

УДК 669.094(075.8)

АКУЛОВИЧ Л. М.¹, СЕРГЕЕВ Л. Е.¹ РОМАНЮК Н.Н.¹, МЕНДАЛИЕВА С. И.¹¹Белорусский государственный аграрно-технический университет²Казахский аграрно-технический университет им. С. Сейфуллина

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Аннотация.

Рассматривается процесс моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей изделий машиностроения. В качестве сложнопрофильных поверхностей рассматриваются сферические формы и поверхности мелкомодульных зубчатых колес. Определены напряженность и магнитная индукция магнитного поля, по которым оценивается эффективность магнитно-абразивного метода обработки. Выявлены оптимальные значения угла α в зоне обработки, влияющие на качество поверхности изделий при магнитно-абразивном методе обработки. Приведены результаты зависимости относительной индукции β от значения угла α .

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, ферроабразивный порошок, поверхность, качество, магнитная индукция, твердость.

Түйіндеме

Машина жасау бұйымдарының күрделі бейінді беттерін магниттік-абразивті өңдеу кезінде магниттік өрісті модельдеу процесі қарастырылады. Күрделі бейінді бет ретінде сфералық формалар және ұсақ модульді тісті доңғалақтардың беті қарастырылады. Магниттік өрістің кернеулігі мен магниттік индукциясы анықталды, олар бойынша өңдеудің магниттік-абразивті әдісінің тиімділігі бағаланады. Өңдеудің магниттік-абразивті әдісі кезінде бұйым бетінің сапасына әсер ететін өңдеу аймағындағы α бұрышының оңтайлы мәндері анықталды. β салыстырмалы индукцияның α бұрышы мәнінен тәуелділігінің нәтижелері келтірілген.

Кілт сөздер: магнитті-абразивтік өңдеу, ферроабразивтік ұнтақ, беті, сапасы, магниттік индукция, қаттылығы.

Abstract

The process of modeling a magnetic field under magnetic abrasive machining of complex surfaces of engineering products is considered. Spherical shapes and surfaces of small-modular gears are considered as complex-profile surfaces. The intensity and magnetic induction of the magnetic field are determined, by which the effectiveness of the magnetic abrasive processing method is evaluated. The optimal values of the angle α in the processing zone have been identified, affecting the surface quality of the products with the magnetic abrasive processing method. The results of the dependence of the relative induction β on the value of the angle α are presented.

Key words: magnetic abrasive machining, ferro abrasive powder, surface, quality, magnetic induction, hardness.

Одной из наиболее распространенной формой сложнопрофильных поверхностей является сферическая форма. Известно, что технология финишной обработки деталей сферической формы, в частности доводка, основана на контактом взаимодействии инструмента и детали путем их обоюдного изнашивания. Кинематика процесса заключается в одновременном вращении ведущего звена в виде детали и упруго прижимаемого к нему через шаровой шарнир ведомого звена или притира. При этом ось притира проходит через ось вращения детали и наклонена к оси образуемой сферы под определенным углом [1]. Для данного процесса характерна сложность взаимного влияния основных технологических факторов, которые поддаются только косвенному управлению.

Сложность обработки такой поверхности обусловлена отсутствием гарантированного трехосного вращения деталей, не дающая возможность получить высокий процент равномерности обработки поверхности. Другие проблемы заключаются в непостоянстве скорости свободного вращения инструмента, высоком градиенте вектора скорости резания и неравномерности контактного давления между инструментом и деталью ввиду наличия так называемых петель и точек возврата тра-

ектории движения. Результатом этого воздействия служит отсутствие одинаковой толщины снимаемого припуска, что приводит к снижению качества и точности.

Эту проблему можно решить с помощью использования магнитно-абразивной обработки (МАО) поверхности, где изменение величины и направления магнитного потока в зоне обработки создает магнитное поле, изменяющее положение оси вращения шарика и сообщающее ферроабразивному инструменту планетарное движение вокруг изделия [2]. Это обеспечивает равномерность съема металла и точность геометрической формы обрабатываемой детали.

Расчет электромагнитного поля в любом электро-техническом устройстве определяется формой поверхности, которая разделяет среды с различными физико-механическими характеристиками в области его существования. Сложность возрастает при необходимости учета нелинейности сред, зависящей от величин характеризующих электромагнитное поле типа магнитной проницаемости среды и напряженности поля. При МАО следует прибавить еще и перемещение сред, т.е. инструмента и шарика. Поэтому необходимым является представление расчетов исследований электромагнитного поля в аналитической форме. Известно, что суще-



стует определенная особенность расчета, связанная с физическим моделированием поля и заключающаяся в реализации условия допущений. Примером тому служит то, что током смещения внутри проводников можно пренебречь в отличие от тока проводимости. Целесообразность выбора системы координат, поскольку дифференциальные уравнения для векторных величин H и B зависят так же и от времени, определяется характером задачи. Это связано с минимизацией средств и затрат для решения крайне сложных краевых задач. Другой проблемой при выборе детерминанта служит выявление знака при рассмотрении приращения или уменьшения функции на элементарных площадках. Однако необходимость получения представления о протекании процесса МАО сферических поверхностей требует установления метода исследования и модели, в которой полностью или в основном явления имеют одинаковую с оригиналом физическую природу. Это существенно облегчает получение необходимых результатов ввиду выбора наиболее приемлемых диапазонов изменения физических величин и геометрических размеров обрабатываемых деталей.

Образцом для физического моделирования является сфера, вращающаяся с частотой n и находящаяся в магнитном поле. Задача заключается в определении напряженности магнитного поля, считая известным поле на оси кругового тока, путем ее непосредственного интегрирования.

Напряженность магнитного поля на оси вращения в точке M (рисунок 1), обусловленная током dI , равняется:

$$dH = dH_z = dI \frac{\sin^3 \beta}{2r} \quad (1)$$

Согласно рисунку 1 следуют соотношения:

$$\sin \beta = \frac{r}{\rho}; \quad r^2 = a^2 - z^2; \quad \rho^2 = z^2 + a^2 - z_3 z. \quad (2)$$

Поэтому $d\theta = -\frac{dz_3}{z}$ и $z_3 dz = -\rho \cdot d\rho$,

$$d = \frac{-\rho^4 + 2\rho^2(z^2 + a^2) - (a^2 - z^2)}{\rho^2} dS. \quad (3)$$

Подставляя эти значения в выражения для dH , получаем:

$$d = -\frac{I}{16az^3} \cdot \frac{\rho^4 + 2\rho^2(z^2 + a^2) - (a^2 - z^2)}{\rho^2} dS. \quad (4)$$

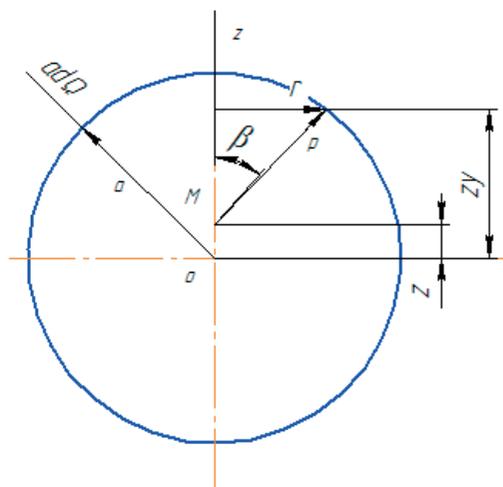


Рисунок 1 Схема для определения напряженности магнитного поля при использовании МАО: z – расстояние от центра шара до точки определения напряженности МП, m ; a – радиус шара, m ; β – угол между осью Z в точке определения напряженности МП

Интегрируя это выражение по ρ , получаем:

$$H = -\frac{I}{16az^3} \cdot \left[\frac{\rho^3}{3} - 2(z^2 + a^2)\rho - (a^2 - z^2) \frac{1}{\rho} \right]. \quad (5)$$

Поле вне сферы, определяющее координату z , которая изменяется от $-\infty$ до $-a$ и от a до $+\infty$, находится как:

$$H = \frac{Ia^2}{3z^3}. \quad (6)$$

Таким образом, анализируя полученное выражение, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным диапазоном обрабатываемых размеров шариков являются диаметры 2-10 мм. Это связано с тем, что требуемую величину напряженности магнитного поля при МАО представляет численное значение, равное 100-500 А·м⁻¹. Максимально теоретически возможным для МАО является размер шарика $d = 15$ мм.

Другой распространенной формой сложнопрофильных поверхностей является поверхность мелкомодульных зубчатых колес, одним из методов получения которых является холодное накатывание, обеспечивающее точный профиль зуба[3,4].

Во время процесса прокатки обрабатываемое зубчатое колесо и инструмент – накатник, имеющий форму цилиндрического зубчатого колеса, находится в беззазорном зацеплении. В результате взаимного относительного скольжения профилей зубьев заготовки и инструмента на противоположных сторонах зуба колеса материал припуска течет в разных направлениях. На ведомой стороне профиля зуба колеса металл перемещается от головки и ножки зуба к делительной окружности. В результате этого на делительной окружности происходит наволакивание металла – образуется выступ. На противоположной стороне профиля зуба металл перемещается от делительной окружности к головке и ножке зуба, из-за чего в зоне делительной окружности по-

является впадина. Вследствие течения металла в сторону головки зуба наружный диаметр обрабатываемого колеса увеличивается (образуется рогообразный нарост). Различный характер деформаций и течения металла на обеих сторонах зубьев создают трудности в получении симметричного профиля зуба колеса. Чтобы получить удовлетворительные результаты, вводят различную коррекцию на каждой стороне зуба накатника, однако полностью устранить рогообразный наплыв невозможно.

На практике оптимальным способом решения этой проблемы является шлифование по наружному диаметру зубчатого колеса после закалки. Вследствие шлифования образуется множество заусенцев и прижогов, что требует последующей финишной обработки. На сегодняшний день для этой цели применяются: притирка, зубохонингование, электрохимическая обработка. Вместе с тем данные методы имеют ряд характерных недостатков. К ним относятся: высокая продолжительность процесса обработки, низкая стойкость инструмента, экологическая вредность производства, постоянный монтаж – демонтаж притирочной системы (привод, носительное расположение), частая притирочной массы, необходимость утилизации отработанного абразива, высокие квалификация рабочего и стоимость инструмента.

Съем металла при МАО осуществляется в результате силового воздействия порошка на поверхность детали и указанных относительных движений. Обрабатываемая деталь 1 помещается между полюсными наконечниками 2 электромагнитной системы при установленном зазоре δ , в которой подается ФАП (рисунок 2).

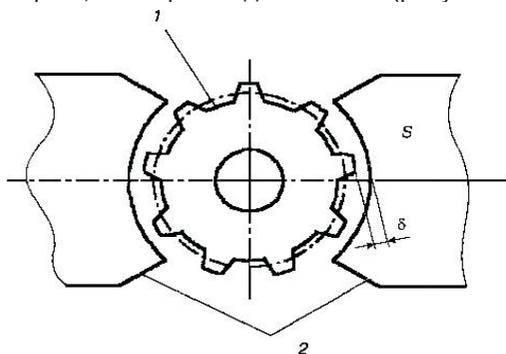


Рисунок 2 Схема магнитно-абразивной обработки зубчатых колес.

Для прерывистой поверхности распределение магнитного потока во многом носит характер неопределенности. Это связано со стремлением магнитного потока осуществить свое прохождение по энергетически выгодному участку магнитной цепи. Проблема МАО зубчатых колес заключается в сложности обработки переменного по разности величин диаметра окружностей их выступов и впадин. Это связано с тем, что по мере удаления от проводника с током, вокруг которого согласно закону Ампера существует поле, последнее ослабевает. Падение напряженности поля, являющейся его силовой характеристикой, приводит соответственно к уменьшению давления ферроабразивного порошка (ФАП) на обрабатываемую поверхность, а в конечном итоге и снижению съема материала. В связи с изложенным выше возника-

ет задача оптимального применения данного метода с целью полного использования технологических возможностей МАО. Как указывалось выше, именно наличие модуля $m \leq 2,5$ мм практически ограничивает финишную обработку зубчатых колес методом зубохонингования, а по данным, магнитное поле, проникающее в паз, затухает на глубине, примерно равной его ширине. Следовательно, чем меньше модуль зубчатого колеса, тем эффективнее происходит процесс съема материала обрабатываемого изделия, несмотря на переменность величин диаметров выступов и впадин при использовании МАО[5]. Кроме того, положительным фактором данного процесса служит наличие эвольвентного профиля контура зуба (его условно можно считать трапециидальным), что увеличивает эффективность доступа ФАП в зону обработки и повышает ее качество. Второе важное условие заключается в том, что острая кромка представляет собой концентратор магнитного потока и именно здесь будет наибольшая плотность этого потока.

Наиболее предпочтительным является математический путь решения задачи. Это дает общие формулы для расчета магнитного поля в зоне обработки и возможности получения картины этого поля, что приводит к оценке потенциала процесса МАО[6]. Данное исследование производится в области между поверхностями полюса ЭМС и зубчатой поверхностью колеса плоскости Z. Ее можно представить в виде четырехугольника ABCD (рисунок 3).

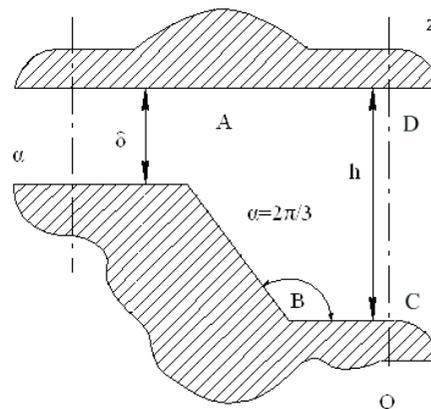


Рисунок 3 - Рабочая зона зубчатого контура колеса при МАО с условием $\alpha = 2\pi/3$

Отображение этого четырехугольника на полуплоскость Q при использовании интеграла Кристоффеля-Шварца в общем виде выглядит следующим образом:

$$Q = C \int_{Q_0}^Q (Q-a)^{\alpha_1-1} (Q-b)^{\alpha_2-1} (Q-c)^{\alpha_3-1} (Q-d)^{\alpha_4-1} + C_1, \quad (7)$$

где a, b, c, d – координаты вершин четырехугольника ABCD;

C, C_1, Q_0 – произвольные постоянные;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – углы при вершинах четырехугольника ABCD (в долях π).

Решение данного случая после ряда преобразований имеет вид:

$$\frac{P}{2\delta} = \frac{1}{\delta} \left\{ \begin{aligned} & \ln(1-\beta) - \alpha \ln(\alpha\beta - 1) + \\ & + \frac{1}{2} \left[\frac{\alpha \ln(1 + \alpha\beta + \alpha^2\beta^2)}{-\ln(1 + \beta + \beta^2)} \right] + \\ & + \sqrt{3} \cdot \left(\arctg \frac{2 + \alpha\beta}{\sqrt{3}\alpha\beta} - \arctg \frac{2 + \alpha\beta}{\sqrt{3}\beta} \right) \end{aligned} \right\} + \frac{\sqrt{3}}{2} (1 - \alpha), \quad (8)$$

где P – шаг зубчатого колеса, мм;
 δ – зазор между полюсом ЭМС и диаметром вершин зубчатого колеса, мм;

$$\alpha = \frac{h}{\delta}, \quad h – \text{глубина паза, мм.}$$

Из выражения (8) следует, что минимальное значение относительной индукции:

$$\beta = \frac{B}{B_{\max}} = \sqrt[3]{\frac{Q+1}{Q+\alpha^3}},$$

$$\beta = \frac{1}{\alpha}. \quad (9)$$

При $h = 0$ (гладкая цилиндрическая поверхность), $\beta = 1$, а если $h \neq 0$, то зависимость $\beta_{\min} = f(\alpha)$ имеет вид гиперболы. Задавая значениями относительной индукции β и подставляя их в уравнение, выявляются соответствующие значения $P/2\delta$ при разных β . Приводя данные показатели применительно к реальному зубчатому колесу (диаметры окружности вершин и впадин, модуль зацепления и т.д.) и магнитному полю (магнитная индукция), можно определить наиболее приемлемые условия обработки и установить возможности процесса MAO для получения необходимых его качеств и производительности[7]. На рисунке 4 приведена зависи-

мость $\beta = f\left(\frac{P}{2\delta}\right)$ при значении $\alpha = 120^\circ$ (трапецидальный зуб), что наиболее отвечает форме рабочего контура зубчатого колеса.

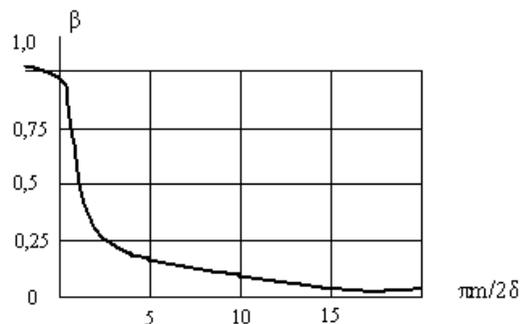


Рисунок 4 - Распределение относительной индукции β в пазу зубчатого колеса при $\alpha=2\pi/3$

Проведенные исследования позволили определить, что максимально возможным значением α , при котором осуществляется процесс MAO, является диапазон 4-6. Преобразовав, $P/2\delta$ как $\pi m/2\delta$ и подставляя данный диапазон, можно варьируя показателями m и δ , произвести прогнозирование обработки мелко модульных зубчатых колес методом MAO.

На основании вышеизложенного были проведены исследования, направленные на оценку технологических возможностей метода MAO при обработке мелко модульных колес ($m = 1,5$ мм). Шестерни имели косой зуб, $\beta = 12^\circ$, материал – сталь 40Х ГОСТ 4543-71, 40-45 HRC₃, оборудование – СФТ 2.150.00.00.000, ФАП – Ж 15 КТ ТУ 6-09-03-483-81. Параметры и режимы обработки: величина магнитной индукции, $B=1$ Тл; скорость резания, $V_p=0,15$ м/с; амплитуда осцилляции, $A=1,5$ мм; коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_3=1$; величина рабочего зазора, $\delta=1$ мм. Основная задача обработки методом MAO заключалась в скруглении фасок зубчатого контура колес и устранении заусенцев, образованных предшествующей операцией шлифования по наружному диаметру деталей.

Литература

- 1 Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учебное пособие / В. Е. Антонюк [и др.]; под общей ред. В. Е. Антонюка. – Минск : УП «Технопринт», 2003. – 766 с.
- 2 Исследование влияния технологии окончательной обработки зубчатых колес на их работоспособность: информационные материалы / НИИМАШ ; сост. О. В. Берестнев, А. С. Соболев. – Москва, 1971. – 210 с.
- 3 Mori, T., “Clarification of Magnetic Abrasive Finishing Mechanism” / T. Mori, K. Hirota, Y. Kawashima // Journal of Materials Possessing Technology, pp. 143–144, 2003.
- 4 Акулович Л.М., Андрушкевич И.Е., Сергеев Л.Е. Моделирование магнитостатических полей при магнитно-абразивной обработке деталей // Докл. II Международной конференции «Математическое моделирование и фундаментальные уравнения. Минск, 2009, 31-33 с.
- 5 Акулович, Л.М. Управления процессами формирования поверхностей при магнитно-абразивной обработке / Л.М. Акулович, И.Ю. Комик // Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК: сборник докладов Международной научно-практической конференции, г. Минск, 15-18 апреля 2009г. В 2ч. Ч.1 / редкол. Шило И.Н. [и др.]. – Минск: БГАТУ, – 2009. – С. 422-426.
- 6 Yamaguchi, H. “Uniform Internal Finishing of SUS304 Stainless Steel Bent Tube Using a Magnetic Abrasive Finishing Process” / H. Yamaguchi, M. Sekine // ASME journal of manufacturing science and engineering, Vol. 127, pp. 605-611, 2005.
- 7 Иконников, А.М., Расчёт параметров процесса магнитно-абразивной обработки поверхностей сложного профиля. «Обработка металлов»/ А.М. Иконников, В.А. Федоров // ОАО НТП и ЭИ «ОРГСТАНКИНПРОМ». Новосибирск, 2003 г. №4. - С. 10-11.