

В ходе испытаний также были рассмотрены следующие режимы работы:

1-ый: сила нагружения 636 Н; удельная нагрузка: 30 МПА; скорость скольжения: 0,5 м/с; расстояние, пройденное образцами: 3000 м.

2-ой: сила нагружения 636 Н; удельная нагрузка: 30 МПА; скорость скольжения: 0,1 м/с; расстояние, пройденное образцами: 3000 м.

При данных режимах работы невозможно было определить износ, т.к. после прохождения 2000 м отпечатки полностью стирались.

Кроме того, при основном режиме работы была выявлена зависимость характера трения от толщины масляного слоя. При недостаточной толщине на отпечатках образовывались тёмные полосы износа.

В зоне этих тёмных полос невозможно было определить размеры отпечатков, и как следствие узнать величину износа. Это связано с ухудшением подтекания смазочного состава в зону трибоконтакта и нарушением условий смазывания пары трения за счет вязкости смазочного материала, вследствие чего в центре контакта происходило сухое трение. Такое же явление наблюдалось при испытании масла с содержанием наноалмазов 0,09%. Причём, увеличение толщины масляного слоя не дало положительных результатов.

**Заключение.** Исследования трибопары при различных режимах работы и в присутствии масла с различным содержанием наноалмазов показало, что с повышением удельной нагрузки снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания при использовании смазки с наноалмазами наблюдается на более ранних стадиях приработки, а скорость скольжения в меньшей степени оказывает влияние на протекание процессов модифицирования поверхности. Наиболее высокие смазывающие свойства при исследуемых режимах работы трибопары проявляются у масел с содержанием наноалмазов 0,36%-0,45%.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Гаркунов, Д. Н. Современные проблемы триботехники и ее общественная значимость / Д. Н. Гаркунов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2007. №6. – С. 2-4.
2. Перекрестов А.П., Непомнящий В.А. Механизм действия противоизносной присадки на магнитной основе. – Вестник АГТУ, 2008. №2 (43). – С. 46-50.

УДК 621.923

### **МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА С УПРАВЛЯЕМОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ФЕРРОАБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН**

*Акулович Л.М., Ворошуха О.Н.*

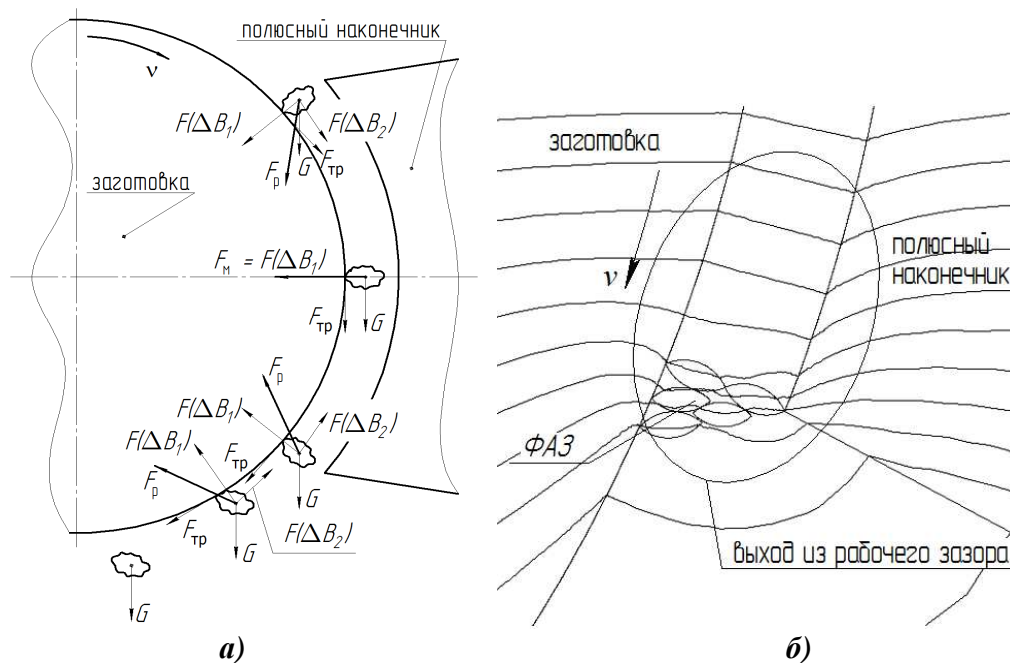
Белорусский государственный аграрный технический университет  
Минск, Республика Беларусь.

Важную роль в обеспечении эксплуатационных характеристик поверхностей деталей играют процессы формирования ее топографии на операциях финишной обработки [1]. Так, величина и форма микронеровностей на рабочих поверхностях деталей оказывает существенное влияние на износостойкость трущихся поверхностей. Уменьшение микронеровностей обеспечивает более благоприятный микропрофиль, облегчающий трение и снижающий износ со-

прягаемых поверхностей. Среди существующих методов финишной обработки в производстве доминирует абразивная обработка, которая нередко является единственно возможным методом обеспечения требуемого качества поверхности. Наиболее технологичной является абразивная обработка, основанная на использовании эластичной связки. К одному из перспективных способов финишной обработки эластичным инструментом относится магнитно-абразивная обработка (МАО). МАО обеспечивает шероховатость поверхности по параметру  $Ra = 0,01 \dots 0,4$  мкм, снижение температуры резания по сравнению с традиционными методами абразивной обработки, что способствует улучшению показателей качества поверхности.

Особенностью МАО является ориентированное абразивное резание. Под действием пандеромоторной силы ферроабразивные зерна (ФАЗ) уже на входе в рабочий зазор ориентируются наибольшей осью вдоль силовых линий магнитного поля и выстраиваются в цепочки, сохраняя начальную ориентацию.

При включении вращения заготовки, результирующая всех сил действующих на ФАЗ (рисунок 1, а) смещает их к выходу из рабочего зазора и удерживает там. По мере уплотнения ФАЗ на выходе из рабочего зазора, наблюдается изменение топографии магнитного поля. ФАЗ принимают положение, при котором передние углы являются отрицательными (рисунок 1, б). При отрицательных передних углах, по мере потери режущей способности ФАЗ, процесс микрорезания переходит в процесс выглаживания, что снижает производительность обработки.



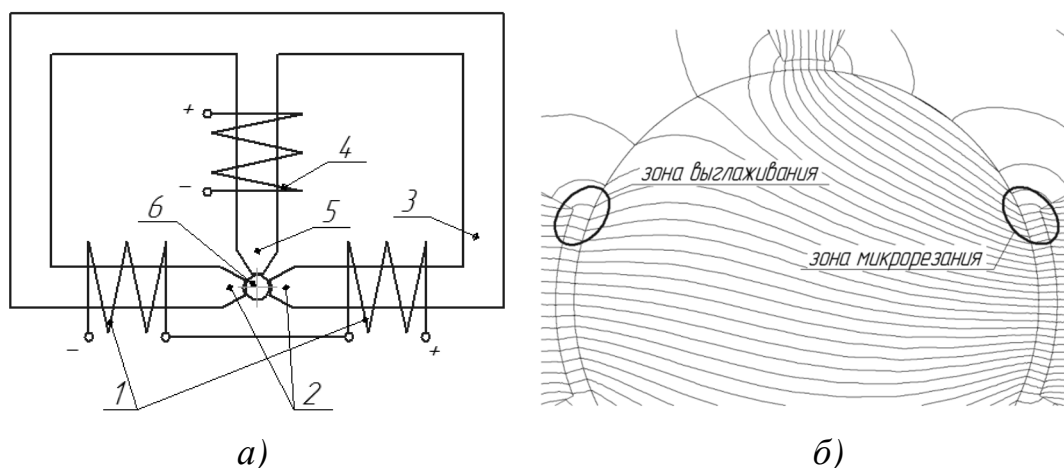
$F_p$  – результирующая сила, действующая на зерно ФАП;  $F_{тр}$  – сила трения;  
 $F_M$  – сила магнитного поля;  $F_M(\Delta B_1)$ ,  $F_M(\Delta B_2)$  – нормальная и тангенциальная  
 составляющие силы магнитного поля;  $G$  – сила тяжести;  
 $v$  – скорость главного движения

Рисунок 1 – Схема сил, действующих на ферроабразивные зерна (а); топография магнитного поля в рабочем зазоре (б)

Для управления ориентацией зерен ФАП путем изменения направления магнитных силовых линий предложено техническое решение, заключающееся в расположении между полюсными наконечниками основного магнитного поля источника дополнительного магнитного поля (рисунок 2, а) [2].

Схема МАО с источником дополнительного магнитного поля изменяет топографию магнитного поля в рабочем зазоре, при которой происходит концентрация магнитных силовых линий в зоне входа в рабочий зазор, создавая условия изменения в ней градиента магнитной индукции и формирует зону резания у входа в рабочий зазор у одного полюсного наконечника и зону выхаживания у другого полюсного наконечника основной магнитной системы (рисунок 2, б).

Расположение дополнительного полюсного наконечника, под углом  $90^\circ$  к основному магнитопроводу, позволяет изменять величину и градиент магнитной индукции в рабочем зазоре, т. е. изменяет направление силовых линий магнитного поля основной магнитной системы. Исследование топографии магнитного поля в рабочем зазоре с использованием компьютерного моделирования позволило установить, что дополнительная магнитная система позволяет изменять угол наклона силовых линий магнитного поля в рабочем зазоре в диапазоне  $43^\circ \dots 85^\circ$  и соответственно передний угол режущих кромок ФАП [2].



1, 4 – катушки электромагнитов; 2, 5 – полюсные наконечники;  
3 – магнитопровод; 6 – заготовка

Рисунок 2 – Схема МАО с дополнительной магнитной системой (а); топография магнитного поля в рабочем зазоре (б)

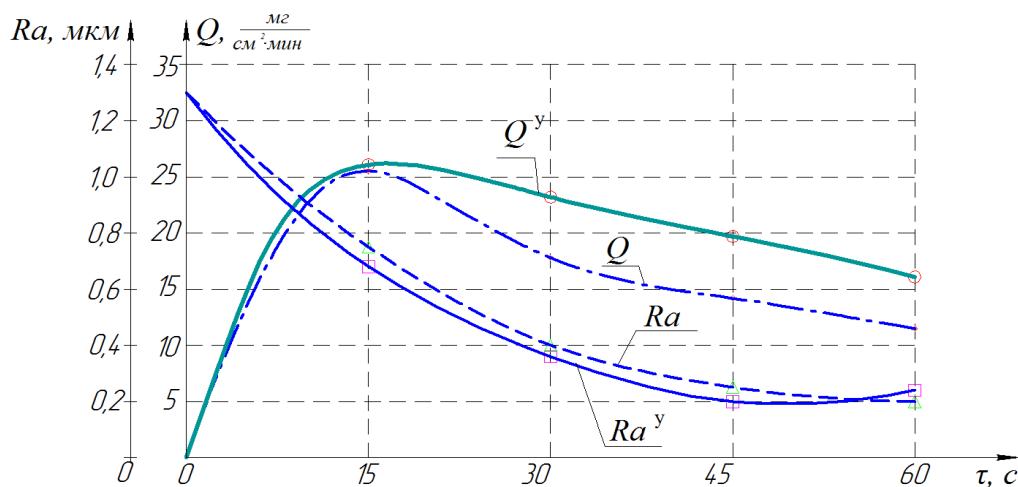
Экспериментальные исследования по установлению влияния на производительность МАО измененного переднего угла режущих кромок ФАП были проведены на модернизированной установке ЭУ-6, содержащей дополнительную магнитную систему.

Условия проведения эксперимента: магнитная индукция основной магнитной системы  $B_0 = 0,9$  Тл; магнитная индукция дополнительной магнитной системы  $B_d = 0,8$  Тл; рабочий зазор основной магнитной системы  $\delta_0 = 1$  мм; рабочий зазор дополнительной магнитной системы  $\delta_d = 1,5$  мм; зернистость ферроабразивного порошка FeTiC  $\Delta = 100\text{--}160$  мкм; скорость главного движения  $v = 0,9$  м/с. Образцами служили поршневые пальцы  $\varnothing 25$  мм, материал сталь

12ХН3А, твердость поверхностного слоя 58–62 HRC. Выходные показатели: достигаемая шероховатость поверхности деталей  $Ra$ , мкм; производительность  $Q$ , мг/(см<sup>2</sup>·мин). Измерение шероховатости поверхности производилось на профилографе-профилометре *Mitutoyo SJ-201P*. Масса деталей взвешивалась на весах *Massa-K BK-600* с точностью до 0,01г.

Были обработаны две партии образцов. Исходная шероховатость образцов  $Ra$  1,14–0,97 мкм. Первую партию обрабатывали по классической схеме МАО без дополнительной магнитной системы, а вторую – с воздействием дополнительного магнитного поля. Все образцы обрабатывались новой порцией порошка.

Графическое представление зависимостей производительности МАО и шероховатости поверхности представлено на рисунке 3.



$Q$  и  $Ra$  – производительность МАО и шероховатость поверхности соответственно при классической схеме;  $Q^y$  и  $Ra^y$  – производительность МАО и шероховатость поверхности соответственно при управлении углом ориентации ФАЗ  
Рисунок 3 – График зависимости шероховатости  $Ra$  и производительности  $Q$  от времени обработки  $\tau$

Анализ экспериментальных данных (рисунок 3) показывает, что после 15 секунд обработки производительность МАО по классической схеме резко падает, а после 30 секунд производительность снижается на 30...40% по сравнению с производительностью в первые 15 секунд обработки. При МАО с управляемым углом наклона ФАЗ в рабочем зазоре, падение производительности более плавное и составляет 8...14% от производительности в первые 15 секунд обработки. Наименьшая шероховатость, при управлении углом наклона ферроабразивных зерен, достигается после 45 секунд обработки, а по классической схеме обработки – после 60 секунд.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Финишная обработка поверхностей / С.А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С.А. Чижика и М.Л. Хейфеца. – Минск : Беларус. навука, 2017. – 377 с.
2. Ворошуха О. Н. Технология магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей с управляемой ориентацией ферроабразивных зерен и регенерацией абразивной щетки импульсным магнитным полем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / О. Н. Ворошуха ; Белорусский национальный технический ун-т. – Минск, 2019. – 24 с.