

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПРЕРЫВИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Докт. техн. наук, проф. АКУЛОВИЧ Л. М., канд. техн. наук, доц. СЕРГЕЕВ Л. Е.,
инж. КОРЗУН А. Е., канд. техн. наук БАБИЧ В. Е.*

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
НПО «Интеграл»*

На формирование шероховатости поверхностей деталей машин и их физико-механических свойств большое влияние оказывают процессы финишной обработки. К числу таких процессов относится магнитно-абразивная обработка (МАО), основанная на использовании энергии электромагнитного поля (ЭМП) в рабочем зазоре между поверхностью полусного наконечника электромагнита и обрабатываемой поверхностью [1, 2].

Известно, что любая финишная абразивная обработка прерывистых поверхностей заготовок деталей имеет более высокий уровень трудозатрат по сравнению с обработкой непрерывных поверхностей. Это обусловлено тем, что для абразивного инструмента с жестко связан-

ным зерном обязательным условием является профилирование режущего контура адекватно обрабатываемой поверхности. В отличие от инструментов с жестко связанным абразивным зерном при МАО ферроабразивная «щетка» обладает возможностью частичного огибания контура обрабатываемой поверхности. Для процесса МАО прерывистых поверхностей одной из главных задач является обеспечить необходимое распределение магнитного потока, который всегда стремится протекать по энергетически выгодному (с наибольшей магнитной проницаемостью) участку магнитной цепи. Для прерывистых поверхностей таким участком является ферромагнитный материал его зуба, а не воздушный промежуток межзубной впади-

ны. Однако главная задача состоит в необходимости обработки межзубной впадины.

Результаты проведенных исследований МАО зубчатых колес [3] показали, что использование эквидистантного (по отношению к наружному диаметру) профиля полюсных наконечников обеспечивает удовлетворительную обработку зубчатых колес с модулем, не превышающим 1 мм. При МАО зубчатых колес с модулем более 1 мм эквидистантный профиль не обеспечивает непрерывность магнитного потока, в результате чего происходит разрыв ферроабразивной «щетки» между поверхностью полюсного наконечника и межзубной впадиной и не обеспечивается требуемое качество обработки.

Следовательно, для возможности МАО прерывистых поверхностей следует определять топографию ЭМП в рабочем зазоре. Топография дает представление о распределении магнитных силовых линий в зазоре со сложным профилем, концентрация этих линий указывает на степень возможного заполнения частицами ФАП межзубной впадины, обеспечивая тем самым давление ферроабразивных частиц на обрабатываемую поверхность. В настоящей работе приводится вариант построения и анализа топографии магнитного поля при МАО прерывистых поверхностей, заключающийся в разработке аналитической модели с учетом физических явлений, сопровождающих процесс МАО, и сопоставление этой модели с полученными результатами.

При создании аналитической модели использован метод конформного преобразования на основе теоремы Кристоффеля – Шварца при следующих условиях: магнитная проницаемость зубьев значительно больше магнитной проницаемости воздушного промежутка впадины, определение топографии производилось только по двум зубьям, поскольку топографии ЭМП присуще свойство симметрии. Так как двумерное пространство обеспечивает достаточно полное представление о топографии магнитного поля, то был осуществлен перевод оси z в бесконечность, что значительно уменьшает объем вычислений, а использование в теореме Кристоффеля – Шварца гиперболических функций $\operatorname{sh} x$ и $\operatorname{ch} x$ исключает показатель периодичности [4]. Это обуславливает необходимость

изменения в процессе МАО прерывистых поверхностей величины зазора между полюсным наконечником и обрабатываемой поверхностью зубчатого колеса и соответственно нескольких вариантов решения задачи. Профиль полюсного наконечника по техническим соображениям целесообразно выполнять в одном из двух конструктивных исполнений. Сущность первого варианта состоит в создании концентратора на полюсном наконечнике оппозитно межзубной впадине. Однако при таком варианте изменение любого геометрического параметра прерывистой поверхности требует создания нового полюсного наконечника, что значительно увеличивает их номенклатуру и экономически может быть неоправданно. Второй вариант предусматривает создание серповидной формы рабочего зазора (рис. 1), топография магнитного поля в котором определяется согласно предлагаемой аналитической модели. Полюсные наконечники с серповидным профилем рабочей поверхности являются унифицированными для МАО определенной группы конструктивных элементов деталей машин.

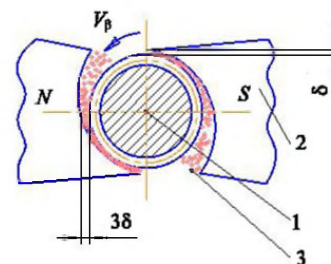


Рис. 1. Схема МАО с переменной величиной рабочего зазора: 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – полюсный наконечник; 3 – ферроабразивный порошок

При расчете топографии ЭМП использована функция комплексного переменного во впадине прерывистой поверхности в виде комплексного потенциала W [5]:

$$W = v + jU, \quad (1)$$

где $v = \text{const}$ – силовые линии магнитного поля; j – векторная величина; U – линии равного потенциала.

$U = \text{const}$, поскольку

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial y},$$

взаимосвязь комплексного потенциала с магнитным полем представляется зависимостью

$$-j \frac{\partial W}{\partial z} = B_x + jB_y, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} B_x &= -\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y}; \\ B_y &= -\frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x}. \end{aligned} \quad (3)$$

Использование комплексного потенциала W для определения магнитной индукции B производилось следующим образом: верхняя полуплоскость $\eta = I_m(\zeta) > 0$ отображалась на реальную область в плоскости z , в которой действует ЭМП с заданным распределением магнитных потенциалов U (рис. 2).

Используя формулу (1) и представив $U = \text{const}$ и $v = \text{const}$ как линии равных значений (поле в рабочем зазоре между профилем полюсного наконечника и обрабатываемой поверхностью), считали, что $W = v + jU$ на верхнюю полуплоскость $\eta = I_m(\zeta)$ таким образом, чтобы точки плоскости ζ , имеющие потенциалы U_1 , U_2 и т. д. перешли в соответствующие кривые $U = \text{const}$ в плоскости W . В результате такого преобразования получим зависимость $W = f_1(\zeta) = f_2(z)$, связывающую комплексный потенциал с реальной конфигурацией области, в которой находится магнитное поле. Для известной функции $W = f_2(z)$ магнитная индукция B определяется с учетом (2)

$$B = \left| \frac{dW}{d\zeta} \frac{d\zeta}{dz} \right|. \quad (4)$$

Поэтому конформное преобразование можно производить на основе теоремы Кристоффеля – Шварца: если $z = f(\zeta)$ представляет собой отображение верхней полуплоскости $\eta = I_m(\zeta) > 0$ на ограниченный многоугольник с углами $\alpha_k \pi$ ($0 < \alpha_k \leq 2$, $k = 1, 2, \dots, n$) при вершинах, причем определенные точки ζ_k действительной оси на плоскости ζ ($-\infty < \zeta_1 < \zeta_2 < \dots < \zeta_n < \infty$) соответствуют вершинам многоугольника на плоскости z , то $f(\zeta)$ имеет вид

$$z = C_1 \int (\zeta - \xi_1)^{\alpha_1 - 1} \dots (\zeta - \xi_n)^{\alpha_n - 1} d\zeta + C_2, \quad (5)$$

где C_1, C_2 – постоянные величины.

В случае если две смежные стороны многоугольника параллельны, точка их пересечения находится в бесконечности, а $\alpha_k = 0$. Формула $z = f(\zeta)$ упрощается, если принять, что одна из точек на оси ξ , принадлежащей плоскости ζ , лежит в бесконечности. В этом случае из формулы (5) исключаются множители типа $(\zeta - \xi_n)^{\alpha_n - 1}$, соответственно расчет упрощается при сохранении результата. Пусть часть поверхности имеет магнитный потенциал U_1 , а остальные U_2 . При наличии разности потенциалов $U_1 - U_2 = U_0$ внутри рабочего зазора магнитное поле будет равномерным. Отобразив плоскость комплексного потенциала $W = v + jU$ на верхнюю полуплоскость $\eta = I_m(\zeta) > 0$ таким образом, чтобы точки плоскости ζ , имеющие потенциалы U_1, U_2 , соответствовали прямым U_1 и U_2 плоскости W , получим искомую зависимость $W = f_1(\zeta) = f_2(z)$, для которой с помощью формул (2) и (3) находится значение магнитной индукции.

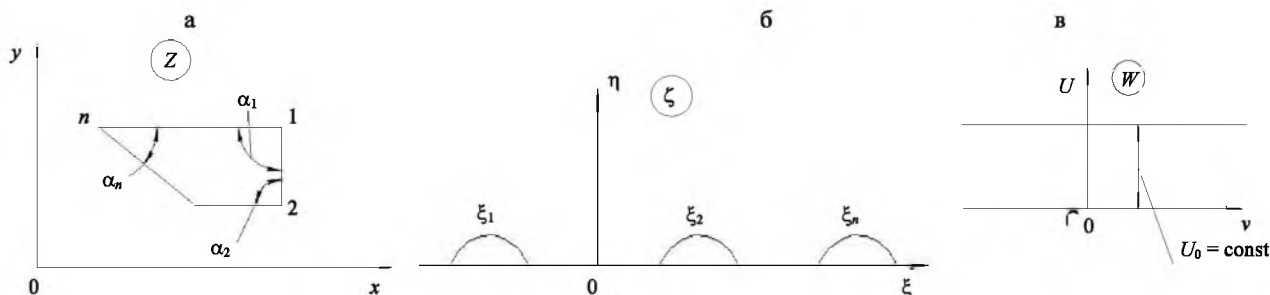


Рис. 2. Схема конформного отображения при расчете магнитного поля с использованием интеграла Кристоффеля – Шварца: а – реальная плоскость; б – плоскость комплексного переменного; в – плоскость комплексного потенциала

Используя интеграл Кристоффеля – Шварца, отображим многоугольник $yQDRPy$ плоскости $z = x + jy$ на полуплоскость $\zeta = \xi + j\eta$ (рис. 3).

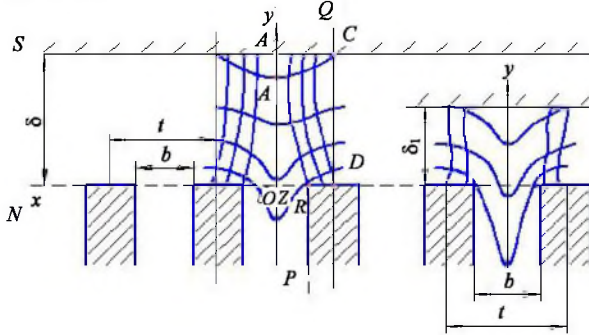


Рис. 3. Схема топографии ЭМП при величинах рабочего зазора δ и δ_1

Тогда координата

$$Z = C_1 \int \frac{1}{\zeta} \sqrt{\frac{\zeta - \alpha}{\zeta - 1}} d\zeta + C_2. \quad (6)$$

Произведем связь полуплоскости ζ с полосой шириной πj в плоскости $W = V + jU$

$$\zeta = \text{ch}^2 \frac{W}{2}. \quad (7)$$

Постоянные величины C_1 , C_2 и α определяются при граничных условиях: $\zeta = \alpha$; $Z = \frac{b}{2t}$; $\zeta = 1$; $Z = \pi$; $\zeta \rightarrow \infty$; $\frac{dW}{dZ} = -j$. Подставив из этих граничных условий значения C_1 , C_2 и α в (6) и произведя интегрирование, получим

$$Z = \frac{b}{2t} - \frac{j}{2\pi} \left[\ln \frac{\sqrt{\zeta - 1} + \sqrt{\zeta - \left(\frac{b}{t}\right)^2}}{\sqrt{\zeta - 1} - \sqrt{\zeta - \left(\frac{b}{t}\right)^2}} - \frac{b}{t} \ln \frac{\sqrt{\zeta - 1} - \sqrt{\frac{t^2}{b^2} \zeta - 1}}{\sqrt{\zeta - 1} + \sqrt{\frac{t^2}{b^2} \zeta - 1}} \right], \quad (8)$$

где b – ширины впадин, мм; t – шаг впадин, мм.

Выделим из (8) мнимую часть, тогда с учетом (7) при $y = \delta$ получим

$$\frac{\delta}{t} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\text{ch}^2 \frac{V}{2} + \text{sh} \frac{V}{2} \sqrt{\text{ch}^2 \frac{V}{2} - \left(\frac{b}{t}\right)^2} - \frac{1 + \left(\frac{b}{t}\right)^2}{2} \right] - \frac{b}{t} \ln \left[\frac{1 + \left(\frac{b}{t}\right)^2}{2} - \frac{\left(\frac{b}{t}\right)^2}{\text{ch}^2 \frac{V}{2}} + \left(\frac{b}{t}\right) \frac{\text{sh} \frac{V}{2}}{\text{ch}^2 \frac{V}{2}} \times \sqrt{\text{ch}^2 \frac{V}{2} - \left(\frac{b}{t}\right)^2} + \left(1 - \frac{b}{t}\right) \ln \frac{2}{1 - \left(\frac{b}{t}\right)^2} \right] \right\}, \quad (9)$$

где V – действительная часть комплексного потенциала.

На эквивалентной поверхности AC $V = \text{const}$, а на силовых линиях DC и OA согласно (7) имеем $V_C = 0$ и $V_A = \pi$. Тогда величину магнитной индукции в любой точке можно определить по (4).

В точках C и A величина магнитной индукции определяется по формулам:

$$B_C = \frac{\text{ch} \frac{V}{2}}{\sqrt{\text{ch}^2 \frac{V}{2} - \left(\frac{b}{t}\right)^2}}; \quad B_A = \frac{\text{sh} \frac{V}{2}}{\sqrt{\text{sh}^2 \frac{V}{2} + \left(\frac{b}{t}\right)^2}}. \quad (10)$$

Используя формулу (4), можно найти изменение β магнитной индукции в зазоре

$$\beta = \frac{B_C - B_A}{B_{cp}} = \left(\frac{b}{t}\right)^2 \text{ch} V \times \left[\sqrt{\text{ch}^2 \frac{V}{2} - \left(\frac{b}{t}\right)^2} \sqrt{\text{sh}^2 \frac{V}{2} + \left(\frac{b}{t}\right)^2} \times \left(\text{ch} \frac{V}{2} \sqrt{\text{sh}^2 \frac{V}{2} + \left(\frac{b}{t}\right)^2} + \text{sh} \frac{V}{2} \sqrt{\text{ch}^2 \frac{V}{2} - \left(\frac{b}{t}\right)^2} \right) \right]^{-1}. \quad (11)$$

По формуле (11) можно также определить изменение β магнитной индукции в зависимости от параметров b/t при учете того, что на любой эквипотенциальной поверхности

$$B_{cp} = \frac{U_A - U_C}{\pi} = 1. \quad (12)$$

Поскольку отношение b/t в зубчатом контуре прерывистых поверхностей находится в пределах $0,3 \leq b/t \leq 0,6$ и соответствующая действительная часть комплексного потенциала $V \geq 6$, следовательно:

$$\beta = \frac{2\left(\frac{b}{t}\right)^2}{\operatorname{ch}^2 \frac{V}{2}}; \quad (13)$$

$$\frac{\delta}{t} = \frac{1}{2\pi} \left\{ V + \left(1 - \frac{b}{t}\right) \ln \frac{1}{1 - \left(\frac{b}{t}\right)^2} - \frac{b}{t} \ln \left[1 + \left(\frac{b}{t}\right)^2 \right] \right\}. \quad (14)$$

Откуда

$$\beta = \frac{8\left(\frac{b}{t}\right)^2 \left(1 - \frac{b}{t}\right)^{\frac{b}{t}}}{1 - \left(\frac{b}{t}\right)^2 \left(1 + \frac{b}{t}\right)^{\frac{b}{t}}} e^{-2\pi \frac{\delta}{t}}.$$

При уменьшении зазора δ до величины δ_1 (рис. 3) формула изменения магнитной индукции имеет вид:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{B_A - B_O}{B_{cp}} = \frac{\pi \delta_1}{bV} t h^2 \frac{V}{2} \times \\ &\times \left[\sqrt{\left(\frac{2\delta_1}{b}\right)^2 + \frac{1}{\operatorname{ch}^2 \frac{V}{2}} \left(\frac{2\delta_1}{b}\right)^2} + 1 \times \right. \\ &\times \left. \left[\sqrt{\left(\frac{2\delta_1}{b}\right)^2 + 1} + V \left(\frac{2\delta}{b}\right)^2 + \frac{1}{\operatorname{ch}^2 \frac{V}{2}} \right] \right]^{-1} \frac{t}{\delta_1}; \\ \frac{t}{\delta} &= \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{2\delta}{b}\right)^2 \operatorname{ch} V - 1 + \frac{4\delta}{b} \operatorname{cth} \frac{V}{2} \sqrt{\left(\frac{2\delta}{b}\right)^2 - \frac{1}{\operatorname{sh}^2 \frac{V}{2}}} \right] + \right. \\ &\left. + \frac{b}{2\delta} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{cth} \frac{V}{2}}{\sqrt{\left(\frac{2\delta}{b}\right)^2 - \frac{1}{\operatorname{sh}^2 \frac{V}{2}}}} - \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{2\delta}{b}\right)^2 + 1 \right] \right\}. \end{aligned}$$

Графическая зависимость величины относительного изменения β магнитной индукции от соотношения величины рабочего зазора δ и шага t элементов прерывистой поверхности изображена на рис. 4.

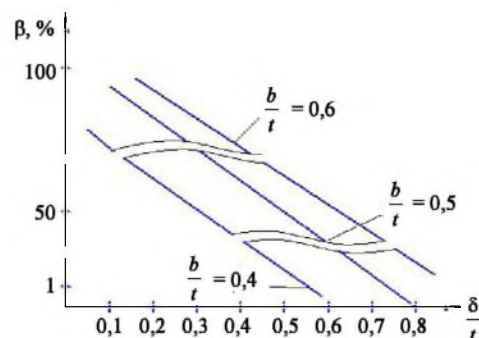


Рис. 4. Зависимости изменения β магнитной индукции от соотношения шага t элементов прерывистой поверхности и величины рабочего зазора δ

Характер полученных зависимостей можно объяснить следующим образом: в случае уменьшения зазоров δ максимальное значение магнитной индукции достигается при $x \rightarrow \infty$, т. е. при условии, что изменение магнитной индукции определяется величиной зазора и шириной впадин. Анализ приведенных зависимостей показывает, что уменьшение величины зазора приводит к увеличению магнитной индукции в межзубной впадине и соответственно способствует удержанию ферроабразивных частиц во впадинах прерывистых поверхностей.

Для проверки приведенных теоретических обоснований были изготовлены полюсные наконечники электромагнитной системы (ЭМС)

с профилем, обеспечивающим переменный рабочий зазор (рис. 1). Соотношение максимальной величины рабочего зазора к минимальной было принято 3:1. С использованием указанных полюсных наконечников была проведена магнитно-абразивная обработка профиля зубьев с модулем 3,5 мм зубчатых колес (диаметр окружности выступов – 147 мм, ширина венца – 32 мм, материал – сталь 25ХГТ ГОСТ 4543–71, 62–64 HRC) на следующих режимах: величина магнитной индукции $B = 1$ Т; скорость резания $v_p = 1,5$ м/с; скорость осцилляции $v_o = 0,15$ м/с; амплитуда осцилляции $A = 1$ мм; размерность частиц ФАП $\Delta = 100/160$ мкм. В результате магнитно-абразивной обработки зуб-

чатых колес в течение 180 с была обеспечена шероховатость поверхности бокового профиля (на уровне делительной окружности) зубьев $Ra_1 = 0,4\text{--}0,5$ мкм при исходной $Ra_2 = 1,6\text{--}2,0$ мкм.

ВЫВОД

На основе математического моделирования топографии магнитного поля и результатов экспериментальных исследований дано научное обоснование геометрической формы рабочей части полюсных наконечников при магнитно-абразивной обработке прерывистых поверхностей. Это позволяет производить магнитно-абразивную обработку зубчатых колес с модулем до 3,5 мм и шлицевых валов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий / Н. С. Хомич. – Минск: БНТУ, 2006. – 256 с.
2. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 172 с.
3. Миронов, А. М. Повышение эффективности МАО зубчатых колес механическим уплотнением ферроабразивного порошка в рабочей зоне: автореф. ... дис. канд. техн. наук / А. М. Миронов; ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси». – Минск, 2007. – 16 с.
4. Мышкис, А. Д. Лекции по высшей математике / А. Д. Мышкис. – М.: Наука, 1980. – 560 с.
5. Брынский, Е. А. Электромагнитные поля в электрических машинах / Е. А. Брынский, Я. Б. Данилевич, В. И. Яковлев. – Л.: Энергия, 1979. – 176 с.

Поступила 26.06.2009

УДК 621.1.001.57

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Канд. техн. наук, доц. ВОРОНОВА Н. П., инж. ГРИБКОВА С. М.

Белорусский национальный технический университет

Проблема энергообеспечения во всем мире считается одной из приоритетных. Энергосбережению как важнейшей ее составляющей в рамках общенациональных задач промышленно развитых стран уделяется самое серьезное внимание. Современные сложные, быстро протекающие и энергоемкие процессы уже невозможно реализовать без дополнения их современными системами автоматического управления. Существуют такие процессы, которые в принципе не могут идти без соответствующей системы управления хотя бы потому, что они являются существенно неустойчивыми.

Международная федерация по автоматическому управлению классифицирует математические модели, включающие в себя описание реальных объектов в виде алгебраических или обыкновенных дифференциальных уравнений или их систем, как системы с сосредоточенными параметрами. Но, к сожалению, такое при-

ближение далеко не всегда адекватно реальному объекту. Математические модели, содержащие уравнения в частных производных или интегральные уравнения, называют системами с распределенными параметрами. Задачи управления такого рода объектами важны и интересны, так как возникают в самых различных областях современной науки. Огромное число таких задач возникает в теоретической физике, в теории сплошных сред, где приходится сталкиваться с уравнениями математической физики, описывающими состояние полей различной природы. Наука об управлении должна устанавливать принципы управления всевозможными процессами, выявляя предельные, оптимальные свойства, которые можно получить с помощью тех или иных распределенных регуляторов.

Разработка теории и техники автоматического управления для объектов с распределен-