

УДК 631.1

**Акулович Л.М.**, д.т.н., профессор;

**Дечко М.М.**, к.т.н., доцент;

**Ворошухо О.Н.**, инженер

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
г. Минск, Республика Беларусь*

## **УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕЗАНИЯ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ**

***Аннотация.** В статье рассмотрен метод интенсификации процесса резания при магнитно-абразивной обработке поверхностей деталей сельскохозяйственных машин путём импульсного воздействия энергией магнитного поля на режущий инструмент.*

### **Введение**

Формирование геометрических и физико-механических свойств поверхностей деталей сельскохозяйственной техники происходит на финишных операциях их обработки как при изготовлении, так и при ремонте. Величина и форма микронеровностей на рабочих поверхностях деталей оказывает существенное влияние на износостойкость трущихся поверхностей. В производстве доминирующим отделочным методом является механическая абразивная обработка, которая нередко является единственно возможным методом обеспечения требуемого качества поверхности. Уменьшение микронеровностей обеспечивает более благоприятный микропрофиль, облегчающий трение и снижающий износ сопрягаемых поверхностей. Одним из перспективных способов финишной обработки является магнитно-абразивная обработка (МАО), при которой зерна абразива в незакрепленном состоянии более полно используют свои режущие способности, так как происходит нивелирование их рабочих кромок относительно обрабатываемой поверхности, а также переориентация и перемещение частиц абразивного порошка в процессе обработки [1]. Для реализации МАО не требуется изготавливать профилирующий абразивный инструмент, а также периодически его править, что в 2 – 3 раза снижает затраты на инструмент. Особенностью МАО является ориентированное

абразивное резание и возможность изменять давление частиц абразивного порошка на обрабатываемую поверхность заготовки путем управления величиной магнитной индукции в рабочем зазоре. По сравнению с другими способами абразивной обработки МАО обладает рядом преимуществ, включая низкую величину скорости резания и температуру (до 200°С) в зоне резания, что исключает прижоги на обработанной поверхности.

### **Основная часть**

Эффективность МАО определяется соотношением величин двух технологических факторов:

- давления порошкового магнитно-абразивного инструмента (МАИ) на поверхность обрабатываемой детали, которая определяется величиной магнитной индукции в рабочем зазоре;
- скорости относительного перемещения частиц МАИ и обрабатываемой поверхности.

При МАО процесс микрорезания осуществляется ферроабразивными частицами, не закрепленными жестко в связке. Под действием магнитной силы  $F_M$  ферроабразивная частица одним или несколькими микро- и субмикровыступами прижимается к обрабатываемой поверхности. При наличии относительных перемещений между обрабатываемой поверхностью и частицей порошка возникает тангенциальная сила, осуществляющая микрорезание.

Интенсивность и качество МАО зависит от стабильности формирования магнитно-абразивного инструмента (ферроабразивная щётка) из ферроабразивного порошка (ФАП). Порция ФАП удерживается в рабочем зазоре силами магнитного поля и прижимается к обрабатываемой поверхности. При движении заготовки относительно полюсных наконечников осуществляется процесс микрорезания. Интенсивность абразивного воздействия зависит от давления ФАП на обрабатываемую поверхность.

На каждую частицу ферроабразивного порошка, находящегося в рабочем зазоре, действует комплекс сил магнитного, электромагнитного и механического происхождения (рис. 1). Соотношение сил определяется характером внешнего магнитного поля, электропроводимостью материала порошка; выбранной схемой обработки; механическими характеристиками порошковой среды; формами и

размерами зерен; свойствами применяемой смазочно-охлаждающей жидкости.

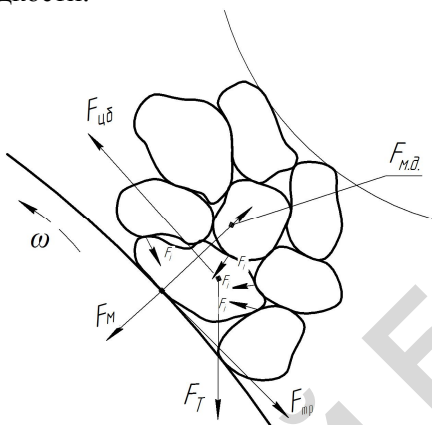


Рисунок 1 - Схема сил, действующих на частицы ФАП

Результирующая сила  $F$ , действующая на частицу ФАП в рабочем зазоре, является векторной суммой составляющих ее сил и определяется по формуле:

$$\vec{F} = \vec{F}_m + \vec{F}_i + \vec{F}_{цб} + \vec{F}_{мд} + \vec{F}_{тр} + \vec{F}_T$$

где  $\vec{F}_m$  – магнитная сила;  $\vec{F}_i$  – инерционная сила;  $\vec{F}_{цб}$  – центробежная сила;  $\vec{F}_{мд}$  – сила механического давления;  $\vec{F}_{тр}$  – сила трения;  $\vec{F}_T$  – сила тяжести.

Так как образовавшаяся вдоль магнитных силовых линий поля цепочка состоит из нескольких частиц, то на граничащую с обрабатываемой поверхностью частицу будет действовать суммарная сила со стороны всех более удаленных от оси детали частиц. В каждом конкретном способе МАО действуют все или только часть перечисленных сил.

Для частицы ФАП в форме эллипсоида вращения величину суммарной магнитной силы  $F_m$  можно определить по формуле [2]:

$$F_m = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\mu \Delta_i^2 b_i K H_i^2}{R_q + \Delta_i},$$

где  $K$  – магнитная восприимчивость материала ферропорошка;

$\mu$  – магнитная проницаемость материала порошка;

$R_i$  – расстояние от начала  $i$ -й частицы до оси упрочняемой поверхности;

$H_i$  – напряженность магнитного поля на границе  $i$ -й частицы;

$\Delta, b_i$  – размеры большой и малой осей эллипсоида, описывающего  $i$ -ю частицу.

В процессе MAO ферроабразивная щётка теряет свою режущую способность в результате затупления частиц ферроабразивного порошка и выкрашивания абразивной составляющей. В то же время по мере засаливания продуктами микрорезания и в результате уплотнения цепочек ферроабразивного порошка процесс переориентации частиц ФАП в составе ферроабразивной щётки становится невозможным.

Возникает необходимость регенерации ферроабразивной щётки с целью интенсификации MAO.

Одним из вариантов принудительной переориентации частиц ФАП является перемешивание порошка и формирование новой ферроабразивной щётки. Для решения этой задачи использована энергия магнитного поля. В конструкции установки для MAO предусмотрены две магнитные системы (основная и дополнительная) (рисунок 2). Дополнительная магнитная система установлена под углом  $90^\circ$  к полюсным наконечникам основной магнитной системы. Рабочие зазоры  $\delta$  между полюсами основной магнитной системы и обрабатываемой деталью заполняются порцией ферроабразивного порошка. Периодическое включение дополнительной магнитной системы позволяет перемешивать порцию порошка, находящегося в рабочем зазоре, а основное магнитное поле переориентирует частицы ФАП.

Установка работает следующим образом: порция ферроабразивного порошка прижимается к обрабатываемой поверхности нормальной силой  $F_m$ , обусловленной магнитным полем ( $B = 0,9$  Тл) основной магнитной системы, производится обработка поверхности детали на протяжении времени  $u$ . Затем производится отключение подачи напряжения на катушки основной магнитной системы и включение на катушку допол-

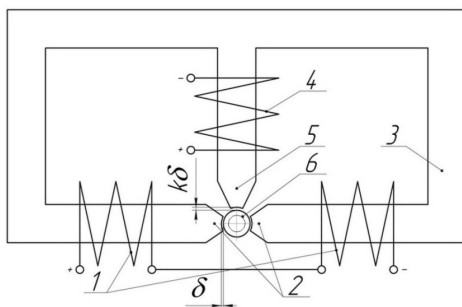


Рисунок 2 – Схема установки МАО с дополнительной магнитной системой:

1 – катушки индуктивности основной магнитной системы, 2 – полюсные наконечники, 3 – магнитопровод, 4 – катушка индуктивности дополнительной магнитной системы, 5 – полюсный наконечник, 6 – заготовка,  $\delta$  – рабочий зазор,  $k\delta$  – рабочий зазор дополнительной магнитной системы

нительной на время  $\tau_d$ . При этом наблюдается перемещение порции порошка из рабочего зазора основной магнитной системы в зазор  $k\delta$  ( $k$  – коэффициент,  $k = 1,5 - 2,0$ ) дополнительной магнитной системы.

Экспериментальные исследования влияния дополнительного магнитного поля на производительность МАО проводились на установке ЭУ-6, методом многофакторного математического планирования экспериментов. При этом был реализован композиционный к плану главных эффектов трёхуровневый из 32-х опытов план [3]. В качестве исследуемого параметра принималась производительность МАО  $Y(\Delta m)$ , мг/с.

Уравнение регрессии искали в виде полиномиальной модели 2-го порядка в нормированных координатах. Расчеты выполнены с использованием программы STATISTICA (общая регрессионная модель GRM). Значимость коэффициентов уравнения оценивали по критерию Стьюдента.

В результате получено уравнение вида:

$$\Delta m = 4,45 - 0,71X_1 + 0,43X_2 + 1,88X_3 - 0,52X_1X_3 + 0,25X_1X_4 + 0,36X_2X_3 + 0,18X_2X_5 + 0,39X_2^2 - 0,73X_3^2$$

Адекватность уравнения проверялась по критерию Фишера, экспериментальное значение которого равно 1,33 и не превосходит критическое значение, равное 1,84.

В результате выполненных экспериментов установлено, что по степени влияния на производительность МАО параметры можно расположить в ряд:  $V \rightarrow \tau \rightarrow V \times U \rightarrow B_{\text{д}} \rightarrow B_{\text{д}} \times \tau_{\text{д}}$ . Возрастание скорости  $V(X_3)$  наиболее способствует увеличению производительности. Отрицательный коэффициент при квадратичном члене этого фактора указывает, что производительность обработки замедляется при увеличении скорости.

Вторым по значимости фактором является время обработки  $\tau$  ( $X_1$ ). Интенсивность съёма металла с поверхности обрабатываемой детали линейно уменьшается по ходу времени, однако эффект этого фактора взаимодействует с  $V$  ( $X_3$ ) и  $U$  ( $X_4$ ). Уменьшение можно «затормозить», если при больших скоростях применять малые интервал включения дополнительной магнитной системы.

Увеличение в рабочем зазоре магнитной индукция дополнительной магнитной системы  $B_{\text{д}}$  ( $X_2$ ) нелинейно повышает производительность, причём положительный квадратичный эффект указывает на интенсивный рост.

Факторы  $X_4$  (интервал включения дополнительной магнитной системы  $u$ ) и  $X_5$  (продолжительность цикла работы дополнительной магнитной системы  $\tau_{\text{д}}$ ) не оказывают статистически значимого самостоятельного влияния и их роль проявляется только во взаимодействиях с другими факторами. Взаимодействие  $X_3X_4$  рассмотрено выше, а взаимодействие  $X_2X_5$  указывает на то, что положительное влияние увеличения индукции может быть усилено возрастанием длительности включения дополнительной магнитной системы.

Задача поиска величин технологических режимов, обеспечивающих максимальную производительность, была решена методом обобщённого приведенного градиента (ОПГ) с использованием программы MS\_Excel [4]. Установлено, что наилучший режим находится на границе изученного факторного пространства (таблица и рисунок 3).

Таблица – Значения технологических режимов и производительности MAO

Значения варьируемых факторов					Величина производительности	
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$\Delta m$ , мг/с	
-1	1	1	-1	1	расчетное значение	экспериментальные значения
$\tau$ , с	$B_{Д}$ , Тл	$V$ , м/с	$u$ , с	$\tau_{Д}$ , с		
30	1,9	0,9	5	6	8,44	9.33; 8.33; 7.67; 8.33

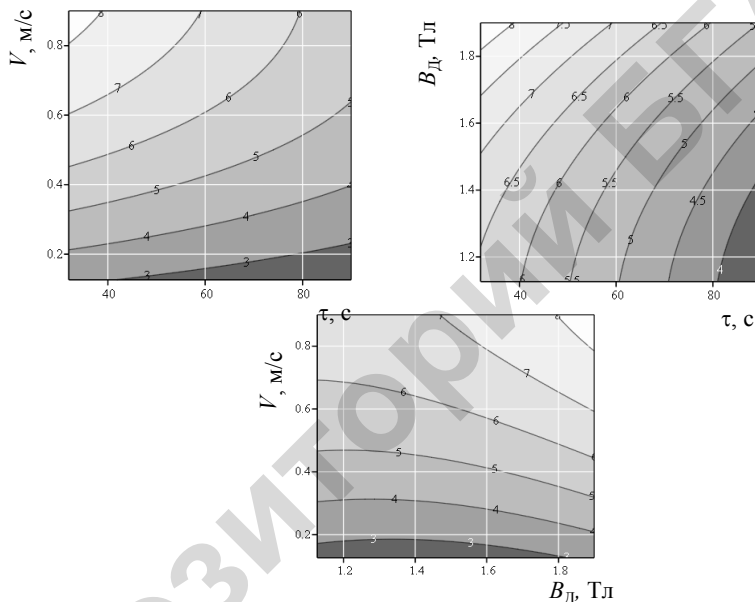


Рисунок 3 – Графическое изображение величины производительности MAO

### Заключение

1. Экспериментально установлено, что периодическое воздействие на ферроабразивную щетку дополнительными потоками энергии магнитного поля, расположенными под углом  $90^\circ$  к основному магнитному полю, обеспечивает высокую производительность MAO на протяжении всего времени обработки.

2. На основе анализа полученного уравнения регрессии установлена степень влияния технологических параметров на производительность МАО:  $V \rightarrow \tau \rightarrow V \times U \rightarrow B_d \rightarrow B_d \times \tau_d$ .

3. Определены значения варьируемых факторов, обеспечивающие максимальную производительность МАО с дополнительной магнитной системой:  $\tau = 30\text{с.}$ ,  $B_d = 1,9\text{Тл}$ ,  $V = 0,9\text{м/с}$ ,  $U = 5\text{с.}$ ,  $\tau_d = 6\text{с.}$

#### Список использованной литературы

1. Акулович, Л.М. Основы профилирования режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2014. – 280с.

2. Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. – Минск : БГАТУ, 2016. – 265 с.

3. Голикова, Т.И. Каталог планов второго порядка / Т.И. Голикова, О.А. Панченко, Т.З. Фридман // В 2 ч. – М: Изд-во МГУ, 1974. – 771 с.

4. Интеллектуальный портал знаний [Электронный ресурс] / Стьюдентизированные удаленные остатки. – Режим доступа: <http://statistica.ru/glossary/general/styudentizirovannye-udalennye-ostatki/>. – Дата доступа 02.05.2016.

**Abstract.** In the article the method of an intensification of cutting process at magnetic-abrasive machining of agricultural machinery details' surfaces by pulse magnetic field energy impact on the cutting tool is considered.