

УДК 621.923

**РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ
ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ**

*д-р техн. наук, проф. Л.М. АКУЛОВИЧ, канд. техн. наук, доц. Л.Е. СЕРГЕЕВ,
канд. техн. наук В.Я. ЛЕБЕДЕВ, В.Е. БАБИЧ, И.Н. КОМИК
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)*

Приводится методика расчета магнитного поля в рабочем зазоре, позволяющая определить силы резания при магнитно-абразивной обработке. Установлена зависимость и осуществлена практическая реализация процесса магнитно-абразивной обработки при обеспечении оптимальных качественных показателей обработанных поверхностей деталей машин. Показано, что правильно созданная конструкции рабочей зоны полюсного наконечника приводит к отсутствию необходимости получения его эквидистантности по отношению к конфигурации детали, что резко снижает себестоимость изготовления данного наконечника. Простота предлагаемой конструкции рабочей зоны полюсного наконечника в совокупности с учетом фундаментальных положений электромагнетизма обеспечивает требуемый уровень давления зерен ферроабразивного порошка в зоне его контакта и высокую эффективность пространственно-временного их расположения.

Введение. Совершенствование методов механической обработки обеспечивает снижение трудоемкости процесса изготовления деталей машин ввиду уменьшения припуска на обработку. Несмотря на изменение качественного состава операций технологического процесса происходит рост количества финишных операций в связи с повышением сложности конструкций и требований к точности и качеству их изготовления. Вследствие этого при проектировании процесса обработки необходимо произвести оценку его эффективности, показателями которого являются качество обработанных деталей, надежность функционирования, производительность и себестоимость производства. Разработка теоретических основ процесса резания материалов позволяет обеспечить научно обоснованный технологический процесс с оптимальной последовательностью и минимальным количеством необходимых операций [1].

К финишным операциям относится и магнитно-абразивная обработка (МАО) [2 – 4]. При МАО роль режущего инструмента выполняет порция магнитно-абразивного порошка, а заготовку для обработки размещают между полюсами магнитного индуктора на определенном расстоянии. Пространство между полюсами индуктора частично или полностью заполняют магнитно-абразивным порошком [5]. Под воздействием магнитного поля частицы ферроабразивного порошка (ФАП) формируются в цепочки, образуя своеобразную «щетку». Данная щетка удерживается силами магнитного поля в рабочем пространстве, оказывается прижатой к обрабатываемой поверхности и при движении заготовки относительно индуктора осуществляет срез с поверхности обрабатываемой детали. При этом удаляется припуск и формируется поверхность с новым микрорельефом и измененными физико-механическими свойствами поверхностного слоя.

Вся порция ферроабразивного порошка, помещенного в рабочий зазор, под действием сил трения со стороны двигающейся заготовки смещается к выходу из рабочего зазора и уплотняется, встречая там основное сопротивление со стороны магнитного поля. Силы трения между зернами и поверхностью полюса помогают магнитному полю удерживать порошок в рабочем зазоре [3].

Основной особенностью данного метода является формирование под действием магнитного поля реологического инструмента в виде ферроабразивной щетки. Данный вид инструмента представляет собой континуальную среду в виде ФАП и агентов смазочно-охлаждающих технологических жидкостей (СОТС). Связкой данной среды служит энергия магнитного поля. Показатели производительности и качества процесса при использовании традиционной схемы обработки с концентричным зазором между полюсным наконечником и обрабатываемой деталью остаются на одном и том же уровне, несмотря на применение новых видов ФАП и СОТС и их комбинаций. Это указывает на необходимость проведения фундаментальных исследований в области теории резания и вскрытия физической природы явлений, происходящих в зонах контакта, трения и износа инструмента и детали.

Описание различных факторов процесса контакта инструмента и детали желательно базировать на одной физической концепции для отражения логической взаимосвязи и принципа математической формализации. В работе [7] в качестве такой концепции предлагается использование теории дислокаций физики твердого тела, в другой [8] – совокупность условий стружконосного слоя, что представляет собой подсистему упругой технологической системы. Вместе с тем, как указано в работе [1], методические средства познания процесса резания имеют свои трудности и поэтому главным способом исследования является эксперимент. Кроме того, данная система пока не может быть расчленена на подсистемы одной физической природы, описываемые определенным числом интегрально-дифференциальных уравнений.

Результаты исследования и обсуждение. Наибольшая эффективность в удалении припуска материала достигается при использовании комбинированных методов обработки с наложением различных форм энергии. Магнитно-абразивная обработка является одним из таких методов, поскольку кроме процесса абразивного резания осуществляется воздействие внешнего магнитного поля, что в совокупности определяет эффективность обработки. Как указывалось ранее, традиционная схема МАО с концентричным зазором представляет собой один из вариантов обработки, который производится в сравнительно узком диапазоне условий функционирования его параметров и сред. По данной причине потенциальные возможности метода остаются нереализованными, а эффективность использования заключается в полировании поверхностного слоя деталей типа тел вращения без каких-либо отклонений от цилиндричности, круглости. Решение вопросов повышения точности, качества и производительности съема материала со сложнопрофильных поверхностей детали не может быть осуществлено без рассмотрения комплексного воздействия факторов МАО на процесс формирования структуры поверхности ее микро- и макрогеометрии, изнашивания инструмента и т.д. Поэтому поставленная задача заключается в разработке математической модели контакта реологического инструмента с обрабатываемой поверхностью детали в условиях комбинированного воздействия различных факторов процесса МАО на основе системного подхода путем их анализа и поиска путей повышения эффективности и качества данного процесса.

Известно, что показатели давления ФАП в рабочей зоне при концентричном зазоре схемы обработки составляют 0,4...2 МПа, что сопоставимо с показателями хонингования [6]. В связи с этим возникает необходимость увеличения давления в ходе протекания процесса МАО, что позволит осуществить интенсификацию съема материала. Решением служит:

- рост величины силы тока, подаваемого на катушки соленоидов электромагнитной системы (ЭМС) оборудования;

- повышение магнитной проницаемости μ_a реологического инструмента;

- изменение геометрии контура рабочей поверхности полюсных наконечников ЭМС и вследствие этого перераспределение плотности магнитного потока для его локализации и концентрации.

Два первых варианта требуют роста энергозатрат и материальных средств для их реализации, а также создания новых видов технологий для производства ФАП, что приводит к увеличению себестоимости изготовления продукции. Применение третьего осуществляется в рамках совершенствования технологии МАО, обеспечивая ресурсо- и энергосбережение средств производства и позволяя получить оптимальное решение конкретной задачи при контроле технических условий процесса.

Требуемое изменение геометрии контура производится на базе уменьшения величины рабочего зазора по пути огибания вышеуказанной дуги.

Результаты решения задачи о переменном магнитном поле по длине дуги в рабочем зазоре и определению магнитной индукции в любой точке сечения зазора позволяют успешно произвести расчет и получить качественную картину воздействия магнитного поля при МАО.

Для описания магнитных полей при магнитно-абразивной обработке индуктором на постоянных магнитах используем уравнения Максвелла магнитостатики:

$$\operatorname{rot} \vec{B} = J,$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0,$$

где H – напряженность магнитного поля; B – магнитная индукция; J – электрический ток, вызывающий магнитное поле.

Существованию магнитного поля всегда соответствует условие: вектор \vec{B} не равен 0, однако этого недостаточно для определения $B(x, y, z)$ при заданной плотности тока $\delta(x, y, z)$. В связи с этим рассмотрим электрический ток, вызывающий магнитное поле J , как произведение $\mu \cdot \delta$ и получим:

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_a \delta_x.$$

Одним из вариантов получения этого условия является использование магнитного поля одиночного прямого провода. При постулировании принципа, что магнитный поток на входе и выходе в какой-либо объем равен 0, можно, приняв $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ в отсутствие электрического тока, определить \vec{B} , если известна плотность тока δ . Поскольку ротор B не равен 0, то он не является градиентом скалярной функции, а представляет собой ротор векторного потенциала $\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}$. Это дает возможность представить \vec{B} в виде ротора другой векторной функции, если дана плотность тока δ при условии, что $\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}$ описывает магнитное поле, следовательно соотношение между δ и A выглядит как

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{A}) = \mu_a \delta_x. \tag{1}$$

Данное уравнение, будучи векторным, может быть представлено тремя уравнениями:

$$(\operatorname{rot} \vec{B})_x = \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z};$$

$$\vec{B}_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y};$$

$$\vec{B}_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}.$$

Следовательно, x – компонента уравнения (1) – имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) = \mu_a \delta_x.$$

В данных функциях можно менять порядок, в котором берутся частные производные [9]:

$$-\frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\partial z} \right) = \mu_a \delta_x,$$

или

$$-\frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) = \mu_a \delta_x.$$

Первые три члена представляют собой лапласиан A_x со знаком (-), а выражение в скобках – дивергенцию A , которая принимается $\operatorname{div} \vec{A} = 0$.

Таким образом, среди ряда функций, которые удовлетворяют условию $\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}$, рассматриваются только те, которые имеют дивергенцию, равную нулю.

Тогда уравнение приобретет вид:

$$\frac{\partial A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial A_x}{\partial z^2} = -\mu_a \delta_x,$$

где δ – скалярная функция от x, y, z и ее решением служит объемный интеграл:

$$A_x(x_1; y_1; z_1) = \frac{\mu_a}{2\pi} \int \frac{\delta(x_2; y_2; z_2)}{r_{12}}.$$

Другие компоненты удовлетворяют аналогичным условиям и, следовательно, их можно объединить в одну векторную формулу:

$$A_x(x_1; y_1; z_1) = \frac{\mu_a}{2\pi} \int \frac{\delta(x_2; y_2; z_2)}{r_{12}} dV_2. \quad (2)$$

Так как $\operatorname{div} \vec{A} = 0$, то функция A , полученная из уравнения (2), обладает тем же свойством. Следовательно, можно в качестве примера рассматривать векторный потенциал длинного прямого провода с током I , и основной задачей становится определение распределения его магнитного поля в пространстве. Поскольку главным допущением является бесконечная длина провода, то интеграл в этом случае может оказаться расходящимся, а результат соответственно таким же бесконечно большим. Это связано с тем, что в данном случае пространство, далекое от области, в которой необходимо определить потенциальную функцию, включает не только точки, удаленные от провода, но и большую часть самого провода.

Решением этой задачи служит то, что в данной системе положение нулевого потенциала приписывается некоторой произвольной точке, которая не располагается ни на самом проводе, ни на бесконечно большом расстоянии от него. Решением задачи с ее граничными условиями будет функция, которая минимизирует интегральное уравнение (2) по сравнению с другими функциями, удовлетворяющими тем же граничным условиям.

Линии магнитного поля длинного прямого провода представляют собой окружности, как показано на рисунке 1, величина поля \vec{B} таких окружностей равна $\frac{I}{2r}$ [9].

Используя единичный вектор $\hat{\phi}$, направленный по окружности, можно записать, что вектор \vec{B} равен:

$$\vec{B} = \mu_a \frac{I}{2r} \hat{\phi}.$$

Если $\hat{\phi}$ есть $\sin \hat{\phi}_x + \cos \hat{\phi}_y$, то можно выразить \vec{B} через x и y следующим образом:

$$\vec{B} = \mu_a \frac{I(-\sin \hat{\phi}_x + \cos \hat{\phi}_y)}{2\sqrt{x^2 + y^2}} = \mu_a \frac{I}{2} \left(\frac{-y\hat{x} + x\hat{y}}{x^2 + y^2} \right).$$

Векторная функция $\vec{A}(x; y; z)$, которая удовлетворяет условию $\nabla_x A = B$, имеет вид:

$$A = -\hat{z} \mu_a \frac{I}{2} \ln(x^2 + y^2).$$

Определяем компоненты \vec{B} :

$$\vec{B}_x = \nabla_x A_x = \frac{\partial A_x}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} = -\mu_a \frac{Iy}{2(x^2 + y^2)};$$

$$\vec{B}_y = (\nabla_x A_y) = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} = -\mu_a \frac{Ix}{2(x^2 + y^2)};$$

$$\vec{B}_z = \nabla_x A_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} = 0.$$

Магнитная проницаемость немагнитных материалов $\mu = 1$, а для ферромагнетиков

$$\mu = \frac{\mu_{\max}}{1 + c \|\text{grad}A\|^2} + \mu_{\min},$$

где μ_{\max} , μ_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения магнитной проницаемости материала.

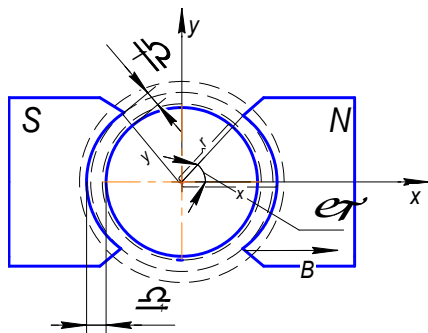


Рис. 1. Схема распределения магнитной индукции в рабочем зазоре

Силы взаимодействия порошка с обрабатываемой поверхностью определяются магнитной индукцией в рабочем зазоре, заполненном порошком, и градиентом магнитной индукции

$$\text{grad}B = \partial B / \partial n,$$

где n – направление возрастания магнитной индукции в рассматриваемом пространстве. Особенно важны градиенты индукции на поверхностях раздела порошковой массы и окружающего воздуха.

Увеличивая с помощью магнитного индуктора напряженность поля в рабочих зазорах, мы увеличиваем значения B и зависящие от нее силы резания. Однако возможности такого пути интенсификации процесса не беспредельны. После достижения магнитного насыщения порошковой среды ее магнитное сопротивление возрастает, увеличиваются магнитные потоки рассеивания, минуя рабочий зазор.

При этом выравниваются плотности магнитного потока по обе стороны поверхности раздела порошковой среды и плотность окружающего воздуха. Градиенты магнитной индукции на этих поверхностях раздела снижаются, что ведет к соответственному уменьшению магнитных сил, удерживающих порошок внутри рабочего зазора. Начинается увеличенный выход порошка из рабочих зазоров, снижение интенсивности съема материала.

Обычно в практике МАО пользуются усредненным по всей рабочей поверхности полюса индуктора значениями магнитной индукции. В действительности магнитная индукция неравномерна вдоль поверхности полюса (и заготовки), магнитный поток концентрируется около ребер, окаймляющих периметр полюса, пазы и т.д. В этом проявляется известный в теории магнетизма «краевой эффект». Из-за неравномерности распределения магнитной индукции в рабочем зазоре происходит перераспределение ФАП, стремящегося к области с наибольшей магнитной индукцией. Плотность ФАП на разных участках рабочего зазора оказывается различной. Соответственно, разным оказывается и силовое воздействие порошка на поверхно-

сти заготовки и полюса. Подтверждением этому могут служить эксперименты М.Д. Крымского [10], который с помощью самотвердеющей пластмассы зафиксировал распределение порошка внутри рабочего зазора в процессе полирования, а затем, пронумеровав участки слепка и взвесив их, определил плотность порошка по всей площади рабочего зазора. На рисунке 2 изображена схема получения слепков порошковой массы для участков, расположенных вдоль образующей полюса, и приведены соответствующие значения пористости и коэффициента уплотнения порошка на разных участках рабочего зазора.

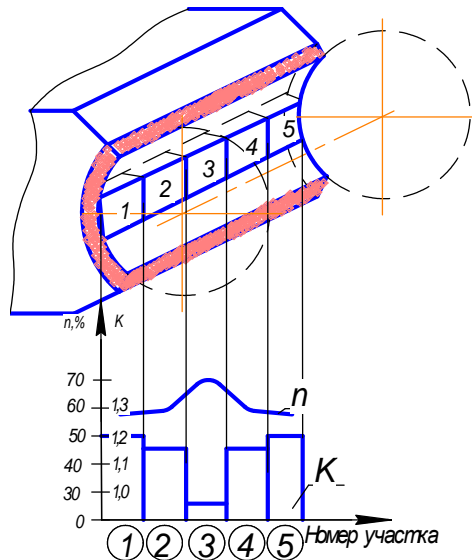


Рис. 2. Схема получения слепков порошковой массы и значения пористости n и коэффициента K уплотнения порошка

Значение высоты рабочего зазора δ в процессе МАО тесно связано с созданием в рабочем зазоре заданного значения магнитной индукции B . Рабочий зазор, заполненный ФАП, представляет достаточно большое сопротивление в магнитной цепи внешнего источника поля (индуктора). Увеличение значения δ и соответственно увеличение магнитного сопротивления зазора приводит к уменьшению основного магнитного потока Φ_o , пронизывающего рабочий зазор (рис. 3), магнитной индукции в зазоре и действующих сил. Одновременно с уменьшением основного магнитного потока возрастают потоки рассеивания Φ_p , минуя рабочий зазор через смежные воздушные участки рабочей зоны. При этом градиент магнитной индукции на поверхности раздела сред порошок – воздух уменьшается, что приводит к уменьшению магнитных сил, удерживающих порошок в рабочем зазоре.

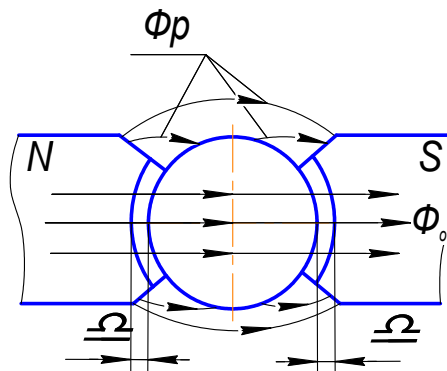


Рис. 3. Основной магнитный поток Φ_o и потоки рассеивания Φ_p при МАО

Если одновременно с изменением высоты рабочего зазора δ изменять мощность индуктора так, чтобы поддерживать постоянным значение магнитной индукции на поверхности полюса, то в этом случае увеличение δ будет сопровождаться снижением производительности полирования. По-прежнему будет иметь место увеличение магнитных потоков рассеивания Φ_p и, соответственно, снижение магнитных сил, удерживающих порошок внутри зазора. При чрезмерном уменьшении рабочего зазора наряду с ростом магнитных сил появляются такие отрицательные явления, как уменьшение порции порошка, плохое

заполнение эквидистантных рабочих зазоров порошком и уменьшение подвижности зерен порошка внутри рабочих зазоров. Уменьшение подвижности зерен приводит к ухудшению самозатачиванию массы и быстрому затуханию процесса резания при полировании [3].

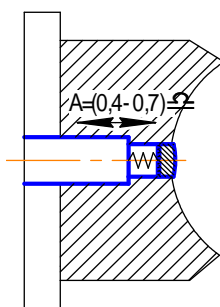


Рис. 4. Полюсный наконечник с пульсирующей вставкой

На основании проведенного анализа распределения магнитной индукции по периметру рабочего зазора возникает необходимость увеличения коэффициента заполнения рабочего участка 3 ферроабразивным порошком (см. рис. 2) для интенсификации процесса обработки.

На рисунке 4 показан полюсный наконечник с пульсирующей вставкой.

Изменяя форму рабочего зазора и искусственно создавая при этом местные уменьшения δ , появляется возможность управления распределением порции порошка в пределах рабочего зазора. Искусственно создавая зону с повышенным давлением порошка на поверхность обрабатываемой детали обеспечиваются условия для управления интенсивностью съема металла либо на всей обрабатываемой поверхности, либо на отдельных ее участках.

Заключение. Определение оптимального значения переменного рабочего зазора на основе экспериментальных исследований согласуется с теоретическими расчетами, выполненными для B_x , и позволяет производить эффективную MAO поверхностей деталей машин. Установление правильно созданной конструкции рабочей зоны полюсного наконечника приводит к отсутствию необходимости получения его эквидистантности по отношению к конфигурации детали, что резко снижает себестоимость изготовления данного наконечника. Кроме того, общие закономерности распределения магнитного поля указывают на то, что стандартное копирование формы детали, как это принято при лезвийной или абразивной обработке, в данном случае не является эффективным. В некоторых случаях коммутация магнитного поля может быть противопоставлена предлагаемому к обработке профилю детали и вместо повышения интенсивности съема материала происходит утечка данного потока B в энергетически более выгодные для него участки размещения. Простота предлагаемой конструкции рабочей зоны полюсного наконечника в совокупности с учетом фундаментальных положений электромагнетизма обеспечивает требуемый уровень давления зерен ФАП в зоне его контакта и высокую эффективность пространственно-временного их расположения.

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлена зависимость и осуществлена практическая реализация процесса магнитно-абразивной обработки при обеспечении оптимальных качественных показателей обработанных поверхностей деталей машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын, П.И. Теория резания / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, Н.А. Корниевич. – Минск: ООО «Новое знание», 2005. – 512 с.
2. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. – Минск: Наука и техника, 1981. – 326 с.
3. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущего инструмента / Ю.М. Барон. – Л., 1986.
4. Скворчевский, Н.Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н.Я. Скворчевский, Э.Н. Федорович, П.И. Ящерицын. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 216 с.
5. Барон, Ю.М. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса обработки деталей машин в магнитном поле / Ю.М. Барон. – Л.: ЛПИ, 1969. – 16 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 656 с.
7. Подураев, В.Н. Технология физико-химических методов обработки / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1985. – 314 с.
8. Клушин, А.И. Резание металлов / А.И. Клушин. – М.: Машгиз, 1954. – 361 с.
9. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2003. – 328 с.
10. Крымский, М.Д. Распределение и уплотнение магнитно-абразивного порошка в рабочем зазоре стана / М.Д. Крымский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев: ИПМ АН УССР, 1980. – С. 92 – 97.

Поступила 28.11.2008