44. Щелевой фильтр: заявлено 29.06.1998: опубл. 30.12.2002 / Витязь П.А., Кусин Р.А., Валькович И.В., Капцевич В.М., Круглей В.П.; заявители ГНУ и БГАТУ;

9. Пат. РБ № 949 Респ. Беларусь. U. В 01D 29/00. Композиционный фильтр: заявлено 18.12.2002: опубл. 30.09.2003 / Капцевич В.М., Крутов А.В., Корнеева В. К., Азаров Г.А., Кусин Р.А., Бокань Г.А., Лыков И.Ю., Кусин А.Р.; заявители ГНУ ИПМ, БГАТУ.

10. Aliaksandr Ph. Ilyushchanka, Aleksey R. Kusin, Iryna M. Charniak, Dzmitryi I. Zhehzdryn, Ruslan A. Kusin, Natalia V. Rutkovskaya, Evgeniy N. Eremin and Tsanka D. Dikova / Equipment for Catalytic Water Purification with a Gas-Saturated Reactor / Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, KOD 2021. Mechanisms and Machine Science, vol 109. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88465-9_17 2022. P. 201-206

Summary. The paper describes a filter material with an orthotropic structure, developed by the O.V. Roman Institute of Powder Metallurgy and BSATU, consisting of a package of woven meshes, and the basic design of filter elements based on it, and demonstrates the prospects for their application in agricultural enterprises.

УДК 621.923

Акулович Л.М.¹, доктор технических наук, профессор;

Сергеев Л.Е.¹, доктор технических наук, доцент;

Алешко А.Ю.¹, студент;

Цекун В.И.², старший научный сотрудник

¹ Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь

² Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОГРАФИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАХ РАБОЧЕГО ЗАЗОРА

Аннотация. В статье приведены результаты исследования топографии магнитного поля при эквидистантной и плоской формах рабочего зазора. Приведен расчет напряженности магнитного поля и распределение этой напряженности в рабочем зазоре. Разработана математическая модель, позволяющая определить максимальную напряженность магнитного поля в рабочем зазоре.

Abstract. The article presents the results of the study of the topography of the magnetic field with equidistant and flat forms of the working gap. The calculation of the magnetic field strength and the distribution of this intensity in the working gap are given. A mathematical model has been developed that allows to determine the maximum intensity of the magnetic field in the working gap

Ключевые слова. Сложнопрофильные поверхности, магнитно-абразивная обработка, рабочая технологическая среда, рабочий зазор, электромагнитная система, топография магнитного поля.

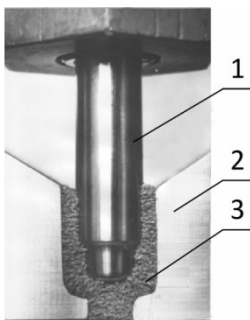
Key words. Complex-profile surfaces, magnetic abrasive treatment, working technological medium, working gap, electromagnetic system, topography of magnetic field.

Мировой и отечественный опыт свидетельствует о том, что применение деталей типа тел вращения со сложнопрофильными поверхностями (СПП) позволяет снизить металлоемкость изделий (от 20% до 30%) за счет уменьшения количества деталей в узлах машин и повысить конкурентноспособность изделий повышением качества и уменьшением их себестоимости до 30% [1–2]. Механическую обработку СПП традиционно производят на специальных станках и их многообразие обусловлено тем, что для каждого вида профиля поверхности требуются свои, отличающиеся от других, формообразующие движения. Однако для таких деталей существует проблема финишной тонкой обработки, заключающаяся в том, что обработка производится специальным абразивным инструментом, у которого профиль режущей кромки должен геометрически или программно отражать топологию обрабатываемой поверхности. При обработке таким инструментом поверхностей с переменной кривизной возникают дополнительные погрешности формы и разброс параметров шероховатости, что приводит к неоднородности показателей качества и необходимости дополнительных доводочных операций. Альтернативным вариантом финишной обработки СПП тел вращения могут быть технологии с использованием концентрированных потоков энергии, к числу которых относится магнитно-абразивная обработка (МАО) [3]. Поэтому отсутствие требуемого информативного объема о топографии магнитного поля (МП), определяемой его магнитной напряженностью H и распределении этой напряженности в рабочем зазоре приводит к эмпирическому подходу при использовании процесса съема материала при МАО СПП, который заключается либо в росте опытно-экспериментальных работ по поиску оптимальной схемы обработки, либо в резком увеличении мощности технологического оборудования для обеспечения необходимого давления режущего инструмента. Цель исследования заключается в разработке математической модели топографии МП в рабочем зазоре в зависимости от его конструктивных параметров для обеспечения производительности и качества процесса МАО СПП.

Одним из важных факторов повышения качества и производительности процесса МАО СПП является создание и применение рабочей техно-

логической среды (РТС), состоящей из ферроабразивного порошка (ФАП) и смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), и формируемой магнитным полем (МП). При МАО роль режущего инструмента выполняет порция ФАП, а заготовку для обработки размещают между полюсами электромагнитной системы (ЭМС). Пространство между полюсами ЭМС, частично или полностью заполненное ФАП, называется рабочей зоной, а пространство между обрабатываемой поверхностью заготовки и полюсами ЭМС – рабочим зазором, рисунок 1.

Установление значений H в любой точке рабочего зазора определяет их одинаковый диапазон на каждом его локальном участке, что позволяет обеспечить равенство давления ФАП на обрабатываемую поверхность детали и позволяет изготовить рациональную конструкцию ЭМС в зависимости от выбранной технологической схемы обработки. Детальное топографическое исследование МП связано с правильным выбором граничных условий и реализовано путем решения уравнений Максвелла матричными формами и применением метода комплексного переменного.



1 – пуансон; 2 – полюсный наконечник; 3 – ферроабразивная «щетка»

Рисунок 1 – Фотография рабочей зоны МАО пуансона

Считаем, что имеется стационарный магнитопровод с магнитной проницаемостью μ . Поскольку среда в рабочем зазоре является однородной, то для решения воспользуемся матричной записью уравнений Максвелла для стационарных полей. Нормальную и тангенциальную составляющие поля внутри магнитопровода обозначим $p_1(x_1)$, $p_2(x_2)$ и $q_1(x_1)$, $q_2(x_2)$ соответственно. В этом случае поле на i -й границе внутри ограниченной ими области можно описать следующим образом:

$$H_i^t = H_n^i(x_i) \sin(\alpha) + H_\tau^i(x_i) \cos(\alpha) =$$

$$= p_i(x_i) \frac{f_i'(x_i)}{\sqrt{1+f_i'(x_i)^2}} + q_i(x_i) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_i)^2}}, \quad (1)$$

$$H_2^i = H_n^i(x_1) \cos(\alpha) + H_\tau^i(x_1) \sin(\alpha) =$$

$$= \rho_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}}, \quad (2)$$

где $H_\tau^i(x_1)$ – тангенциальная составляющая магнитного поля;

$H_n^i(x_1)$ – нормальная составляющая магнитного поля;

$f_i(x_1)$ – функция кривой, определяющей границу расчетной области магнитного поля в виде формы полюсного наконечника;

$\rho_i(x_1)$ – нормальная составляющая магнитного поля внутри магнитопровода на его границе;

α – угол нормали профиля магнитопровода;

$q_i(x_1)$ – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля внутри магнитопровода на его границе.

В качестве граничных условий приняты:

$q_1(x_1) = q_2(x_2)$ – тангенциальная компонента непрерывна при прохождении границы раздела сред;

$\mu_{a1} \rho_1(x_1) = \mu_{a2} \rho_2(x_2)$ – нормальная компонента претерпевает разрыв, определяемый отношением магнитных проницаемостей сред.

Схемы рабочего зазора при магнитно-абразивной обработке эквидистантной и плоской форм представлены на рисунке 2 (а, б).

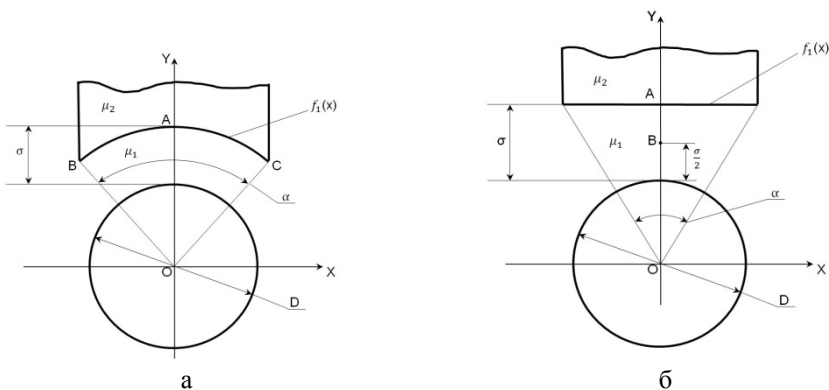


Рисунок 2– Схемы эквидистантного (а) и плоского (б) зазора при МАО

где μ_1 – магнитная проницаемость зазора, Гн/м;

μ_2 – магнитная проницаемость полюсного наконечника, Гн/м;

α – угол нормали профиля магнитопровода, град.;

σ – рабочий зазор, мм;

D – диаметр, мм;

$f_1(x)$ – функция границы верхнего зазора.

Каждая из двух схем имеет ряд конструктивных особенностей, определяемых конструкцией ЭМС. Направим ось Y вдоль центральной линии магнитопровода. Пусть граница верхнего зазора задаётся функцией $f_1(x)$. Нормальная и тангенциальная составляющие поля внутри магнитопровода на верхней границе обозначим $\rho_1(x)$ и $q_1(x)$ соответственно. В этом случае поле на верхней границе внутри ограниченной ею области можно описать следующим образом:

$$H_x^1 = \rho_1(x) \frac{f_1'(x)}{\sqrt{1 + f_1'^2(x)}} + q_1(x) \frac{1}{\sqrt{1 + f_1'^2(x)}};$$

$$H_y^1 = \rho_1(x) \frac{1}{\sqrt{1 + f_1'^2(x)}} + q_1(x) \frac{f_1'(x)}{\sqrt{1 + f_1'^2(x)}}.$$

Рассмотрим эквидистантную форму рабочего зазора при МАО:

Обозначим $OA = \frac{D}{2} + \sigma = r$ – радиус дуги ВАС. Уравнение окружности с радиусом r и центром в точке O :

$$x^2 + y^2 = r^2 \rightarrow y = \pm \sqrt{r^2 - x^2},$$

где знак $(+)$ описывает верхнюю часть окружности. Поэтому для верхней границы магнитопровода получаем

$$f_1(x) = \sqrt{r^2 - x^2} \quad \text{или} \quad f_1(x) = \sqrt{\left(\frac{D}{2} + \sigma\right)^2 - x^2},$$

где x лежит в интервале

$$-\left(\frac{D}{2} + \sigma\right) \sin \frac{\alpha}{2} \leq x \leq \left(\frac{D}{2} + \sigma\right) \sin \frac{\alpha}{2}.$$

В (1) вычислим дробные выражения. Применяя формулу производной от квадратного корня

$$\left(\sqrt{f(x)}\right)'_x = \frac{f'(x)}{2\sqrt{f(x)}},$$

по (2) вычисляем производную функции $f_1(x)$:

$$f_1'(x) = \frac{\left[\left(\frac{D}{2} + \sigma\right)^2 - x^2\right]'}{2\sqrt{\left(\frac{D}{2} + \sigma\right)^2 - x^2}} = \frac{-2x}{2\sqrt{\left(\frac{D}{2} + \sigma\right)^2 - x^2}} = -\frac{x}{\sqrt{\left(\frac{D}{2} + \sigma\right)^2 - x^2}}$$

$$f_1'^2(x) = \frac{x^2}{\left(\frac{D}{2} + \sigma\right)^2 - x^2}.$$

Далее находим

$$\begin{aligned}\sqrt{1+f_1'^2(x)} &= \sqrt{1+\frac{x^2}{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2+x^2}{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2}{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}} = \\ &= \frac{\frac{D}{2}+\sigma}{\sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}}.\end{aligned}$$

Дробные выражения в (1) принимают вид

$$\begin{aligned}\frac{f_1'(x)}{\sqrt{1+f_1'^2(x)}} &= -\frac{x}{\sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}} \cdot \frac{\frac{D}{2}+\sigma}{\sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}} = -\frac{x}{\sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}}{\frac{D}{2}+\sigma} = \\ &= -\frac{x}{\frac{D}{2}+\sigma} \cdot \\ \frac{1}{\sqrt{1+f_1'^2(x)}} &= \frac{\sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}}{\frac{D}{2}+\sigma}.\end{aligned}$$

Получим

$$\frac{f_1'(x)}{\sqrt{1+f_1'^2(x)}} = -\frac{x}{\frac{D}{2}+\sigma}, \quad \frac{1}{\sqrt{1+f_1'^2(x)}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}}{\frac{D}{2}+\sigma}. \quad (3)$$

Подставляя формулы (3) в формулы (1), получаем

$$\begin{aligned}H_x^I &= \rho_1(x) \cdot \left(-\frac{x}{\frac{D}{2}+\sigma}\right) + q_1(x) \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}}{\frac{D}{2}+\sigma} = \frac{-\rho_1(x) \cdot x + q_1(x) \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}}{\frac{D}{2}+\sigma} \\ H_y^I &= \rho_1(x) \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}}{\frac{D}{2}+\sigma} + q_1(x) \cdot \left(-\frac{x}{\frac{D}{2}+\sigma}\right) = \frac{\rho_1(x) \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2} - q_1(x) \cdot x}{\frac{D}{2}+\sigma}.\end{aligned}$$

Окончательно получаем проекцию напряженности магнитного поля на ось X на верхней границе внутри ограниченной ею области,

$$H_x^1 = \frac{-\rho_1(x) \cdot x + q_1(x) \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{2} + \sigma\right)^2 - x^2}}{\frac{D}{2} + \sigma} \quad (4)$$

и проекцию напряженности магнитного поля на ось Y на верхней границе внутри ограниченной ею области,

$$H_y^1 = \frac{\rho_1(x) \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{2} + \sigma\right)^2 - x^2} - q_1(x) \cdot x}{\frac{D}{2} + \sigma} \quad (5)$$

$$\text{где } -\left(\frac{D}{2} + \sigma\right) \sin \frac{\alpha}{2} \leq x \leq \left(\frac{D}{2} + \sigma\right) \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Рассмотрим форму плоского рабочего зазора при МАО:

Из рис. 2 следует $y = OA = \frac{D}{2} + \sigma$. Поэтому для верхней границы магнитопровода получаем функцию

$$f_1(x) = y = \frac{D}{2} + \sigma = \text{const}.$$

Производная от const равна нулю: $f_1'(x) = 0$ и по формулам (1) получаем

$H_x^1 = q_1(x)$ – проекция магнитного поля на ось X на верхней границе внутри ограниченной ею области,

$H_y^1 = \rho_1(x)$ – проекция магнитного поля на ось Y на верхней границе внутри ограниченной ею области,

$$\text{где } -\left(\frac{D}{2} + \sigma\right) \sin \frac{\alpha}{2} \leq x \leq \left(\frac{D}{2} + \sigma\right) \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Таким образом, на основе установленной взаимосвязи конструкции рабочих зазоров и характеристик МП разработана математическая модель, позволяющая определить их основные параметры и условия создания топографии МП при его максимальной магнитной напряженности.

В статье описана математическая модель для расчета напряженности магнитного поля в области рабочего зазора с учетом его геометрических размеров и формы (эквидистантный и плоский) на основе решения уравнений Максвелла матричными формами и применением метода комплексного переменного. Полученная математическая модель реализует функциональную связь между исследуемыми составляющими напряженности магнитного поля и геометрическими факторами рабочего зазора, что обеспечивает эффективность их использования и не требует многократного и громоздкого расчета топографии МП. Сравнение результатов расчетов математической модели с расчетами численными методами, использующими

конечно-разностную аппроксимацию согласно программы Femm, а также экспериментальными данными, полученными применением тесламетра Т-3 показали достаточную точность разработанной модели, поскольку результаты расчетов численными методами согласуются с расчетными и полученными экспериментальными результатами и составляют погрешность для эквидистантного – $14 \div 18$ % и плоского – $10 \div 14$ %, что обеспечивает изготовление рациональной конструкции ЭМС в зависимости от выбранной технологической схемы обработки. Показаны условия неоднородности топографии МП, создаваемой ЭМС, и необходимость применения рабочих зазоров с заданной величиной напряженности МП, которые являются оптимальными для создания высокоэффективной схемы МАО СПП.

Список использованной литературы

1 Ящерицын, П. И. Обработка изделий со сложным профилем в магнитном поле / П. И. Ящерицын, Т. Л. Деев, Л. М. Кожуро // Вестн. машиностроения. – 1994. – № 3. – С. 42–44.

2 Афанасова, Ю. А. Повышение эффективности технологии механической обработки фасонных поверхностей деталей пресс – форм : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Ю. А. Афанасова ; ГОУ ВПО «Белгород. гос. технолог. ун-т им. В. Г. Шухова». – Белгород, 2010. – 19 с.

3 Акулович, Л. М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2019. – 272 с.

Summary. This article describes a mathematical model for calculating the magnetic field strength in the working gap region, taking into account its geometric dimensions and shape (equidistant and planar). This model is based on solving Maxwell's equations using matrix forms and the complex variable method.

УДК 658.51 : 621.81

Акулович Л.М.¹, доктор технических наук, профессор;

Стрига М.В.¹, студент;

Мендалиева С.И.², кандидат технических наук, доцент

¹ Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь

² НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина», г. Астана, Республика Казахстан

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ И ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН ИЗ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований точности и шероховатости поверхностей заготовок при термической резке листового