

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.923

**ВОРОШУХО**  
**Олег Николаевич**

**ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ  
НАРУЖНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
С УПРАВЛЯЕМОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ФЕРРОАБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН  
И РЕГЕНЕРАЦИЕЙ АБРАЗИВНОЙ ЩЕТКИ ИМПУЛЬСНЫМ  
МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

Минск 2019

Работа выполнена в Учреждении образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»

Научный руководитель **АКУЛОВИЧ Леонид Михайлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология металлов» Учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»

Официальные оппоненты: **ПОПОК Николай Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование машиностроительного производства» Учреждения образования «Полоцкий государственный университет»;

**ХОМИЧ Николай Степанович**, кандидат технических наук, директор Республиканского дочернего унитарного предприятия «Полимаг»

Оппонирующая организация Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 19 апреля 2019 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202, телефон ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 18 марта 2019 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, доктор технических наук, профессор



О.Г. Девойно

## ВВЕДЕНИЕ

В передающих механизмах и узлах трения машин доля деталей с цилиндрическими поверхностями достигает около 40%. К ним относятся многие детали трансмиссий мобильных машин и двигателей внутреннего сгорания (валы коробок передач, крестовины карданов, сателлиты, распределительные валы, поршневые пальцы и т.п.), которые изготавливают из конструкционных легированных сталей (20X, 15HMA, 15XMA, 12X2H4A и др.). Износостойкость трущихся поверхностей указанных деталей существенно зависит от величины и формы микронеровностей, которые формируются на операциях финишной обработки.

Среди финишных методов традиционно доминирует абразивная обработка. Она осуществляется жестко связанными, свободными и подвижно-скоординированными абразивными зёрнами. При любом способе финишной абразивной обработки интенсивность резания определяется возможностью изменять давление абразивных зёрен на обрабатываемую поверхность заготовки. В незакрепленном состоянии зёрна абразива более полно используют свои режущие способности, так как каждое зерно имеет возможность независимо осуществлять нивелирование режущей кромки относительно обрабатываемой поверхности. Поэтому использование энергии магнитного поля в качестве гибкой связующей среды для абразивных зёрен является обоснованным. Способ магнитно-абразивной обработки (МАО) обеспечивает ориентированное абразивное резание и отличается простотой в реализации и удобством в управлении. В результате явлений самоорганизации зёрен ферроабразивного порошка (ФАП) под воздействием магнитного поля стремятся сориентироваться наиболее острыми кромками перпендикулярно обрабатываемой поверхности. При этом множество зёрен ФАП охватывают обрабатываемый участок поверхности и образуют гибкий профилирующий абразивный инструмент в виде абразивной щетки.

Общим недостатком существующих способов МАО является снижение режущей способности ФАП из-за износа ферроабразивных зёрен (ФАЗ). Интенсивное резание происходит в течение первых 15...30 с., затем наблюдается его «затухание». Усилия отечественных и зарубежных ученых (Ящерицын П.И., Сакулевич Ф.Ю., Барон Ю.М., Хомич Н.С., Сергеев Л.Е., Майборода В.С., Иконников А.М., Македонский Б.Г., Акулович Л.М., Оликер В.Е., Крымский М.Д. и др.) по интенсификации МАО были направлены на создание композиционных ФАП из сверхтвердых материалов, создание в рабочем пространстве зон с изменяющимся градиентом магнитного поля, механическое воздействие на ФАЗ, использование специальных обрабатывающих технологических сред. Положительные результаты были достигнуты при обработке поверхностей сложного профиля в потоке движущихся ФАЗ.

Однако для МАО цилиндрических поверхностей отсутствуют эффективные методы интенсификации процесса резания, что ограничивает область применения МАО. Поэтому разработка высокопроизводительной технологии, основанной на управлении ориентированным резанием и регенерации контура режущего инструмента во время обработки, является актуальной.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертации соответствует перечню приоритетных научных исследований Республики Беларусь на 2016-2020 годы (многофункциональные материалы и технологии), утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 года № 190.

Диссертационные исследования проводились в рамках:

– ГПНИ «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», задание 5.1.16 на проведение НИР «Формирование физико-механических свойств материала и геометрические параметров обрабатываемых поверхностей при воздействии потока электрической и магнитной энергии» (№ ГР 20123109) и задание 5.1.05 на проведение НИР «Развитие теоретических и технологических основ интенсификации процесса магнитно-абразивной обработки поверхностей деталей машин» (№ ГР 20141307);

– НИР БГАТУ (решение Совета БГАТУ от 03.06.2010г., протокол № 5), тема 3.6 на 2011-2015г.г. «Разработка научных основ воздействия электрическими и магнитными потоками энергии в процессах упрочнения и обработки поверхностей деталей машин» и на 2016-2020г.г. «Исследование и интенсификация процессов финишной магнитно-абразивной обработки поверхностей рабочих органов аппаратов пищевой промышленности».

### **Цель и задачи исследования**

Целью исследований является разработка технологии магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей с управляемой ориентацией ферроабразивных зерен и регенерацией абразивной щетки импульсным магнитным полем, обеспечивающей повышение производительности процесса резания.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

– исследовать кинетику ферроабразивных зерен в рабочем зазоре, обеспечивающую их ориентированную упаковку при формировании абразивной щетки в процессе магнитно-абразивной обработке наружных цилиндрических поверхностей;

– исследовать топографию магнитного поля в рабочем зазоре и установить зону формирования абразивной щетки, в которой технологически возможно управлять величиной наклона ферроабразивных зерен при ориентированном резании. Определить технические решения по управлению;

– разработать и исследовать способ обновления режущих кромок абразивной щетки в процессе магнитно-абразивной обработки, обеспечивающий стабилизацию процесса резания;

– установить зависимости производительности магнитно-абразивной обработки и шероховатости поверхности от технологических режимов магнитно-абразивной обработки и параметров импульсного магнитного поля;

– исследовать микротвердость и коррозионную стойкость поверхностного слоя после магнитно-абразивной обработки с управляемой ориентацией ферроабразивных зерен и регенерацией абразивной щетки импульсным магнитным полем;

– разработать и внедрить технологию магнитно-абразивной обработки цилиндрических поверхностей с управляемой ориентацией ферроабразивных зерен и регенерацией абразивной щетки импульсным магнитным полем.

### **Научная новизна**

1. На основе теоретических исследований механизма формирования в рабочем зазоре абразивной щетки и компьютерного моделирования топографии магнитного поля установлено, что формирование абразивной щетки в зоне входа в рабочий зазор позволяет изменять наклон ферроабразивных зерен относительно обрабатываемой поверхности на угол менее  $90^\circ$ .

2. Предложен метод управления ориентированным резанием, заключающийся в суперпозиции основного магнитного поля и регулируемого дополнительного магнитного поля, полюсный наконечник которого расположен в промежутке между полюсными наконечниками основного магнитного поля, что позволяет изменять направление магнитных силовых линий и уменьшать угол резания.

3. Предложен метод смены режущих кромок абразивной щетки, основанный на переориентации ферроабразивных зерен во время их перемещения из рабочей зоны к полюсному наконечнику источника импульсного магнитного поля и обратно, что обеспечивает в процессе магнитно-абразивной обработки регенерацию абразивной щетки и восстановление режущих свойств ее контура.

4. Установлены зависимости производительности магнитно-абразивной обработки и шероховатости поверхности от технологических режимов и параметров управления ориентацией ферроабразивных зерен и регенерацией абразивной щетки.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты теоретических исследований кинетики ферроабразивных зерен в рабочем зазоре между полюсным наконечником и обрабатываемой поверхностью и полученные компьютерные модели топографии магнитного поля, что позволило научно обосновать необходимые условия для реализации управляемой ориентацией ферроабразивных зерен, а именно формирование абразивной щетки в зоне входа в рабочий зазор, и установить диапазон изменения угла наклона ферроабразивных зерен.

2. Установленные теоретические зависимости величины силы резания от угла наклона оси ферроабразивного зерна относительно обрабатываемой поверхности при изменении угла входа в рабочий зазор направления магнитных силовых линий путем суперпозиции основного магнитного поля и регулируемого дополнительного магнитного поля, на основании чего разработан метод управления ориентированным резанием, что позволяет управлять величиной угла наклона ферроабразивных зерен.

3. Результаты анализа разработанных компьютерных моделей топографии магнитных полей, в рабочем зазоре между полюсными наконечниками электромагнитов и обрабатываемой поверхностью, генерируемых основной магнитной системой и дополнительной, расположенной под углом  $90^\circ$  к основной, позволившие установить, что наибольшая плотность магнитного потока находится в зоне формирования абразивной щетки у входа в рабочий зазор, и разработанный на основе анализа метод смены режущего контура абразивной щетки, основанный на его обновлении за счет переориентации ферроабразивных зерен под воздействием импульсного магнитного поля от дополнительной магнитной системы, и параметры импульсного магнитного поля, обеспечивающие регенерацию абразивной щетки и восстановление ее режущей способности.

4. Результаты экспериментальных исследований, устанавливающие зависимость производительности магнитно-абразивной обработки и шероховатости поверхности от технологических режимов и параметров импульсного магнитного поля, что позволило определить технологические режимы, обеспечивающие повышение производительности магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей, и осуществить их обоснованный выбор для разработки технологического процесса.

5. Результаты экспериментальных исследований влияния магнитно-абразивной обработки на показатели качества поверхности, включающие определение шероховатости, микротвердости и коррозионной стойкости, позволившие установить преимущество магнитно-абразивной обработки с управляемой ориентацией ферроабразивных зерен и регенерацией абразивной щетки импульсным магнитным полем по сравнению с классической технологией магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Лично соискателем разработаны: научное обоснование и метод управления ориентированным резанием, метод смены режущих кромок ферроабразивными частицами с использованием дополнительного импульсного магнитного поля, методики исследований и математико-статистические модели. Направления и методики исследований, обсуждение их результатов и формулирование выводов проводились совместно с научным руководителем д.т.н., профессором Л.М. Акуловичем. Дечко М.М. оказал помощь в расчете коэффициентов математико-статистических моделей. Миранович А.В., Сергеев Л.Е. и другие соавторы принимали участие в обсуждении материалов совместных публикаций, их редактировании и оформлении. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертации не использовались.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты диссертационных исследований были доложены и обсуждены на международных научно-технических конференциях: «Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» (Минск, 2014), «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (Минск, 2015), «Современные проблемы освоения техники, технологий, организации технического сервиса в АПК» (Минск, 2016), «Научно-образовательная среда как основа развития агропромышленного комплекса и социальной инфраструктуры села» (Чебоксары, 2016), «Инженерия поверхности и реновация изделий» (Одесса-Киев, 2016), «Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК» (Минск, 2017), «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество» (Минск, 2018).

Результаты диссертации внедрены в образовательный процесс БГАТУ на кафедре «Технология металлов», прошли производственные испытания и приняты к внедрению на предприятии ООО «Автомобильные конструкции».

#### **Опубликование результатов диссертации**

По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 6 статей в журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь общим объемом 3,9 авторских листа, 6 статей в сборниках материалов конференций, 2 тезиса докладов, получено 3 патента.

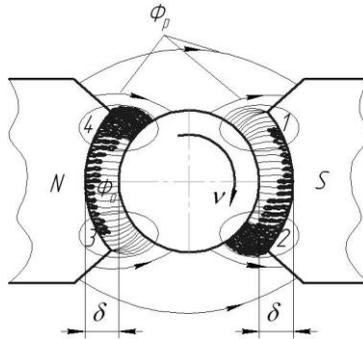
### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

Полный объем диссертации составляет 164 страницы. Работа содержит 78 рисунков на 32 страницах, 12 таблиц на 6 страницах, 9 приложений, библиографический список из 155 источников, включая 17 публикаций автора.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен анализ существующих способов повышения производительности при МАО. Установлено, что на интенсивность МАО и качество поверхности оказывает влияние зона расположения в рабочем зазоре абразивной щетки, в которой происходит концентрация магнитного потока, а в остальной части рабочего зазора магнитный поток ослабевает. При МАО цилиндрических поверхностей абразивная щетка располагается у выхода из рабочего зазора в зонах 2 и 4 (рисунок 1) в результате перемещения ферроабразивных зерен из зон 1 и 3 соответственно.



$\Phi_0$  – основной магнитный поток;  $\Phi_p$  – поток рассеивания;  
 $\delta$  – рабочие зазоры; 1–4 – зоны формирования режущего инструмента;  
 $v$  – скорость главного движения

Рисунок 1. – Схема формирования режущего инструмента при МАО

По мере износа ФАЗ и засаливания абразивной щетки стружкой и продуктами износа, что происходит в течение 15...30 с, производительность МАО снижается в 2 и более раз (рисунок 2), а процесс самоорганизации ФАЗ становится невозможным в уплотненной массе зерен.

Выявлены методы интенсификации процесса резания при МАО:

- изменение величины и направления градиента магнитной индукции путем фокусирования магнитного поля в рабочем зазоре;
- абразивно-ударное воздействие ферроабразивных зерен (ФАЗ) на обрабатываемую поверхность при импульсном изменении направления магнитного потока;

– увеличение давления абразивной щетки на обрабатываемую поверхность путем механического заклинивания ФАЗ в рабочем зазоре;

– создание композиционных ФАП, обладающих повышенной режущей способностью;

– использование смазочно-охлаждающих технологических средств с поверхностно-активными веществами.

Установлено, что для повышения производительности МАО требуется периодическая регенерация абразивной щетки.

На основе проведенного анализа определены цель и задачи исследований.

**Во второй главе** описаны методики исследований, применяемое оборудование и материалы.

Исследования проводились на образцах из цементируемой конструкционной легированной стали 20Х, 12Х2Н4А, 12ХН3А с использованием экспериментальной установки ЭУ-6 на базе токарного станка ТВ-4. В качестве ФАП использовался порошок на основе карбидов титана FeTiC зернистостью  $\Delta = 100\text{--}160$  мкм, СОЖ – «Виттол – 100». Измерение шероховатости поверхностей образцов производили профилометром *Mitutoyo Surftest SJ-201*. Масса образцов измерялась на весах *Massa-K BK-600* с точностью до 0,01г.

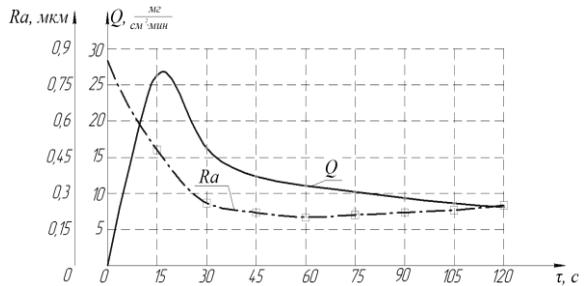
Расчет и построение топографии магнитного поля производились методом конечных элементов с использованием компьютерной программы FEMM 4.2. Пространство, вокруг магнитной системы, разбивается на отдельные части (конечные элементы), имеющие достаточно малые, но конечные размеры.

Экспериментальные исследования влияния параметров импульсного магнитного поля на интенсивность съема металла проводились по пятифакторному трехуровневому композиционному плану, который объединяет план для линейной модели, дополненный опытами с центральными точками факторов для перехода к квадратичной модели и состоящий из 32-х опытов.

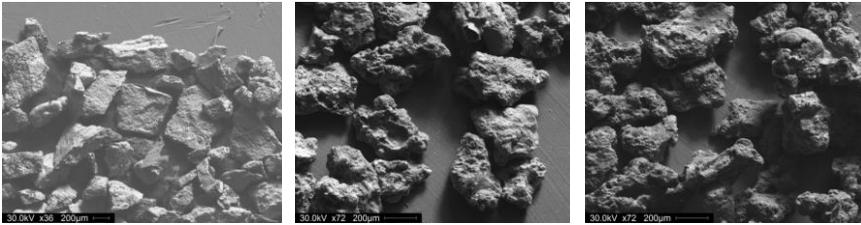
Измерение магнитной индукции проводилось прибором ИМИ-1, а микротвердости – микротвердомером ПМТ-3м. Микроструктуру исследовали на микрошлифах, изготовленных по стандартной методике, с использованием микроскопа МИМ-8м.

**Третья глава** содержит теоретические исследования механизма ориентации ферроабразивных зерен и топографии магнитного поля в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке наружных цилиндрических поверхностей.

Анализ фотографий порошков (рисунок 3), полученных с использованием растровой электронной микроскопии, показывает, что зерна ФАП имеют весьма разнообразную форму, приближающуюся к овальной, эллиптической, веретенообразной, пластинчатой.



**Рисунок 2.** – График зависимости шероховатости  $Ra$  и производительности  $Q$  от времени обработки  $\tau$



а – Fe–W2B5 ×36; б – FeTiC ×72; в – Fe(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiC) ×72

**Рисунок 3. – Фотографии зерен ферроабразивных порошков (растровая электронная микроскопия)**

Обобщенная модель ФАЗ представлена в форме трехосного эллипсоида. Форма такой модели аналогична геоиду, на поверхности которого расположены частицы абразивной составляющей (рисунок 4). При классической схеме МАО передний угол  $\gamma$  режущих элементов ФАЗ имеет отрицательные значения.

Рассмотрим действие сил на ФАЗ в рабочем зазоре (рисунок 5).

В направлении градиента магнитной индукции на ФАЗ действует сила магнитного поля  $F_M$ :

$$F_M = \frac{\mu_a abc \chi H}{R_d + \delta}, \quad (1)$$

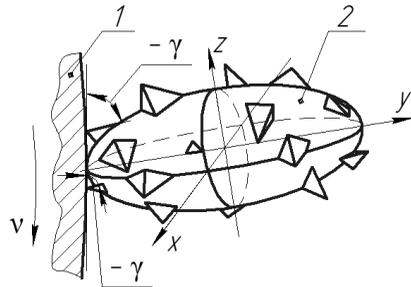
где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – размеры большой, средней и малой осей эллипсоида, м;  $\mu_a$  – магнитная проницаемость материала ФАЗ, Гн/м;  $\chi$  – магнитная восприимчивость материала порошка, Гн/м;  $H$  – напряженность магнитного поля у верхней границы зерна, А/м;  $R_d$  – радиус обрабатываемой заготовки, м;  $\delta$  – величина рабочего зазора, м.

Поскольку градиент магнитной индукции направлен в радиальном и тангенциальном направлении, то соответственно сила  $F_M$  на рисунке 5 представлена в виде 2-х составляющих:  $F_M(\Delta B_1)$  – нормальная и  $F_M(\Delta B_2)$  – тангенциальная.

Сила тяжести  $G$ :

$$G = V \rho g, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность материала порошка, МПа;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup> (Н/кг).



**1 – обрабатываемая поверхность;  
2 – ферроабразивное зерно;  
v – скорость главного движения;  
 $\gamma$  – передний угол**

**Рисунок 4. – Модель ферроабразивного зерна**

При вращении заготовки, между обрабатываемой поверхностью и ФАЗ возникает сила трения  $F_{\text{тр}}$ :

$$F_{\text{тр}} = \mu F_M(\Delta B_1), \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения.

Анализ действующих на зерно ФАП сил магнитного поля показывает, что на входе в рабочий зазор и выходе из него равнодействующая сила направлена в сторону «втягивания» ФАЗ в пространство рабочего зазора (рисунок 5), где они удерживаются силой магнитного поля  $F_M$ .

Следовательно, управлять величиной сил, действующих на ФАЗ в рабочем зазоре при МАО, можно изменением градиента магнитной индукции. Рассмотрим действие этих сил на единичное зерно.

На единичное феррообразивное зерно, находящееся в рабочем зазоре при МАО цилиндрических поверхностей, действуют силы (рисунок 6):

– сила реакции обрабатываемой поверхности  $N$ , равная величине нормальной составляющей силы магнитного поля  $F_M(\Delta B_1)$ ;

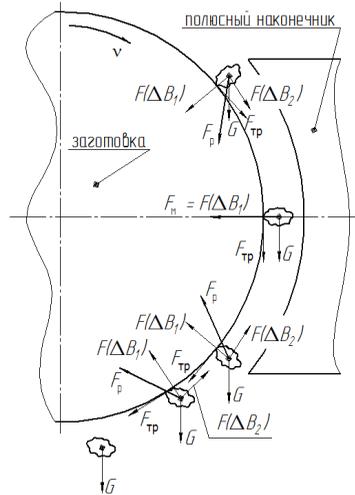
– сила трения  $F_{\text{тр}}$  между феррообразивным зерном и обрабатываемой поверхностью;

– суммарное нормальное давление  $p_k$  на проекцию контактной поверхности феррообразивного зерна, в нормальном сечении, определяющем толщину срезаемого слоя  $h$ .

Проекционные составляющие силы резания, действующие на ФАЗ в направлении осей  $z$  и  $y$ , могут быть выражены зависимостями:

$$P_z = p_k S_1 + F_{\text{тр}}, \quad P_y = N, \quad (4)$$

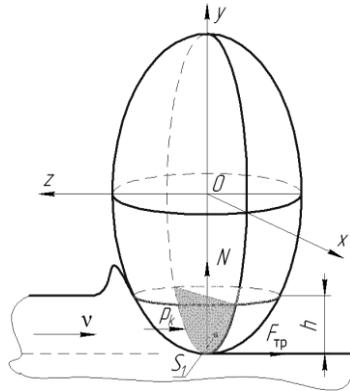
где  $S_1$  – величина площади сечения, на которое действует суммарное контактное напряжение,  $\text{мкм}^2$ .



$F_p$  – результирующая сила, действующая на феррообразивное зерно;

$F_{\text{тр}}$  – сила трения;  $F_M$  – сила магнитного поля;  $F_M(\Delta B_1)$  и  $F_M(\Delta B_2)$  – нормальная и тангенциальная составляющие силы магнитного поля;  $G$  – сила тяжести;  $v$  – скорость главного движения

Рисунок 5. – Схема сил, действующих на феррообразивные зерна



**Рисунок 6. – Схема резания единичным ферромагнитным зерном при МАО**

Величина  $S_1$  с учетом симметричности эллипсоида относительно обеих осей может быть рассчитана по формуле

$$S_1 = \int_{-b}^{-b+h} dy \int_{-a\sqrt{1-\frac{y^2}{b^2}}}^{a\sqrt{1-\frac{y^2}{b^2}}} dx = ab \left( \arccos \frac{b-h}{b} - \frac{b-h}{b} \sqrt{1 - \left( \frac{b-h}{b} \right)^2} \right). \quad (5)$$

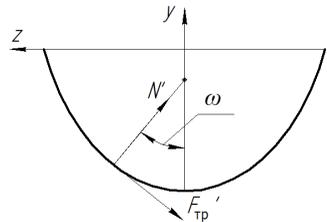
Толщину срезаемого слоя  $h$  в (5) можно определить из закона Кика, если ФАЗ уподобить индентору

$$h = \sqrt{\frac{P_3}{c_3}}, \quad (6)$$

где  $P_3$  – усилие внедрения (равно силе магнитного поля  $F_M$ ),  $N$ ;  $c_3$  – коэффициент, зависящий от угла внедрения ФАЗ и упругопластических свойств материала, в который вдавливается зерно.

Так как угол внедрения ферромагнитного зерна в обрабатываемую поверхность зависит от его наклона, то из (6) следует, что на толщину срезаемого слоя оказывает влияние угол наклона ФАЗ.

При повороте ФАЗ на угол  $\omega$  (рисунок 7) проекции сил на ось  $z$  имеют вид:



**$N'$  – нормальная сила реакции, действующая на ФАЗ со стороны обрабатываемого материала;  
 $F_{тр}'$  – сила трения  
Рисунок 7. – Схема сил, действующих на боковую поверхность ФАЗ**

$$N'_z = N' \sin \omega, \quad F'_{тр z} = F'_{тр} \cos \omega, \quad (7)$$

Суммируя векторы  $N'$  и  $F_{\text{тр}}'$  на полупериметре, с учетом изменения угла  $\omega$ , получаем сумму их интегральных абсолютных значений:

$$\left| \int_{90^\circ}^{0^\circ} N' \sin \omega d\omega \right| + \left| \int_{90^\circ}^{0^\circ} F_{\text{тр}}' \cos \omega d\omega \right| = N' + F_{\text{тр}}'. \quad (8)$$

Нормальные силы можно определить через нормальное давление  $p_{N_z}$ , а силу трения – через касательное напряжение  $p_{F_{\text{тр}}}$ . В свою очередь, нормальное давление пропорционально твердости обрабатываемого материала.

Суммируя проекции сил  $N'$  и  $F_{\text{тр}}'$  на ось  $z$  и учитывая (7), получим составляющую силы резания

$$P_z' = N_z' + F_{\text{тр}_z}' = N'(\sin \omega + \mu \cos \omega). \quad (9)$$

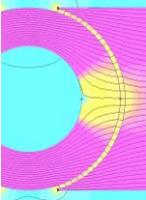
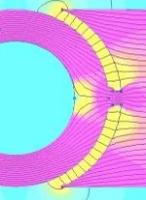
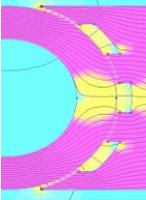
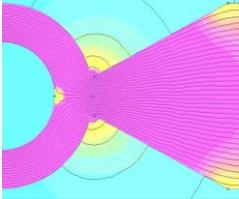
Величина  $P_y'$  при MAO всегда равна величине силы магнитного поля. При постоянстве силы магнитного поля ферроабразивное зерно будет внедряться в обрабатываемую поверхность на глубину, определяемую упругопластическими свойствами обрабатываемого материала.

С позиций теории резания уменьшение угла наклона зерен  $\omega$  приводит к увеличению угла сдвига  $\beta_1$  и уменьшению угла резания. Таким образом, для интенсификации срезания припуска при MAO целесообразно управлять углом наклона ФАЗ, однако при этом необходимо учитывать радиус скругления режущей кромки. Форма ФАЗ в виде трехосного эллипсоида имеет различную кривизну по контуру. Радиус скругления имеет наименьшее значение в точке пересечения эллипса с наибольшей полуосью  $b$ . Возможные зоны контакта ФАЗ с обрабатываемой поверхностью находятся в пределах значений угла  $\omega$  от  $90^\circ$  до  $0^\circ$ . Для трехосного эллипсоида с соотношением полуосей  $b = 1 : c = (b+a)/2 : a = 0,25$  графическим методом определено граничное значение величины угла наклона ферроабразивного зерна  $\omega = 58^\circ$ .

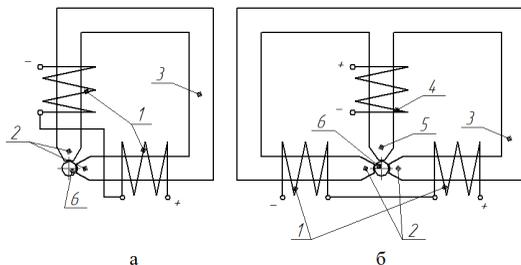
Сила магнитного поля  $F_m$  зависит от величины градиента магнитной индукции, который определяется формой полюсного наконечника электромагнита. Выбор рациональной формы производился путем компьютерного моделирования топографии магнитного поля с использованием программы FEMM 4.2 (таблица 1).

На основе анализа полученных компьютерных моделей топографии магнитного поля установлено, что эквидистантный полюсный наконечник с уменьшенной рабочей площадью (профиль 5) позволяет получить высокие и однородные значения величины магнитной индукции по всей рабочей площади полюсных наконечников. Однако большая величина магнитной индукции затрудняет переориентацию ФАЗ и обновление у них режущих кромок. Следовательно, требуется принудительная регенерация абразивной щетки.

Таблица 1. – Величина магнитной индукции в рабочем зазоре при различных видах фокусирования магнитного поля

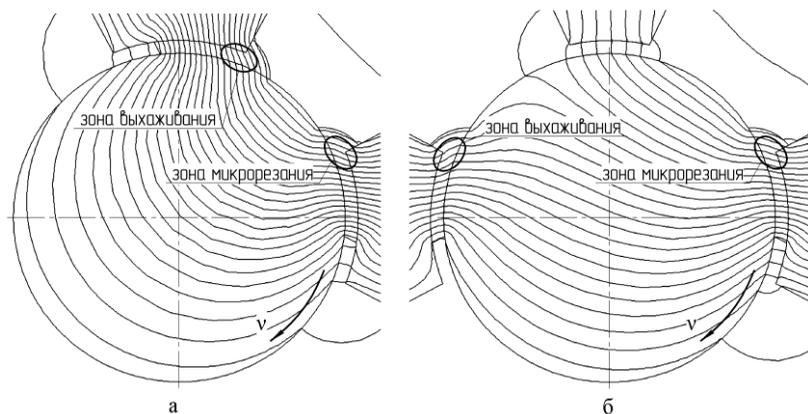
Профиль наконечника		Топография магнитного поля в рабочем зазоре	Величина магнитной индукции в рабочем зазоре В, Тл		
№	вид		в зоне формирования щетки	в центре рабочего зазора	по краям рабочего зазора
1	Эквидистантный		0,6	0,6	0,6
2	Серповидный		0,8	0,2	0,8; 0,2
3	Эквидистантный с концентратором по центру		0,9	0,9	0,3
4	Эквидистантный с тремя пазами		0,7; 0,8	0,2	0,7
5	Эквидистантный с уменьшенной площадью		1,1	1,1	1,1

В результате проведенных исследований предложены технические решения, позволяющие управлять углом ориентации ФАЗ относительно обрабатываемой поверхности путем изменения направления магнитных силовых линий. Предложенные схемы по асимметричному расположению полюсных наконечников основного магнитного поля относительно обрабатываемой поверхности (рисунок 8, а) и по размещению в промежутке между полюсными наконечниками основного магнитного поля источника дополнительного магнитного поля (рисунок 8, б) реализуют принцип суперпозиции магнитных полей, согласно которому в заданной точке рабочего зазора суммарное магнитное поле, создаваемое несколькими источниками, равно сумме векторов каждого из них.



**1, 4 – катушки электромагнитов;  
2, 5 – полюсные наконечники;  
3 – магнитопровод; 6 – заготовка**  
**Рисунок 8. – Схемы МАО с асимметрично  
расположенными полюсными  
наконечниками (а) и с дополнительной  
магнитной системой (б)**

Применение асимметрично расположенных полюсных наконечников позволяет при МАО получить две зоны, в одной из которых будет происходить процесс микрорезания, а в другой – выхаживания (рисунок 9, а). Эта схема целесообразна при снятии небольшого припуска, когда время обработки не выходит за пределы 15 с.



**в – скорость главного движения**  
**Рисунок 9. – Топография магнитного поля в рабочем зазоре  
с асимметричным расположением полюсных наконечников (а)  
и с дополнительной магнитной системой (б)**

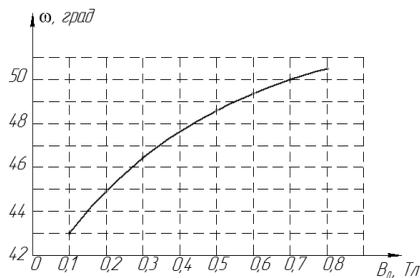
Схема МАО с источником дополнительного магнитного поля аналогично изменяет топографию магнитного поля в рабочем зазоре (рисунок 9, б), при которой происходит концентрация магнитных силовых линий в зоне входа в рабочий зазор, создавая условия изменения в ней градиента магнитной индукции. Эта схема позволяет также осуществлять регенерацию абразивной щетки импульсным воздействием дополнительного магнитного поля.

Компьютерным моделированием топографии магнитного поля установлено, что угол наклона силовых линий магнитного поля в зоне входа в рабочий зазор изменяется в пределах от  $43^\circ$  до  $50^\circ$  (рисунок 10). Изменение величины угла наклона  $\omega$  силовых линий в рабочем зазоре в зависимости от величины магнитной индукции дополнительной магнитной системы  $B_d$  описывается уравнением:

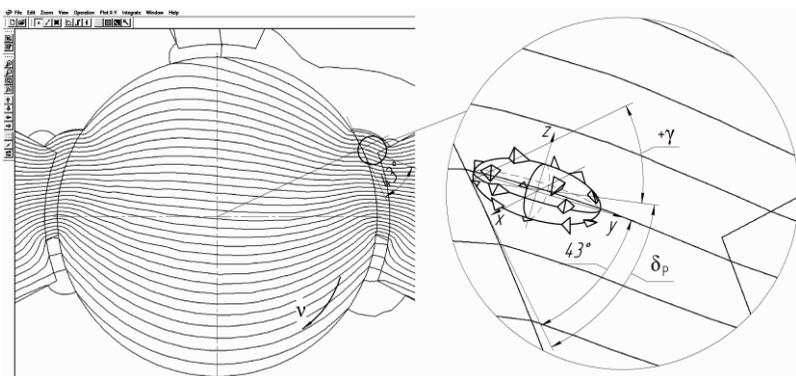
$$\omega = -9,8214B_d^2 + 18,804B_d + 41,615. \quad (10)$$

Компьютерным моделированием установлены также граничные условия величины магнитной индукции, генерируемой дополнительной магнитной системой:  $B_d < B_0$ .

Использование дополнительной магнитной системы для управления наклоном силовых магнитных линий основной магнитной системы позволяет переместить абразивную щетку к входу в рабочий зазор и сориентировать ФАЗ таким образом, чтобы получить у них положительные передние углы ( $+\gamma$ ) (рисунок 11).



**Рисунок 10. – Зависимость угла наклона силовых линий магнитного поля в зоне входа в рабочий зазор от величины магнитной индукции дополнительной магнитной системы**

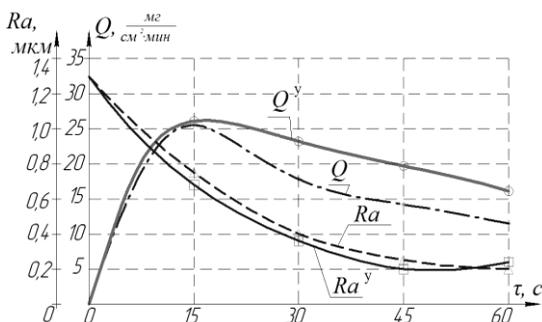


**Рисунок 11. – Компьютерная модель наклона силовых линий магнитного поля и положения ферроабразивного зерна**

Таким образом зона резания формируется у входа в рабочий зазор у одного полюсного наконечника, а зона выхаживания – у другого полюсного наконечника основной магнитной системы. Плавная регулировка угла наклона силовых линий путем изменения величины магнитной индукции, генерируемой дополнительной магнитной системой, позволяет управлять интенсивностью резания и шероховатостью поверхности.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретические предпосылки о влиянии управления углом ориентации ФАЗ относительно обрабатываемой поверхности на производительность MAO (рисунок 12).

Анализ экспериментальных данных (рисунок 12) показывает, что после 15 секунд обработки производительность MAO по классической схеме резко падает, а после 30 секунд производительность снижается на 30...40% по сравнению с производительностью в первые 15 секунд обработки. При MAO с управляемым углом ориентации 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 ФАЗ, достигается после 45 секунд обработки, а по классической схеме обработки – после 60 секунд.



**$Q$  и  $Ra$  – производительность MAO и шероховатость поверхности соответственно при классической схеме**  
**Рисунок 12. – График зависимости шероховатости  $Ra^y$  и производительности  $Q^y$  от времени обработки  $\tau$  при управлении углом наклона ферроабразивных зерен**

**Четвертая глава** посвящена разработке метода повышения режущей способности абразивной щетки и экспериментальным исследованиям влияния параметров управления магнитным полем и технологических режимов на производительность обработки и шероховатость поверхности.

По мере засаливания продуктами микрорезания и в уплотненной массе ФАЗ, процесс самоорганизации абразивной щетки становится невозможным.

Поэтому решена задача принудительной переориентации ФАЗ путем регенерации абразивной щетки. Одним из вариантов решения поставленной задачи является использование направленных магнитных потоков от двух магнитопроводов, расположенных под углом  $90^\circ$  друг к другу и работающих в импульсном режиме (рисунок 9, б), что позволяет восстанавливать режущую способность абразивной щетки за счет периодического перемешивания ФАП в рабочем зазоре.

В результате экспериментальных исследований и численных расчетов получены математико-статистические модели, устанавливающие зависимости производи-

тельности ( $\Delta m$ ) магнитно-абразивной обработки и шероховатости ( $Ra$ ) поверхности от технологических режимов и параметров MAO с регенерацией контура режущего инструмента в процессе MAO:

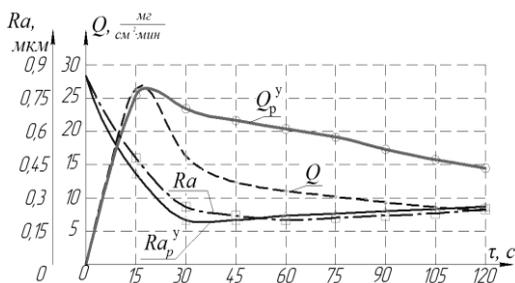
$$\Delta m = 4,45 - 0,71\tau + 0,43B_d + 1,88v - 0,52\tau v + 0,25\tau u + 0,36B_d v + 0,18B_d \tau_d + 0,39B_d^2 - 0,73v^2; \quad (12)$$

$$\Delta Ra = 0,866Ra_{исх} - 0,265 + 0,033B_d + 0,019B_d u - 0,025B_d \tau_d - 0,018v\tau_d - 0,041\tau^2. \quad (13)$$

Установлено, что по степени влияния на производительность  $\Delta m$  обработки, технологические режимы MAO можно расположить в ряд  $Y_1 = \Delta m: v \rightarrow \tau \rightarrow v \times u \rightarrow B_d \rightarrow B_d \times \tau_d$ , а на шероховатость поверхности – в ряд  $Y_2 = Ra: Ra_{исх} \rightarrow B_d \rightarrow B_d \times u \rightarrow v \times \tau_d \rightarrow B_d \times \tau_d \rightarrow \tau$ . Определены рекомендуемые технологические режимы при обработке цилиндрических поверхностей (магнитная индукция основной магнитной системы  $B_0 = 0,9$  Тл; магнитная индукция для управления ориентацией ФАЗ  $B_d = 0,8$  Тл, магнитная индукция импульсов для регенерации  $B_d = 1,9$  Тл; рабочий зазор основной магнитной системы  $\delta_0 = 1$  мм; рабочий зазор дополнительной магнитной системы  $\delta_d = 1,5$  мм; скорость главного движения  $v = 0,9$  м/с; время обработки  $\tau = 30$  с; интервал включения дополнительной магнитной системы  $u = 5$  с, продолжительность цикла работы дополнительной магнитной системы  $\tau_d = 6$  с), обеспечивающие стабильность интенсивности съема металла в пределах 12% и повысить производительность обработки в 1,6...1,8 раза (рисунок 13).

**Пятая глава** посвящена исследованиям показателей качества обработанных поверхностей и разработке технологии магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей с управляемой ориентацией ФАЗ и регенерацией абразивной щетки импульсным магнитным полем.

В результате экспериментальных исследований влияния управляемой ориентации ФАЗ и регенерации абразивной щетки импульсным магнитным полем в процессе магнитно-абразивной обработки на показатели качества обработанных поверхностей установлено, что уменьшение угла резания в зоне входа в рабочий за-



**$Q$  и  $Ra$  – производительность MAO и шероховатость поверхности соответственно при классической схеме**  
**Рисунок 13. – График зависимости шероховатости  $Ra_p^y$  и производительности  $Q_p^y$  от времени обработки  $\tau$  при условиях регенерации абразивной щетки и управлении углом наклона ферроабразивных зерен**

зор и выхаживание обрабатываемой поверхности в зоне выхода из рабочего зазора при обработке заготовок из стали 12ХНЗА снижает шероховатость поверхности по параметру  $Ra$  на 25% по сравнению с классической схемой магнитно-абразивной обработки (рисунок 13).

Использование импульсного магнитного поля для регенерации абразивной щетки повышает микротвердость поверхностного слоя заготовок из стали 12ХНЗА в 1,2 раза (с 10740 МПа до 13100 МПа) и обеспечивает формирование мелкодисперсных структур.

После МАО структура имеет мелкодисперсное строение с равномерно распределенными мелкими округленными зёрнами карбидов. Такая структура способствует росту контактной прочности и повышению износостойкости.

На основании результатов исследований разработана технология (ГФУЛ 03.14 и ГФУЛ 11.18) МАО цилиндрических поверхностей с управляемой ориентацией ФАЗ и регенерацией абразивной щетки импульсным магнитным полем, которая апробирована на предприятии ООО «Автомобильные конструкции» и принята к внедрению с ожидаемым экономическим эффектом 11 478 рублей.

Технологические режимы обработки: скорость главного движения  $v = 0,9$  м/с, время обработки  $\tau = 30$  с, магнитная индукция основной магнитной системы  $B_0 = 0,9$  Тл, магнитная индукция дополнительной магнитной системы  $B_d = 1,9$  Тл, интервал включения дополнительной магнитной системы  $u = 5$  с, продолжительность цикла работы дополнительной магнитной системы  $\tau_d = 6$  с, зернистость ферроабразивного порошка FeTiC  $\Delta = 100\text{--}160$  мкм, СОЖ – «Виттол – 100». Технология ГФУЛ 03.14 обеспечивает микропрофиль поверхностей с шероховатостью  $Ra$  0,24...0,16 мкм и повышает производительность финишной обработки в 4,5–4,7 раза по сравнению с действующей на предприятии технологией полирования.

Результаты исследований механизма интенсификации магнитно-абразивной обработки цилиндрических поверхностей внедрены в образовательный процесс БГАТУ на кафедре «Технология металлов» при подготовке инженеров по специальности 1–74 06 03 «Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве», что повышает профессиональную компетенцию студентов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании теоретического анализа сил, действующих на ферроабразивные зёрна в рабочем зазоре и экспериментальных исследований магнитно-абразивной обработки по классической схеме, установлено, что при расположении абразивной щетки в зоне выхода из рабочего зазора действие сил трения наклоняет ферроабразивные зёрна в направлении вектора скорости главного движения, увеличивая при этом угол резания, в результате чего через 15...30 секунд обработки съём металла снижается в 2 и более раз. Вместе с тем, по мере износа режущей кромки ферроабразивное зёрно не может переориентироваться и сменить режущую кромку, так как этому препятствуют соседние зёрна, находящиеся в плотной упаковке. Это позволило обосновать целесообразность повышения производительности обработки путем управления углом наклона ферроабразивных зёрен относительно обрабатываемой поверхности, а для обновления режущих кромок производить периодическую регенерацию абразивной щетки [5].

2. В результате теоретических исследований кинетики ферроабразивных зерен и полученных компьютерных моделей топографии основного и дополнительного магнитных полей в рабочем зазоре установлено, что формирование абразивной щетки в зоне входа в рабочий зазор позволяет управлять углом наклона ферроабразивных зерен относительно обрабатываемой поверхности в интервале  $43^\circ \dots 85^\circ$ , что уменьшает угол резания. На основании результатов этих исследований разработан метод управления углом ориентацией ферроабразивных зерен относительно обрабатываемой поверхности, заключающийся в суперпозиции основного магнитного поля и регулируемого дополнительного магнитного поля, полюсный наконечник которого расположен между полюсными наконечниками основного магнитного поля, что позволяет изменить направление магнитных силовых линий в зоне формирования абразивной щетки, уменьшить угол резания и повысить интенсивность съема металла до 40% [4, 5].

3. На основании анализа компьютерных моделей топографии магнитных полей, генерируемых основной магнитной системой и дополнительной, расположенной под углом  $90^\circ$  к основной, установлено распределение плотности магнитного потока в рабочем зазоре между полюсными наконечниками электромагнитов и обрабатываемой поверхностью и разработан метод обновления режущего контура абразивной щетки, основанный на его переформировании под воздействием импульсов дополнительного магнитного поля в процессе магнитно-абразивной обработки. Экспериментально установлены параметры дополнительного магнитного поля (магнитная индукция для управления ориентацией ферроабразивных зерен  $B_d = 0,8$  Тл, магнитная индукция импульсов для регенерации  $B_d = 1,9$  Тл, интервал включения импульсов дополнительной магнитной системы  $u = 5$  с, продолжительность импульса дополнительной магнитной системы  $\tau_d = 6$  с, угол расположения источника импульсного магнитного поля  $90^\circ$ ), осуществляющего управление ориентированным резанием, а при подаче импульса магнитного поля – переориентацию ферроабразивных зерен и формирование в зоне входа в рабочий зазор обновленной абразивной щетки, что позволяет стабилизировать интенсивность съема металла на протяжении всего цикла обработки в интервале 5...12% по сравнению с ранее достигнутым 30...60% и повысить производительность обработки в 1,6...1,8 раза [1 – 3, 6 – 8, 10, 12, 13 – 17].

4. В результате экспериментальных исследований магнитно-абразивной обработки с импульсным воздействием дополнительным магнитным полем на ферроабразивную щетку получены математико-статистические модели, устанавливающие зависимости производительности ( $\Delta m$ ) магнитно-абразивной обработки с регенерацией абразивной щетки и шероховатости поверхности (по параметру  $Ra$ ) от технологических режимов. Установлено, что по степени влияния на производительность  $\Delta m$  технологические режимы можно расположить в ряд  $Y_1 = \Delta m: v \rightarrow \tau \rightarrow v \times u \rightarrow B_d \rightarrow B_d \times \tau_d$ , а на шероховатость поверхности – в ряд  $Y_2 = Ra: Ra_{max} \rightarrow B_d \rightarrow B_d \times u \rightarrow v \times \tau_d \rightarrow B_d \times \tau_d \rightarrow \tau$ . Определены рациональные технологические режимы при обработке цилиндрических поверхностей (магнитная индукция основной магнитной системы  $B_0 = 0,9$  Тл; магнитная индукция дополнительной магнитной системы 1,9 Тл; рабочий зазор основной магнитной системы  $\delta_0 = 1$  мм; рабочий зазор дополнительной магнитной системы  $\delta_d = 1,5$  мм; скорость главного движения  $v =$

0,9 м/с; время обработки  $\tau = 30$  с; интервал включения дополнительной магнитной системы  $u = 5$  с, продолжительность цикла работы дополнительной магнитной системы  $t_d = 6$  с), обеспечивающие стабильность интенсивности съема металла в пределах 15% [6, 10, 12, 13].

5. В результате экспериментальных исследований влияния управляемой ориентации ферроабразивных зерен и регенерации абразивной щетки импульсным магнитным полем на показатели качества обработанных поверхностей заготовок из стали 12ХН3А установлено:

- уменьшение угла резания в зоне входа в рабочий зазор и его увеличение в зоне выхода из рабочего зазора реализует цикл выхаживания обрабатываемой поверхности и снижает ее шероховатость по параметру  $Ra$  на 25% по сравнению с классической схемой магнитно-абразивной обработки;

- воздействие импульсного магнитного поля повышает микротвердость поверхностного слоя до 1,2 раза (с 10740 МПа до 13100 МПа) и обеспечивает формирование мелкодисперсных структур;

- коррозионная стойкость обработанной поверхности не изменяется [3 – 5, 7, 9, 11, 14].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. На основании результатов исследований процесса магнитно-абразивной обработки с управляемой ориентацией ферроабразивных зерен и регенерацией абразивной щетки импульсным магнитным полем разработаны технологии магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей деталей (ГФУЛ 03.14, ГФУЛ 11.18). Технология ГФУЛ 03.14 прошла производственную апробацию и принята к внедрению на предприятии ООО «Автомобильные конструкции» с ожидаемым экономическим эффектом 11 478 рублей.

2. Результаты исследований механизма интенсификации магнитно-абразивной обработки внедрены в образовательный процесс БГАТУ на кафедре «Технология металлов» при подготовке инженеров по специальности 1–74 06 03 «Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве», что повышает профессиональную компетенцию студентов.

3. Разработанные технология и устройство для ее реализации могут найти применение в производствах деталей гидроаппаратуры диаметром 10...70 мм, станкостроительными и ремонтными предприятиями, а также учреждениями образования машиностроительного профиля.



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Регенерация ферроабразивной щетки при магнитно-абразивной обработке на основе самоорганизации процесса / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, И. Ю. Комик, О. Н. Ворошухо, О. Н. Ващило // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2011. – Вып. 110. – С. 206–211.
2. Акулович, Л. М. Повышение износостойкости поверхностей валов коробок перемены передач упрочнением и обработкой в электромагнитном поле / Л. М. Акулович, А. В. Миранович, О. Н. Ворошухо // Научное обозрение. – 2015. – № 4. – С. 151–163.
3. Акулович, Л. М. Управление обработкой поверхностей деталей машин в процессах магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки / Л. М. Акулович, А. В. Миранович, О. Н. Ворошухо // Вес. Нац. Акад. Навук Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. Навук. – 2016. – № 4. – С.37–48.
4. Акулович, Л. М. Магнитно-абразивная обработка цилиндрических канавок с радиусным профилем / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, О. Н. Ворошухо // Вестник БарГУ. Серия: технические науки. – 2018. – Вып. 6. – С. 20–32.
5. Акулович, Л. М. Интенсификация магнитно-абразивной обработки изменением угла наклона частиц ферроабразивного порошка при ориентированном резании / Л. М. Акулович, А. А. Тиунчик, О. Н. Ворошухо // Агропанорама. – 2018. – № 4. – С. 2–9.
6. Акулович, Л. М. Особенности магнитно-абразивной обработки с регенерацией контура режущего инструмента импульсным магнитным полем / Л. М. Акулович, М. М. Дечко, О. Н. Ворошухо // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – Вып. 11. – С. 71–77.

### Материалы конференций

7. Акулович, Л. М. Интенсификация магнитно-абразивной обработки воздействием дополнительного магнитного поля / Л. М. Акулович, О. Н. Ворошухо // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы международной научно-практической конференции, Минск, 23–24 окт. 2014 г. : в 2 ч. / БГАТУ ; редкол. : И. Н. Шило (научный ред.) [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 2. – С. 106–108.
8. Акулович, Л. М. Повышение износостойкости рабочих поверхностей деталей машин обработкой в электромагнитном поле / Л. М. Акулович, А. В. Миранович, О. Н. Ворошухо // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 9 июня 2016 г. / БГАТУ ; редкол. : Н. К. Лисай (научный ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 154–160.
9. Ворошухо, О. Н. Интенсификация процесса резания при магнитно-абразивной обработке деталей сельско-хозяйственных машин / О. Н. Ворошухо, М. М. Дечко // Научно-образовательная среда как основа развития агропромышленного комплекса и социальной инфраструктуры села (посвященной 85-летию ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА): материалы международной научно-практической конференции, Чебоксары, 20–21 окт. 2016 г. / ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА ; ред. : А. Е. Макушев. – Чебоксары, 2016. – С. 386–389.

10. Акулович, Л. М. Повышение износостойкости поверхностей деталей мобильных машин с использованием энергии электромагнитного поля / Л. М. Акулович, А. В. Миранович, О. Н. Ворошуха // Научно-образовательная среда как основа развития агропромышленного комплекса и социальной инфраструктуры села (посвященной 85-летию ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА): материалы международной научно-практической конференции, Чебоксары, 20–21 окт. 2016 г. / ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА ; ред. : А. Е. Макушев. – Чебоксары, 2016. – С. 343–347.

11. Акулович, Л. М. Влияние регенерации режущей способности ферроабразивной щетки на производительность магнитно-абразивной обработки / Л. М. Акулович, М. М. Дечко, О. Н. Ворошуха // Инженерия поверхности и реновация изделий : материалы 16-й Международной научно-технической конференции, Одесса, 30 мая–03 июня 2016г. / АТМ Украины ; ред. М. Ю. Копейкина. – Киев, 2016. – С. 5–7.

12. Акулович, Л. М. Управление процессом резания при магнитно-абразивной обработке поверхностей деталей / Л. М. Акулович, М. М. Дечко, О. Н. Ворошуха // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Белагро-2017», Минск, 7–8 июня 2017 г. / М-во сел. хоз-ва и прод. Респ. Беларусь, УО «Белорус. гос. аграр. техн. ун-т», РО «Белагросервис» ; редкол.: Н. Н. Романюк [и др.]. – Минск, 2017. – С. 55-62.

#### **Тезисы докладов**

13. Акулович, Л. М. Регенерация режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке / Л. М. Акулович, О. Н. Ворошуха // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : междуна. науч.-техн. конф., Минск, 8–9 апреля 2015 г. : тез. докл. / БНТУ ; редкол. : В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2015. – С. 14–17.

14. Магнитно-абразивная обработка беговых дорожек шариковых подшипников / Л. М. Акулович, С. Е. Сергеев, О. Н. Ворошуха, Д. В. Кучук // Технология – Оборудование – Инструмент – Качество : 33-я Междуна. науч.-техн. конф., Минск, 11 апреля 2018 г. : тез. докл. / БНТУ ; редкол. : В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2018. – С. 14–15.

#### **Патенты**

15. Станок для магнитно-абразивной обработки рабочих поверхностей бочкообразных роликов : полез. модель ВУ 8480 / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, В. А. Агейчик, Н. И. Ермаков, О. Н. Ворошуха. – Опубл. 30.08.2012.

16. Станок для комбинированной обработки поверхностей бочкообразного ролика подшипника : пат. ВУ 18336 / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, В. А. Агейчик, Н. И. Ермаков, О. Н. Ворошуха. – Опубл. 30.06.2014.

17. Станок для комбинированной обработки поверхностей бочкообразного ролика подшипника : пат. ВУ 19211 / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, В. А. Агейчик, Н. И. Ермаков, О. Н. Ворошуха. – Опубл. 30.06.2015.

## РЭЗІЮМЭ

Варашуха Алег Мікалаевіч

**ТЭХНАЛОГІЯ МАГНІТНА-АБРАЗІЎНАЙ АПРАЦОЎКІ  
ВОНКАВЫХ ЦЫЛІНДРЫЧНЫХ ПАВЕРХНЯЎ  
З КІРАВАНАЙ АРЫЕНТАЦЫЯЙ ФЕРААБРАЗІЎНЫХ ЗЕРНЯЎ  
І РЭГЕНЕРАЦЫЯЙ АБРАЗІЎНАЙ ШЧОТКІ ІМПУЛЬСНЫМ  
МАГНІТНЫМ ПОЛЕМ**

**Ключавыя словы:** магнітна-абразіўная апрацоўка, тапаграфія магнітнага поля, абразіўная шчотка, фераабразіўнае зерне, імпульснае магнітнае поле, прадукцыйнасць, шурпатаць паверхні.

**Мэта даследаванняў:** распрацоўка тэхналогіі магнітна-абразіўнай апрацоўкі вонкавых цыліндрычных паверхняў з кіраванай арыентацыяй фераабразіўных зерняў і рэгенерацыяй абразіўнай шчоткі імпульсным магнітным полем, якая забяспечвае павышэнне прадукцыйнасці працэсу рэзанання.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** тэарэтычныя, якія базуюцца на тэорыі рэзанання, законах тэарэтычнай механікі, электрамагнетызму, і эксперыментальныя з вымярэннем шурпатасці (прафілометр *Mitutoyo Surftest SJ-201*), масы (шалі *Massa-K BK-600*), магнітнай індукцыі (прылада ІМІ-1), мікрацвердасці (мікрацвердамер ПМТ-3м), мікраструктуры (мікраскоп МІМ-8м).

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** матэматычныя залежнасці велічыні сіл, якія дзейнічаюць на фераабразіўныя зерні, і кампутарныя мадэлі тапаграфіі магнітнага поля, што абгрунтоўваюць фармаванне абразіўнай шчоткі ў зоне ўваходу ў рабочы зазор і змяненне кірунку магнітных сілавых ліній шляхам суперпазіцыі асноўнага магнітнага поля і рэгуляванага дадатковага магнітнага поля, на падставе чаго распрацаваны метады кіравання арыентацыяй фераабразіўных зерняў і вызначаны параметры імпульснага магнітнага поля, што забяспечваюць рэгенерацыю абразіўнай шчоткі.

Эксперыментальныя залежнасці прадукцыйнасці магнітна-абразіўнай апрацоўкі і шурпатасці паверхні ад параметраў кіравання арыентацыяй фераабразіўных зерняў і рэгенерацыі абразіўнай шчоткі, якія адрозніваюцца стабільнасцю інтэнсіўнасці здыму металу ў межах 12%, зніжэннем шурпатасці паверхні на 25%, павелічэннем мікрацвердасці павярхоўнага пласта да 1,2 разы і падвышэннем прадукцыйнасці апрацоўкі ў 1,6...1,8 разы.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** тэхналогія апрацавана пры аднаўленні парты (20 штук) валаў каробкі перадач аўтамабіля ГАЗ-3221.

**Галіна выкарыстання:** вытворчасць дэталю гідраапаратуры, каробак перадач і трансмісій транспартных сродкаў.

## РЕЗЮМЕ

Ворошухо Олег Николаевич

**ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ  
НАРУЖНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
С УПРАВЛЯЕМОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ФЕРРОАБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН  
И РЕГЕНЕРАЦИЕЙ АБРАЗИВНОЙ ЩЕТКИ ИМПУЛЬСНЫМ  
МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

**Ключевые слова:** магнитно-абразивная обработка, топография магнитного поля, абразивная щетка, ферроабразивное зерно, импульсное магнитное поле, производительность, шероховатость поверхности.

**Цель исследований** – разработка технологии магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей с управляемой ориентацией ферроабразивных зерен и регенерацией абразивной щетки импульсным магнитным полем, обеспечивающей повышение производительности процесса резания.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** теоретические, базирующиеся на теории резания, законах теоретической механики, электромагнетизма, и экспериментальные с измерением шероховатости (профилометр *Mitutoyo Surfest SJ-201*), массы (весы *Massa-K BK-600*), магнитной индукции (прибор ИМИ-1), микротвердости (микротвердомер ПМТ-3м), микроструктуры (микроскоп МИМ-8м).

**Полученные результаты и их новизна:** математические зависимости величины сил, действующих на ферроабразивные зерна, и компьютерные модели топографии магнитного поля, обосновывающие формирование абразивной щетки в зоне входа в рабочий зазор и изменение направления магнитных силовых линий путем суперпозиции основного магнитного поля и регулируемого дополнительного магнитного поля, на основании чего разработан метод управления ориентацией ферроабразивных зерен и определены параметры импульсного магнитного поля, обеспечивающие регенерацию абразивной щетки.

Экспериментальные зависимости производительности магнитно-абразивной обработки и шероховатости поверхности от параметров управления ориентацией ферроабразивных зерен и регенерации абразивной щетки, отличающиеся стабильностью интенсивности съема металла в пределах 12%, снижением шероховатости поверхности на 25%, увеличением микротвердости поверхностного слоя до 1,2 раза и повышением производительности обработки в 1,6...1,8 раза.

**Рекомендации по использованию:** технология апробирована при восстановлении партии (20 штук) валов коробки передач автомобиля ГАЗ-3221.

**Область применения:** производство деталей гидроаппаратуры, коробок передач и трансмиссий транспортных средств.

## SUMMARY

Voroshuho Oleg Nikolaevich

### TECHNOLOGY OF MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING OF EXTERNAL CYLINDRICAL SURFACES WITH CONTROLLABLE FERRO-ABRASIVE GRAINS ORIENTATION AND ABRASIVE BRUSH REGENERATION WITH PULSED MAGNETIC FIELD

**Keywords:** magnetic-abrasive machining, magnetic field topography, abrasive brush, ferro-abrasive grain, pulsed magnetic field, productivity, surface roughness.

**The research purpose** is the development of the technology of magnetic-abrasive machining of external cylindrical surfaces with controllable orientation of ferro-abrasive grains and abrasive brush regeneration with a pulsed magnetic field that provides an increase in the cutting process productivity.

**Research methods and equipment used:** theoretical, based on cutting theory, laws of theoretical mechanics, electromagnetism, and experimental with roughness (Mitutoyo SurfTest SJ-201 profilometer), mass (Massa-K BK-600 scales), magnetic induction (device IMI-1), micro-hardness (PMT-3m microhardness meter) and microstructure (MIM-8m microscope) measurements.

**Obtained results and their novelty:** mathematical dependencies of the forces acting on ferro-abrasive grains, and computer models of the magnetic field topography, justifying the formation of an abrasive brush in the area of entry into the working gap and changing the direction of magnetic field lines by superposition of the main magnetic field and adjustable additional magnetic field, on the basis of which a method has been developed to control the ferro-abrasive grains orientation and determined the parameters of a pulsed magnetic field that provide abrasive brush regeneration.

Experimental dependencies of the productivity of magnetic-abrasive machining and surface roughness on the parameters controlling the orientation of ferro-abrasive grains and abrasive brush regeneration, characterized by a stable metal removal rate of 12%, a decrease in surface roughness by 25%, and an increase in the surface layer microhardness up to 1.2 times and an increase in processing productivity by 1.6...1.8 times.

**Recommendations for use:** the technology has been tested when recovering a batch (20 pieces) of the shafts of a GAZ-3221 gearbox.

**Application field:** production of hydraulic equipment parts, gearboxes and transmissions of vehicles.

Научное издание

**ВОРОШУХО**  
**Олег Николаевич**

**ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ  
НАРУЖНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
С УПРАВЛЯЕМОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ФЕРРОАБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН  
И РЕГЕНЕРАЦИЕЙ АБРАЗИВНОЙ ЩЕТКИ ИМПУЛЬСНЫМ  
МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

Подписано в печать 14.03.2019. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 60. Заказ 129.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.