

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев

**МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА
СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

Минск
БГАТУ
2019

Акулович, Л. М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2019. – 272 с.: ил. – ISBN 978-985-25-0018-0.

В монографии описаны особенности формирования топографии и микрорельефа сложнопрофильных поверхностей при их магнитно-абразивной обработке. Научно обоснованы компоненты рабочей технологической среды, оказывающие основное влияние на процесс магнитно-абразивной обработки. Приведены результаты исследования свойств компонентов рабочей технологической среды и их влияния на интенсивность съема материала и показатели качества сложнопрофильных поверхностей тел вращения. Предложен метод управления параметрами рабочей технологической среды с учетом самоорганизации процесса магнитно-абразивной обработки. Рассмотрены примеры практической реализации технологии магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей.

Для научных работников, занимающихся разработкой технологий финишной обработки поверхностей деталей машин, аспирантов и студентов машиностроительных специальностей высших учебных заведений.

Табл. 52. Ил. 95. Библиогр.: 308 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Учреждения образования «Белорусский государственный
аграрный технический университет»
(протокол № 1 от 3 января 2019 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор,
заведующий научно-исследовательской инновационной
лабораторией плазменных и лазерных технологий
филиала БНТУ «Научно-исследовательский
политехнический институт» *О. Г. Девойно*;
кандидат технических наук, доцент,
начальник отдела – заведующий лабораторией
ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси» *И. И. Вегера*

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
Глава 1. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ФИНИШНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	
1.1. Анализ методов финишной абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....	11
1.1.1. Классификация сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....	13
1.1.2. Финишная обработка сложнопрофильных поверхностей инструментом с жестко-связанным абразивным зерном.....	15
1.1.3. Финишная обработка сложнопрофильных поверхностей инструментом со свободным закреплением абразивного зерна.....	16
1.1.4. Финишная обработка сложнопрофильных поверхностей инструментом с подвижно-скоординированным закреплением абразивного зерна.....	19
1.1.5. Финишная обработка сложнопрофильных поверхностей инструментом с гибким проволочно-абразивным валом.....	20
1.1.6. Современные представления механизмов съема металла при финишной абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей.....	22
1.2. Основные закономерности механизма стружкообразования при финишной абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей тел вращения и технологические параметры.....	25
1.3. Влияние параметров рабочей технологической среды на магнитно-абразивную обработку сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....	29
1.4. Механизм формирования микрорельефа, топографии и профиля поверхности при магнитно-абразивной обработке тел вращения.....	35
1.5. Анализ способов магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения, схем и конструкций оборудования.....	38
1.6. Методология исследования процессов магнитно-абразивной обработки в электромагнитном поле.....	43

1.7. Методология самоорганизации процессов магнитно-абразивной обработки в электромагнитном поле.....	46
1.8. Экспериментальное оборудование, приборы и материалы для исследования процесса магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....	48
1.9. Методы исследования.....	50
1.9.1. Методика исследования абразивной способности ферроабразивных порошков.....	50
1.9.2. Методики исследования смазочно-охлаждающих технологических средств.....	52
1.9.2.1. Методика исследования смазочно-охлаждающих технологических средств компьютерной микроскопией.....	52
1.9.2.2. Методика исследования бактерицидной поражаемости смазочно-охлаждающих технологических средств.....	53
1.10. Методики расчета и исследования топографии магнитного поля и ферроабразивных порошков.....	54
1.10.1. Методики расчета параметров ЭМП и определения магнитных характеристик ФАП.....	54
1.10.2. Методика исследования прохождения различных рабочих жидкостей через слой ФАП при наложении магнитного поля.....	56
Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАБОЧЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И КАЧЕСТВО ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ	
2.1. Кинетика рабочей технологической среды при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....	58
2.1.1. Кинетика рабочей технологической среды при магнитно-абразивной обработке с учетом синергизма ее факторов.....	58
2.1.2. Динамика рабочей технологической среды при магнитно-абразивной обработке с учетом синергизма ее факторов.....	60
2.1.3. Исследование влияния давления рабочей технологической среды на обрабатываемую поверхность при магнитно-абразивной обработке.....	67
2.1.4. Исследование режущей способности рабочей технологической среды и ее адгезионного взаимодействия с обрабатываемым металлом при магнитно-абразивной обработке.....	71

2.2. Исследование процесса формирования топографии магнитного поля для магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....	75
2.2.1. Теоретическое описание топографии магнитного поля для сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....	76
2.2.2. Исследование топографии магнитного поля решением системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты.....	80
2.2.3. Исследование топографии магнитного поля методом конформных отображений.....	83
2.3. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....	87
2.3.1. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке деталей сферической формы.....	87
2.3.2. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке мелкозубчатых колес.....	89
2.3.3. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке наружных конических поверхностей.....	91
2.3.4. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке внутренних конических поверхностей.....	93
2.4. Экспериментальные исследования влияния параметров рабочей технологической среды на производительность и качество при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....	95
2.4.1. Исследование топографии магнитного поля на основе схемы обработки беговых дорожек внутренних колец подшипников качения.....	96
2.4.2. Факторный анализ процесса магнитно-абразивной обработки по производительности и качеству поверхности.....	100
2.4.3. Разработка математико-статистических моделей зависимости производительности и качества обрабатываемой поверхности при магнитно-абразивной обработке от технологических режимов.....	104

Глава 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ФЕРРОАБРАЗИВНЫХ ПОРОШКОВ, ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СЪЕМА МЕТАЛЛА

3.1. Разработка технологии изготовления композиционных ферроабразивных порошков.....	112
--	-----

3.1.1. Виды ферроабразивных порошков и способы их изготовления.....	113
3.1.2. Магнитная проницаемость ферроабразивных порошков.....	116
3.1.3. Исследования структуры и фазового состава ферроабразивных порошков.....	119
3.1.4. Технологии изготовления композиционных ферроабразивных порошков.....	123
3.2. Исследование режущей способности композиционных ферроабразивных порошков при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....	126
3.2.1. Исследование режущей способности ферроабразивных порошков на основе оксидов ванадия и титана для повышения светоотражательной способности....	127
3.2.2. Исследование режущей способности ферроабразивных порошков на основе белого износостойкого чугуна для обработки алюминиевых сплавов.....	131
3.2.3. Исследование режущей способности ферроабразивных порошков на основе боридов железа для обработки бронзовых и латунных сплавов.....	134
3.3. Механизм влияния смазочно-охлаждающих технологических средств на интенсивность съема металла при магнитно-абразивной обработке.....	137
3.3.1. Механизм действия смазочно-охлаждающих технологических средств на съем металла.....	139
3.3.2. Механизм действия смазочно-охлаждающих технологических средств при магнитно-абразивной обработке эвольвентных поверхностей.....	141
3.3.3. Механизм анодного растворения углеродистых сталей.....	143
3.3.4. Влияние активирующих технологических сред на процесс резания материалов.....	146
3.3.5. Разработка смазочно-охлаждающих технологических средств для магнитно-абразивной обработки цветных материалов.....	147
3.3.6. Исследование влияния составов и физико-химических характеристик смазочно-охлаждающих технологических средств на интенсивность съема металла.....	155
3.4. Экспериментальные исследования влияния смазочно-охлаждающих технологических средств на интенсивность съема металла при магнитно-абразивной обработке.....	160

Глава 4. РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ МАГНИТОПРОВОДОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА УПРАВЛЕНИЕМ ПАРАМЕТРАМИ РАБОЧЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

- 4.1. Расчет профилирования полюсных наконечников
при формировании рабочей технологической среды.....172
 - 4.1.1. Расчет эквидистантного профиля полюсных наконечников...175
 - 4.1.2. Расчет профиля полюсных наконечников методом
интерполирования.....177
- 4.2. Исследование электромагнитных устройств
для магнитно-абразивной обработки
сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....179
- 4.3. Самоорганизация и управление процессами
магнитно-абразивной обработки
сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....186
 - 4.3.1. Критерии процессов формирования поверхностей
при магнитно-абразивной обработке.....186
 - 4.3.2. Моделирование и оптимизация параметров рабочей
технологической среды с учетом самоорганизации процесса
магнитно-абразивной обработки.....190
 - 4.3.3. Управление параметрами рабочей технологической среды
с учетом самоорганизации процесса
магнитно-абразивной обработки.....199

Глава 5. РАЗРАБОТКА И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ С УПРАВЛЕНИЕМ ПАРАМЕТРАМИ РАБОЧЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

- 5.1. Исследование физико-механических характеристик
поверхностного слоя в зависимости
от параметров рабочей технологической среды
при магнитно-абразивной обработке.....202
 - 5.1.1. Исследование шероховатости поверхности.....203
 - 5.1.2. Исследование светотрагательной способности поверхности....207
 - 5.1.3. Исследование микротвердости
и структуры поверхностного слоя.....209
- 5.2. Исследование эксплуатационных характеристик
поверхностного слоя после магнитно-абразивной обработки.....219
 - 5.2.1. Исследование износостойкости поверхностного слоя.....219

5.2.2. Исследование коррозионной стойкости поверхностного слоя.....	224
5.3. Разработка типового технологического процесса магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....	227
5.4. Освоение в производстве технологии и оборудования для магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....	228
5.5. Перспективные области применения магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения.....	235
5.5.1. Магнитно-абразивная обработка мелко модульных зубчатых колес.....	236
5.5.2. Применение магнитно-абразивной обработки для скругления фасок и удаления заусенцев.....	237
5.5.3. Магнитно-абразивная обработка длинномерных отверстий.....	240
5.5.4. Применение магнитно-абразивной обработки для металлооптических элементов с высоким коэффициентом светоотражения изделий.....	242
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	245

ВВЕДЕНИЕ

Важной и ответственной задачей, стоящей перед машиностроением, является создание принципиально новых машин и оборудования для реализации инновационных технологий, позволяющих увеличивать производительность труда, повышать качество и обеспечивать конкурентоспособность выпускаемой продукции. Срок службы деталей машин во многом зависит от показателей качества поверхностного слоя, которые окончательно формируются на финишных операциях. В связи с этим непрерывно совершенствуются технологические процессы изготовления деталей. Развитие высокоэффективных технологий изготовления заготовок деталей машин (точная штамповка, прокатка, точное литье, порошковая металлургия и т. п.) все более приближает заготовки к требованиям чертежей самих деталей, как по форме, так и по точности. Это приводит к снижению припусков на механическую обработку. Поэтому в механообрабатывающем производстве имеет место тенденция уменьшения доли черновой обработки материалов резанием. Это обуславливает необходимость совершенствования универсальных методов чистовой обработки резанием, которые обеспечивают формообразование поверхностей и их точность. В то же время для обеспечения конкурентоспособности к технологическим процессам чистовой обработки предъявляются требования высокой производительности и низкой энергоемкости. В условиях рыночной экономики к важнейшим характеристикам машиностроительного производства относится гибкость, т. е. способность его быстрой переналадки, адекватной спросу потребителя [1–3]. Это является мотивацией создания принципиально новых методов механической обработки, в том числе основанных на ином характере взаимодействия инструмента с поверхностью детали.

В настоящее время для решения вышеперечисленных технологических задач нашли широкое применение электрофизические методы обработки, позволяющие обрабатывать материалы с высокими механическими свойствами без применения больших динамических усилий с использованием инструментов, твердость которых значительно меньше твердости обрабатываемого материала. Кроме того, электрофизические методы позволяют производить локальную обработку материалов без изменения свойств материала

детали, а в некоторых случаях и улучшать физико-механические свойства (устранять наклеп, удалять прижоги, повышать антикоррозийные, улучшать электрофизические свойства – электропроводность и магнитную проницаемость и др.).

Процессы обработки материалов высокоэнергетическими потоками частиц (электронами, ионами, атомами, молекулами), газоразрядной плазмой и излучениями различных видов (оптическим, рентгеновским, гамма) или, так называемые элионные технологии, относятся к процессам с устойчивыми тенденциями промышленного развития [4, 5]. Обусловлено это неоспоримыми преимуществами последних по сравнению с традиционными технологиями машиностроения и приборостроения, среди которых отмечают комфортность обслуживания и простоту управления, воспроизводимость и контролируемость параметров обработки, экологическую чистоту и безопасность.

К числу таких перспективных методов относится процесс магнитно-абразивной обработки (МАО) [6–8]. Этот процесс стабильно обеспечивает получение шероховатости поверхности $R_a = 0,01–0,4$ мкм, снижение температуры резания по сравнению с традиционными методами абразивной обработки, что способствует образованию высокого качества поверхности и структуры поверхностного слоя.

Глава 1

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ФИНИШНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

1.1. Анализ методов финишной абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения

В машиностроительном производстве применяются разнообразные методы формирования рабочих сложнопрофильных поверхностей деталей машин с обеспечением заданных шероховатости и физико-механических свойств. Финишная обработка, к которой относят механические, немеханические и комбинированные способы удаления материала с заготовки [9], обладает свойством управляемости и обеспечения гибкости производства, что является эффективным средством получения изделий требуемого качества. Поэтому ее развитие представляет важный резерв машиностроения [9–13]. Финишной обработке подвергается до 80 % всех деталей машин [14], а ее удельная трудоемкость составляет 20...45 % в общей трудоемкости машиностроительного производства [15].

По виду режущего инструмента существующие методы финишной абразивной обработки можно разделить на абразивную обработку жестко-связанным, свободным и подвижно-скоординированным зерном [16]. В настоящее время обработку сложнопрофильных поверхностей производят в основном на станках с ЧПУ. При этом для финишной абразивной обработки требуется создание дорогостоящих специальных инструментов, у которых профиль режущей кромки должен геометрически или программно отражать топологию обрабатываемой поверхности. Однако при обработке таким инструментом участков поверхностей с переменной кривизной имеет место изменение значений фактических углов резания (переднего, заднего, углов в плане). В связи с этим на отдельных участках обрабатываемых поверхностей возникают погрешности формы и разброс шероховатости, что приводит к неоднородности

показателей качества поверхностей. В результате параметры качества на различных участках отличаются друг от друга, и для обеспечения требований чертежа требуется дополнительная доводочная операция, которая выполняется, как правило, вручную и является трудоемкой. Альтернативой обработке резанием являются электрофизические и электрохимические методы обработки, которые имеют принципиальные отличия от традиционных процессов резания. У этих методов снятие припуска и формообразование поверхности происходит с использованием энергии электрического, электромагнитного, ультразвукового и других полей. Однако для формообразования сложнопрофильных поверхностей электрофизическими методами требуется изготовление соответствующих сложнопрофильных инструментов-электродов, форма рабочей поверхности у которых является зеркальным отображением обрабатываемой поверхности. Одним из перспективных методов является магнитно-абразивная обработка [7, 8]. Анализ показывает, что к настоящему времени исследование данного процесса содержит ряд отдельных работ, в которых ставятся преимущественно частные задачи, возникающие в результате изучения отдельных конкретных устройств. Следовательно, успех в эффективном создании оборудования и оснастки, использующих энергию электромагнитного поля, во многом зависит от степени понимания физических процессов, протекающих в зоне резания.

Таким образом, достигнутый уровень исследований процесса МАО не позволяет производить обработку сложнопрофильных поверхностей, в том числе деталей, изготавливаемых по аддитивным технологиям. Имеющиеся рекомендации по выбору режимов и параметров МАО сложнопрофильных поверхностей требуют дополнений, связанных с появлением нового ряда и типа деталей со сложнопостранственной формой и областей их применения. Для достижения высоких показателей производительности и качества МАО сложнопрофильных поверхностей недостаточно информации о физико-химических процессах в зоне резания и взаимосвязи компонентов рабочей технологической среды, взаимовлиянии технологических параметров и режимов МАО сложнопрофильных поверхностей. Требуется проведение теоретических и экспериментальных исследований физико-химических процессов, протекающих на инструментальной и обрабатываемой поверхности, формирования

топографии электромагнитного поля, механизма и основных закономерностей магнитной проницаемости рабочей технологической среды (РТС), анодно-механического растворения обрабатываемой поверхности, сглаживания микронеровностей профиля поверхности. В совокупности комплекс этих задач является научной базой для решения важной народнохозяйственной проблемы создания технологических процессов МАО и высокоэффективного технологического оборудования, обеспечивающих формирование поверхностей изделий с заданным набором механических и эксплуатационных свойств, точности и геометрических параметров качества.

Перспектива МАО сложнопрофильных поверхностей сопряжена со стабилизацией параметров ориентированного абразивного резания при обработке различных участков. Для этого необходимо решить научную проблему управления формообразующими параметрами рабочей технологической среды в рабочем зазоре при МАО и целенаправленного изменения давления частиц абразивного порошка на обрабатываемую поверхность.

В монографии приведены результаты исследований авторов по концептуальному развитию технологии обработки сложнопрофильных поверхностей, базирующейся на самоорганизации процессов формообразования и абразивной обработки и обеспечивающие геометрические и физико-механические показатели качества поверхностей изделий.

1.1.1. Классификация сложнопрофильных поверхностей тел вращения

Проведенные ранее исследования были направлены на разработку общих теоретических положений физических основ и технологических особенностей метода, однако проведенный анализ показывает, что данные исследования в основном касались деталей простой геометрической формы, в то время как работы, посвященные МАО изделий сложнопространственной формы, носят стохастический и разрозненный характер. Следует отметить, что по производительности и другим критериям существующие технологии формообразования сложнопрофильных поверхностей резанием зачастую уступают аналогичным технологиям обработки изделий, ограниченных плоскостями и линейчатыми поверхностями вращения.

При изготовлении изделий типа лопастей винтов, гидротурбин, насосов еще широко применяются ручные операции, доля которых в трудоемкости обработки сложнопрофильных поверхностей достигает до 70 % [17], что указывает на необходимость создания эффективных схем формообразования, реализующих их станочного оборудования и режущих инструментов.

В технологии обработки сложнопрофильных поверхностей реализация формообразующих движений сопряжена с определенными трудностями. Поэтому создана научно обоснованная система классификации поверхностей деталей машин, представленная на рис. 1.1. Такая классификация основывается на топологических признаках, присущих деталям, и одновременно носит технологический характер, так как на ней базируется систематизация процессов обработки. Таким образом, классификация сложнопрофильных поверхностей тел вращения является основой синтеза технологических процессов для комплексного решения задач обработки поверхностей каждой технологической группы.

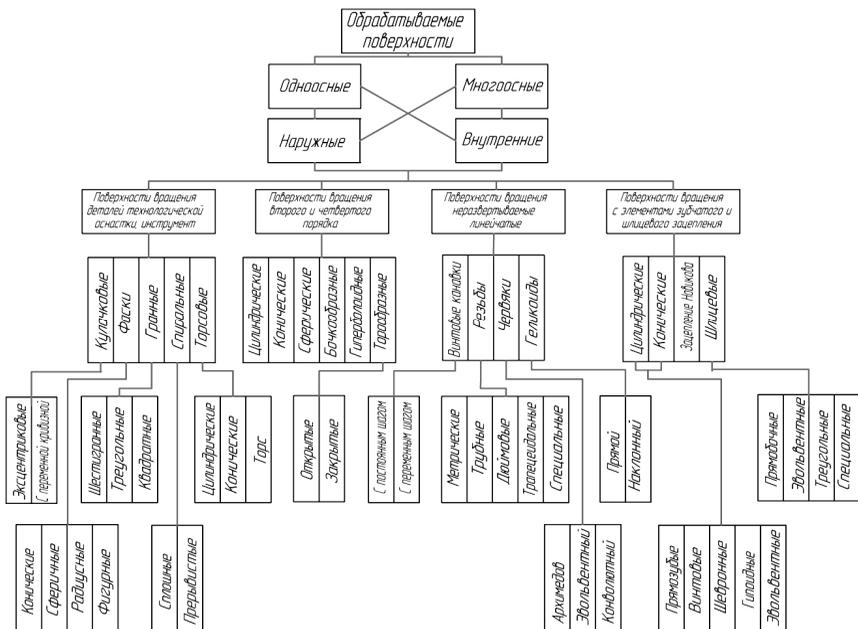


Рис. 1.1. Классификация сложнопрофильных поверхностей

1.1.2. Финишная обработка сложнопрофильных поверхностей инструментом с жестко-связанным абразивным зерном

В настоящее время наибольшее распространение имеет абразивная обработка связанным зерном абразивного порошка, обеспечивающая высокую производительность и точность детали и возможность обработки высокотвердых материалов. Шлифование – процесс тонкого скоростного микрорезания, применяется как отделочная операция и позволяет получать детали 6...8 квалитетов точности с шероховатостью $Ra = 0,32...0,63$ мкм. Однако профильное шлифование, как правило, требует применения специального оборудования, а также повышенного качества профильных шлифовальных кругов. Правка таких кругов является самостоятельной частью производственного процесса. Она ведет к расходу абразивного и правящего инструментов, износу технологического оборудования и снижает технико-экономические показатели процесса обработки. Применение его связано со значительными материальными затратами, требует использования специального оборудования, изготовления фасонных шлифовальных кругов или блоков, частой их правки. Увеличение скорости резания вызывает обильное выделение тепла и приводит к снижению микротвердости обработанной поверхности, а также увеличению вероятности появления шлифовочных прижогов [18]. Применение тонкого шлифования на операциях финишной обработки деталей являются трудоемким и малопродуктивным, так как требует предварительной обработки деталей, точного их базирования на станке, тонкой правки шлифовальных кругов.

Суперфиниширование – процесс отделочной обработки наружных поверхностей деталей мелкозернистыми брусками, упруго прижатыми к обрабатываемой поверхности с небольшим давлением (0,20...0,40 МПа) и совершающими колебательные движения относительно вращающейся детали [15]. Процесс абразивного микрорезания при суперфинишировании прекращается автоматически по мере удаления неровностей исходного микропрофиля. Дефекты макрогеометрии суперфиниширование не устраняет, поэтому необходимая точность обработки должна быть обеспечена на операциях, предшествующих финишной. Использование

процесса суперфиниширования при обработке наружных поверхностей деталей сложного профиля при предъявлении к ним высоких требований к геометрической форме затруднительно, так как по ряду причин, обусловленных кинематикой процесса, имеет место неравномерный съём металла с различных участков профиля. Предложен метод абразивного шлифования поверхностей за счет рационального профилирования и скрещивания осей инструмента и детали в процессе ее формообразования и съема припуска на основе разработанных 3D геометрических моделей формообразующих систем шлифовальных станков [19]. Однако неравномерность круговой подачи за один оборот заготовки изменяется в 5–50 раз, несмотря на то, что скорость вращения детали остается постоянной. Это обуславливает переменный объем снимаемого металла, переменные силы резания, а, следовательно, и изменяющуюся погрешность профиля, а также является источником вибраций.

В настоящее время предложен способ исключить абразивную обработку из технологических процессов получения деталей и заменить высокоскоростной лезвийной обработкой применительно к получению неполных (ограниченных плоскостями с одной или двух сторон) наружных сферических поверхностей деталей [20]. Однако высокоскоростная обработка требует применения дорогостоящих приводов и шпинделей станков, специальных инструментальных материалов и покрытий, не позволяет использовать режущие инструменты большого диаметра из-за снижения мощности высокоскоростного привода.

1.1.3. Финишная обработка сложнопрофильных поверхностей инструментом со свободным закреплением абразивного зерна

Наиболее распространенным способом обработки свободными абразивами является вибрационная обработка [21–25]. Возможно использование вибрационной обработки на операциях отделочной обработки сложнопрофильных изделий. Однако при этом наблюдается неравномерный съём металла с различных участков поверхностей деталей. Плохо обрабатываются труднодоступные участки – канавки, углубления, внутренние поверхности деталей. Для получения шероховатости, соответствующей $R_a = 0,16...0,32$ мкм,

необходима длительная обработка в несколько переходов со смежной наполнителя и составов технологической жидкости, что существенно увеличивает трудоемкость финишной операции. Высокий уровень шума, сопровождающий работу виброустановок, ухудшает условия труда рабочих.

Абразивная доводка (притирка) осуществляется абразивно-доводочной смесью, нанесенной на поверхность притира [26, 27]. Сам процесс доводки является трудоемким, малопроизводительным, содержит, как правило, большой объем ручного труда, требует частой правки притиров для восстановления их исходной формы.

Способ центробежно-ротационной обработки [28, 29] заключается в том, что гранулированная обрабатываемая среда и детали приводятся в движение, в котором частицы движутся по спиральным траекториям. Недостатки центробежно-ротационной обработки – повышенный износ абразивной среды, возможность деформации деталей малой жесткости. Центробежно-ротационная обработка не позволяет эффективно обрабатывать крупные детали (> 100 г), в процессе обработки происходит расслоение – обрабатываемые детали находятся внизу, абразивная масса – сверху.

Сущность струйной абразивно-жидкостной обработки заключается в направлении струи суспензии, состоящей из транспортирующей среды (например, воды) и абразивных зерен, на поверхность обрабатываемой детали. Взаимодействие абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью непродолжительно и носит ударный характер, количество ударов колеблется от $2 \cdot 10^6$ до $26 \cdot 10^6$ в секунду [30, 31]. При обработке деталей гидроабразивной струей имеет место неравномерный съем металла с различных участков профиля, что приводит к искажению геометрической формы детали. В установках для абразивно-жидкостной обработки часто наблюдается выход из строя сопел, связанный с их интенсивным разрушением под воздействием высокоскоростной гидроабразивной струи. Для повышения стойкости сопел их изготавливают из твердых сплавов, однако и в этом случае стойкость сопел не превышает 4...6 часов.

Способ турбоабразивной обработки [32] основан на создании абразивного кипящего (псевдосжиженного) слоя, в который помещают обрабатываемую деталь, задавая в зависимости от ее формы различные виды движения. После турбоабразивной обработки

поверхность имеет кратерообразный микрорельеф, состоящий из большого количества коротких царапин, которые создают матовую поверхность.

Широкое распространение в промышленности получила обработка деталей во вращающихся барабанах. Силы взаимодействия деталей с частицами наполнителя невелики, поэтому обработка во вращающихся барабанах продолжается от 5 до 100 часов [32–37]. К недостаткам относятся: неравномерный съем металла с поверхностей сложной формы; отсутствие эффективного воздействия абразивных наполнителей на труднодоступные участки профиля – канавки, углубления и т. п.; взаимные соударения деталей, приводящие к появлению забоин и вмятин на обрабатываемых поверхностях.

На операциях отделочной обработки наружного профиля деталей типа колец, втулок и т. п. находит применение шпиндельная обработка. Закрепленная на шпинделе и вращающаяся с высокой скоростью обрабатываемая деталь вводится в соприкосновение с абразивной средой, находящейся, например, в вибрационной камере [38]. Погрешности макрогеометрии (волнистость, огранка) данный способ обработки практически не устраняет. При обработке деталей типа колец, втулок на их геометрическую точность существенное влияние оказывает осевое биение шпинделя, величина которого не должна превышать 0,1 мм. В противном случае наблюдается образование овала.

Перспективным способом обработки деталей является полирование абразивом, уплотненным инерционными силами [32–39]. Кроме того, при обработке данным способом уплотненный абразивный поток, вращающийся с высокой скоростью, производит интенсивное микрорезание, и для получения обработанных поверхностей с шероховатостью по параметру $R_a = 0,10 \dots 0,20$ мкм необходима обработка в несколько проходов с последовательным уменьшением зернистости абразивного материала, что снижает производительность процесса.

Одним из новых видов такой обработки является абразивно-экструзивная обработка (АЭО), заключающаяся в снятии слоя материала с поверхности обрабатываемого канала под давлением через него рабочей среды, состоящей из вязкоупругого основания, наполненного твердыми рабочими элементами (чаще всего – абразивные или алмазные зерна). В настоящее время в США, где этот

процесс имеет название Abrasive Flow Machining, а также в некоторых других странах, процесс АЭО получает широкое применение, вытесняя гидроабразивную обработку [40, 41]. Недостатки абразивно-экструзивной обработки заключаются в перепрессовании рабочей среды, необходимости дополнительных устройств и приспособлений для закрепления деталей при их обработке и неравномерности заполнения потоком рабочей среды партий деталей.

1.1.4. Финишная обработка сложнопрофильных поверхностей инструментом с подвижно-скоординированным закреплением абразивного зерна

Широкое распространение на операциях отделочной обработки деталей сложной конфигурации получило полирование абразивными лентами [42–44]. Однако и обработке абразивными лентами присущи недостатки при отделке наружных сложнопрофильных поверхностей. Абразивная лента обладает определенной упругостью, поэтому отдельные труднодоступные участки профиля остаются не шлифованными. Это вызывает необходимость применения ручной полировки, что снижает технико-экономические показатели процесса обработки.

Близкой к полированию абразивными лентами является обработка деталей профильными алмазными брусками на эластичной связке [45], упруго прижатыми к поверхности вращающейся детали. Несмотря на перспективность, данный метод обработки находит ограниченное применение в промышленности. Это связано с высокой стоимостью брусков, износом и засаливанием их в процессе обработки, а также сложностью восстановления их режущих свойств.

Разработана технология ленточного шлифования изделий и предложен метод управляемого ориентирования зерен абразива при формировании макроструктуры покрытий из абразивных материалов с использованием направленного воздействия электростатического поля при получении ленточного шлифовального инструмента [46]. Однако данный инструмент ориентирован на использовании фракции абразивного образца размером 0,16...0,2 мм, что снижает его технологические возможности.

Рассмотренные методы обработки применяются преимущественно для обработки однородных изделий простой формы,

в связи с чем возникает необходимость использования других эффективных методов и способов финишной обработки изделий, состоящих из материалов с различными физико-механическими и магнитными свойствами.

1.1.5. Финишная обработка сложнопрофильных поверхностей инструментом с гибким проволочно-абразивным валом

Разработаны технология и инструменты с гибким проволочно-абразивным валом, которые предназначены для шлифования и полирования сложнопрофильных наружных и внутренних поверхностей и отверстий малого диаметра. Проволочно-абразивный инструмент выполнен в виде цилиндра и представляет собой гибкое упругое тело (из одной или нескольких сплетенных между собой проволок) с нанесенными различными способами абразивно-алмазными зернами. Устройство снабжено индивидуальным приводом вращения инструмента относительно собственной оси. При этом инструмент выполнен в виде гибкого проволочно-абразивного вала, абразивный слой закреплен по всей его периферии [47, 48].

На рис. 1.2 представлена схема обработки глухого отверстия с выпуклой внутренней сферической поверхностью, на рис. 1.3 (а, б) – схема обработки вала с переменным сечением, на рис. 1.4 – схема обработки сложнопрофильного отверстия малого диаметра в режиме черного шлифования, на рис. 1.5 – схема обработки глухого отверстия с внутренней вогнутой сферической поверхностью.

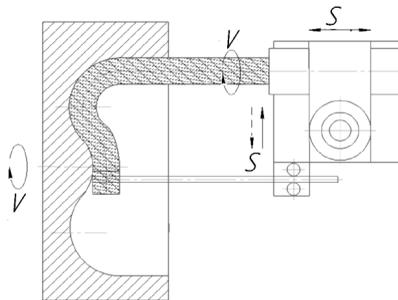


Рис. 1.2. Схема обработки глухого отверстия с выпуклой внутренней сферической поверхностью

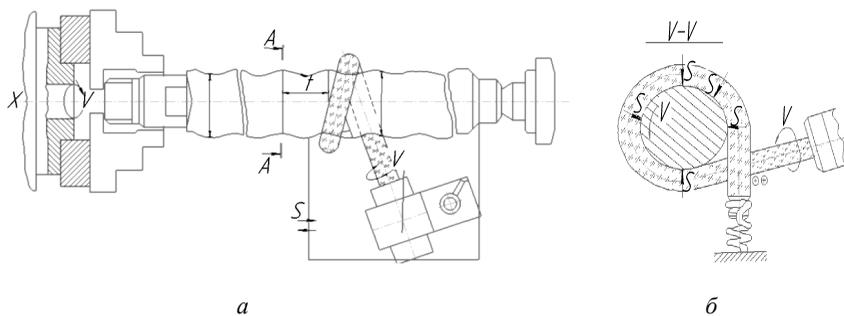


Рис. 1.3. Схема обработки вала с переменным сечением:
 а – общий вид; б – разрез устройства

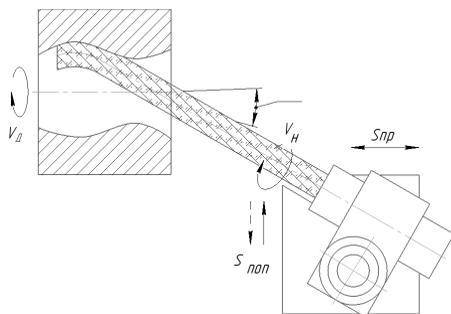


Рис. 1.4. Схема обработки сложного отверстия малого диаметра
 в режиме чернового шлифования

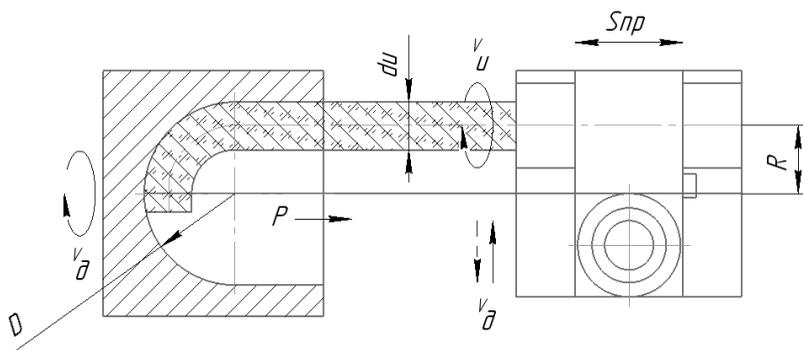


Рис. 1.5. Схема обработки глухого отверстия
 с внутренней вогнутой сферической поверхностью

Недостатками инструмента являются невысокая эффективность шлифования, поскольку абразивный слой узкой полосой закреплен только на внутренней поверхности не вращающегося инструмента, минимальная площадь контакта инструмента с заготовкой, особенно при обработке выступов валов, что не позволяет интенсифицировать режимы обработки. Кроме того, неподвижное не вращающееся состояние инструмента требует большей (на порядок выше) скорости вращения обрабатываемой детали, которую не в состоянии обеспечить имеющееся в эксплуатации оборудование.

1.1.6. Современные представления механизмов съема металла при финишной абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей

В теории абразивной обработки установлено, что стружкообразование возможно при определенном соотношении между глубиной h внедрения режущих вершин зерен абразивного инструмента в обрабатываемую поверхность и радиусов округления ρ этих вершин. Так при шлифовании отожженной стали марки У8 образование стружки возможно при $e = h/\rho > 0,2$ [49]. При меньших значениях возможно лишь пластическое или упругое деформирование обрабатываемой поверхности.

Локальные контакты единичных зерен с неровностями обрабатываемой поверхности должны заканчиваться следующими событиями: 1) упругой деформацией; 2) пластической деформацией; 3) деформацией сдвига (собственно – микрорезанием, снятием стружки).

И. В. Крагельским [50] установлено граничное условие перехода пластического деформирования в микрорезание:

$$h = 0,5\rho \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_s} \right), \quad (1.1)$$

где τ – прочность на срез адгезионной связи, МПа.

Такой же точки зрения на природу перехода от пластического оттеснения металла к микрорезанию придерживаются И. В. Лавров и др. [51–56], которые отмечают, что если принимать во внимание

реальное строение рабочей поверхности абразивного зерна, то переход от пластического деформирования к микрорезанию определяется параметрами субмикрорельефа абразивного зерна.

Микрорезание достаточно пластичных металлов со снятием стружки возможно при значениях отрицательных передних углов абразивных зерен не выше $\gamma = 45...50^\circ$, чему соответствует отношение [56]:

$$k = \frac{a_z}{\rho} \approx 0,5, \quad (1.2)$$

где a_z – толщина среза; ρ – радиус округления вершин зерна.

При $k < 0,5$ наблюдается пластическое деформирование металла или даже скольжение зерен по металлу, т. е. имеет место процесс микровыглаживания поверхности. При $k > 0,5$ происходит процесс микрорезания, причем при $k = 1,0$ микрорезание обеспечивается стабильно во всех случаях [57]. От пластичности металла зависит степень его деформации при абразивной обработке. Например, для относительно хрупких материалов (чугун, закаленная сталь) $k_1 = 0,8...0,9$, для вязких (техническое железо, медь) – $0,3...0,5$ [58].

Согласно работам Г. И. Грановского [59], Н. Н. Зорева [60], Е. Г. Коновалова [61], доказано, что даже при жестком креплении режущего элемента кинематика резания может отличаться от задаваемой станком. В работе [62] исследуется влияние формы зерна и его ориентации в связке на процесс микрорезания и определена мгновенная величина заглупления зерна в течение одного акта взаимодействия с обрабатываемым материалом:

$$h = \frac{\varphi_0 (1 \pm \varepsilon_\varphi)}{\frac{1}{R(1 \pm \varepsilon_R)} + \frac{\omega}{s}} \operatorname{tg} \omega t, \quad (1.3)$$

где φ_0 – угол, образованный отрезками, соединяющими вершины двух зерен, последовательно вступающих в зону контакта, с центром абразивного круга; R – расстояние от центра круга до вершины

зерна; ε_φ и ε_R – величины, учитывающие погрешности расположения зерен, а также смещение зерен относительно друг друга вдоль оси круга; ω – угловая скорость вращения инструмента (рад/с); S – скорость подачи; t – время, за момент времени $t = 0$ принят момент начала взаимодействия зерна и заготовки, то есть самое первое касание.

По мере заглубления режущей части абразивного зерна изменяется положение крайней точки контакта A (рис. 1.6).

Диапазон возможных значений величины h имеет широкий разброс (на рисунке показан в виде заштрихованной области), обусловленный случайным характером расположения зерен на рабочей поверхности круга. В любой момент времени зерно может быть заглублено на величину из диапазона $[h_{\min}(t); h_{\max}(t)]$. Если процесс стружкообразования осуществляется при глубине h_p , то при данных режимах обработки часть зерен, внедренных на глубину $h \in [h_p; h_{\max}(t)]$, будет осуществлять сьем стружки. Другая часть, для которой $h \in [h_{\min}(t); h_p]$ – только пластически деформировать материал.

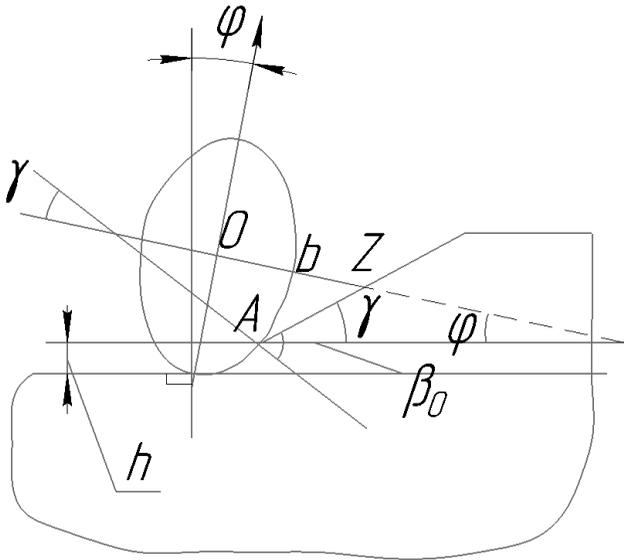


Рис. 1.6. Определение мгновенного значения угла β_0

Пути повышения эффективности использования инструмента заключаются в увеличении количества режущих зерен. Это можно осуществить двумя способами. Первый заключается в повышении скорости резания, второй предполагает минимизацию угла β_0 путем использования формы и ориентации в связке.

1.2. Основные закономерности механизма стружкообразования при финишной абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей тел вращения и технологические параметры

Анализ процессов MAO и финишных методов обработки [68] свидетельствует о подобии их физической сущности. Общим для процесса MAO и других финишных методов является механический характер удаления поверхностного слоя (рис. 1.7). Применяемые при MAO абразивные частицы электрокорунда класса 40...28 мкм имеют радиус округления вершин в пределах 6...12 мкм [65]. Для них сущность явлений, происходящих в поверхностном слое металла, одинакова и сводится к осуществлению двух разновидностей деформирования металла: микрорезания со снятием стружки и пластического деформирования [66]. Значительное превышение твердости абразива над твердостью обрабатываемого материала (в 1,5 раза и более), малые радиусы округления вершин абразивных зерен, большие удельные давления, малая вязкость СОТС способствуют осуществлению процесса в режиме микрорезания при сравнительно малом удельном весе пластической деформации металла. Эти условия обеспечивают шероховатость поверхности ($R_a = 0,1...0,2$ мкм).

Скорость абсолютного движения зерен V_z , по данным [63], значительно меньше скорости V движения обрабатываемой поверхности. При $V = 0,6...2,1$ м/с скорость абсолютного движения зерен вдоль дуги рабочего зазора $V_z = 0,01...0,02$ м/с. Н. Я. Скворчевским выделены из порошковой массы и исследованы образующиеся при MAO стружки, которые по форме похожи на стружки, образующиеся при шлифовании [68]. Соотношение их длины и толщины находится в пределах $l_c/a_c = 5...20$. Это косвенно свидетельствует о более высокой степени пластических деформаций диспергируемого металла в процессе MAO.



Рис. 1.7. Фотография ферроабразивной «щетки» в рабочем зазоре

Если о глубине внедрения зерен в обрабатываемую поверхность судить по глубине оставшихся риски – следов резания, то для MAO характерно $h < 0,1 \dots 0,4$ мкм образование стружки. При MAO сталей в отличие от шлифования происходит при $e < 0,005 \dots 0,13$, т. е. при более неблагоприятных условиях. Благодаря этому пластические деформации обрабатываемой поверхности и стружкообразование могут происходить при меньших значениях действующих сил и менее благоприятных значениях соотношения h/ρ . Подтверждением этому могут служить обнаруженные другими исследователями изменения пластических свойств материалов в присутствии магнитных полей. Так, в работе [69] опубликовано о снижении на 250 % предела текучести углеродистой стали в присутствии поперечного к направлению нагрузки магнитного поля $B = 0,005$ Тл. В этом случае производительность MAO резко увеличивается.

Процесс снятия стружки состоит в следующем (рис. 1.8). Процесс пластического деформирования и микрорезания будет иметь место, если $F_a \geq \tau_c$ (где τ_c – напряжение сдвига в металле). Очевидно, что разворот зерна возможен, если радиус округления режущей кромки ρ и угол γ увеличиваются. Таким образом, анализ схемы резания при магнитно-абразивной обработке показывает, что процесс контакта режущих кромок носит дискретный характер, а переориентация зерен в пространстве рабочего зазора осуществляется за счет действия крутящего момента, вызывающего их перекачивание [70].

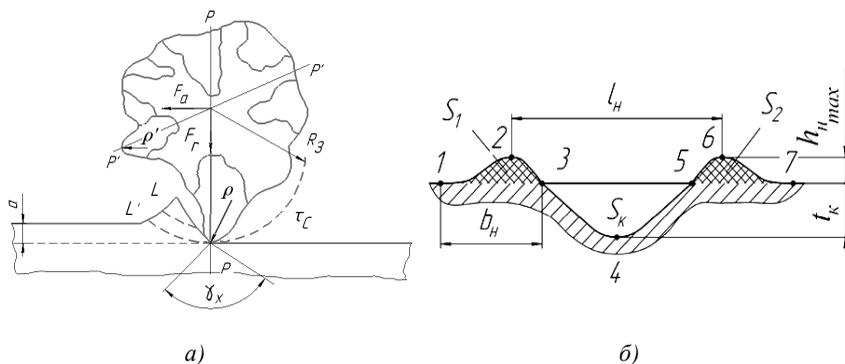


Рис. 1.8. Схема стружкообразования при магнитно-абразивной обработке:
 а) – схема резания единичным зерном при магнитно-абразивной обработке:
 F_y – сила взаимодействия; F_a – тангенциальная сила; t_c – напряжение сдвига;
 γ_x – угол резания; ρ , ρ' – радиус при вершине; $P'P'$ – плоскость;
 б) – профиль царапины, полученной округленным царапающим элементом:
 S_1 и S_2 – площадь поперечного сечения левого и правого навалов;
 h_{max} – высота навалов; b_H – ширина навалов; t_k – глубина риски;
 S_k – площадь шлифовочной канавки

Экспериментально установлены зависимости ширины царапин (рис. 1.9), средней высоты навалов $t_{нр}$, глубины царапания и коэффициента навалов ϵ_n от материала образца и радиальной нагрузки P_y (рис. 1.10).

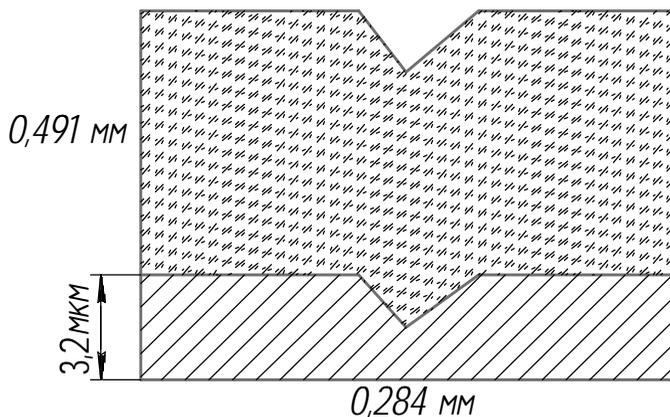


Рис. 1.9. 3D-модель царапин поверхности без использования магнитного поля

Исследования показали, что высота навалов меньше, чем глубина царапин, т. е. основная часть металла (60...75 %), вытесняемого зерном, переходит в микростружку. На фотографии (рис. 1.11) хорошо видны элементы сдвига, и внешний вид поверхностей сдвига свидетельствует об интенсивной пластической деформации. Поверхности лепестков неровные, имеют углубленные борозды и срывы ламеллярного течения металла.

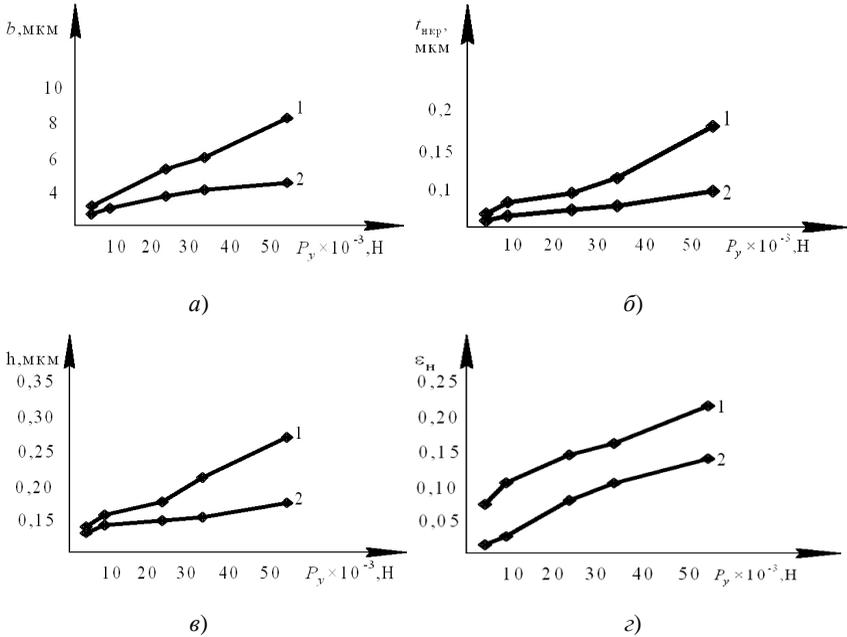


Рис. 1.10. Зависимости ширины царапины от нагрузки на единичное зерно (а), средней высоты навалов от нагрузки на зерно (б), глубины царапины от нагрузки на единичное зерно (в), коэффициента навалов при микрорезании от нагрузки на зерно (г): 1 – с использованием магнитного поля; 2 – без использования магнитного поля

В этой области (толщиной в несколько сотен ангстрем) линейные дислокации движутся по многочисленным параллельным линиям, образующим пачки скольжения [70]. Пластическая деформация осуществляется путем движения волн дислокаций по плоскостям скольжения с их выходом на поверхность кристаллов

и образованием соответствующих площадок сдвига. В результате проведенного анализа и исследования процесса микрорезания единственным зерном ферромагнитного материала при наложении магнитного поля установлено, что глубина царапины в 1,5...1,6 раза больше, чем в отсутствие магнитного поля. Объяснением полученных результатов является проникновение электромагнитных волн в тонкий поверхностный слой ферромагнитного материала и возникновение теплового эффекта, который обеспечивает увеличение степени пластической деформации материала.

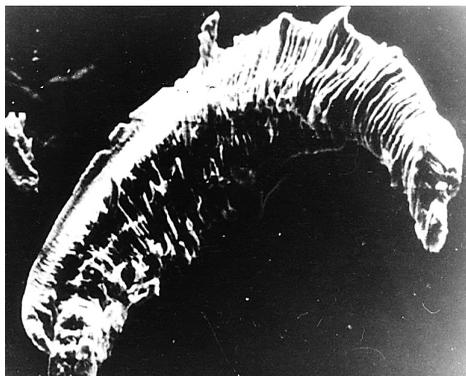


Рис. 1.11. Фотография стружки при МАО (x500)

Областью рационального использования метода МАО являются такие сферы производства, как медицинская и текстильная промышленность, система агропромышленного комплекса, машиностроительная отрасль, авто- и тракторостроение, обработка прецизионных деталей электроники, оптики и лазерной техники [71, 72].

1.3. Влияние параметров рабочей технологической среды на магнитно-абразивную обработку сложнопрофильных поверхностей тел вращения

Неоходимо учитывать факторы, определяющие производительность, качество и эксплуатационные характеристики поверхностного слоя изделий и пути повышения качества сложнопрофильных поверхностей при магнитно-абразивной обработке.

Производительность процесса МАО характеризует зависимость размерного ΔD или массового ΔG съема металла от времени обработки [72]. Контролируя производительность процесса, представляется возможным управлять не только точностью, но и качеством обработки. Следует отметить, что из-за отсутствия в литературе информации о степени воздействия рабочей технологической среды на поверхностный слой деталей затруднен целенаправленный поиск их составов для МАО сложнопрофильных поверхностей.

Разработанные составы позволяют обрабатывать изделия, изготовленные из черных и цветных металлов и сплавов. Одним из важных факторов функционирования МАО является применение РТС, состоящей из ФАП и СОТС, формируемой электромагнитным полем (ЭМП). Если ранее эффективность данного процесса производилась созданием новых видов ФАП и СОТС, то на сегодняшний день повышение эффективности следует оценивать через синергическое воздействие параметров для этой задачи. Поэтому переход на следующую качественную ступень создания режущего инструмента для МАО в виде РТС позволяет сократить его номенклатуру, оптимизировать режимы обработки, стабилизировать параметры процесса резания и повысить эффективность производства деталей машин сложного профиля, изготовленных из различных материалов.

Необходимость взаимодействия компонентов РТС и установления ковариантности ее свойств представлена в более ранних работах, например, термин *рабочая среда* появился в работе [73], определение *технологические среды* предложено в работе [74] и в дальнейшем использовано в работе [75], окончательная редакция понятия *рабочая технологическая среда* нашла свое место в работе [6], однако во всех источниках их содержание носит описательный характер.

Полученные результаты показывают, что при обработке аналогичных деталей изменение параметров РТС приводит к большим отклонениям в области качества поверхностного слоя и эксплуатационных показателей. Например, в работе [76] установлено, что стойкость метчиков в результате использования МАО увеличивается в 2–3 раза, в то время как, по данным работы [77], стойкость подобных метчиков повысилась только на 50–90 %. Согласно [78], выявлено, что при МАО лезвий режущих сегментов из стали 65Г замена ФАП Ж15Т на Царамам-А и СОТС Аквол-10 на СинМА-1, при прочих равных условиях, приводит к уменьшению времени скругления кромки в 2,6 раза,

что указывает на необходимость исследования структуры и химического состава ферроабразивных порошков и различных составов СОТС, их ковариантности и взаимовлияния на процесс обработки и диспергирования при наложении электромагнитных полей. В работе [79] представлены данные, что после MAO резцов достигнуто повышение их стойкости в 2–3 раза при использовании магнитных индукторов по причине обеспечения возможности варьирования величиной магнитной индукции в зоне резания изменением положения данного индуктора (значения режимов обработки и параметры не приводятся). Несмотря на топологическую стационарность больших кольцевых зазоров, которые применены в работе [80], повышение работоспособности резцов после MAO в 1,3...1,5 раза гарантировано тем, что одно из главных условий получения лучшей шероховатости и выглаженного микрорельефа заключалось в изменении положения детали в зоне обработки относительно линий магнитной индукции на 20–30° и 5 %-й добавке в ФАП алмазного порошка в сравнении с другими составами РТС. В настоящее время исследованиями процесса MAO и его внедрением в производство занимаются в Беларуси, Российской Федерации, Украине, США, Китае, Индии, Японии, Южной Корее и др. странах [81–90]. Достигнутый уровень проведенных исследований позволил создать технологии MAO и оборудование для ее реализации, в основном, деталей простой геометрической формы типа шеек валов или колец подшипников. Исследования MAO сложнопрофильных поверхностей ограничиваются обработкой инструмента лезвийного (Ю. М. Барон, В. С. Майборода, А. М. Иконников) и медицинского (Л. М. Кожуро), беговых дорожек подшипников (Ф. Ю. Сакулевич), лопаток газотурбинных двигателей (В. С. Майборода, Н. С. Хомич).

Опубликованная информация о проведенных исследованиях MAO сложнопрофильных поверхностей часто носит стохастический или противоречивый характер. Это объясняется тем, что у исследователей о режущем инструменте сложилось устойчивое представление только как о ферроабразивном порошке без учета магнитной проницаемости РТС, роли СОТС и электромагнитного поля и их синергетического воздействия. Например, в работе [91] установлено, что при намагниченности насыщения 50 А/м и градиенте магнитной индукции 10 Тл/м происходит 30-кратное увеличение плотности жидкости при наличии магнитных компонентов. Согласно данным работы [92], СОТС относятся к электролитам 2 рода, поэтому их взаимодействие с обрабатываемой и инструментальной поверхностями осуществляется

по электрохимическому механизму. В работе [75] выявлено, что при МАО кромок сварных швов присутствует неоднородность качественных показателей на их боковой поверхности и торцах по причине разности давления ферроабразивной щетки, которое обеспечивается оптимальной геометрией рабочей зоны и топографией электромагнитного поля. Это часто приводит к ошибкам при выборе и назначении режимов и параметров МАО, а в результате – к непроизводительным потерям и низким эксплуатационным свойствам деталей. В работе [93] установлено, что при МАО образцов из стали У10А при варьировании величинами магнитной индукции имеются отклонения по содержанию остаточного аустенита на 40 %, дисперсности блоков когерентного рассеяния – на 70 %, остаточных напряжений 1 и 2 рода – на 45 % и 25 % соответственно. Остаются нерешенными вопросы интенсификации процесса МАО сложнопрофильных поверхностей, стойкости РТС, расчета конформности зоны обработки, оптимальности конструкции технологического оборудования, влияния технологических режимов на точность и производительность обработки и физико-механические и эксплуатационные свойства изделий.

Применение графических методов определения топографии МП в зоне обработки не позволяет провести более строгий анализ динамического и кинематического факторов процесса МАО. Поэтому по данной причине не удалось получить положительного результата при финишной обработке беговых дорожек обойм подшипников [8]. Определение топографии МП связывается с интуитивным подходом, для эффективного решения которого требуется персонал с крайне высокой квалификацией. Поэтому синергический подход, выявляющий наиболее важные стороны каждого из компонентов, обеспечивает интенсификацию МАО сложнопрофильных поверхностей (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Основные воздействия РТС на обрабатываемую поверхность детали

Действие	Характер протекающих процессов
Диспергирующее	Создание инструмента, состоящего из пористого тела, твердого тела, расклинивающий эффект
Моющее	Адсорбция с образованием многослойных структурных упорядоченных пленок

Действие	Характер протекающих процессов
Смазывающее	Физическая или химическая адсорбция с образованием граничного слоя
Охлаждающее	Тепловой на основе теплообмена
Химическое	Образование химических пленок
Пластифицирующее	Пластическая деформация микрорельефа поверхностного слоя

Качество поверхностного слоя изделий

Характеристики микрорельефа, в том числе и его регулярность, самым существенным образом влияют на качество поверхностных слоев [94, 95], состояние которых определяет эксплуатационные свойства деталей машин и приборов [96]. К важнейшим физико-механическим характеристикам поверхностного слоя относятся: микротвердость (H), – величина макро- (σ_1) и микронапряжений (σ_2), глубина залегания деформаций и дисперсность блоков мозаики (D) [97]. Значения этих параметров качества для образцов из стали ШХ15 (58,5...60 HRC) после MAO приведены в таблице 1.2 [98].

Таблица 1.2

Физико-механические характеристики поверхностного слоя, сформированного MAO (материал – сталь ШХ 15, 58,5...60 HRC)

Способ обработки	R_a , мкм	H , МПа	σ_1 , МПа	D , А	σ_2 , МПа
Круглое шлифование	0,38	4370	105	823	85
MAO $t = 20$ с	0,10	5650	-638	721	103
MAO $t = 60$ с	0,032	5150	-325	780	107

При MAO в поверхностном слое возникают остаточные напряжения сжатия величиной (0,8...1,4 ГПа), распространенные на глубину до 5 мкм. Значения этих характеристик сопоставимы

с результатами, полученными другими способами тонкой абразивной обработки. Например, при суперфинишировании отожженной стали в режиме резания в поверхностном слое создаются напряжения сжатия 1 рода величиной (200...300 МПа), а в режиме трения-полирования – (700...900 МПа). При этом микротвердость увеличивается с 1,6 до 2,2 ГПа [99].

В работе [63] установлено что на эти показатели существенный эффект оказывает величина магнитной индукции, скорость резания и осцилляции, вид СОЖ и ФАП. В работе [100] выявлено, что качество обработанной поверхности после МАО определяется химическим составом и физическими свойствами ФАП и СОТС. В работе [101] отмечено, что при технологическом управлении шероховатости поверхности наибольшее влияние на ее изменения оказывает время. В работе [93] определено, что на шероховатость поверхности влияет материал композиционного ФАП, массовое содержание абразивной составляющей в порошке и размерность его частиц. В работе [68] установлено важное влияние вида и состава СОЖ на качества обработанной поверхности, также существенное воздействие на качество обработки оказывают величина магнитной индукции, скорости резания и осцилляции.

В более поздних работах [102, 103] данные об изменении шероховатости поверхности в процессе МАО являются не полными и носят частный характер, поскольку не учитывают в полной мере влияние всех параметров режима обработки на динамику снижения шероховатости. Следует отметить, что в настоящее время в результате отсутствия систематизированных экспериментальных данных о сглаживании шероховатости поверхности в зависимости от указанных выше факторов продолжительность обработки определяется опытным путем.

Эксплуатационные показатели

Несмотря на широкое применение метода МАО в различных отраслях промышленности до настоящего времени известны лишь ограниченные сведения комплексных экспериментальных исследований влияния МАО на такие эксплуатационные характеристики как износо- и коррозионная стойкость. В работе [104] проведены испытания на износостойкость шлифованных, полированных и обработанных МАО образцов. В качестве характеристик износостойкости в период приработки были приняты износ и длительность

переработки. Установлено, что износ шлифованных образцов в два раза больше, чем обработанных МАО. После МАО поверхность изделия имеет большую опорную площадь, чем после шлифования и полирования. Однако в работе отсутствуют результаты оценки и численные значения опорной площади, поэтому не известны фактические нагрузки на контактные площадки после данных методов. В работе [105] представлены результаты МАО швейных игл, что позволило увеличить износостойкость иглы на 65–70 %. В работе [75] приведены результаты коррозионных испытаний сварных соединений, которые сравнивались с обработкой кромки шабрением. После испытаний сварных соединений на общую коррозию существенных коррозионных поражений не обнаружено. Потери прочностных свойств достигают для разных режимов 12,6 %. Исследования на склонность к межкристаллитной коррозии показали, что все сварные соединения имеют растрав, глубина которого колеблется от 1,14 до 1,24 мм. МАО твердых сплавов приводит не только к улучшению их износостойкости, но также к некоторому повышению таких эксплуатационных характеристик, как временное сопротивление при изгибе и ударная вязкость. В работе [106] при МАО пуансонов для глубокой вытяжки деталей патронного производства достигнуто повышение износостойкости в 1,6...2,5 раза по сравнению со шлифованными. В работе [107] установлено, что при МАО высокоуглеродистых легированных сталей обеспечивается снижение шероховатости поверхности с $R_a = 0,4$ мкм после шлифования до $R_a = 0,03$ мкм после МАО и рост износостойкости в 3 раза.

1.4. Механизм формирования микрорельефа, топографии и профиля поверхности при магнитно-абразивной обработке тел вращения

Первая стадия изменения шероховатости поверхности характеризуется резким уменьшением высоты неровностей, затем этот процесс замедляется, и шероховатость стабилизируется на некотором уровне. Обычно собственная шероховатость МАО находится

в пределах $R_a = 0,02 \dots 0,08$ мкм [108–110]. Многие характеристики работоспособности поверхности (коррозионная стойкость, сопротивление питтингообразованию, наличие концентраторов напряжений, качество покрытий и др.) зависят от характера глубинных участков микрорельефа (наличие узких и глубоких следов обработки, острота впадин и т. д.).

Для аналитического выражения шероховатости П. Е. Дьяченко [111] рекомендует применять формулу:

$$y = y_0 Cx, \quad (1.4)$$

где y – значение абсциссы; x – текущее значение ординаты (расстояние от основания профиля); C – коэффициент, вычисляемый по графику кривой.

Н. Б. Демкин [112] установил, что опорные кривые, построенные в относительных координатах, хорошо аппроксимируются нормальным законом распределения, однако сложность расчетной формулы ограничивает ее применение.

В настоящее время наиболее широко используются выражение опорной кривой в относительных координатах и аппроксимация $1/3 - 1/2$ ее высоты при помощи степенной функции:

$$\mu = b\varepsilon^y, \quad (1.5)$$

где ε – относительное сближение ($a = R_z - h_i$); b, v – вычисляемые коэффициенты.

Недостатками степенных зависимостей (1.1) и (1.2) являются невозможность аппроксимации всей опорной кривой и громоздкость расчетов. Кроме того, исследования [63] показывают, что коэффициенты b и v недостаточно четко характеризуют тип шероховатости. Неоднородность шероховатости, как правило, появляется вследствие неравномерного удаления припуска на разных участках полируемой поверхности. В результате съема на средних участках оказывается менее интенсивным, и исходная шероховатость может оказаться на прежнем уровне [113].

В работе [67] было отмечено, что на краях заготовок, около пазов и отверстий на обрабатываемой плоскости ферромагнитной заготовки, образуются отклонения от плоскостности, которые могут достигать 23 мкм. При полировании торцовыми вращающимися индукторами имеет место неравномерность съема на разных участках по ширине заготовки, возникающая из-за разной скорости резания на этих участках и длительности их контакта с порошковой абразивной массой, размещенной на полюсах индуктора.

При полировании нескольких плоских заготовок вращающимся магнитным индуктором может встретиться недоработка начальных участков по отношению к вектору скорости главного движения v . Похожее явление наблюдали и при полировании стальных плоскостей с отверстиями. У задней кромки отверстия остается выпуклый участок поверхности с неудаленными следами исходных неровностей. Предположительным объяснением появления недообработанных участков в двух последних примерах может служить то, что кромки ферромагнитных деталей и кромки отверстий на них являются концентраторами магнитного потока.

Отклонения формы обрабатываемой поверхности от ее исходного состояния возникают из-за неравномерности съема припуска на разных участках. Большие амплитуды осцилляции зерен у торцовых границ рабочего зазора и их постепенное уменьшение у средней части зазора сопровождаются соответствующими изменениями интенсивности съема металла на этих участках и приводят к появлению бочкообразной погрешности на цилиндре. Длительное полирование коротких цилиндрических поверхностей из-за повышенных скоростей осцилляции в средней части зазора (появление эффекта вытеснения магнитного потока) образует погрешности формы в виде корсетности. При полировании бочкообразных роликов подшипников с эквидистантными рабочими зазорами разная интенсивность осцилляции зерен привела к искажению формы [67] (рис. 1.12). Увеличенные съемы металла имели место в приторцовых зонах рабочих зазоров, хотя у самых торцовых кромок ролика действовали концентраторы магнитного потока, заставившие зерна порошка на этих участках двигаться вместе с осциллировавшим роликом.

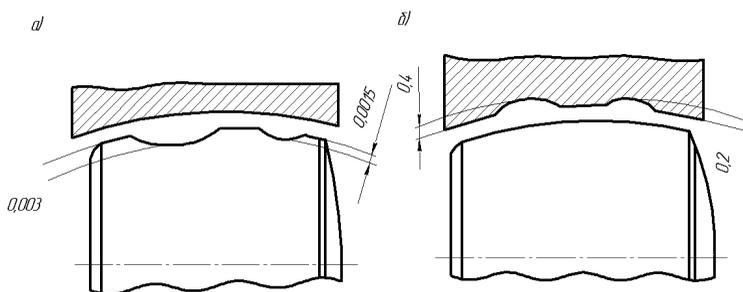


Рис. 1.12. Влияние исходной формы рабочего зазора на отклонения профиля обрабатываемой поверхности

1.5. Анализ способов магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения, схем и конструкций оборудования

Магнитно-абразивная обработка осуществляется при движении относительно друг друга заготовки и абразивных частиц в магнитном поле (ГОСТ 23505–79). Впервые метод МАО был предложен в 1938 году Н. И. Каргаловым, который получил авторское свидетельство на способ полирования деталей машин с использованием энергии магнитного поля [114].

Особенностями МАО являются снижение циклических нагрузок на технологическую систему, что способствует повышению точности геометрических размеров и формы обрабатываемой поверхности из-за непрерывного контакта абразива с поверхностью изделия; обеспечение стабильности физико-механических показателей качества поверхностного слоя детали ввиду отсутствия жесткого крепления абразивного зерна в связке; устранение в зоне резания критических давлений и температур, что увеличивает стойкость зерна и способствует самопроизвольному нивелированию режущего инструмента относительно топографии обрабатываемой поверхности; управление жесткостью абразивного инструмента в осевом и продольном направлениях путем регулирования величины магнитной индукции, что позволяет изменять величину съема металла с обрабатываемой поверхности изделия; совмещение черновой, чистовой и финишной обработки без смены технологических баз

и позиционирования детали; осуществление размерной и безразмерной обработки, обеспечивающей съём металла 0,002...0,5 мм за 10...120 с.

Промышленное применение способ получил, начиная с 70-х годов прошлого века, благодаря разработкам, выполненным в ФТИ НАН Беларуси под руководством Е. Г. Коновалова [7]. Развитие МАО стало возможным на основе исследований П. И. Ящерицына, Ф. Ю. Сакулевича, Н. Я. Скворчевского, Г. С. Шулева, Л. К. Минина, Н. С. Хомича, В. И. Ждановича, В. С. Майбороды, Ю. М. Барона, G. Kremen, J. Kodacsy, H. Yamaguchi, L. Singh, R. Komanduri, E. Wantuch и др. [4, 8, 63, 65, 68, 81, 84, 85, 87, 108, 115, 116, 117, 118, 119].

Разработанные методы МАО можно классифицировать по форме обрабатываемой поверхности [103]: обработка наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, плоскостей, кромок, поверхностей вращения с криволинейной образующей, сферических поверхностей (рис. 1.13). Обрабатываемая деталь 1 располагается между полюсными наконечниками 2 электромагнитов 3. В зазор между обрабатываемой поверхностью и полюсными наконечниками подается ФАП 4, формируемый в эластичный инструмент силами магнитного поля. Съём металла происходит за счет наличия относительных перемещений детали и инструмента (вращательных, поступательных и осциллирующих). В схемах (рис. 1.13, а, з, д, е) отражено выполнение двух движений формообразования: главного движения резания детали и движения продольной подачи детали (инструмента), которые определяются величинами скорости резания и продольной подачи. В схеме (рис. 1.13, б, в, ж, з) осуществляется выполнение трех движений формообразования, при этом главное движение резания совершает инструмент. Обработку по схеме (рис. 1.13, з) выполняют с осциллирующим движением детали.

Магнитное поле удерживает порошок в рабочем зазоре и выступает в роли связки, прижимающей порошок к обрабатываемой детали. Основные виды схем МАО используются при обработке других поверхностей. В работе [82] исследования выполняли на четырехгранных пластинах, изготовленных из двух- и трехкарбидных твердых сплавов типа Т15К6 и ТТ10К8. Установлено, что величина R_a как на задней, так и на передней поверхности режущих пластин за время обработки 120 секунд с реверсом вращения достигает

величины 0,6...0,63 мкм на передней и задней поверхностях и практически не зависит от состава применяемого ферроабразивного порошка. При этом следует отметить, что при обработке на станке МАРС получены худшие результаты, подтверждающие результаты работы [102].

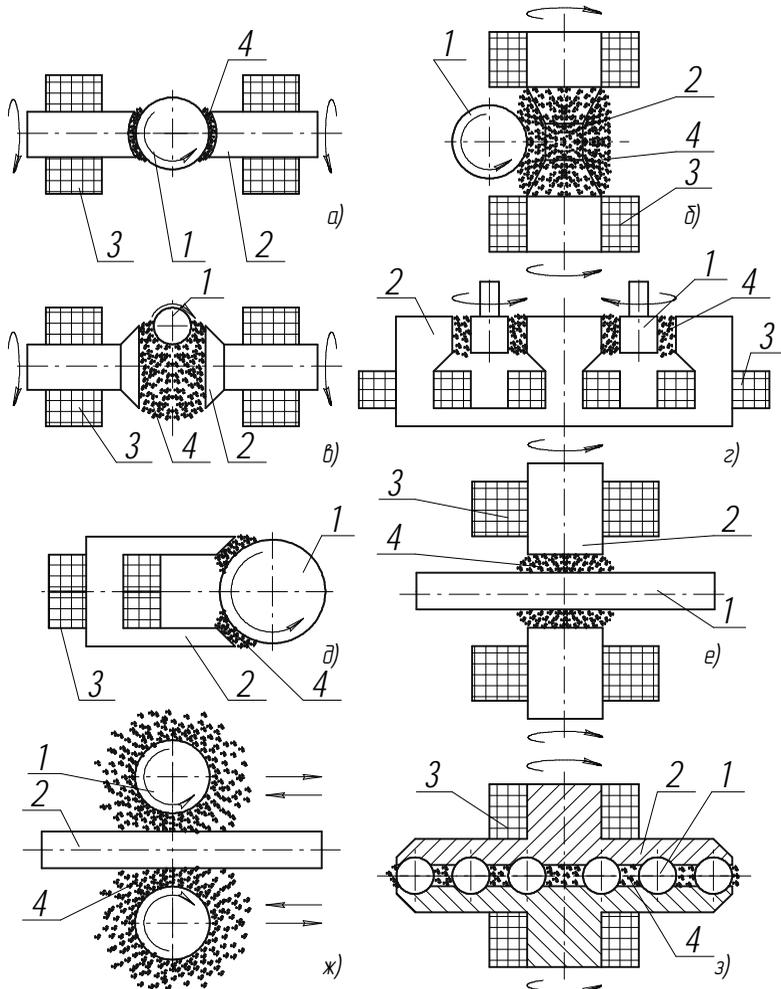


Рис. 1.13. Схемы МАО:

а, б – валов; *в* – прутков и труб; *г* – цилиндрических и стержневых деталей; *е, ж* – листов и лент; *з* – сферических поверхностей

Такая низкая эффективность МАО объясняется исходным качеством пластин и характером финишной обработки, результаты которой в полной мере не представляется возможным удалить при МАО. Анализ схемы МАО зубчатого колеса с применением эквидистантных полюсных наконечников показал, что распределение концентрации ФАП на сложнопрофильной поверхности венца зубчатого колеса зависит от разности значений индукции по осям зуба и впадины, поэтому важно знать характер распределения индукции по всей глубине впадины. Условно процесс МАО зубчатого колеса можно разбить на 3 этапа (рис. 1.14): 1 – этап покрытия зубьев ФАП посредством их намагниченности (I сектор), 2 – этап наполнения впадины порошком посредством вращения детали (II сектор); 3 – этап обработки впадины посредством осциллирующего движения обрабатываемой детали (III сектор).

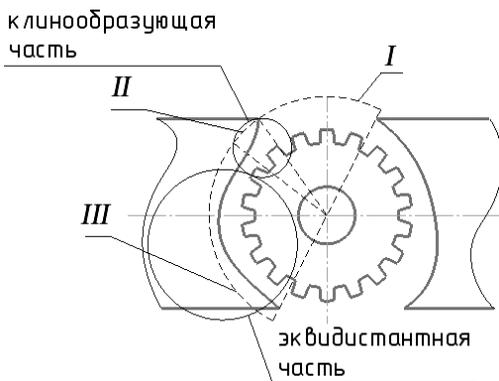


Рис. 1.14. МАО зубчатого колеса

В работе [119] магнитное поле удерживает шары в пазах и в зависимости от величины магнитной индукции прижимает их к поверхности заготовки с силой 50...100 Н. Магнитная индукция составляла $B = 1,3...2,0$ Тл.

Были выполнены эксперименты на валах из термически обработанной стали С45 с твердостью $HV = 290$. Размеры заготовки: $(0,20...0,70) \times (200...600)$ мм, диаметр шаров 6...14 мм. При МАО с правильно выбранными технологическими условиями за один рабочий ход шероховатость может быть уменьшена на 1/3. Твердость

поверхностного слоя может быть повышена в 1,5 раза и более чем на глубину 20...30 мкм.

Процесс обработки при наличии движущейся рабочей среды является одной из модернизаций МАО, который представляет собой объемную механическую обработку сложнопрофильных деталей и производит финишную обработку труднодоступных зон и участков детали [120]. Однако требуется специальное приспособление для создания необходимых условий с целью направления движущейся рабочей среды на подвергаемые обработке участки детали. Однако существенной проблемой этой обработки является терморегуляция рабочей зоны, повышенный нагрев установки и, вследствие этого, необходимость создания сложной системы охлаждения, что резко увеличивает себестоимость процесса съема материала.

Процесс магнитно-абразивной галтовки [121] происходит в неподвижном рабочем объеме, окруженном постоянными магнитами, в который загружены наполнитель, представляющий короткие обоюдоострые иглы, обрабатываемые детали и смазочно-охлаждающая технологическая среда.

Результаты изменения массы деталей из латуни марки Л63 при магнитной галтовке в СОТС показывают, что основной съем металла заканчивается через 10...25 мин. При недостаточной силе или же неправильной конфигурации поля наполнитель будет беспорядочно перемещаться по рабочему объему, не создавая обрабатывающего усилия на поверхности изделий. Анализ теоретических и практических достижений в области магнитно-абразивной обработки показывает, что в настоящее время реализована лишь малая часть технологических возможностей метода, вытекающих из его особенностей. Выполненные научные и прикладные работы позволили создать ряд технологических процессов полирования в магнитном поле, однако практически не изучена проблема полирования в магнитном поле поверхностей перед нанесением различного рода металлических, керамических и других покрытий.

Таким образом, в опубликованных работах имеются ограниченные сведения о влиянии МАО на эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей, износостойкости и контактной прочности и не исследованы возможности использования МАО для повышения важнейшей из эксплуатационных характеристик – коррозионной стойкости. На практике реализованы лишь схемы МАО поверхностей вращения

и плоскостей штучных деталей. Не рассматривалась и не решена проблема полирования и зачистки длинномерных изделий машиностроения и металлургии типа прутков, труб, проволоки, листов и лент. Нет решений задач финишной обработки в магнитном поле винтовых и пространственно-сложных поверхностей деталей, отсутствуют сведения об исследовании возможностей применения магнитно-абразивной обработки на операциях полирования прецизионных поверхностей деталей электроники (например, пластины монокристаллов кремния – подложки интегральных схем), оптики и лазерной техники (стекла, флюориты и др.). Между тем, физико-механические особенности метода MAO (низкие температуры в зоне обработки и давления на обрабатываемую поверхность) являются благоприятными факторами для формирования нанорельефа поверхностей и бездефектного поверхностного слоя.

Повышение эффективности процесса MAO достигается кинематическими и геометрическими методами управления процессом съема материала, объединением в одном процессе схем частичного или полного формообразования, активированием процесса микро-резания, отражающим воздействие ЭМП, что определяет условия сопротивления пластическому деформированию и позволяет управлять градиентом магнитной индукции для формообразования сложнопрофильных поверхностей, интенсификацией удаления материала анодно-химическим растворением поверхностного слоя и созданием высокоэффективного технологического оборудования и оснастки для его реализации.

1.6. Методология исследования процессов магнитно-абразивной обработки в электромагнитном поле

Анализ процессов формирования поверхности детали при магнитно-абразивной обработке обеспечит определение основных направлений аналитических и экспериментальных исследований. Первоочередными направлениями аналитических исследований магнитно-абразивной обработки являются: 1) создание теоретических основ формирования поверхностного слоя при электрохимических и магнитных воздействиях; 2) разработка аналитических

моделей тепловых и механических процессов, управляемых электромагнитными потоками энергии; 3) определение критериев, характеризующих электромагнитные потоки энергии и тепломассоперенос в процессах самоорганизации поверхностных явлений; 4) структурно-функциональный синтез технологической системы механических процессов деталей машин; 5) определение технологических параметров управления состоянием поверхностного слоя при магнитном, химическом и механическом воздействии.

Теоретические основы позволяют создать методологию управления эксплуатационными характеристиками детали. Они включают в себя совокупность взаимосвязанных аналитических моделей и критериев оптимизации технологических воздействий, построенных на основе методов теоретической механики [122, 123], гидродинамики [124, 125], термодинамики [126–128] и электродинамики [129, 130] различных тел и средств с применением теории упругости и пластичности [131, 132], ползучести и вязкости [133–135], разрушения [136–139], теплопроводности [140, 141], магнитно- и электропроводности [142, 143].

Разработка аналитических моделей носит многоступенчатый характер (рис. 1.15).

На первом этапе рассматривается макроуровень (*A*) рабочей зоны технологической системы. Анализируется формирование поверхностного слоя детали по средствам управления электромагнитными воздействиями. Формирование слоя имеет комбинированный механизм и описывается взаимосвязанными механическими и тепловыми процессами.

На следующем этапе изучается мезоуровень (*B*) областей контакта элементов технологической системы в рабочей зоне. Исследуется кинематика частиц порошка и силы, действующих на частицы в рабочей зоне с позиций механики и электродинамики порошковой среды. Затем рассматривается распределение температур в цепочке частиц под влиянием действующих на них сил, проходящего через цепочки зерен тока и в зависимости от теплофизических характеристик контактирующих материалов. Распределение температур в цепочке зерен формирует температурное поле детали. Температурное поле совместно с механикой трибоконтакта определяет кинематику ферроабразивной щетки, которая влияет на контактные давления.

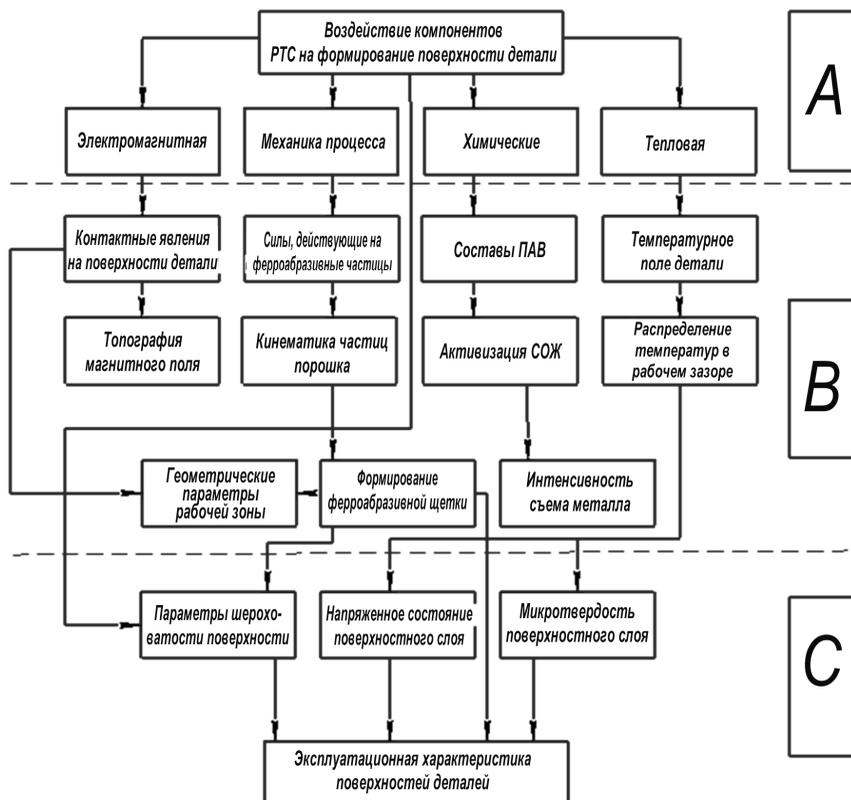


Рис. 1.15. Структура аналитических моделей процесса магнитно-абразивной обработки поверхностей:

A – рабочая зона технологической системы; *B* – область контакта компонентов рабочей технологической среды; *C* – поверхностный слой детали

На заключительном этапе исследуется микроуровень (*C*) формируемого поверхностного слоя в рабочей зоне, т. е. формирование эксплуатационных характеристик детали. Контактные давления на формируемой поверхности детали совместно с температурным полем задают поле напряжений поверхностного слоя, характеризующие остаточные напряжения в поверхностном слое после МАО. Эксплуатационные характеристики детали, помимо технологической наследственности, определяются полем напряжений, сложившимся при использовании детали, а также непосредственно

эксплуатационными температурами и контактными давлениями. Определение критериев оптимизации технологических воздействий, характеризующих электромагнитные потоки и тепломассоперенос в поверхностном слое, основывается на аналитических моделях. Оно проводится путем выделения ведущих технологических факторов и выявления их взаимосвязей при стабильном обеспечении требуемых эксплуатационных характеристик детали [144]. Синтез технологической системы обработки деталей машин базируется на анализе функций системы и исследования структуры их взаимосвязей при управлении формированием заданных эксплуатационных характеристик детали.

1.7. Методология самоорганизации процессов магнитно-абразивной обработки в электромагнитном поле

Анализ показывает, что протекание процесса МАО как процесса резания представляет собой эволюцию открытой, неравновесной термодинамической системы с воздействием внешних флуктуаций, трансформацией ее структуры при наличии обратных связей. Любая математическая модель не в состоянии при использовании линейных уравнений отразить в полной мере оценку МАО сложно-профильных поверхностей. Таким образом, исследование данного процесса следует отнести к отрасли синергетики технических процессов механической обработки, используя системный подход к изучению этой системы. Система МАО должна включать ряд подсистем, в которые входят электромагнитная система (ЭМС), которая обеспечивает обмен энергией с системой рабочей технологической среды (ФАП, СОТС, ЭМП), и система контакта РТС с поверхностным слоем детали или система резания.

Подвод энергии от ЭМС осуществляет переход РТС от состояния хаотичности к состоянию порядка и обеспечивает возникновение аттрактора как упорядоченной структуры. Фазовый переход связан с намагниченностью РТС, а в случае обработки ферромагнитного материала, еще и детали. Независимыми переменными для системы МАО являются координаты x , y , z декартовой плоскости и время t , их перевод в разряд зависимых заключается в выборе

схемы обработки и определением периода времени, необходимого для реализации МАО. Поскольку система МАО является инерциальной, это приводит к наличию силового баланса, характеризующегося равновесием сил резания и ее направлением, и который может быть определен в системе МАО для обработки деталей простой формы. Однако для сложнопрофильных поверхностей равнодействующая сил резания и ее направление изменяются по причине изменения геометрии контакта с обрабатываемой поверхностью, что приводит к отсутствию требуемых значений параметров порядка (шероховатость после обработки и массовый съем материала). Следовательно, необходимо произвести создание структуры РТС через обратные связи таким образом, чтобы кооперативность и когерентность зависимых параметров процесса МАО (скорость резания, осцилляции, магнитная индукция, амплитуда осцилляции и т. д.) обеспечивали выходные показатели параметров порядка в соответствии с требованиями РКД. Решение данной задачи может быть реализовано путем самоорганизации процесса МАО, когда будет выявлен необходимый диапазон зависимых параметров, иначе режимов МАО, в котором РТС самоорганизуется необходимым образом для получения требуемой шероховатости и массового съема материала. Самоорганизация процесса МАО через связь ее механизма и диссипативных структур представлена в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Связь механизма самоорганизации и диссипативных структур процесса МАО

Диссипативные структуры	Механизм самоорганизации
Намагниченность РТС	Фазовый переход
Структурно-фазовые изменения поверхностного слоя	Оптимизация процесса МАО
Износ	Радиус стабилизации завитка стружки
РТС	Массоперенос
Турбулентное движение СОТС	Образование отрицательных углов зерен РТС

Поскольку высокий уровень сложности системы МАО не позволяет использовать математические модели, адекватно отражающие

преобладание положительных обратных связей над отрицательными, то действенным механизмом контроля и проведения самоорганизации процесса МАО является его оптимизация. В результате проведенного моделирования процесса МАО сложнопрофильных поверхностей установлено, что его самоорганизация должна быть описана полиномом более высокого порядка, а именно кубическим, в отличие от поверхностей простой формы, где достаточен квадратичный. Применение парного корреляционного анализа для поиска в зависимости параметров порядка МАО сложнопрофильных поверхностей показало недостаточность его дальнейшего анализа, что требует использования более сложного – линейно-корреляционного. Таким образом, использование вышеуказанных кубического полинома и линейно-корреляционного анализа обеспечивает установление взаимозависимостей параметров МАО и наличие корреляционной связи между ними, среди которых значимы тройные взаимодействия. Выявление таких взаимодействий приводит к определению диапазонов режимов МАО сложнопрофильных поверхностей, которые отражены через регрессионные уравнения, расчет которых регламентирует процесс самоорганизации.

1.8. Экспериментальное оборудование, приборы и материалы для исследования процесса магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения

Эксперименты выполнялись в соответствии с матрицами полных и дробных факторных планов методом крутого восхождения для обеспечения наиболее равномерного расположения точек в факторном пространстве. При проведении экспериментальных исследований использовались универсальные и агрегатные металлорежущие станки, специальные установки для МАО и применялись различные виды СОТС – синтетические, полусинтетические и естественные эмульсии и ФАП – однородные, керметные и литые. Исследование физико-химических показателей качества СОТС произведен согласно ОСТ 380-1327–83, взятие проб осуществляли в соответствии с ГОСТ 2517–85. Требования безопасности и характеристику токсико-гигиенических и пожароопасных свойств СОТС определяли в соответствии с ГОСТ 12.1.005–88 и 12.1.044–84.

Для оценки структуры, состава и твердости ФАП были применены методы оптической (Neophot-2), растровой электронной микроскопии (РЭМ-100) и рентгеноструктурный фазовый анализ. Рентгеноструктурные исследования осуществлялись на дифрактометре ДРОН-3.0 путем регистрации рентгеновских интерференционных максимумов ионизационным методом. Съемка велась в монокроматизированных CuK_α и CoK_α излучениях.

Физико-механические параметры поверхностного слоя обработанных деталей оценивались по величине твердости *HRC* по Роквеллу и микротвердости H_μ по Виккерсу; знаком и величиной напряжений I (δ_I) и II (δ_{II}) рода; дисперсностью блоков когерентного рассеяния (*D*). Исследование шероховатости поверхности образцов проводилось на профилографе-профилометре «Калибр-201», «Калибр-252», «Калибр-296». При проведении производственных испытаний обеспечивалось исследование износо- и коррозионной стойкости деталей машин в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Напряжения определялись по методике Н. Н. Давиденкова, основанной на измерении деформации детали по мере удаления напряженных слоев металла и вычислении величин напряжений, которые понадобились бы для устранения этих деформаций. Удаление слоев металла производилось электрохимическим методом со скоростью 0,05 мкм/с. Остаточные напряжения исследовались на глубине 5 мкм. Твердость поверхности и структур измерялась на твердомере ТК2-М, микротвердомере ПМТ-3 и «Бюллер». Величины микронапряжений и блоков мозаики определялись методами рентгеноструктурного анализа по известным методикам, основанным на аппроксимации линий эталонного и исследуемого образцов. В качестве эталонов использовались исходный образец и армко-железо. Рентгеноструктурные исследования осуществлялись на дифрактометре ДРОН-3.0 путем регистрации рентгеновских интерференционных максимумов ионизационным методом.

Производительность обработки Q , равная уменьшению массы m образца, приходящейся на единицу площади в течение периода времени t , измерялась на аналитических весах АДВ-200М.

Вычисление параметров ЭМП осуществлялось на основе применения закона Био-Савара-Лапласа и принципа суперпозиции. Определение положения линий магнитной индукции было выявлено методом Рунге-Кутта с помощью программного пакета «Mathematica-4»,

методом конформных отображений с использованием интеграла Кристоффеля-Шварца и применением функции комплексного переменного и интерактивного метода Ньютона. Расчет топографии ЭМП представлен уравнениями Максвелла на базе комплексных и вещественных числовых матриц путем транспонирования миноров для их преобразования при линейном, нелинейном и тождественном отображении и удовлетворяющих алгебре Клиффорда.

При выполнении измерений использованы средства измерений, аппаратура, вспомогательные устройства и материалы, в том числе: линейка поверочная по ГОСТ 8026–92; набор щупов № 1 толщиной 0,05 и 0,10 мм; уровень брусковый по ГОСТ 9392–89; бязь отбеленная арт. 247 по ГОСТ 29298–2005 или ткань хлопчатобумажная миткалевой группы по ГОСТ 7138–83; стандартные образцы абразивной и режущей способности, состоящие из шлифпорошка электрокорунда и (или) карбида кремния зернистостью 8; микрошлифпорошка электрокорунда и (или) карбида кремния зернистостью М14; водяная баня с температурой 35–37 °С (аппарат АИС ТУ 64-11991–77); весы аналитические типа ВЛР-200 – ТУ 25-С6-1131–75; шкаф сушильный лабораторный – ГОСТ 1941–74; часы или секундомер – ГОСТ 5072–79; пробирки лабораторные градуированные на 15...20 мл – ГОСТ 25336–82; цилиндры мерные на 10...100 мл – ГОСТ 1770–74; воронки лабораторные стеклянные В-36...50 – ГОСТ 25336–82; микропипетки объемом 0,1...0,2 мл – ГОСТ 20292–74; склянки из желтого стекла (ОС) на 20–30 мл с плотной пластмассовой пробкой – ТУ 64-2-109–72; колбы стеклянные лабораторные на 50...100 мл с пробкой ГОСТ 25336–82; вата гигроскопическая – ГОСТ 5556–81; вода дистиллированная – ГОСТ 6709–72; бумага фильтровальная – ГОСТ 12026–76; индикатор – дихлорфеноиндофенолят натрия – ТУ 6-09-2808–77, 0,1 % раствор.

1.9. Методы исследования

1.9.1. Методика исследования абразивной способности ферроабразивных порошков

Была использована установка с программно-аппаратным комплексом, которая приспособлена для нанесения царапин зернистостью

160/125 мкм на поверхность исследуемого металла. В процессе работы с помощью датчиков производятся измерения радиальной и тангенциальной составляющих силы резания. С использованием специальной платы аналого-цифрового преобразователя осуществляется передача в компьютер информации, поступающей от датчиков. Поверхности образцов предварительно полировали до шероховатости по параметру $R_a < 0,05$ мкм для последующего качественного измерения глубины царапины и высоты навалов. Был определен диапазон сил, с которыми зерно действует на поверхность обрабатываемой детали при МАО $(0,5-16) \times 10^{-3}$ Н. Скорость принималась $V = 0,5$ м/с – при многократных циклических проходах. Исследуемый материал – Ст. 3 ГОСТ 380–71.

Контроль профиля вершины производится на микроскопе МИМ. Значение углов при вершине принятые равными 90 и 100 градусов, а значение радиусов округления вершин равными 20, 30, 40, 60 и 110 мкм. Образцы для микрорезания закреплялись между полюсными наконечниками электромагнитной системы, обладающими возможностью перемещения и вращения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Установка для микрорезания единичным зерном позволяет получить результаты влияния величины магнитного потока на топографию поверхности формируемых рисок, их размеры и свойства поверхностного слоя, определяемые профилографированием сечения рисок и измерением их микротвердости с помощью косых шлифов. Влияние величины магнитного потока на значение критических отношений стружкообразования α_z / ρ инструментом с жестко-связанным абразивным зерном, характеризующих момент начала резания, определялось путем последовательного нанесения на поверхность образцов рисок различной глубины. Для плавного изменения глубины микрорезания образец можно устанавливать с наклоном (1:500...1:1000) в плоскости, параллельной направлению продольной подачи. Определение влияния величины магнитных сил и намагничивания образцов на образование топографии поверхности осуществляют через значения критических отношений стружкообразования α_z / ρ , значения сил и условных сил микрорезания и проводят в два этапа. На первом этапе направление действия магнитного поля совпадает с направлением микрорезания в каждом

конкретном цикле исследования. На втором этапе электромагнитная система вместе с образцом разворачивается на 90° , и микрорезание проводится в направлении вектора магнитной индукции, который перпендикулярен вектору скорости абразивного зерна. Для измерения износа зерна серию процессов микрорезания образцов проводят с различными глубинами резания, что соответствует его состоянию в реальном процессе MAO. После получения 3...5 рисок измеряют размеры площадки на вершине резца и радиальный износ. Опыт считается законченным, если длина площадки износа на вершине зерна достигает 0,02...0,1 мм (в зависимости от размеров абразивного зерна).

1.9.2. Методики исследования смазочно-охлаждающих технологических средств

1.9.2.1. Методика исследования смазочно-охлаждающих технологических средств компьютерной микроскопией

Измерения структурных параметров эмульсий осуществлялись на копиях микроизображений, предварительно сохраненных в базе данных компьютерного микроскопа. При этом также автоматически фиксируются значения измеряемых площадей. На рис. 1.16 в качестве примера показано микроизображение (дисперсная фаза эмульсии) с нанесенными измерительными линиями и контуром.

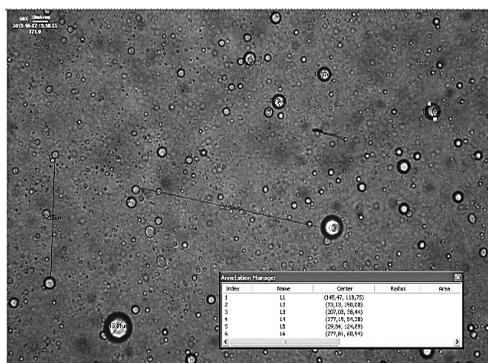


Рис. 1.16. Микроизображение дисперсной фазы эмульсии с нанесенными на него измерительными линиями и измерительным контуром

Для определения объемного содержания структурных элементов (частиц) следует обеспечить их высококонтрастное выделение на микроизображении, для чего микроизображение делается бинарным (черно-белым). Затем автоматически вычисляется относительная площадь структурных элементов (частиц) в выбранном поле наблюдения. Таким способом можно определять содержание дисперсной фазы в эмульсиях.

Перед обработкой, а также по окончании каждого этапа обработки брали пробы эмульсии СОТС и определяли в них средний размер $R_{\text{ср}}$ масляных капель с помощью компьютерного микроскопа (производство ЧНПУП «Спектравтоматкомплекс», Беларусь) и программного комплекса обработки и анализа изображений AutoScanStudio (ЗАО «Спектроскопические системы», Беларусь).

1.9.2.2. Методика исследования бактерицидной поражаемости смазочно-охлаждающих технологических средств

Метод анализа основан на окислительно-восстановительной (дегидроизной) способности микроорганизмов, обитающих в СОТС, изменять цвет редокс-индикаторов, добавленных в СОТС. Оценку микробной поражаемости СОТС производят в баллах от «1» до «6» по времени исчезновения синей окраски в пробирках, содержащих СОТС вместе с водным раствором редокс-индикатора дихлорфенолиндофенолята натрия. В две пробирки из трех вносят дихлорфенолиндофенолят натрия, третью пробирку с СОТС оставляют в качестве контрольной пробы. Обе пробирки, содержащие СОТС с редокс-индикатором, тщательно перемешивают вращением вокруг вертикальной оси и все три пробирки закрывают ватными пробками. Через 5, 20, 30, 40, 50 и 60 минут отмечают цвет жидкости в пробирках. Микробную поражаемость СОТС оценивают в баллах. В таблице 1.4 указано время обесцвечивания СОТС в пробирках с редокс-индикатором, соответствующее времени обесцвечивания оценка микробной поражаемости СОТС в баллах и среднее число микробов в 1 миллилитре СОТС. В соответствии с произведенным анализом микробной поражаемости СОТС и оценкой ее в баллах делают заключение о пригодности СОТС к эксплуатации.

Таблица 1.4

Оценка микробной поражаемости СОТС в баллах

Время обесцвечивания СОТС	Оценка микробной поражаемости в баллах	Среднее число микробов в 1 мл СОТС
Цвет СОТС не изменился за 6–12 часов	0	менее 10^3
Обесцвечивание через 210 ± 60 минут	1	10^3
Обесцвечивание через 77 ± 18 минут	2	10^4
Обесцвечивание через 51 ± 12 минут	3	10^5
Обесцвечивание через 30 ± 9 минут	4	10^6
Обесцвечивание через 12 ± 5 минут	5	10^7
Обесцвечивание через 5 ± 3 минуты	6	10^8 и более

1.10. Методики расчета и исследования топографии магнитного поля и ферроабразивных порошков

1.10.1. Методики расчета параметров ЭМП и определения магнитных характеристик ФАП

Вычисление параметров ЭМП осуществлялось на основе применения закона Био-Савара-Лапласа и принципа суперпозиции.

Определение положения линий магнитной индукции было проведено на базе решения системы дифференциальных уравнений, правая часть которых есть компоненты результирующего вектора магнитной индукции. Нахождение линий уровня абсолютной величины магнитной индукции достигалось путем программного обеспечения. Данная система была решена методом Рунге-Кутты с помощью программного пакета «Mathematica-4».

Исследование магнитного поля при трапецидальной форме зубьев и влияние скоса зуба на характер кривой распределения индукции осуществлено при помощи метода конформных отображений [145, 146]. Определение значения B во впадине зубчатого колеса произведено с использованием интеграла Кристоффеля-Шварца и методом конформного отображения с применением функции комплексного переменного. Изменение величины B от конфигурации геометрии как обрабатываемого изделия, так и формы рабочего зазора производилось методом конформного отображения при использовании интеграла Кристоффеля-Шварца и интерактивного метода Ньютона для наружных конических поверхностей сборных изделий. Расчет топографии магнитного поля матричными формами представления системы уравнения Максвелла, базирующегося на матрицах, удовлетворяющих алгебре Клиффорда, устанавливает связь между B и H через тензоры магнитной проницаемости для поля внутри разрыва магнитопровода с целью расчета параметров и конфигурации электромагнитных систем.

Определение магнитных характеристик порошков проводили при помощи установки типа БУ-3. При расчете магнитных характеристик частиц порошка последний рассматривали как пористое тело, заполняющее рабочий зазор, зависящий от плотности засыпки и пикнометрической плотности γ .

Датчиком намагниченности измеряли намагниченность брикета:

$$\mu_n = \frac{\mu - p}{1 - p}, \quad (1.6)$$

где μ – фактическая проницаемость брикета порошка.

По соотношению плотности брикета γ и пикнометрической плотности γ^0 порошка определяли величину пористости брикета

$$p = 1 - \gamma / \gamma^0. \quad (1.7)$$

Благодаря размагничивающему действию пор, магнитное поле, приложенное к частицам порошка, меньше, чем поле, приложенное к брикету. Эффективная магнитная проницаемость определяется по отношению индукции в частице порошка с пикнометрической плотностью к внешнему магнитному полю.

1.10.2. Методика исследования прохождения различных рабочих жидкостей через слой ФАП при наложении магнитного поля

Для проведения экспериментов по протеканию жидкости через слой ферроабразивного порошка использовали:

1) № 1 – СОТС 1–5 %-я водомасляная эмульсия ЭГТ ТУ 0258-004-27192068–2002 – без ультразвуковой (УЗ) обработки; № 2 – СОТС 2–5 %-я водомасляная эмульсия ЭГТ ТУ 0258-004-27192068–2002 – с УЗ обработки 5 мин; № 3 – раствор NaCl ГОСТ 4233–77 (10 г/л); № 4 – техническая вода; № 5 – дистиллированная вода.

2) ФАП Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81 3). Стеклоанная трубка различных диаметров ГОСТ 27460–87: образец 1 – внешний диаметр 12 мм, внутренний – 8 мм; образец 2 – внешний диаметр 8, внутренний – 6 мм; образец 3 – внешний диаметр 6 мм, внутренний – 2 мм.

4) Постоянные магниты МПП 21-25-15-10 ГОСТ 24936–89.

Методика проведения экспериментов по протеканию жидкости через слой ФАП заключается в следующем. В стеклоанную трубку различных диаметров помещают ФАП и закрепляют ее на штатив ГОСТ 10197–70. Через слой ФАП пропускали определенный объем жидкости (№ 1...№ 5). В дальнейшем при помощи ПК была произведена обработка данных в специальных программах для того, чтобы произвести вычисления об изменении скорости от времени протекания жидкости через слой ФАП. Эксперименты проводились с применением постоянных магнитов. На рис. 1.17 приведена схема прохождения различных рабочих жидкостей через слой ФАП.

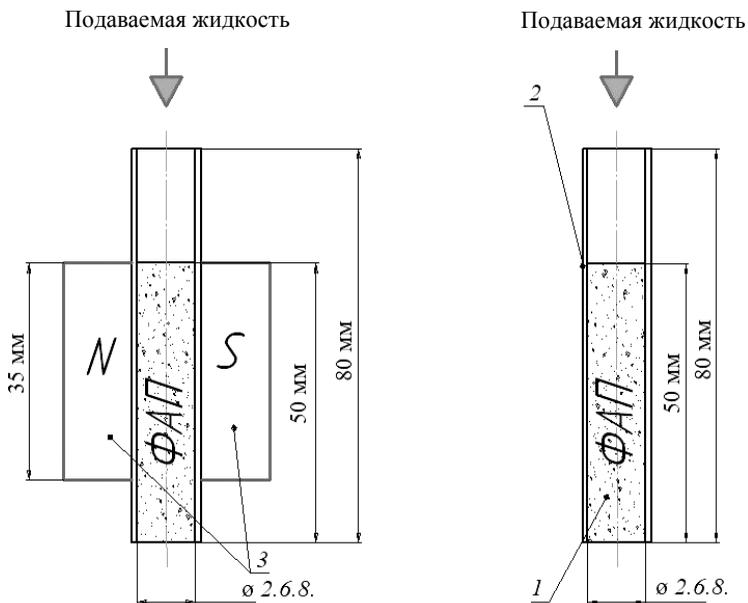


Рис. 1.17. Схема прохождения различных рабочих жидкостей через слой ФАП:
 1 – ферроабразивный порошок Ж15КТ; 2 – стеклянная трубка;
 3 – постоянные магниты

Для проведения экспериментов по измерению магнитной индукции постоянного магнитного поля использовали тесламетр ИМИ-1. При помощи тесламетра в определенных точках, представленных на рис. 1.17, измеряется магнитная индукция B . По полученным данным производится расчет скорости прохождения СОТС через слой ФАП.

Глава 2
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ РАБОЧЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ
НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И КАЧЕСТВО
ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ
СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

2.1. Кинетика рабочей технологической среды
при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных
поверхностей тел вращения

Поиск путей управления свойствами РТС, формирования поверхностного слоя и интенсификации МАО сложнопрофильных поверхностей обусловил необходимость определения закономерностей явлений, протекающих в рабочей зоне МАО, и анализа взаимосвязи технологических параметров процесса. Проведенное до настоящего времени исследование не дает полного объяснения механизма взаимодействия и кинетики параметров процесса МАО. Выдвинутые гипотезы не обеспечивают гарантированного представления обо всех физико-химических явлениях, происходящих в рабочей зоне, и не позволяют однозначно выявить особенности процесса МАО сложнопрофильных поверхностей.

2.1.1. Кинетика рабочей технологической среды
при магнитно-абразивной обработке
с учетом синергизма ее факторов

Разработка высокопроизводительного процесса МАО сложнопрофильных поверхностей деталей, являющегося многопараметрическим, нуждается в определении закономерности взаимного влияния физических явлений, происходящих при контактировании пары инструмент-деталь, и обусловлена механизмом действия магнитного поля. Знание топографии ЭМП устанавливает характер распределения сил, действующих в зоне обработки,

условия теплообмена, процесс микрорезания и стружкообразование, напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя, кинетику изнашивания вышеуказанной пары и достижение этой полноты обеспечивает правильную конструкцию технологической оснастки и оборудования, приводя к равномерности давления по всей площади обрабатываемого изделия. Следовательно, рост производительности и качества MAO сложнопрофильных поверхностей связан с формированием принципа управления их обрабатываемостью через определение топографии ЭМП и построение рабочей технологической среды, которая приводит к созданию требуемого уровня деформационно-теплового баланса в зоне обработки.

Согласно предложенной последовательности этапов построения аналитических моделей стадии процесса формирования поверхностного слоя на основе исследования влияния РТС на производительность и качество MAO сложнопрофильных поверхностей отражены на рис. 2.1.

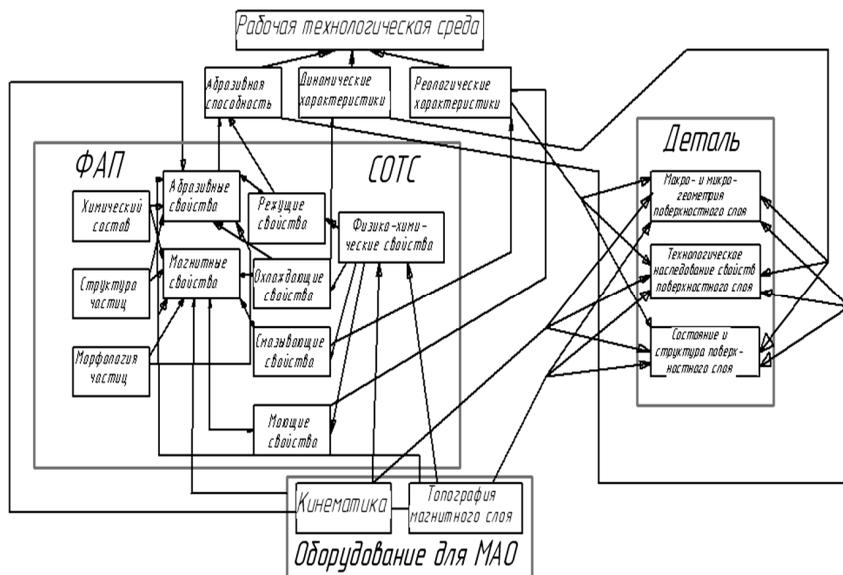


Рис. 2.1. Схема взаимного влияния компонентов РТС на показатели качества обработанной поверхности

2.1.2. Динамика рабочей технологической среды при магнитно-абразивной обработке с учетом синергизма ее факторов

Динамика процесса MAO определяет давление ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность и является важным фактором, влияющим на интенсивность съема металла и формирование поверхностного слоя. Данные об этом необходимы не только для управления процессом MAO, но и для расчета мощности и жесткости оборудования. Для изучения особенностей динамики процесса MAO сложнопрофильных поверхностей тел вращения требуются комплексные исследования [153–155].

Давление ФАП при MAO определяется нормальными силами воздействия на обрабатываемую поверхность [67]:

$$P = \frac{\sum_1^n F_n}{S} = \frac{1}{S} \frac{VB\Delta B}{\mu_0}, \quad (2.1)$$

где F_n – пондеромоторная сила, с которой абразивное зерно воздействует на обрабатываемую поверхность, H ; S – площадь обработки, м^2 ; μ_0 – магнитная постоянная, равная $1,256 \text{ мкГн/м}$; V – объем ферромагнитной частицы, м^3 ; B – величина магнитной индукции в частице, Тл ; ΔB – градиент магнитной индукции, Тл/м .

Величина F_n составляет для ферромагнитных абразивных гранул $(1,0 \dots 1,2) \cdot 10^{-3} \text{ Н}$ и зависит от размеров и формы зерен, а также от их положения в рабочей зоне [67]. При шлифовании единичным зерном нормальным электрокорундом класса зернистости 125...80 мкм глубине шлифования 10...40 мкм соответствуют нормальные силы в пределах 2,75...11,8 Н [156, 157].

Рассмотрим действие в направлении нормали к обрабатываемой поверхности сил магнитного поля на ферромагнитную частицу, находящуюся в рабочем зазоре. Для формирования поверхностного слоя необходимо затратить энергию на создание магнитного поля, перемещение поверхности и наконечников с ФАП, подачу порошка и СОТС и получение РТС. При разработке конструкции MAO необходимо определить величину мощности, требуемую для

относительного перемещения поверхности и полюсных наконечников с ФАП. Мощность привода рассчитывается исходя из величины тангенциальных сил, действующих на поверхность детали. Тангенциальные силы возникают в результате неравномерного распределения ФАП в рабочем зазоре, вследствие изменения магнитной индукции на границах участка с различным магнитным сопротивлением. Градиенты магнитной индукции создаются концентраторами магнитного потока, процесс распределения частиц по зазору хаотичен, поэтому градиент магнитной индукции на отдельных участках изменяется как по величине, так и по направлению. При таких условиях тангенциальная сила будет не одинакова для различных частиц, поэтому рассматривается суммарная тангенциальная сила. Установлено, что частицы ФАП располагаются у выхода рабочего зазора согласно его геометрическим размерам, поэтому величину тангенциальных сил целесообразно относить к единице ширины полюсного наконечника [93].

С целью определения силы резания, действующей на каждом локальном участке сложнопрофильной поверхности детали типа тел вращения, проведены исследования, связанные с установлением ее величины в зависимости от геометрического контура рабочей зоны полюсного наконечника. Деталь помещается в рабочую зону, пространство которой между полюсными наконечниками и ее поверхностью заполняется ФАП с динамической вязкостью η , и на деталь действует сила F , приходящаяся на единицу ее площади (рис. 2.2). Линия центров OO_1 детали и рабочей зоны составляет с вертикалью угол φ , величина которого меняется с величиной F . Этот угол является углом положения детали, а расстояние OO_1 между центрами – эксцентриситетом e , при этом, с другой стороны, $e = 2(R - r)$. С уменьшением серповидности рабочего зазора создается разница давления, достаточного для выравнивания показателей F . Обозначим через $c = R - r$ средний зазор между деталью и полюсным наконечником при учете ввода угловой координаты O некоторой точки внутри рабочего зазора.

Если при использовании концентрического профиля полюсного наконечника по всей площади поверхности контакта давление ФАП на обрабатываемую поверхность F с определенным допущением считать постоянным, то применение расходящегося и серповидного профилей полюсного наконечника связано с резким изменением этого давления. Основными геометрическими показателями полюсных

наконечников, влияющих на давление, создаваемое ФАП, являются форма создаваемого рабочего зазора и эксцентриситет.

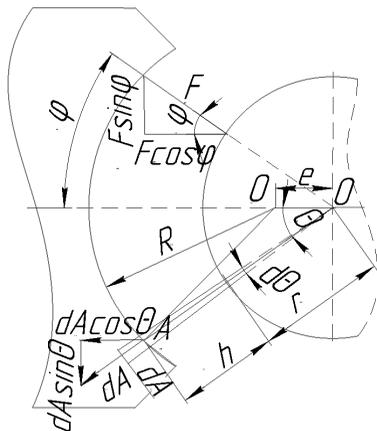


Рис. 2.2. Схема расчета геометрических и динамических параметров рабочей зоны при MAO рукояток микрофонов

Решение поставленной задачи состоит в определении коэффициента изменения давления ФАП на обрабатываемую поверхность в любой точке контакта ферроабразивного инструмента с деталью через угол θ и относительный эксцентриситет ϵ , используя положение о том, что для расходящегося профиля полюсного наконечника $\epsilon < 1$; для концентрического – $\epsilon = 1$; для серповидного – $\epsilon > 1$.

Тогда для треугольника $ОАО_1$

$$OA = r + h = OB + BA = e \cos \theta + \sqrt{(r+c)^2 - e^2 \sin^2 \theta} = e \cos \theta + (r+c) \sqrt{1 - \left(\frac{e}{r+c}\right)^2 \sin^2 \theta}, \quad (2.2)$$

где $e \approx c$, а поскольку $R = r + c \cdot e$, то $\left(\frac{e}{r+c}\right)^2$ пренебрежимо мало и может быть исключено из дальнейшего рассмотрения. В результате из равенства $r + h = e \cos \theta + (r+c)$ имеем:

$$\frac{h}{c} = 1 + \left(\frac{e}{c}\right) \cos \theta. \quad (2.3)$$

Отношение e/c или ε является относительным эксцентриситетом. Считая, что $x = r\theta$ в уравнении Рейнольдса $\frac{dp}{dx} = 6\eta V \frac{h-h_0}{h^3}$ [158], получаем:

$$\frac{dp}{d\theta} = 6\eta Vr \frac{h-h_0}{h^3}, \quad (2.4)$$

где V – скорость вращения детали, м/с; h_0 – значение величины рабочего зазора при котором давление $p = \text{max}$.

Подставляя $h = c(1 + \varepsilon \cos \theta)$ из уравнения (2.3) в (2.4) и интегрируя, получаем

$$p = \frac{6\eta Vr}{c^2} \left[\int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} - \frac{h_0}{c} \int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \right]. \quad (2.5)$$

Поскольку ферроабразивная «щетка» может выдерживать только определенные отрицательные давления, то следует принимать граничные условия, заключающиеся в установлении области

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}.$$

$$p = 0 \text{ при } \theta = 0 \text{ и } \theta = \theta_2,$$

$$\frac{dp}{d\theta} = 0 \text{ при } \theta = \theta_1 \text{ и } \theta = \theta_2.$$

Используя метод замены переменных, определяем интегралы в выражении (2.5), что позволяет найти рост давления p [158]:

$$p = \frac{6\eta Vr}{c^2} \left[\frac{\varepsilon(2 + \varepsilon \cos \theta) \sin \theta}{(2 + \varepsilon^2)(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} \right]. \quad (2.6)$$

Для этого необходимо установить, какая сила действует на конкретный локальный участок обрабатываемой поверхности и, чтобы найти это значение, рассмотрим элементарную площадь dA , разложенную на $dA \cos \theta$ и $dA \sin \theta$. Силу F , приходящуюся на единицу площади dA , раскладываем на $F \sin \theta$ и $F \cos \theta$, и поскольку $F \sin \theta$ представляет тангенциальную составляющую, производящую удержание частиц ФАП в рабочем зазоре, то рассмотрению она не подлежит. Основным интерес представляет нормальная составляющая $F \cos \theta$ ввиду того, что ее воздействие на обрабатываемую поверхность определяет эффективность съема материала.

Чтобы найти угол положения φ , выпишем соотношение

$$\begin{aligned} F \cos \varphi &= Lr \int_0^{\frac{\pi}{2}} p \cos \theta d\theta = Lr \left(p \sin \theta \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dp}{d\theta} \sin \theta d\theta \right) = \\ &= Lr \left(p - 6\eta V r \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{h-h_0}{h^2} \sin \theta d\theta \right) = Lrp - 6\eta V Lr^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{h-h_0}{h^2} \sin \theta d\theta. \end{aligned}$$

Согласно выражению (2.5)

$$F \cos = \frac{6\eta V Lr^2}{c^2} \left(\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} - \frac{h_0}{c} \int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \right). \quad (2.7)$$

Интеграл вида $\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3}$ может быть сведен к интегралам вида $\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2}$ и $\int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2}$:

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} = \frac{1}{2(1 - \varepsilon^2)} \times \left(\frac{\sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} + \int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} - 2\varepsilon \int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} \right) + C, \quad (2.8)$$

которые, в свою очередь, сводятся к выражениям, содержащим интеграл вида $\int \frac{d\theta}{1 + \varepsilon \cos \theta}$:

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} = \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(\frac{\sin \theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \varepsilon \int \frac{d\theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} \right) + C, \quad (2.9)$$

$$\int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} = \frac{1}{\varepsilon^2 - 1} \left(\frac{\varepsilon \sin \theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \int \frac{d\theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} \right) + C. \quad (2.10)$$

Окончательный вид интегралов зависит от величины ε . Рассмотрим три случая, указанные выше: $\varepsilon < 1$, $\varepsilon > 1$ и $\varepsilon = 1$.

Если $\varepsilon < 1$, то

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} = \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(\frac{\sin \theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \varepsilon \left(\frac{2}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - \varepsilon) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) \right) + C,$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} = \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(1 - \frac{2\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - \varepsilon)}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) =$$

$$= \frac{1}{2(1 - \varepsilon^2)} \left(\frac{\sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} + \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(\frac{\sin \theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \frac{2\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - \varepsilon) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{2\varepsilon}{1 - \varepsilon^2} \left(\frac{\varepsilon \sin \theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \frac{2}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - \varepsilon) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) \right) + C.$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} =$$

$$= \frac{1}{2(1 - \varepsilon^2)} \left(\frac{1}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} + \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(\frac{1}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \frac{2\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - \varepsilon)}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{2\varepsilon}{1 - \varepsilon^2} \left(\varepsilon - \frac{2}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - \varepsilon)}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) \right).$$

Если $\varepsilon > 1$, то

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\varepsilon \cos \theta)^2} = \frac{1}{(1-\varepsilon^2)} \left(\frac{\sin \theta}{1+\varepsilon \cos \theta} - \varepsilon \left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right) \right),$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\varepsilon \cos \theta)^2} = \frac{1}{(1-\varepsilon^2)} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right),$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\varepsilon \cos \theta)^3} =$$

$$= \frac{1}{2(1-\varepsilon^2)} \left(\frac{\sin \theta}{(1+\varepsilon \cos \theta)^2} + \frac{1}{1-\varepsilon^2} \left(\frac{\sin \theta}{1+\varepsilon \cos \theta} - \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right) \right) +$$

$$+ \frac{2\varepsilon}{1-\varepsilon^2} \left(\frac{\varepsilon \sin \theta}{1+\varepsilon \cos \theta} - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right) \Bigg|_0^{\frac{\pi}{2}} =$$

$$= \frac{1}{2(1-\varepsilon^2)} \left(1 + \frac{1}{(1-\varepsilon^2)} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right) + \frac{2\varepsilon}{1-\varepsilon^2} \left(\varepsilon - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right) \right).$$

Если $\varepsilon = 1$, то

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\cos \theta)^2} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{6} \operatorname{tg}^3 \frac{\theta}{2} + C,$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\cos \theta)^2} = \frac{1}{3},$$

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \cos \theta)^3} = \frac{1}{4} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{20} \operatorname{tg}^5 \frac{\theta}{2} + C,$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \cos \theta)^3} = \frac{1}{5}.$$

Таким образом, $F \cos \varphi$ непосредственно определяет силу, с которой ферроабразивная «щетка» воздействует на каждый локальный участок обрабатываемой поверхности и производство ее расчета через геометрические параметры профиля полюсного наконечника и материализации его образа позволяет обеспечить качество обработки различных деталей сложного профиля.

В результате произведенных теоретических исследований получены аналитические зависимости измерения величины давления ферроабразивной «щетки» как режущего инструмента от геометрического профилирования полюсных наконечников с целью прогнозирования и высокоэффективной обработки методом MAO сложнопрофильных тонкостенных деталей.

2.1.3. Исследование влияния давления рабочей технологической среды на обрабатываемую поверхность при магнитно-абразивной обработке

Задача исследования давления РТС на обрабатываемую сложнопрофильную поверхность заключается в необходимости получения его равномерности на каждый локальный участок поверхности. Давление ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность детали при MAO по схеме, приведенной в [115], определялось в ряде работ. Полученные значения давления порошка на обрабатываемую поверхность оказались завышенными [7]. В работе [66] указывается, что давление зерен порошка на обрабатываемую поверхность вызвано только силами магнитного поля. Таким образом, не учитывается возрастание давления вследствие механического взаимодействия ферромагнитных зерен в рабочем зазоре.

Изучая закономерность давления ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность, автор работы [108] пришел к выводу, что этот процесс определяется как силами магнитного

поля, так и силами, возникающими при механическом взаимодействии ферромагнитных зерен между собой и боковой поверхностью полюсного наконечника при перемещении порошка по рабочему зазору (заклиниванию и уплотнению зерен в узкой части зазора). Показано, что при МАО деталей типа тел вращения давление порошка на обрабатываемую поверхность достигает 2,4 МПа. Из анализа данных работы [108], видно, что с увеличением B зависимость $P = f(B)$ становится почти линейной. Так, при увеличении величины магнитной индукции в рабочем зазоре от 0,4 до 1,6 Тл давление возрастает от 0,1 до 0,62 МПа. Как показано в работе [93], данная закономерность справедлива до насыщения ферромагнитной составляющей порошка. По усредненным экспериментальным данным получена эмпирическая зависимость:

$$P = \frac{2,884V_p^{0,102}V_n^{0,315}B^{0,342}K_3^{0,451}}{V_o^{0,175}\delta^{0,433}}, \quad (2.11)$$

где V_p – скорость резания, м/с; V_n – скорость переносного движения, м/с; B – магнитная индукция, Тл; K_3 – коэффициент заполнения рабочего зазора; V_o – скорость осцилляции, м/с; δ – величина рабочего зазора, мм.

Эта эмпирическая формула дает возможность аналитически рассчитать давление ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность в зависимости от технологических факторов МАО с достаточной точностью. Для достижения одинаковой величины съема материала на разных диаметрах сложнопрофильной детали требуется добиться равенства величины давления ФАП. Это возможно путем изменения геометрии рабочего контура полюсного наконечника для придания ему серповидной формы при обработке поверхности большего диаметра. Для обработки меньшего диаметра кольца форма рабочего зазора должна быть эквидистантна, что обеспечивается условным передвижением этого диаметра на величину O_1 и O_2 , равную величине эксцентриситета e (рис. 2.3). Поскольку величина рабочего зазора равна $\delta = R_2 - R_1$, то принимаем, $R_1 + h = R_2 - b \cdot \cos\theta$ откуда $h = \delta - e \cdot \cos\theta$. Обозначим $\alpha = \frac{\delta}{e}$, где α – величина переменного зазора, $1 \leq \alpha \leq \infty$, и представим зависимости $h(\theta)$ в виде: $h = e(\alpha - \cos\theta)$.

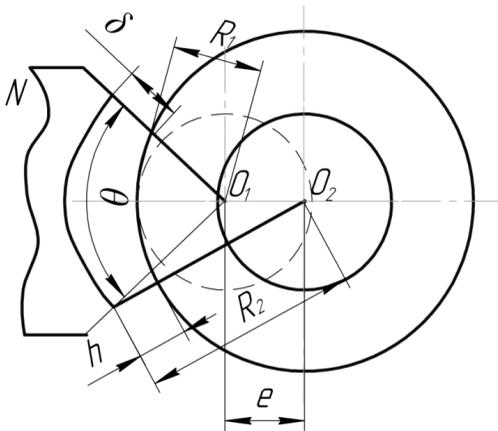


Рис. 2.3. Расчетная схема для определения геометрических параметров рабочей зоны при серповидном зазоре

Учитывая, что если $x = R_1\theta$, то

$$\frac{dp}{dx} = \frac{1}{R_1} \frac{dp}{d\theta} \frac{dp}{dx} = \frac{k\mu V}{h^3} (h^* - h)$$

где k – коэффициент, учитывающий магнитную вязкость среды;
 μ – кинематическая вязкость, сСт.

Показатель h^* имеет тот смысл, что представляет собой величину рабочего зазора в том сечении, где $\frac{dp}{dx} = 0$.

Теперь уравнение (2.12) можно представить:

$$\frac{dp}{d\theta} = \frac{k\mu VR_1}{e^2} \left[\frac{2\alpha(\alpha^2 - 1)}{2\alpha^2 + 1} \frac{1}{(\alpha - \cos\theta)^3} - \frac{1}{(\alpha - \cos\theta)^2} \right]. \quad (2.13)$$

Проведем интегрирование:

$$p(\theta) - p_0 = \frac{k\mu VR_1}{\delta^2} \frac{\alpha^2}{2\alpha^2 + 1} \frac{\sin\theta}{\alpha - \cos\theta} \left(1 + \frac{\alpha}{\alpha - \cos\theta} \right). \quad (2.14)$$

Исходя из (2.14), следует, что знак разности $p(\theta) - p_0$ определяется значением угла θ и величиной переменного зазора a . Следовательно, определение давления, необходимого для повышения эффективности процесса, зависит от соотношения геометрических параметров полюсного наконечника и детали. С целью снижения данной номенклатуры возникает необходимость в создании универсального типа полюсного наконечника.

Материал поршня АЛ1, *НВ* 90–120. В качестве оборудования применяется станок СФТ 2.150.00.00.000. ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81, зернистость ФАП, $\Delta = 100/160$ мкм, СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 5 %-й водный раствор. Величина рабочего зазора варьировалась от $\delta = 1 \dots 3,5$ мм, коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_3 = 1$, время обработки составляло $t = 120$ с. Исходная шероховатость поверхности поршня $R_{a1} = 0,8 \dots 1$ мкм. Выходными показателями служит величина удельного массового съема материала, ΔG , мг и достигаемая шероховатость поверхности, R_{a2} , мкм.

Результаты исследований представлены на рис. 2.4.

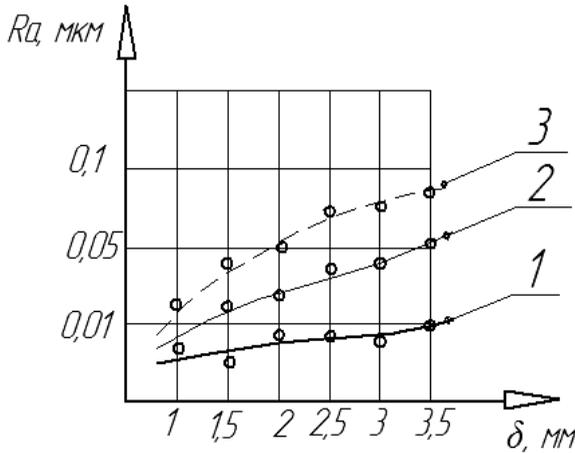


Рис. 2.4. Зависимость шероховатости поверхности R_a поверхности поршня от величины рабочего зазора δ при величине магнитной индукции B :
1 – 1,1 Тл; 2 – 1,0 Тл; 3 – 0,9 Тл

В результате проведенных исследований установлено, что использование МАО сложнопрофильных поверхностей обеспечивает

шероховатость поверхности по параметру $R_a - 0,01 \dots 0,02$ мкм, при величине удельного массового съема $- 7,5$ мг/см² · мин.

2.1.4. Исследование режущей способности рабочей технологической среды и ее адгезионного взаимодействия с обрабатываемым металлом при магнитно-абразивной обработке

В исследованиях [159, 160] установлено, что для нормального протекания процесса MAO важно предотвратить химическое взаимодействие между абразивом и обрабатываемым материалом, которое приводит к адгезии материала с абразивными зернами, увеличению сил трения и шероховатости обработанной поверхности. В местах дискретного фактического контакта абразива с изделием температура будет близка к значениям, соответствующим эвтектическому плавлению карбидов (боридов) с полируемыми металлами (рис. 2.5).

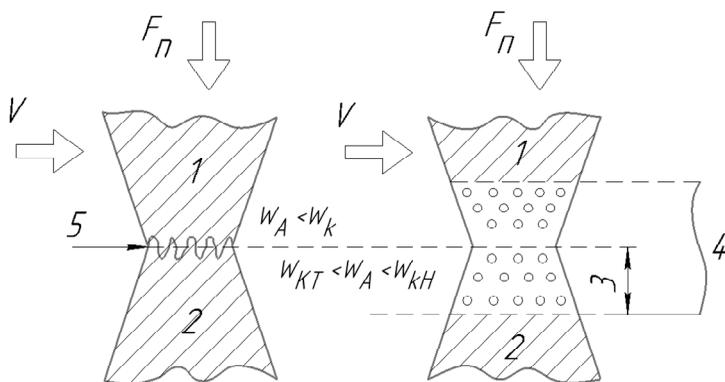


Рис. 2.5. Схема механизма адгезионного изнашивания при MAO:
 1 – твердая фаза; 2 – мягкий металл; 3 – зона разрыва связей (схватывания);
 4 – реакция зона; 5 – граница разрыва связей

Работу адгезии, определяемую по краевому углу смачивания, находят по формуле Юнга:

$$W_A = \sigma_{ж} (1 + \cos \theta), \quad (2.15)$$

где W_A – работа адгезии соответствующего жидкого металла к карбиду (бориду), Дж/м²; $\delta_{ж}$ – поверхностное натяжение жидкого металла при температуре плавления, Дж /м²; θ – краевой угол смачивания, град.

Определение склонности исследуемого класса материалов к адгезионному взаимодействию может быть сведено с учетом механического фактора к аналогичной задаче для соответствующего твердого тугоплавкого соединения, распределенного в железной матрице. Обработку изделий производили на установке СФ12.150.00.00.000, работающей по схеме наружной МАО. Образцами служили втулки $D \times d \times L = 36 \times 29 \times 32$ мм, материал ШХ15 ГОСТ 801–78, 52...62 HRC. Исходная шероховатость поверхности образцов – $R_a = 0,8 \dots 1,2$ мкм. В качестве ФАП использовался Fe+TiC, размер зерна равен 160/200 мкм, коэффициент заполнения рабочего зазора $K_3 = 1$. СОТС, состав 1...5 %-й водный раствор эмульсола Э-2 ГОСТ 1975–75; состав 2 – триэтаноламин ([НОСН₂СН₂]₃N) – 1 %, олеиновая кислота (СН₂(СН₂)₇СООН) – 0,5 %, бура (Na₂B₄O·10Н₂O) – 0,5 %; состав 3 – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор (табл. 2.1).

В четвертом случае проведение экспериментов проводилось в отсутствие СОТС. Обработка происходила при следующих режимах: магнитная индукция $B = 1$ Тл; скорость резания, $V_p = 1$ м/с; скорость осцилляции, $V_o = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции, $A = 1,5$ мм; время обработки, $t = 15$ мин.

Таблица 2.1

Абразивные и магнитные свойства порошков композиционных материалов

Рабочая технологическая среда 160/200 мкм	Количество абразивной составляющей, масс. %	Шероховатость поверхности образцов после МАО, R_a , мкм	Съем металла в результате МАО, G, г	Магнитная проницаемость ($H = 70\,000$ А/м), мкГ/м
Fe+TiC	15	0,217	149	6,57
	25	0,239	189	6,09
	35	0,278	197	5,56

Рабочая технологическая среда 160/200 мкм	Количество абразивной составляющей, масс. %	Шероховатость поверхности образцов после MAO, R_a , мкм	Съем металла в результате MAO, G, г	Магнитная проницаемость (H = 70 000 А/м), мкГ/м
Fe+TiC	15	0,118	162	6,69
5 %-й водный раствор эмульсола Э-2	25	0,146	182	6,54
ГОСТ 1975–75	35	0,174	197	6,37
Fe+ TiC триэтаноламин ([HOCH ₂ CH ₂] ₃ N) – 1 %-я олеиновая кислота (CH ₂ (CH ₂) ₇ COOH) – 0,5 %, бура (Na ₂ B ₄ O ₇ 10H ₂ O) – 0,5 %	15	0,098	126	6,43
	25	0,131	133	6,38
	35	0,146	167	6,23
Fe+TiC СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор	15	0,09	157	6,89
	25	0,119	178	6,53
	35	0,126	192	6,42

На рис. 2.6 представлены частицы ФАП после их использования в течение 15 мин обработки при отсутствии СОТС. Образование в результате охлаждения порошка после обработки новой эвтектики характеризуется созданием на его поверхности фазы хаотичного разветвления этой эвтектики. На рис. 2.7 представлены частицы ФАП после протекания процесса MAO с использованием СОТС на основе эмульсола Э-2. Несмотря на отсутствие изменений эвтектического характера, данные частицы после обработки покрыты слоем шлама, образованного наличием масляной фазы СОТС. На рис. 2.8 представлена структура поверхности ферроабразивного порошка после использования СОТС на основе триэтаноламина, олеиновой кислоты и буры.

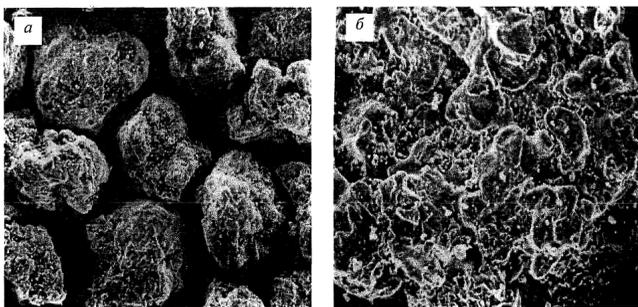


Рис. 2.6. Форма (а) (х100) и структура (б) (х400) поверхности ферроабразивного порошка после обработки в отсутствие СОТС

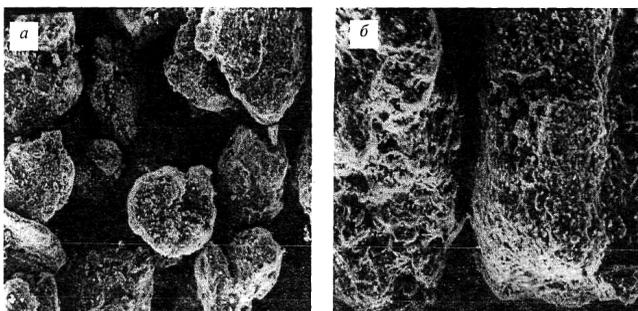


Рис. 2.7. Форма (а) (х100) и структура (б) (х400) поверхности ферроабразивного порошка после использования СОТС на основе эмульсола Э-2

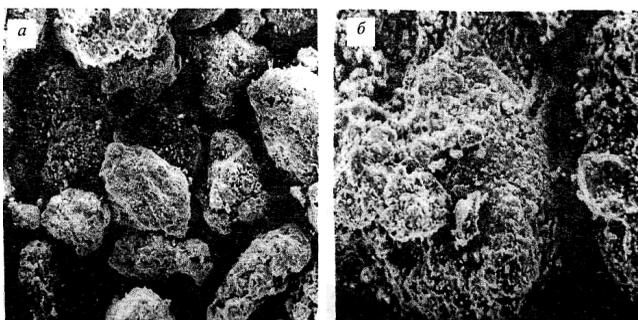


Рис. 2.8. Форма (а) (х100) и структура (б) (х400) поверхности ферроабразивного порошка после использования СОТС на основе триэтаноламина, олеиновой кислоты и буры

Лучшие показатели по моющей способности показывает СОТС СинМА-1 (рис. 2.9). Активная адсорбция на этой поверхности мельчайших частиц образующегося при полировании шлама – продуктов разрушения зерен и диспергирования обрабатываемого материала объясняется образованием электрокинетического потенциала обрабатываемой поверхности.

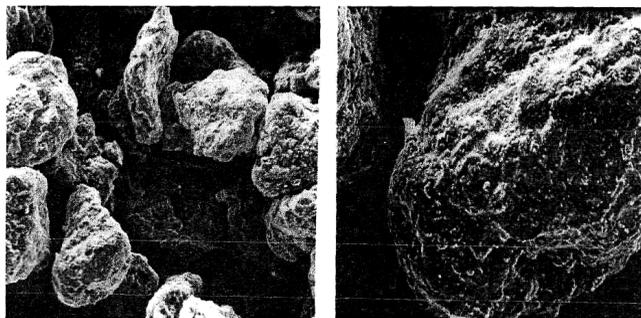


Рис. 2.9. Форма (а) (x100) и структура (б) (x400) поверхности ферроабразивного порошка после использования СОТС СинМА-1

Адсорбированная пленка шлама появляется при длительной работе одной порцией порошка, измельчающейся с увеличением длительности обработки, и при отсутствии СОТС или недостаточно эффективном моющем действии СОТС.

2.2. Исследование процесса формирования топографии магнитного поля для магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения

Сложность алгоритма и реализации аналитического расчета ЭМП по отношению к реальному отображению топографии является основной проблемой на пути получения точного решения. ЭМП является особым видом материи и характеризуется определенным распределением в пространстве, обладая при этом дискретной структурой [161]. Существует ряд работ [67, 70, 162, 163], в которых представлены исследования параметров и источники МАО. Однако в них ставятся преимущественно частные задачи,

возникающие в результате изучения отдельных конкретных устройств. Поэтому эта информация пригодна лишь для анализа данного устройства и обычно не поддается обобщению. Такой подход не удовлетворяет требованиям современного производства и затрудняет процесс конструирования нового оборудования.

Следовательно, успех в рациональном и правильном создании устройств, использующих энергию ЭПМ, во многом зависит от степени понимания физических процессов, протекающих при взаимодействии данного поля с обрабатываемой деталью.

2.2.1. Теоретическое описание топографии магнитного поля для сложнопрофильных поверхностей тел вращения

Исследование топографии магнитного поля матричными формами представления системы уравнений Максвелла.

Считается, что начало исследованиям, целью которых являлось представление системы уравнений Максвелла, положено В. И. Фушичем [164].

В рассмотрение вводятся матрицы [165].

$$\alpha_1 = i \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \alpha_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \alpha_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.16)$$

удовлетворяющие алгебре Клиффорда, функция-столбец

$$\Psi = i \begin{pmatrix} 0 \\ E_1 - iH_1 \\ E_2 - iH_2 \\ E_3 - iH_3 \end{pmatrix}, \quad (2.17)$$

и уравнения Максвелла в отсутствие зарядов и токов приобретают вид:

$$\left(i \frac{\partial}{\partial t} - \alpha p \right) \Psi = 0. \quad (2.18)$$

Имеется стационарный магнитопровод с магнитной проницаемостью μ_2 . В магнитопроводе сделан разрез границами $f(x)$ и $g(x)$, соответственно (рис. 2.10). Среда в разрезе имеет магнитную проницаемость μ_1 .

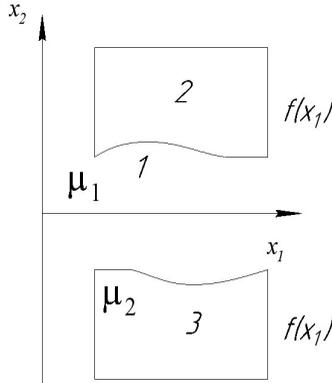


Рис. 2.10. Схема магнитопровода с разрезом сложного профиля

Считая магнитную проницаемость в магнитопроводе и разрезе однородной, для решения воспользуемся матричной записью уравнений Максвелла для стационарных полей.

Будем решать двухмерную задачу, считая, что решение Ψ не зависит от x_3 .

$$\partial_1 \xi^1 \Phi_{12} + \partial_2 \xi^2 \Phi_{12} = 0. \quad (2.19)$$

Следуя алгебраическому методу разделения переменных, Φ_{12} представим в виде произведения матриц от соответствующих переменных

$$\Phi_{12} = \Phi_1 \Phi_2, \quad (2.20)$$

для которых справедливы следующие соотношения

$$\Phi_1 = \Phi_1^k + \Phi_1^a, \quad [\Phi_1^k, \xi^2] = 0, \quad [\Phi_1^k, \xi^2]^+ = 0, \quad (2.21)$$

$$\Phi_2 = \Phi_2^k + \Phi_2^a, [\Phi_2^k, \xi^1] = 0, [\Phi_2^k, \xi^1]^+ = 0, \quad (2.22)$$

$$[\Phi_1, \Phi_2] = 0. \quad (2.23)$$

С учетом (2.19, 2.20) уравнение Максвелла в матричной формулировке приобретает вид:

$$\partial_1 \xi^1 \Phi_1 = \Phi_1 K_{12} \partial_2 \xi^2 \Phi_2 = \Phi_2 K_{12}. \quad (2.24)$$

Для общего решения можно получить:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{0x} \\ E_{0y} \\ -E_{0z} \\ -H_{0z} \\ H_{0y} + \int_{-\infty}^{\infty} \{C'_{11}(\lambda) \sin(i\lambda x_1) + C'_{12}(\lambda) \cos(i\lambda x_1)\} \{C'_{21}(\lambda) e^{i\lambda x_2} + C'_{22}(\lambda) e^{-i\lambda x_2}\} d\lambda + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} \{C_{11}(\lambda) \sin(\lambda x_1) + C_{12}(\lambda) \cos(\lambda x_1)\} \{C_{21}(\lambda) e^{\lambda x_2} + C_{22}(\lambda) e^{-\lambda x_2}\} d\lambda \\ H_{0x} + \{-C'_{12}(\lambda) \sin(i\lambda x_1) + C'_{11}(\lambda) \cos(i\lambda x_1)\} \{C'_{21}(\lambda) e^{i\lambda x_2} - C'_{22}(\lambda) e^{-i\lambda x_2}\} d\lambda + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} \{-C_{12}(\lambda) \sin(\lambda x_1) + C_{11}(\lambda) \cos(\lambda x_1)\} \{C_{21}(\lambda) e^{\lambda x_2} - C_{22}(\lambda) e^{-\lambda x_2}\} d\lambda \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.25)$$

В (2.25) λ является комплексной величиной.

Направим ось x_2 вдоль центральной линии магнитопровода, и пусть границы зазора (верхняя и нижняя) задаются функциями $f_1(x_1)$ и $f_2(x_2)$ соответственно. Нормальная и тангенциальная составляющие поля внутри магнитопровода на границе будем обозначать $\rho_1(x_1)$, $\rho_2(x_2)$ и $q_1(x_1)$, $q_2(x_2)$ соответственно. В этом случае поле на i -й границе внутри ограниченной ими области можно описать следующим образом:

$$H_1^i = H_n^i(x_1) \sin(\alpha) + H_t^i(x_1) \cos(\alpha) = \rho_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}}, \quad (2.26)$$

$$H_2^i = H_n^i(x_1)\cos(\alpha) + H_\tau^i(x_1)\sin(\alpha) = \rho_i(x_1)\frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1)\frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}}. \quad (2.27)$$

причем справедливы соотношения:

$$F(-x_1 + ix_2) = \frac{H_2(x_1, x_2) - iH_1(x_1, x_2)}{2},$$

$$G(x_1 + ix_2) = \frac{H_2(x_1, x_2) + iH_1(x_1, x_2)}{2}. \quad (2.28)$$

Определяя $F(-x_1 + ix_2)$, $G(x_1 + ix_2)$ на i -й границе через нормальные составляющие поля получаем:

$$F(-x_1 + if_i(x_1)) = \frac{1}{2} \left[\rho_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} - i\rho_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} - iq_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} \right]. \quad (2.29)$$

$$G_i(x_1 + if_i(x_1)) =$$

$$= \frac{1}{2} \left[\rho_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + i\rho_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + iq_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} \right]. \quad (2.30)$$

Проведя далее достаточно громоздкие вычисления, для поля внутри разрыва магнитопровода окончательно получаем

$$\begin{aligned} \mathring{H}_1^{\mathcal{O}}(x_1, x_2) &= \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \left\{ i\mathcal{O}_{\lambda 1}^{\mathcal{O}} e^{\lambda(-x_1 + ix_2)} + \mathcal{O}_{\lambda 4}^{\mathcal{O}} e^{-i\lambda(-x_1 + ix_2)} - i\mathcal{O}_{\lambda 2}^{\mathcal{O}} e^{\lambda(x_1 + ix_2)} - i\mathcal{O}_{\lambda 3}^{\mathcal{O}} e^{-i\lambda(x_1 + ix_2)} \right\} = \\ &= i\mathring{F}^{\mathcal{O}}(-x_1 + ix_2) - i\mathring{G}^{\mathcal{O}}(x_1 + ix_2), \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} \mathring{H}_2^{\mathcal{O}}(x_1, x_2) &= \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \left\{ \mathcal{O}_{\lambda 1}^{\mathcal{O}} e^{\lambda(-x_1 + ix_2)} + \mathcal{O}_{\lambda 4}^{\mathcal{O}} e^{-\lambda(-x_1 + ix_2)} + \mathcal{O}_{\lambda 2}^{\mathcal{O}} e^{\lambda(x_1 + ix_2)} + \mathcal{O}_{\lambda 3}^{\mathcal{O}} e^{-\lambda(x_1 + ix_2)} \right\} = \\ &= \mathring{F}^{\mathcal{O}}(-x_1 + ix_2) - \mathring{G}^{\mathcal{O}}(x_1 + ix_2), \end{aligned} \quad (2.32)$$

где

$$\mathcal{H}(-x_1 + ix_2) = \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \left\{ \mathcal{C}_{\lambda 1}^{\mathcal{H}} e^{\lambda(-x_1 + ix_2)} + \mathcal{C}_{\lambda 4}^{\mathcal{H}} e^{-\lambda(-x_1 + ix_2)} \right\}, \quad (2.33)$$

$$\mathcal{H}(x_1 + ix_2) = \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \left\{ \mathcal{C}_{\lambda 2}^{\mathcal{H}} e^{\lambda(x_1 + ix_2)} + \mathcal{C}_{\lambda 3}^{\mathcal{H}} e^{-\lambda(x_1 + ix_2)} \right\}. \quad (2.34)$$

2.2.2. Исследование топографии магнитного поля решением системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты

В соответствии с законом Био-Савара-Лапласа и принципом суперпозиции, заключающимися в том, что магнитное поле, созданное несколькими движущимися зарядами или токами, равно векторной сумме магнитных полей, существует возможность определения магнитной индукции [165].

Для одного проводника его величина составит:

$$B = \frac{\mu_a}{4\pi} \cdot \frac{2I}{r} = \frac{c}{r}. \quad (2.35)$$

Таким образом, $B_i = c/r_i$.

Например, если $r_0 = 1$, $r_1 = 1,4$, $r_2 = 2,33$, $r_3 = 7$, то топография ЭМП для одного проводника с током представлена на рис. 2.11, а. В случае наличия двух проводников, расстояние между которыми равно h (см. рис. 2.11), вектор магнитной индукции определяется следующим образом:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 = (B_x, B_y).$$

Данное расположение проводников можно считать адекватным схеме наружной MAO. Таким образом, установление картины ЭМП позволяет получить представление о ее топографии, что обеспечивает возможность оптимального конструирования магнитно-абразивного оборудования.

Чтобы определить топографию ЭМП путем установления линий B , необходимо решить систему дифференциальных уравнений с использованием метода Рунге-Кутты и учетом компоненты результирующего вектора магнитной индукции:

$$x = B_x^0;$$

$$y = B_y^0.$$

На рис. 2.11 (а, б, в) представлена топография ЭМП. Следует отметить, что периметры сечения проводников не совпадают с линиями магнитной индукции. Эти линии стягиваются к некоторой точке, которая характеризуется значением магнитной индукции, равным 0.

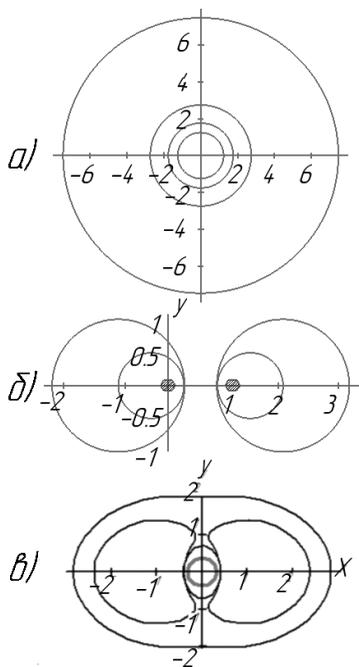


Рис. 2.11. Картина электромагнитного поля при наличии одного (а), двух (б) и трех (в) проводников с током

Условия для B области $0 \leq x \leq 1$ определяются координатами $B = (b_{xh} \ b_{yh})$ в произвольной точке $c (x_h, y_h)$.

$$x_{hh} = -\frac{y_h \left(-1 + 4x_h^2 + x_h^4 + 2x_h^2 y_h^2 + y_h^4 \right)}{\left[\left(x_h^2 + y_h^2 \right) \left(1 - 2x_h + x_h^2 + y_h^2 \right) \left(1 + 2x_h + x_h^2 + y_h^2 \right) \right]}; \quad (2.36)$$

$$y_{hh} = \frac{x_h \left(-1 + x_h^4 - 4y_h^2 + 2x_h^2 y_h^2 + y_h^4 \right)}{\left[\left(x_h^2 + y_h^2 \right) \left(1 - 2x_h + x_h^2 + y_h^2 \right) \left(1 + 2x_h + x_h^2 + y_h^2 \right) \right]}.$$

Наличие трех проводников с током, что тождественно схеме МАО отверстий, указывает на то, что, как и ранее $\underline{B} = \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_3 = (B_x, B_y)$, где проводники 1 и 3 имеют противоположное направление тока по отношению к 2. В этом случае $B_i = (b_{ix}, b_{iy})$, $B = (b_x, b_y)$ и координаты (x, y) зависят от инварианта t . Иначе говоря, имеем $x(t)$, $y(t)$. В центре располагается обрабатываемая деталь. В результате получаем:

$$b_x = y(t) \frac{\left[-1 + 4x(t)^2 + x(t)^4 + 2x(t)^2 y(t)^2 + y(t)^4 \right]}{\left[x(t)^2 + y(t)^2 \right] \cdot \left[1 - 2x(t) + x(t)^2 + y(t)^2 \right] \cdot \left[1 + 2x(t) + x(t)^2 + y(t)^2 \right]} \quad (2.37)$$

$$b_y = x(t) \frac{\left[-1 + x(t)^4 - 4y(t)^2 + 2x(t)^2 y(t)^2 + y(t)^4 \right]}{\left[x(t)^2 + y(t)^2 \right] \cdot \left[1 - 2x(t) + x(t)^2 + y(t)^2 \right] \cdot \left[1 + 2x(t) + x(t)^2 + y(t)^2 \right]} \quad (2.38)$$

Таким образом, представлена картина ЭМП для трех проводников (т. е. МАО отверстий). На рис. 2.12 показана картина ЭМП для уровня величины магнитной индукции в области $0 \leq x \leq 1, -1 \leq y \leq 1$.

Распределение магнитной индукции в рабочей зоне представлено на рис. 2.12, на основании чего можно выявить наиболее эффективную форму этой зоны и предельные размеры обрабатываемого изделия.

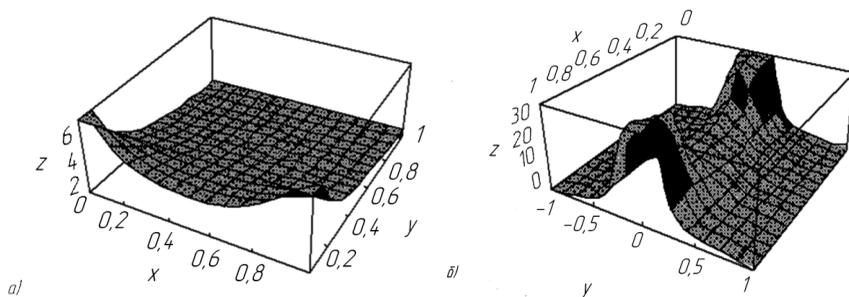


Рис. 2.12. Схема линий уровня абсолютной величины магнитной индукции при наличии двух (а) и трех (б) проводников с током

Установлена топография ЭМП при наружной и внутренней MAO путем решения системы дифференциальных уравнений на основе закона Био-Савара-Лапласа методом Рунге-Кутты с помощью программного пакета «Mathematika-4». Получение картины ЭМП позволяет осуществить прогнозирование и управление процессом механической обработки деталей машин применительно к MAO. Обобщение анализа действия ЭМП приводит к повышению эффективности создания оборудования для практической реализации данного метода финишной обработки.

2.2.3. Исследование топографии магнитного поля методом конформных отображений

Проблема MAO пазов зубчатых колес заключается в сложности обработки переменного по разности величин диаметра окружностей их выступов и впадин.

Подобная задача решена для правильного выбора геометрии зубцовой зоны ротора индукторной машины и поэтому применялись разработанные методики Н. Я. Альпера, В. В. Апсита, Л. Э. Домбура, В. В. Домбровского, А. В. Иванова-Смоленского, К. Э. Скрузитиса и др. [166–172].

Данное исследование производится в области между поверхностями полюса ЭМС и зубчатой поверхностью колеса плоскости Z . Ее можно представить в виде четырехугольника ABCD (рис. 2.13).

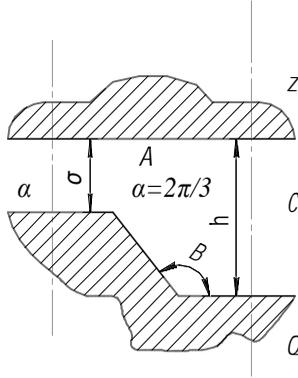


Рис. 2.13. Рабочая зона контура впадин при МАО с условием $\alpha = 2\pi/3$

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

$$Q = C \int_{Q_0}^Q (Q-a)^{\alpha_1-1} (Q-b)^{\alpha_2-1} (Q-c)^{\alpha_3-1} (Q-d)^{\alpha_4-1} + C_1, \quad (2.39)$$

где a, b, c, d – координаты вершин четырехугольника $ABCD$; C, C_1, Q_0 – произвольные постоянные; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – углы при вершинах четырехугольника $ABCD$ (в долях π).

Решение данного случая после ряда преобразований имеет вид [172]:

$$\frac{P}{2\delta} = \frac{1}{\delta} \left\{ \begin{aligned} & \left[\text{Ln}(1-\beta) - \alpha \text{Ln}(\alpha\beta - 1) + \frac{1}{2} \left[\alpha \text{Ln}(1 + \alpha\beta + \alpha^2\beta^2) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \text{Ln}(1 + \beta + \beta^2) \right] + \sqrt{3} \times \right. \\ & \left. \times \left(\text{arctg} \frac{2 + \alpha\beta}{\sqrt{3}\alpha\beta} - \text{arctg} \frac{2 + \alpha\beta}{\sqrt{3}\beta} \right) \right\} + \\ & + \frac{\sqrt{3}}{2} (1 - \alpha), \end{aligned} \right. \quad (2.40)$$

где P – шаг зубчатого колеса, мм; δ – зазор между полюсом ЭМС и диаметром вершин зубчатого колеса, мм; $\alpha = \frac{h}{\delta}$, h – глубина паза, мм.

Из выражения (2.40) следует, что минимальное значение относительной индукции:

$$\beta = \frac{B}{B_{\max}} = \sqrt[3]{\frac{Q+1}{Q+\alpha^3}}, \quad (2.41)$$

$$\beta = \frac{1}{\alpha}. \quad (2.42)$$

На рис. 2.14–2.16 представлена топография магнитного поля в рабочем зазоре при обработке зубчатых колес при их различном положении в зоне ЭМС.

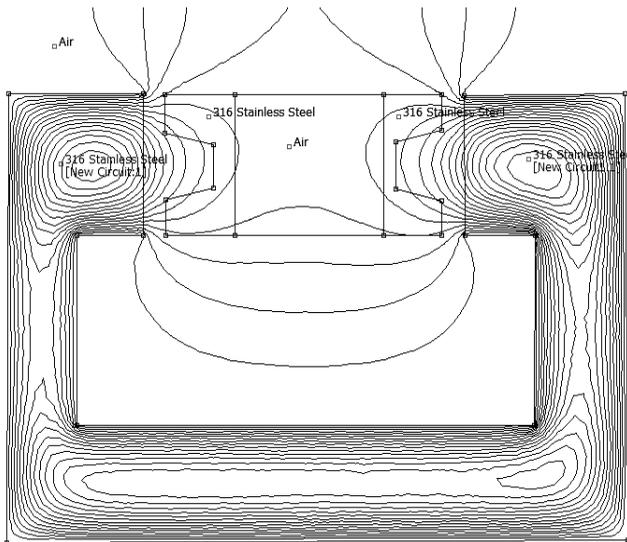


Рис. 2.14. Топография магнитного поля при среднем положении в рабочем зазоре для зубчатого колеса

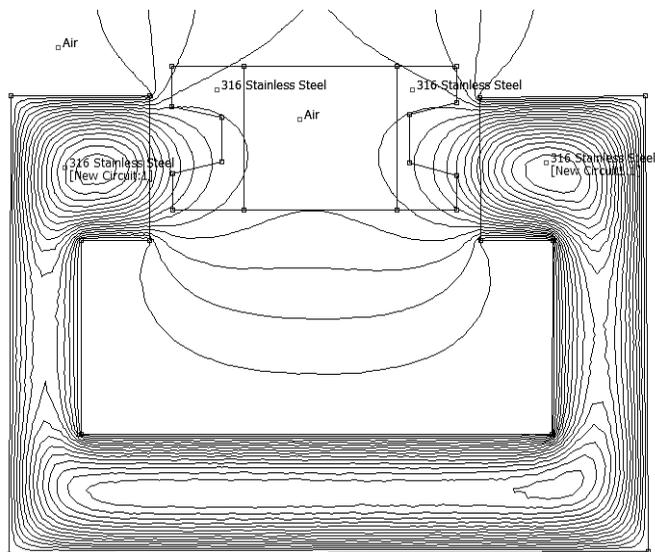


Рис. 2.15. Топография магнитного поля в левом крайнем положении в рабочем зазоре при осцилляции для зубчатого колеса

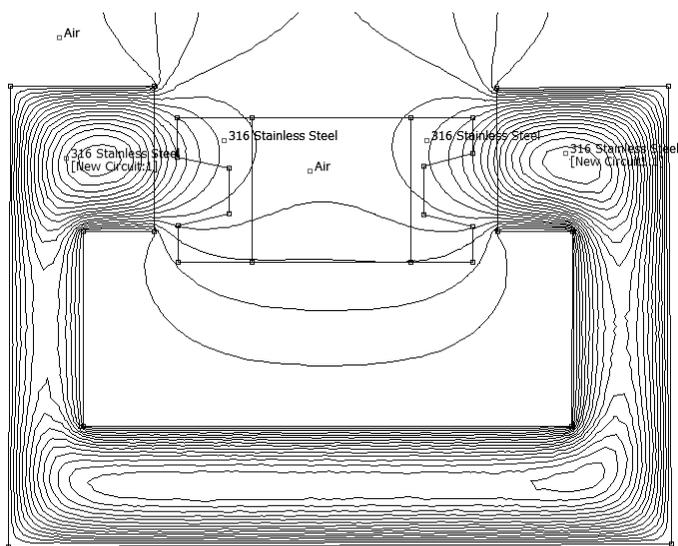


Рис. 2.16. Топография магнитного поля в правом крайнем положении в рабочем зазоре при осцилляции для зубчатого колеса

2.3. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей тел вращения

2.3.1. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке деталей сферической формы

Образцом для моделирования является сфера, вращающаяся с частотой n и находящаяся в магнитном поле, обусловленном наличием тока, равным $2 A$. Главная задача заключается в определении напряженности магнитного поля на оси вращения вне шариков, считая известным поле на оси кругового тока путем ее непосредственного интегрирования.

Напряженность магнитного поля на оси вращения в точке M (рис. 2.17), обусловленная током dI , равняется:

$$dH = dH_z = dI \frac{\sin^3 \beta}{2r}. \quad (2.43)$$

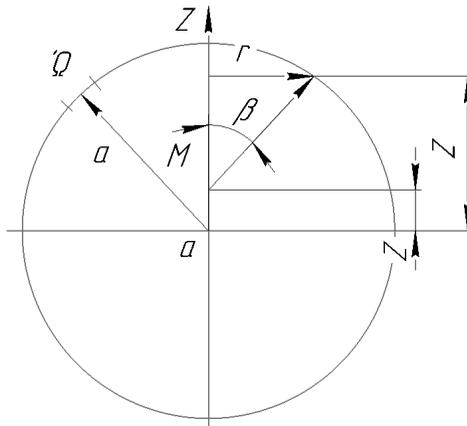


Рис. 2.17. Схема для определения напряженности магнитного поля при использовании МАО

z – расстояние от центра шара до точки определения напряженности МП, м;
 a – радиус шара, м; β – угол между осью Z
 в точке определения напряженности МП

Интегрируя это выражение по ρ , получаем:

$$H = -\frac{I}{16az^3} \left[\frac{\rho^3}{3} - 2(z^2 + a^2)\rho - (a^2 - z^2) \frac{1}{\rho} \right]. \quad (2.44)$$

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

$$H = \frac{Ia^2}{3z^3}. \quad (2.45)$$

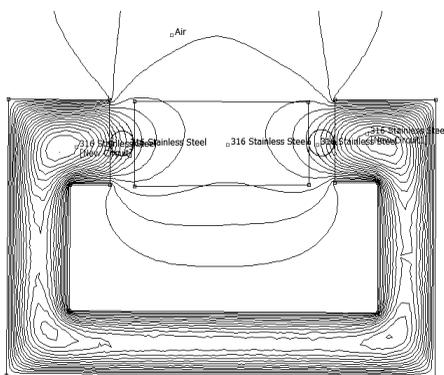


Рис. 2.18. Топография магнитного поля при среднем положении в рабочем зазоре для сферы

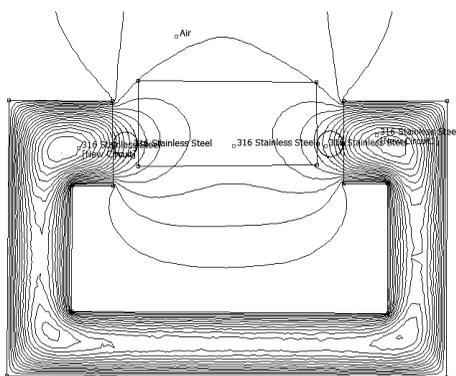


Рис. 2.19. Топография магнитного поля в левом крайнем положении в рабочем зазоре при осцилляции для сферы

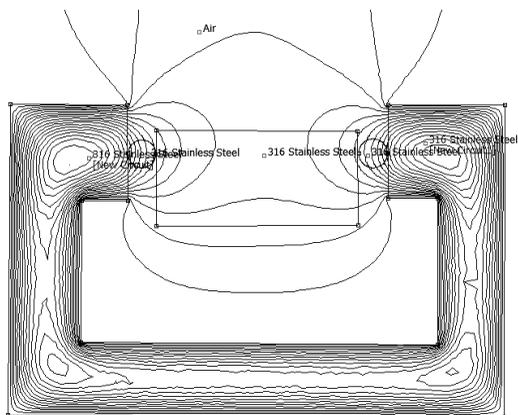


Рис. 2.20. Топография магнитного поля в правом крайнем положении в рабочем зазоре при осцилляции для сферы

Таким образом, анализируя полученное выражение, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным диапазоном обрабатываемых размеров шариков являются диаметры 2...10 мм. Это связано с тем, что требуемую величину напряженности магнитного поля при МАО представляет численное значение, равное 100...500 А/м. Максимально теоретически возможным для обработки методом МАО является размер шарика $d = 15$ мм. На рис. 2.18–2.20 представлена топография магнитного поля в рабочем зазоре при обработке сферических поверхностей при их различном положении в зоне ЭМС.

2.3.2. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке мелко модульных зубчатых колес

Как указывалось выше, именно наличие модуля $m \leq 2,5$ мм практически ограничивает финишную обработку зубчатых колес методом зубохонингования, а, по данным [98], магнитное поле, проникающее в паз, затухает на глубине, примерно равной его ширине. Следовательно, чем меньше модуль зубчатого колеса, тем эффективнее происходит процесс съема материала обрабатываемого изделия, несмотря на переменность величин диаметров выступов и впадин при использовании МАО.

Тогда интеграл Кристоффеля-Шварца приобретет вид:

$$\text{при } \alpha_2 = 1/2: \quad Z = c \int_{z_0}^z \frac{1}{z} \sqrt{\left(\frac{z+a}{z+1}\right)} dz + c_1, \quad (2.46)$$

$$\text{при } \alpha_2 = 2/3: \quad Z = c \int_{z_0}^z \frac{1}{z} \sqrt[3]{\left(\frac{z+a}{z+1}\right)} dz + c_1, \quad (2.47)$$

где Z – плоскость; ζ – полуплоскость; c – произвольная постоянная; α – углы при вершинах, в долях, π .

Интегралы типа (2.46), (2.47), (при $\alpha_2 = 1/2, 2/3$), выражаются в элементарных функциях. В дальнейшем целесообразно рассмотреть выражение (2.47) для трапецеидального зуба с углом наклона 120° , т. к. именно этот вариант схож с геометрией эвольвентного зуба колеса.

Используя это выражение после некоторых преобразований получим:

$$\frac{x}{\delta} = \frac{1}{\pi} \left\{ \begin{aligned} & \ln(1-\beta) - \alpha \ln(\alpha\beta - 1) + \frac{1}{2} \left[\alpha \ln(1 + \alpha\beta + \alpha^2\beta^2) - \ln(1 + \beta + \beta^2) \right] + \\ & + \sqrt{3} \left(\alpha \arctg \frac{2 + \alpha\beta}{\sqrt{3}\alpha\beta} - \arctg \frac{2 + \beta}{\sqrt{3}\beta} \right) \end{aligned} \right\} + \frac{\sqrt{3}}{2}(1-\alpha). \quad (2.48)$$

На основании вышесказанного и ранее проведенного исследования, преобразовав $\frac{x}{\delta}$ как $\frac{\pi m}{2\delta}$ (где m – модуль зубчатого колеса).

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

2.3.3. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке наружных конических поверхностей

Назначение полюсных наконечников заключается в создании эквидистантной по отношению к форме детали зоны обработки с рабочим зазором, заполненным ФАП. Поэтому следует использовать полюсный наконечник с определенной конусностью для обработки методом МАО некоторой группы типоразмеров деталей с коническими поверхностями, а в ряде случаев – применять полюсные наконечники и без профилирования при небольшой конусности детали.

Расчетная схема для определения ЭМП с учетом принятых допущений показана на рис. 2.21.

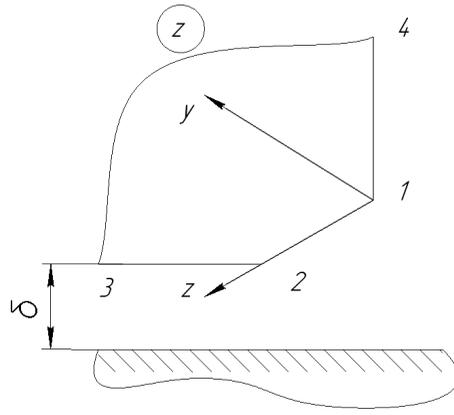


Рис. 2.21. Расчетная схема для определения ЭМП

Многоугольник [170] (см. рис. 2.21), в плоскости z отображается на верхнюю полуплоскость ξ при помощи следующего интеграла Кристоффеля-Шварца:

$$z = D_1 \int_0^{\xi} \xi^{\alpha_1-1} (1-\xi)^{\alpha_2-1} (1-\kappa\xi)^{\alpha_3-1} d\xi + D_2, \quad (2.49)$$

где D_1 , D_2 , κ – постоянные, подлежащие определению.

Анализ уравнения (2.49) показывает, что даже частные случаи с углами 30° , 45° или 60° , считая от горизонтали, имеют сложные подынтегральные выражения.

Для этого множитель представим в виде биномиального ряда:

$$(1 - \kappa \xi)^{\alpha_3 - 1} = 1 - \frac{\alpha_3 - 1}{1!} \kappa \xi + \frac{(\alpha_3 - 1)(\alpha_3 - 2)}{2!} \kappa^2 \xi^2 - \dots = \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_m^{(3)} \kappa^m \xi^m, \quad (2.50)$$

где $\alpha_{m+1}^{(3)} = \frac{m+1-\alpha_3}{m+1} \alpha_m^{(3)}$; $\alpha_0^{(3)}$ – рекуррентные формулы.

Для определения постоянной κ из уравнения (2.50) используем интерактивный метод Ньютона:

$$\kappa_{n+1} = \kappa_n - \frac{f(\kappa_n)}{f'(\kappa_n)}. \quad (2.51)$$

где

$$f'(\kappa_n) = \frac{\pi l_1 \Gamma(l_1 + l_2)}{\delta \Gamma(l_1) \Gamma(l_2)} - \kappa_n^{\alpha_1 + \alpha_2 - 1} \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n \kappa_n}{(1 - \kappa)^{1 - \alpha_2}}; \quad (2.52)$$

$$f'(\kappa_n) = -\kappa_n^{\alpha_1 + \alpha_2 - 1} \left[(\alpha_1 + \alpha_2 - 1) \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n \kappa_n}{(1 - \kappa)^{1 - \alpha_2}} - \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n \kappa_n}{(1 - \kappa)^{\alpha_2 - 1}} - \frac{\kappa_n \sum_{n=0}^{\infty} A_n \kappa_n}{(1 - \kappa)^{1 - \alpha_2}} \right], \quad (2.53)$$

где $\kappa_0 = \left[\frac{\pi l_1 \Gamma(l_1 + l_2)}{\delta \Gamma(l_1) \Gamma(l_2)} \right]^{\frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2 - 1}}$ и $\kappa_1 = \frac{\kappa_0}{1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \kappa_0}$ – соответственно

начальное и первое приближения.

Равномерный скос на всю высоту сегмента (рис. 2.22):

$$B = B_\gamma + jB_z = B_\delta \left(\frac{\xi}{\xi - 1} \right)^\theta, \quad 0 < \xi < 1.$$

Исследования, проведенные путем измерения в рабочем зазоре тесламетром *T-3*, позволили выявить и подтвердить данные результаты, которые приведены значением *B* при одном угле конуса. Но при различной длине конической части установлено, что увеличение примерно в 1,5 раза длины конической части детали при угле конуса 45° приводит к уменьшению магнитной индукции в среднем на 20 %. Например, при угле конуса 45°, длине конуса 20 мм и рабочем зазоре 1 мм величина вышеуказанной индукции уменьшается в 1,26 раза, а при зазоре 3 мм – в 1,58 раза. С уменьшением угла конуса характер изменения *B* на конусной части также зависит от величины рабочего зазора. Так при $\delta = 3$ мм *B* начинает уменьшаться для углов со значением менее 70°, а при $\delta = 5$ мм – для углов менее 60°.

Проведенные исследования показывают, что в таком случае обязательным условием должно быть профилирование полюсных наконечников относительно профиля конусной части детали.

2.3.4. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке внутренних конических поверхностей

Установлено, что во многих случаях, представляющих практический интерес, такого рода решение может быть найдено путем сведения к двумерной задаче. Например, требуется обработать рефлектор карманного фонаря, представляющий собой полый усеченный конус, внутреннюю поверхность которого следует довести до высокой светоотражательной способности (рис. 2.22).

В данном случае используется схема MAO с продольным расположением магнитного поля, поскольку конструктивное оформление оборудования, реализующего способ с поперечным МП, имеет более высокую сложность. На основании изложенного выше предлагается следующий расчет, заключающийся в определении векторного потенциала магнитного поля, а посредством его – и магнитной индукции, являющейся одной из основных характеристик этого поля.

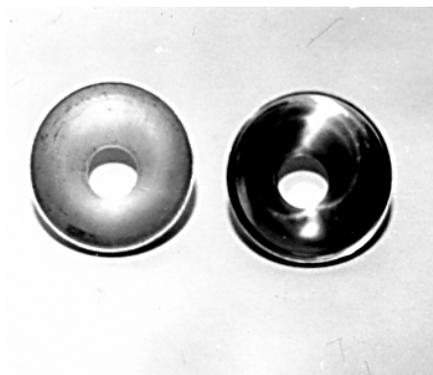


Рис. 2.22. Рефлектор до (слева) и после (справа) MAO

В цилиндрической системе координат:

$$B_r = -\frac{\partial A_\theta}{\partial z} = \frac{3a^2 \mu_a I r z}{4R^5}, \quad (2.54)$$

$$B_\theta = 0,$$

$$B_z = \frac{a^2 \mu_a I}{2R^3}. \quad (2.55)$$

Основное значение для MAO конусных внутренних поверхностей в продольном магнитном поле имеет составляющая B_r (рис. 2.23). Установлено, что на большем и меньшем диаметрах рефлектора карманного фонаря имеется отличие значений величин магнитной индукции, которое не превышает 15 %. Проведенные эксперименты показали, что наличие этой разницы позволяет обрабатывать методом MAO рефлектор карманного фонаря. В качестве оборудования применялся станок ЭУ-5, ФАП – ПФА Р6М5-1 ТУ 27-104-02–86, размер зерна, $\Delta = 63/100$ мкм, СОТС – СинМА-2 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор. Параметры и режимы MAO: величина магнитной индукции, $B = 1$ Тл; угловая скорость шпинделя, $\omega = 90$ с⁻¹; скорость заготовки, $V = 0,5$ м/мин; рабочий зазор, $\delta = 1$ мм; время обработки, $t = 120$ с.

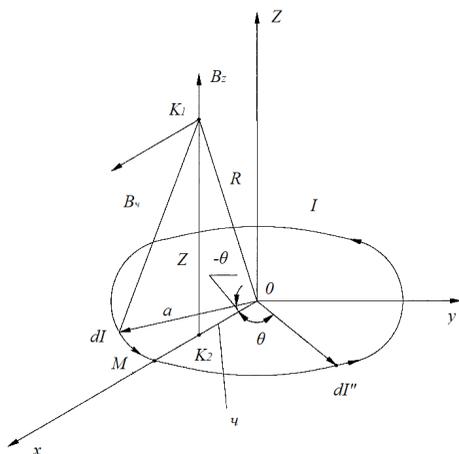


Рис. 2.23. Схема определения векторного потенциала для MAO рефлектора

Изменение указанного выше критерия (15 %) в большую сторону в ходе протекания процесса MAO приводит к неравномерности размерного и массового съема материала обрабатываемой детали, что является признаком брака.

2.4. Экспериментальные исследования влияния параметров рабочей технологической среды на производительность и качество при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей тел вращения

При финишной обработке, как и при других видах механической обработки, выявление взаимного влияния технологических режимов приходится проводить опытным путем и устанавливать его количественное значение посредством поиска эмпирических формул. Анализ полученных эмпирических зависимостей – один из наиболее широко используемых методов исследования способов финишной обработки резанием, в том числе и магнитно-абразивной обработки [173]. Исследования по методу многофакторного планирования экспериментов [174] проводятся путем изучения функции отклика при изменении ряда варьируемых факторов и фиксации остальных факторов, статистической проверки

адекватности аппроксимирующих функций, их последующего анализа, построения графиков, таблиц и т. п. Математические методы планирования экспериментов представляют собой надежное средство рациональной организации научно-исследовательских и опытно-технологических работ [175–177], так как сокращают сроки экспериментальных исследований и повышают эффективность поиска функциональных зависимостей.

2.4.1. Исследование топографии магнитного поля на основе схемы обработки беговых дорожек внутренних колец подшипников качения

Силовой характеристикой магнитного поля (величиной магнитной индукции B), определяющей эффективность воздействия на частицы ФАП по длине образующей детали, можно управлять изменением формы рабочего зазора за счет профилирования полюсного наконечника. Установлено, что с чем меньшими рабочими зазорами ведется обработка, тем эффективнее влияние величины зазора на геометрическую точность обработанной поверхности. Например, в работе [8] предложена и исследована схема МАО с прямолинейным вдоль оси детали 2 движением осцилляции при обработке внутренних колец подшипников (рис. 2.24). При этом были использованы полюсные наконечники I с профилем рабочих поверхностей, эквидистантным обрабатываемой поверхности.

Исследования топографии магнитного поля в рабочем зазоре при МАО беговой дорожки шарикоподшипника с относительным осциллирующим движением полюсных наконечников электромагнитов показывают, что формируемое магнитное поле в среднем и крайних положениях рабочего зазора (рис. 2.24, *б* и *в*) вызывает миграцию частиц ФАП вдоль из правой части рабочего зазора в левую, и наоборот. Причиной наблюдаемой миграции является разрыв цепочек частиц на периферийных участках профиля рабочего зазора при движении осцилляции. В результате значительная часть порошка переносится вращением детали из одного рабочего зазора в другой и непрерывно перераспределяется по длине профиля в рабочем зазоре.

Однако различным участкам дуги профиля соответствует разная интенсивность миграции частиц и, следовательно, различное режущее воздействие частиц ФАП на обрабатываемую поверхность. При сближении полюсного наконечника и обрабатываемой поверхности при осцилляции (см. рис. 2.24, б, в) происходит периодическое уплотнение порошка на боковых участках профиля. Это приводит к интенсификации процесса резания на этих участках и, как следствие, к локальным отклонениям (глубиной до 0,5–1 мкм) геометрических форм как беговой дорожки h_{δ} внутреннего кольца подшипника, так и полюсного наконечника h_{η} .

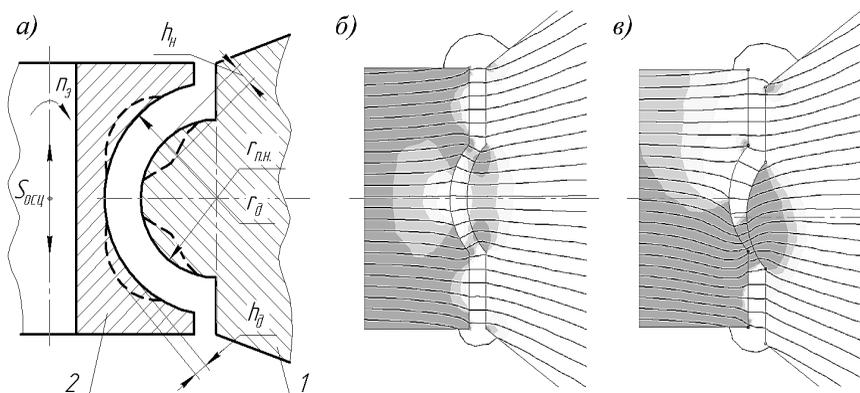


Рис. 2.24. Схема MAO беговой дорожки кольца подшипника (а); топография магнитного поля в среднем (б) и крайнем (в) положениях рабочего зазора при осцилляции:

1 – полюсный наконечник; 2 – внутреннее кольцо подшипника;

r_{δ} – радиус дорожки; r_{η} – радиус полюсного наконечника;

h_{η} , h_{δ} – локальные отклонения геометрических форм полюсного наконечника и беговой дорожки соответственно

Для обеспечения равномерности съема металла с различных участков профиля беговой дорожки подшипника были проведены исследования по влиянию формы полюсного наконечника на однородность магнитного поля в рабочей зоне при MAO беговой дорожки. Были проведены исследования 4-х видов формы полюсного наконечника путем компьютерного моделирования топографии магнитного поля в рабочем зазоре, основанного на расчете величин

магнитной индукции по методу конечных элементов, с использованием программы Femm. Топография магнитного поля в рабочем зазоре представлена на рис. 2.24, а результаты моделирования – в таблице 2.2.

Моделированием магнитного поля установлено, что эквидистантные полюсные наконечники (табл. 2.2, вид 1), которые использовались в работе Л. К. Минина при обработке дорожки подшипника, обеспечивают неравномерную обработку по периметру дорожки из-за наличия концентраторов магнитной индукции по краям беговой дорожки. Величина магнитной индукции по краям беговой дорожки имеет максимальное значение, а к центру уменьшается. Для равномерной обработки беговой дорожки необходимо обеспечить равномерную величину индукции магнитного поля по периметру беговой дорожки подшипника.

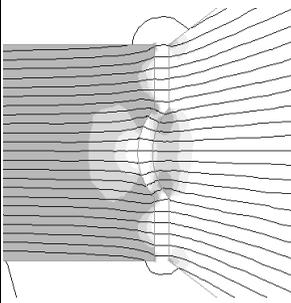
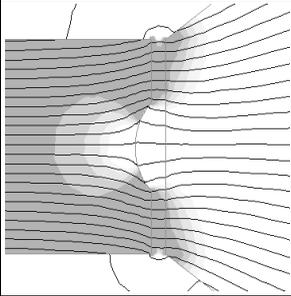
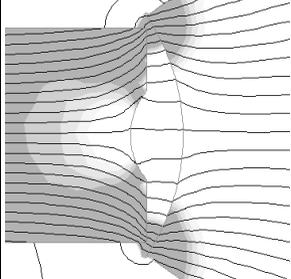
Исследование топографии магнитного поля в рабочем зазоре с плоскими полюсными (табл. 2.2, вид 2) наконечниками показало, что величина магнитной индукции в беговой дорожке будет иметь наименьшее значение, т. к. концентраторами выступают цилиндрические поверхности кольца подшипника и при этом величина магнитной индукции от центра беговой дорожки к ее краям является неравномерной.

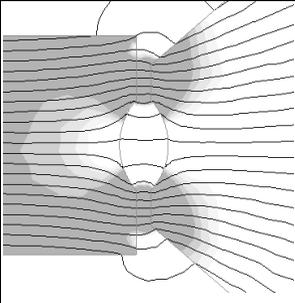
В рабочем зазоре с радиусными полюсными наконечниками с охватом ширины кольца (табл. 2.2, вид 3) величина магнитной индукции равномерна по периметру беговой дорожки, но не достигает требуемой величины для удержания ферроабразивного порошка, весь порошок концентрируется в зоне цилиндрических поверхностей.

Исполнение радиусных полюсных наконечников с охватом ширины дорожки (табл. 2.2, вид 4), позволило получить требуемую величину магнитной индукции по периметру беговой дорожки с сохранением ее равномерности. В зонах, где форма полюсного наконечника эквидистантна форме обрабатываемого кольца подшипника, величина магнитной индукции имеет наибольшее значение, что создает «запирающие» зоны и не дает ФАП выйти из зоны обработки беговой дорожки. В зоне обработки беговой дорожки величина магнитной индукции в 2 раза меньше, чем в «запирающих» зонах.

Таблица 2.2

Формы профиля полюсных наконечников

Профиль наконечника		Топография магнитного поля в рабочем зазоре	Величина магнитной индукции в зоне беговой дорожки B , Тл	Распределение магнитной индукции по контуру беговой дорожки подшипника B , Тл	
№	вид			по краям дорожки	в центре
1	2	3	4	5	6
1	Эквидистантный		0,9...1,2	1,2	0,9
2	Плоский		0,85...0,45	0,85	0,45
3	Радиусный с охватом ширины кольца		0,35...0,3	0,35	0,3

1	2	3	4	5	6
4	Радиусный с охватом ширины дорожки		0,5...0,6	0,6	0,5

По результатам исследований топографии магнитного поля предложена и реализована схема обработки беговых дорожек внутренних колец подшипников качения. В представленной схеме для обработки используются серповидные полюсные наконечники с радиусным охватом ширины дорожки подшипника. Наружные точки каждого диаметрального сечения находятся на разном расстоянии от оси вращения, что резко изменяет градиент магнитной индукции по высоте детали. Сгущения магнитных силовых линий в различных частях рабочей зоны вызываются образованием воздушного зазора во внутренней области детали из-за невозможности попадания ферроабразивного порошка в эту область.

2.4.2. Факторный анализ процесса магнитно-абразивной обработки по производительности и качеству поверхности

Экспериментальное исследование проведено при MAO колец шарикоподшипников из стали ШХ-15. Технологические режимы MAO и диапазоны их варьирования представлены в таблице 2.3.

Технологические режимы MAO варьировали согласно матрице ротatableного плана из 77 опытов с 4-кратным дублированием в центральной точке, то есть получено 80 образцов для анализа, на которых измерены следующие параметры, характеризующие качество обработанной поверхности и съем обрабатываемого материала: $\Delta g, \text{ мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ – скорость съема массы металла с единицы площади обработанной поверхности детали (далее – удельный

сьем); ΔD_1 , мкм – размерный съем по дну беговой дорожки; ΔD_2 , мкм – размерный съем по стенке беговой дорожки; R_n , мкм – параметр шероховатости после обработки; β_1 , нм – размер блоков когерентного рассеяния в поверхностном слое до MAO; β_1' , нм – размер блоков когерентного рассеяния в поверхностном слое после MAO; $\Delta\beta_1$, нм – изменение размера блоков когерентного рассеяния в поверхностном слое; β_2 , МПа – напряжение 2-го рода в поверхностном слое до MAO; β_2' , МПа – напряжение 2-го рода в поверхностном слое после MAO; $\Delta\beta_2$, МПа – изменение напряжения 2-го рода в поверхностном слое; P , МПа – напряжение 2-го рода в поверхностном слое до MAO; P' , МПа – напряжение 2-го рода в поверхностном слое после MAO; ΔP , МПа – изменение напряжения 1-го рода; A , % – содержание аустенита в поверхностном слое до MAO; A' , % – содержание аустенита в поверхностном слое после MAO; ΔA , % – содержание аустенита в поверхностном слое.

Измеренные значения параметров представляют собой случайные величины, подчиняющиеся определенным законам распределения. Для поиска взаимосвязи случайных величин широко применяется метод парного корреляционного анализа [178], для корректного применения которого распределение случайных величин удовлетворительно описывается нормальным законом вероятностей. Для оценки распределений значений параметров, оцениваемых в нашем эксперименте, построены гистограммы и выполнены расчеты критерия Колмогорова-Смирнова для предварительной оценки вероятности принадлежности распределения к нормальному.

Выполненный анализ показывает, что нормальному закону распределения с вероятностью $p > 0,2$ не противоречат распределения параметров ΔD_1 , ΔD_2 , β_1' , β_2' , $\Delta\beta_2$, P , P' , ΔP , A , ΔA . При этом ряд важных для дальнейшего анализа параметров не может быть удовлетворительно описан нормальным законом распределения.

Поэтому для преобразования этого параметра была использована другая функция: $\Delta\beta_1 \rightarrow \ln(b_0 + b_1 \Delta\beta_1)$, где постоянные $b_0 = 2,96$ и $b_1 = -1,013$ были найдены из условия минимизации максимального отклонения получаемой в результате преобразования эмпирической функции распределения от нормального закона.

Технологические режимы МАО

Фактор режима МАО	Единица измерения	Диапазон варьирования	
		min	max
Скорость вращения заготовки	м/с	1,15	5,85
Скорость осцилляции полюсных наконечников	м/с	0,121	0,319
Величина магнитной индукции	Тл	0,42	0,98
Амплитуда осцилляции полюсных наконечников	мм	0,55	2,25
Шероховатость поверхности детали до МАО, R_a	мм	0,305	1,295
Время обработки	с	17,6	102,4

Для дальнейшего исследования взаимосвязей явлений при МАО построены графики попарной взаимозависимости основных измеренных параметров. Для пары параметров графики отображают картину, характеризующую корреляцию их взаимозависимости: если точки на графике группируются около некоторой линии, это указывает на существование взаимосвязи; если точки образуют рассеянное «облако», это говорит о взаимной независимости рассматриваемых параметров. Однако при возрастании удельного съема Δg параметры размерного съема ΔD_1 и ΔD_2 уменьшаются. Это вызвано влиянием времени обработки: его возрастание снижает съем в единицу времени, но общий размерный съем возрастает пропорционально времени обработки.

Для количественной оценки уровня взаимосвязи всех параметров проведен линейный корреляционный анализ; результаты, содержащие доверительные уровни вероятности статистической значимости корреляции, приведены в таблице 2.4. Корреляционный анализ выявил еще одну группу взаимосвязанных параметров с достаточно высокой вероятностью $\geq 0,90$ %: ΔP , ΔD_1 , ΔD_2 . Прямо пропорциональная их взаимозависимость связана с возрастанием деформирующего воздействия на обработанную поверхность при увеличении размерного съема материала при МАО.

Таблица 2.4

Доверительная вероятность существования корреляционной связи между параметрами при МАО

	$\ln(\Delta g)$						
ΔD_1	100 %	ΔD_1					
ΔD_2	100 %	100 %	ΔD_2				
$\ln(Ra)$	100 %	100 %	100 %	$\ln(Ra)$			
$f(\Delta\beta_1)$	8 %	16 %	47 %	19 %	$f(\Delta\beta_1)$		
$\Delta\beta_2$	44 %	53 %	78 %	84 %	100 %	$\Delta\beta_2$	
ΔP	78 %	99 %	93 %	83 %	47 %	4 %	ΔP
ΔA	19 %	65 %	47 %	30 %	45 %	71 %	79 %

Установленные взаимосвязи между различными группами параметров являются основанием для перехода к некоторым обобщенным параметрам, объединяющим в себе группы взаимозависимых первичных параметров, измеренных при изучении процесса МАО. Одним из методов такого перехода является факторный анализ по методу главных компонент, представляющий собой математическое преобразование матрицы парных корреляций, в результате чего вводится новая система координат в обобщенных и взаимонезависимых параметрах, связанных с группами первичных параметров.

Таблица 2.5

Факторные нагрузки для обобщенных и первичных параметров

	Обобщенные параметры		
	F_1	F_2	F_3
$\ln(\Delta g)$	0,916	0,002	0,057
ΔD_1	-0,893	-0,012	0,218
ΔD_2	-0,887	0,086	0,134
$\ln(Ra)$	0,902	-0,070	-0,015
$f(\Delta\beta_1)$	0,005	-0,861	0,141
$\Delta\beta_2$	-0,086	0,871	0,121
ΔP	-0,203	-0,109	0,681
ΔA	0,049	0,089	0,823

Анализ по методу главных компонент подтверждает, что для характеристики процесса MAO может быть выбрано 3 главных обобщенных параметра (F_1, F_2, F_3), взаимосвязь которых с первичными определяется факторными нагрузками, приведенными в таблице 2.5. Данные таблицы подтверждают, что параметры процесса MAO могут быть сгруппированы в три обобщенных, объединяющих те первичные параметры, формирование которых обусловлено одними и теми же физико-механическими процессами, сопровождающими MAO. Тем самым будет сокращено число уравнений регрессии для описания процесса, а главное, оптимизация процесса будет возможна в системе взаимонезависимых параметров. Выполненный статистический анализ результатов измерений параметров производительности и качества поверхности, получаемых в процессе MAO, показывает, что распределение большинства исследованных параметров может быть описано нормальным законом вероятностей.

Корреляционный анализ параметров MAO выявил статистически значимые взаимосвязи между различными группами параметров, которые могут быть объяснены одинаковыми физико-механическими механизмами формирования этих параметров в процессе MAO.

2.4.3. Разработка математико-статистических моделей зависимости производительности и качества обрабатываемой поверхности при магнитно-абразивной обработке от технологических режимов

Для нахождения функции отклика используют метод регрессионного анализа, который позволяет определить коэффициенты регрессионного уравнения, отражающего искомую зависимость нормально распределенной случайной величины с постоянной дисперсией от независимых переменных факторов.

Рассматриваемая техническая система (процесс MAO) по своей физической природе относится к классу стохастических (вероятностных) систем, так как основной режущий инструмент представляет собой совокупность абразивных частиц, параметры которых имеют некоторое статистическое распределение, а на их взаимодействие с обрабатываемой поверхностью влияет множество случайных факторов [173, 174]. Проведенные исследования при использовании локально-интегральной модели процесса MAO

отверстий (игольчатых подшипников 4074912 ГОСТ 4657–82, сталь ШХ15 ГОСТ 801–78, 61...65 HRC, $D \times d \times B = 85 \times 60 \times 25$ мм) и его описании в виде квадратичного полинома позволили выявить наиболее значимые факторы и определить интервалы их варьирования. Применение данного квадратичного полинома позволило получить функцию отклика. Однако исследования МАО, например, цилиндрических радиусных поверхностей беговых дорожек шариковых подшипников 1000812 ГОСТ 8338–75, геометрические параметры которых имеют более сложную зависимость от технологических режимов МАО, выявили неадекватность регрессионных моделей второго порядка в выбранном диапазоне варьирования факторов. Поэтому для описания процесса в качестве регрессионных моделей взяты полиномы третьего порядка.

В качестве параметров оптимизации выбраны шероховатость обработанной поверхности $Y_1 = R_a$, мкм и производительность процесса, оцениваемая параметром $Y_2 = Q$, мг/(см²·мин) – скорость съема массы металла с единицы площади обработанной поверхности детали в единицу времени (далее – удельный массовый съем). Исследовано влияние следующих факторов технологии МАО: $X_1 = V_p$, м/с – скорость резания (скорость вращения заготовки); $X_2 = V_o$, м/с – скорость осцилляции (скорость возвратно-поступательного движения полюсных наконечников относительно обрабатываемой поверхности); $X_3 = B$, Тл – величина магнитной индукции; $X_4 = A$, мм – амплитуда осцилляции полюсных наконечников; $X_5 = R_{a_0}$, мкм – исходная шероховатость поверхности детали; $X_6 = t$, с – время обработки. Для проведения эксперимента выбран композиционный ротатабельный униформ-план. Для оценки воспроизводимости эксперимента в каждой точке плана выполнено трехкратное дублирование опытов. Уровни варьирования факторов в натуральных и нормированных координатах представлены в таблице 2.6.

Анализ функций распределения полученных экспериментальных значений шероховатости и производительности показал их существенное отклонение от нормального закона вследствие сильной левосторонней асимметрии. Для приближения полученных распределений к нормальному закону выполнено логарифмическое преобразование экспериментальных значений исследуемых параметров, т. е. искомые коэффициенты b_i рассчитывались

для уравнения 2.56, представленного в экспоненциальной форме. В результате статистического анализа значимости коэффициентов регрессии и адекватности полученного уравнения установлена зависимость параметра R_a от факторов MAO вида:

$$R_a = \exp \left(\begin{array}{l} -2,4217 + 0,0941X_1 + 0,1337X_2 - 0,1814X_3 + 0,2772X_4 + 0,2788X_5 + 0,0497X_6 - \\ -0,0678X_1X_6 + 0,1431X_2X_3 - 0,2166X_2X_4 - 0,0731X_4X_5 - 0,0617X_4X_6 + \\ +0,0688X_1X_2X_3 + 0,0643X_1X_2X_4 - 0,1218X_2X_3X_4 - 0,0484X_2X_3X_5 + \\ +0,1507X_1^2 + 0,0884X_2^2 + 0,1390X_3^2 + 0,0426X_4^2 + 0,0695X_5^2 + 0,0862X_6^2 - \\ -0,0425X_1^3 - 0,0213X_2^3 - 0,0130X_3^3 - 0,03086X_4^3 - 0,0265X_5^3 - 0,0214X_6^3 \end{array} \right) \quad (2.56)$$

Уравнение (2.56) представляет собой полином 3-й степени от 6 варьируемых факторов в полулогарифмических нормированных координатах. Кроме главных факторов и их степеней статистически значимыми оказались некоторые парные и тройные взаимодействия, что говорит о сложном взаимовлиянии технологических режимов MAO на получаемую шероховатость поверхности. Поэтому аналитическая интерпретация полученной зависимости затруднительна и выполнен поиск минимума функции численным методом.

Таблица 2.6

Уровни варьирования факторов

Технологический фактор	V_p , м/с	V_0 , м/с	B , Тл	A , $\times 10^{-3}$ м	Ra_0 , мкм	t , с
Нормированное обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
Основной уровень (0)	3,50	0,220	0,70	1,40	0,800	60,0
Верхний уровень (+1)	4,33	0,255	0,80	1,70	0,975	75,0
Нижний уровень (-1)	2,67	0,185	0,60	1,10	0,625	45,0
Звездная точка (+ α) +2,828	5,85	0,319	0,98	2,25	1,295	102,4
Звездная точка (- α) -2,828	1,15	0,121	0,42	0,55	0,305	17,6

Оптимальные значения трех факторов находятся на границе исследованных интервалов. Можно получить дальнейшее снижение

шероховатости, согласно полученному уравнению регрессии, если уменьшить значения скорости и амплитуды осцилляции, и увеличивать величину магнитной индукции.

Аналогично выполнен анализ зависимости значения ΔQ от факторов MAO, описываемой полученным уравнением регрессии:

$$\Delta Q = \exp \left(\begin{array}{l} -0,9973 + 0,0571X_1 + 0,0982X_2 - 0,1791X_3 + 0,2862X_4 + 0,2529X_5 - 0,2412X_6 - \\ -0,0735X_1X_6 + 0,1138X_2X_3 - 0,1961X_2X_4 - 0,0641X_4X_5 + \\ +0,0551X_1X_2X_3 + 0,0597X_1X_2X_4 - 0,0774X_2X_3X_4 + \\ +0,1388X_1^2 + 0,0883X_2^2 + 0,1201X_3^2 + 0,0437X_4^2 + 0,0873X_5^2 + 0,1438X_6^2 - \\ -0,0335X_1^3 - 0,0167X_2^3 - 0,0193X_3^3 - 0,0319X_4^3 - 0,0175X_5^3 - 0,0152X_6^3 \end{array} \right) \quad (2.57)$$

Численное решение с использованием регрессионной зависимости (2.57) позволило определить технологические режимы, обеспечивающие максимальное значение ΔQ .

При сравнении полученных регрессионных уравнений двух исследованных режимов процесса MAO прослеживается подобие в направлении влияния его факторов и их взаимодействий. Поскольку выполнить оптимизацию процесса возможно только по одному критерию оптимизации, то второе требование необходимо задавать в виде граничного значения, руководствуясь техническими ограничениями (табл. 2.7).

Таблица 2.7

Значения технологических режимов в точке с максимальным ΔQ

Технологический фактор	V_p , м/с	V_o , м/с	B , Тл	A , $\times 10^{-3}$ м	R_{a0} , мкм	t , с
Нормированное обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
Нормированное значение	min	max	min	max	max	-1,376
Натуральное значение	1,15	0,319	0,42	2,25	1,295	40

В качестве требований к поверхности детали обычно задана максимально допустимая величина R_a , поэтому задача управления технологическим процессом может быть сформулирована как

выбор таких режимов обработки, которые обеспечат максимальную производительность обработки при заданном максимально допустимом параметре R_a получаемой поверхности. Таким образом, математическая модель оптимизации процесса МАО будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta Q(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) &\rightarrow \max, \\ R_a(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) &\leq [R_a], \\ -2,0 \leq (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) &\leq 2,0. \end{aligned} \quad (2.58)$$

Область варьирования факторов в нормированных координатах сужена до ± 2 , так как на границах исследованного факторного пространства погрешность предсказания по уравнению регрессии существенно возрастает.

Полученные в результате экспериментов значения шероховатости лежат в диапазоне $R_a = 0,64 \dots 0,032$ мкм. Используемые в качестве ограничений (2.58) предельно допустимые значения R_a выберем из ряда предпочтительных значений шероховатости 0,63; 0,50; 0,32; 0,25; 0,160; 0,125; 0,080; 0,063; 0,040; 0,032.

Поскольку обе функции, описывающие параметры процесса, являются нелинейными регрессионными уравнениями, то данная задача относится к классу задач нелинейной оптимизации. Для ее решения использован численный метод, реализованный в программе Mathcad.

Расчетные оптимальные значения факторов и режимов приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8
Расчетные оптимальные значения факторов и режимов

V_p , м/с	5,16	4,94	4,76	4,35	4,03	2,75	1,84	1,84	1,84
V_o , м/с	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,21	0,21
B , Тл	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,832	1,018
$A, \times 10^{-3}$, м	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R_{a0} , мкм	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15

t, c	90	90	90	90	90	90	87,8	90	90
R_a	0,452	0,320	0,250	0,160	0,125	0,080	0,063	0,040	0,032
ΔQ	9,198	6,846	5,537	3,767	3,042	2,104	1,648	0,771	0,669

Установлено, что для достижения высоких показателей ΔQ при учете таких режимов, как скорость резания и скорость осцилляции, необходимо гарантировать повышение значений второго параметра (рис. 2.25, *a*). При учете таких параметров, как амплитуда осцилляции A и магнитная индукция B , высокие показатели производительности (рис. 2.25, *б*) определяются ростом значений обоих режимных факторов. Достижение минимальной шероховатости при варьировании скорости резания и времени обработки определяется областью минимума, расположенной в центре координатной плоскости (рис. 2.26, *a*).

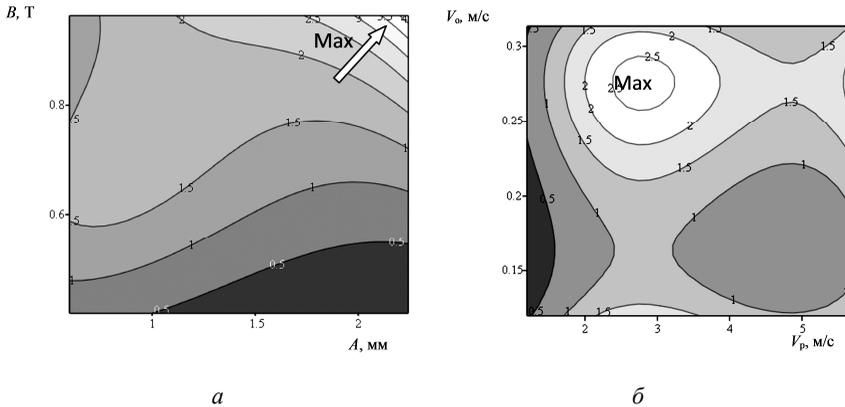


Рис. 2.25. Зависимости удельного массового съема ΔQ от скоростей резания и осцилляции (*a*), амплитуды осцилляции и магнитной индукции (*б*)

На рис. 2.26, *б* представлена область минимума величины шероховатости после МАО в осях магнитной индукции и исходной шероховатости поверхности беговой дорожки шарикоподшипника. На рис. 2.26, *в* представлены две области минимума при разных

сочетаниях факторов скорости и амплитуды осцилляции, которые расположены противоположно друг другу и определяются тем, что первая область характеризуется снижением значений обоих факторов, вторая – их ростом [166].

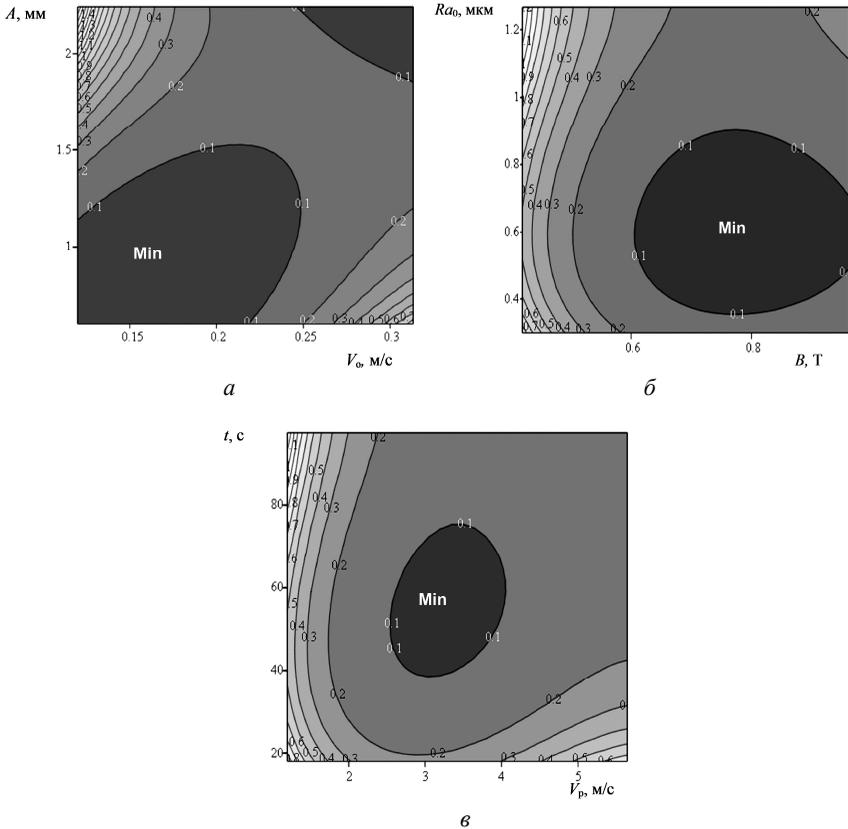


Рис. 2.26. Зависимости шероховатости обработанной поверхности R_a от скорости резания и времени обработки (*a*), магнитной индукции и начальной шероховатости (*б*), скорости осцилляции и амплитуды (*в*)

По результатам оптимизации можно заключить, что для повышения удельного массового съема ΔQ при учете скоростей резания и осцилляции, амплитуды осцилляции и магнитной индукции необходимо обеспечить следующие значения технологических

режимов: $B > 0,8$ Тл, $A > 2$ мм, $V_o > 0,25$ м/с, $V_p = 2 \dots 4$ м/с; для снижения шероховатости обработанной поверхности R_a при учете скоростей резания и осцилляции, времени обработки и исходной шероховатости необходимо обеспечить следующие величины технологических режимов: $V_o = 0,6 - 1,0$ м/с, $V_p = 2 - 4$ м/с, $t = 40 - 70$ с, $Ra_0 = 0,4 - 0,8$ мкм.

Таким образом, пользуясь полученными математическими зависимостями, можно оценить влияние остаточных напряжений на усталостную прочность при любом напряженном состоянии, возникающем в процессе эксплуатации изделия.

Глава 3

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ФЕРРОАБРАЗИВНЫХ ПОРОШКОВ, ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СЪЕМА МЕТАЛЛА

3.1. Разработка технологии изготовления композиционных ферроабразивных порошков

Первоначально в исследовании MAO в качестве ФАП использовались ферромагнитные сплавы на основе железо – ферробор, серый чугун и др. [184]. Ввиду невысоких магнитных свойств и недостаточной твердости этих материалов их применение дало посредственные результаты. Попытка использования ферритов и ферромагнитного электрокорунда также оказалась малоэффективной [185]. Отсутствие материалов, обладающих высокими ферромагнитными и абразивными свойствами, вынудило к созданию специального композиционного материала. Его ферромагнитный компонент представляет собой техническое железо, а абразивный – частицы электрокорунда [185]. Магнитно-абразивный материал на основе железа и электрокорунда, известный под маркой МАМ-40, обладает относительно высокими магнитными свойствами и удовлетворительной абразивной способностью. Однако прочность соединения составляющих в его зернах недостаточно высока. В процессе изготовления из железной основы выкрашивается около половины введенных ранее абразивных частиц. Среднестатистические значения линейных характеристик абразивных включений МАМ-40 значительно меньше, чем у зерен ЭБМ40 из-за дробления последних в процессе изготовления ФАП [185]. Разделение составляющих МАМ-40 наблюдается и при MAO [185], вследствие чего материал обладает низкой абразивной стойкостью. К его недостаткам следует отнести низкую технологичность и трудоемкость изготовления, а также относительно высокую стоимость.

В работе [186] приведены также данные об использовании карбидов титана и хрома в качестве абразивных компонентов ФАП. Однозначно оценить эффективность применения TiC и Cr_3C_2

в данном случае не представляется возможным. Если при обработке стали ШХ15 эти материалы по производительности превосходят МАМ-40, то при обработке стали У8А значительно ему уступают (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Производительность МАО при использовании керметов с различными абразивными составляющими [186]

Обрабатываемая сталь	Состав кермета (% мас.)			
	20Al ₂ O ₃ + 80Fe	15Al ₂ O ₃ + 15TiC+70Fe	30TiC – 70Fe	30CrC + 70Fe
ШХ15	1,84	–	2,92	3,62
У8А	4,80	3,80	0,50	0,50

В работе [75] установлено, что зачистка плат с целью подготовки их поверхности под операцию нанесения фоторезиста оказалась невозможной при применении ФАП на основе TiC, поскольку они в контакте с медной поверхностью адгезионно и диффузионно насыщают ее углеродом и железом. В связи с этим идеальным является ФАП, частицы которого имеют ферромагнитную матрицу, покрытую прочной химически инертной абразивной оболочкой. Методом получения такого ФАП является способ распыления расплава. В качестве распыляющего агента выступают воздух, вода или азот, что обеспечивает образование на поверхности частиц оболочки, состоящей из высокотвердых окислов и нитридов и тугоплавких элементов. Процесс МАО может быть интенсифицирован созданием композиционных ФАП, имеющих меньшие размеры абразивных зерен, чем у МАМ-40, при условии обеспечения их надежного крепления в ферромагнитной основе [187].

3.1.1. Виды ферроабразивных порошков и способы их изготовления

Существуют следующие группы ФАП: механические смеси, керметы и литые порошки. Механические смеси-порошки состоят из ферромагнитных (железо, низкоуглеродистая сталь, ферриты, сплавы типа Fe-Ni-Al-Co и др.) и абразивных частиц (алмаз,

эльбор, карбид титана и кремния и др.). Их общими недостатками являются высокое процентное содержание абразивной составляющей, снижающее магнитные характеристики порошков, а также сегрегация смеси как в процессе хранения, так и эксплуатации. С учетом указанных особенностей данная группа ФАП имеет ограниченное применение (в основном, в виде суспензии). Керметные порошки – металлокерамические частицы, представляющие собой гетерогенную композицию ферромагнитной основы с одной или несколькими керамическими фазами (абразивами). К литым порошкам относят порошки, полученные распылением или грануляцией из расплава.

Если пользоваться классификацией по структуре ФАП, предложенной в работе [184] и на рис. 3.1, можно выделить первый тип – порошки, изготовленные из более твердых, чем обрабатываемый, материалов – тип I, например, чугунная дробь, порошки ферросплавов. Ко второму типу относятся специальные порошки, которые состоят из ферромагнитной матрицы и абразивного наполнителя, распределенного по всему объему частиц. Этот тип можно разделить на два подтипа (подтипы *IIa*, *IIб*), которые отличаются способом изготовления. Порошки типа *IIa* изготавливают традиционными методами порошковой металлургии, которые включают смешивание исходных компонентов, брикетирование, спекание, дробление и размол. Такие порошки содержат до 30 % абразивной составляющей, в качестве которой используют оксиды (Al_2O_3 , SiO_2 и др.), карбиды (SiC , TiC , Mo_2C , Cr_3C_2 , ZrC и др.), бориды (TiB_2 , ZrB_2). К материалам, которые изготавливают по такой технологии, относятся МАМ40 и FeTi – первые специальные ФАП.

К подтипу *IIб* относятся порошки, в которых абразивный компонент образует каркас, – псевдосплавленные и полученные распылением из расплава [188]. Псевдосплавленные порошки имеют в своем составе достаточно твердый абразивный компонент при значительной прочности зерен в целом. Распыленные порошки системы Fe-Si-C с добавками алюминия, бора, переходных металлов имеют высокую прочность частиц, эвтектическое строение и высокодисперсный абразивный компонент. Порошки II типа чаще всего используются в качестве инструмента для МАО.

Тип III представляет собой порошки с ферромагнитным ядром, покрытые слоем абразива. Стойкость частиц с такой структурой

определяется прочностью сцепления абразива с ферромагнитной матрицей. Порошки, близкие к III типу, со структурой IV типа имеют абразив с несколькими поверхностями разного состава, расположенными на поверхности частиц ФАП. Такая структура, по мнению авторов [189], должна совмещать преимущества структур II и III типов и в то же время не иметь их недостатков.

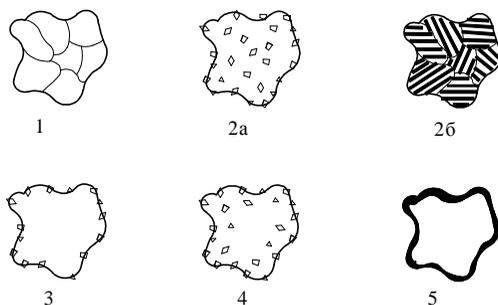


Рис. 3.1. Типы ферроабразивных порошковых материалов

Порошки III и IV типов получают прокаткой смеси железного порошка и абразива в валках [190], обкатыванием железного порошка в смеси железа и абразива [191] или методами внутреннего азотирования или цементации порошков сплава железа из нитридо- и карбино-содержащими элементами.

Порошки V типа состоят из магнитного ядра, полностью покрытого абразивным материалом. Такую структуру можно получить при борировании железного порошка. Порошки V типа исключают контакт материала ферромагнитного ядра с обрабатываемыми изделиями.

Исследования различных порошковых материалов для MAO показали, что эффективность обработки в значительной степени зависит от формы зерен ферроабразивного порошка. При MAO большое влияние на эффективность обработки оказывает не только материал порошка, но и состояние режущих кромок зерен ФАП. Основными геометрическими параметрами, определяющими режущую способность ферроабразивного зерна, являются форма зерен, число вершин (режущих кромок), углы при вершинах и радиусы округления вершин [192].

3.1.2. Магнитная проницаемость ферроабразивных порошков

Режущая и полирующая способность ФАП во многом зависит от их магнитных характеристик, наиболее важных из них является магнитная проницаемость, которая соответствует напряженности магнитного поля $H = 400 \dots 600$ кА/м свойственная процессу МАО [75].

В случае однородной изотропной среды магнитная проницаемость μ :

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (3.1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м – магнитная постоянная.

Магнитные свойства порошков, применяемых при магнитно-абразивном полировании, значительно влияют на производительность процессов. Эти свойства определяют, как силы резания, так и количество порошка, которое может удерживаться магнитными силами в рабочем зазоре станка. На магнитную частицу в неоднородном магнитном поле действует сила

$$F = \mu_0 \chi_0 V H \text{grad} H, \quad (3.2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м – магнитная постоянная; χ_0 – магнитная восприимчивость частицы, зависящая от ее геометрической формы; V – объем частиц, м³; H – напряженность магнитного поля, в котором находится частица ФАП, А/м; $\text{grad} H$ – градиент этого поля, А/м².

Наилучшими магнитными характеристиками обладает техническое железо и такие магнито-мягкие материалы как его сплавы с кремнием, алюминием, кобальтом, никелем. Сплавы железо-кобальт имеют высокие значения индукции насыщения $B = 2,43$ Тл, но их механическая твердость не превышает 1 ГПа. Высокая стоимость сплавов железо-кобальт и железо-никель резко удорожает изготовление ФАП на их основе. Сплавы железа с кремнием применяются в зависимости от содержания кремния, поскольку,

если кремния больше 33 %, то осуществляется потеря ферромагнитных свойств, для алюминия это содержание регламентируется количеством более 16,5 %. Установлено что пластическая деформация и термообработка (закалка) существенно снижают индукцию насыщения и магнитную проницаемость. В результате проведенного анализа выявлено, что в качестве ферромагнитных компонентов композиционных ФАП целесообразно использовать техническое железо и его сплавы с алюминием и кремнием [188].

Одним из вариантов увеличения магнитной проницаемости порошков для МАО является применение железо-кремниевых сплавов, поскольку сплавам Fe-Si с содержанием Si в пределах 6,5...6,8 масс. % свойственна повышенная микротвердость – 3600...5800 МПа. Поскольку налажено производство железо-кремниевых сплавов с содержанием кремния 15...20 %, то существует возможность в проведении исследований по созданию порошка (Fe-Si)-TiC – двумя способами. Сущность первого заключается в смешивании Fe-Si (6,5 % Si, размер частиц 250/63 мкм) с порошком TiC, прессовании при давлении 250 МПа, спекании при температуре 1100 °С в течение 0,5 часа и измельчении спеков. По второму способу смешивались порошки железа, чистого кремния и карбида титана, прессовались и спекались при температуре 1100 °С в течение часа, затем измельчались. Для этого процесса необходимо длительное спекание для протекания процесса диффузионного насыщения железа кремнием из «точечных источников». Результаты испытаний абразивных и магнитных свойств материалов, полученных обоими методами, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Абразивные и магнитные свойства различных материалов для МАО

Материал	Съем металла в результате МАО, 10^{-3} г	Шероховатость поверхности после МАО, R_a , мкм	Магнитная проницаемость при 60 000 А/м, 10^{-3} Г/м
Железо-кремниевый сплав с содержанием	71	0,40	4,6
Железо-кремниевый сплав с содержанием кремния, 15 %	54	0,35	5,4

Материал	Съем металла в результате MAO, 10-3 г	Шероховатость поверхности после MAO, Ra, мкм	Магнитная проницаемость при 60 000 А/м, 10-3 Г/м
Ферроабразивный порошок (Fe-Si)-TiC, первый способ изготовления	328	0,071	6,7
Ферроабразивный порошок (Fe-Si)-TiC, второй способ изготовления	117	0,095	5,5

Проведенные испытания ФАП, изготовленного первым способом, показали лучшие результаты по сравнению со вторым. Низкая магнитная проницаемость второго порошка указывает на то, что температура 1100 °С и выдержка в течение часа недостаточны, чтобы произошло равномерное распределение кремния в железе в результате его диффузии из «точечных источников». Увеличение температуры и длительности спекания в данном случае влечет за собой дополнительные затраты энергии и увеличение трудоемкости операции. Результаты испытаний абразивных и магнитных свойств материалов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Абразивные и магнитные свойства порошков композиционных материалов

Материал	Количество абразивной составляющей, масс. %	Шероховатость поверхности образцов после MAO, R_a , мкм	Съем металла в результате MAO, G, г	Магнитная проницаемость ($H = 70\,000$ А/м), мкГ/м
1	2	3	4	5
Fe+TiC	10	0,09	138	6,31
	20	0,079	197	6,11
	30	0,087	149	5,79
На основе износостойкого белого чугуна	20	0,118	62	6,3

1	2	3	4	5
На основе отходов быстрорежущей стали	25	0,238	96	6,23
На основе боридов железа	20	0,247	77	5,23
На основе нитридов и карбидов титана	20	0,412	68	6,19

Перспективными материалами для МАП являются порошки, которые в качестве абразивной составляющей содержат частицы карбидов и боридов переходных металлов IV–VI групп (табл. 3.3).

Под действием сил, возникающих в результате заклинивания порошка при выходе из рабочего зазора, происходит уплотнение порошка в 1,7 раза по сравнению со свободной насыпкой. Средняя величина уплотнения порошка в зазоре составляет 1,24. Определив величину уплотнения, можно установить средние значения его магнитных параметров в процессе магнитно-абразивной обработки. Очевидно, что магнитные свойства порошков зависят от содержания железа. Но при значительном содержании железа резко ухудшаются абразивные свойства порошка. Поэтому по магнитным свойствам можно сравнить порошки с одинаковым содержанием абразивного компонента. Из группы порошков с одинаковым содержанием абразивного компонента лучшим по магнитным свойствам является тот, который при одинаковой пористости засыпки намагничивается до заданного значения J_n в меньшем поле H , либо при заданном поле H имеет более высокую намагниченность. Такой порошок будет обладать и более высокой эффективной проницаемостью μ_n .

3.1.3. Исследования структуры и фазового состава ферроабразивных порошков

Морфология и структура порошковых материалов на основе железа в отличие от литых компактных сталей имеют ряд особенностей.

К ним относятся: наличие пористости, большее по сравнению с литыми сталями количество неметаллических включений (графита, оксидов, сульфидов и др.), гетерогенность микроструктуры. Размер и морфология порошковых частиц являются одними из важных характеристик их дисперсного состояния, что обуславливает необходимость анализа кооперативности свойств ФАП при наложении ЭМП.

Строение структуры литого (Fe-TiC) порошка обусловлено наличием базового кристалла карбида титана, представляющего основу всей эвтектической зоны. Другие кристаллы, имеющие форму октаэдров, пронизывают матрицу [93]. Такое строение обеспечивает устойчивость двухфазного фронта, а кристаллизация карбидов приводит к образованию прочной эвтектической колонии, определяя ее зональное строение и внешний вид. Размеры карбидных включений составляют от нескольких микрон до нескольких десятков, что вызвано условиями диспергирования струи расплава и последующей химико-термической обработкой.

Установлено, что микротвердость карбидных слоев ФАП Fe-TiC составляет 12...15 ГПа при их толщине 10...20 мкм. Герофильность Fe по отношению к TiC значительно интенсифицирует усадку при охлаждении частиц и снижает опасность роста пор. Качественная и полуколичественная идентификация структурных составляющих представлена на рис. 3.2.

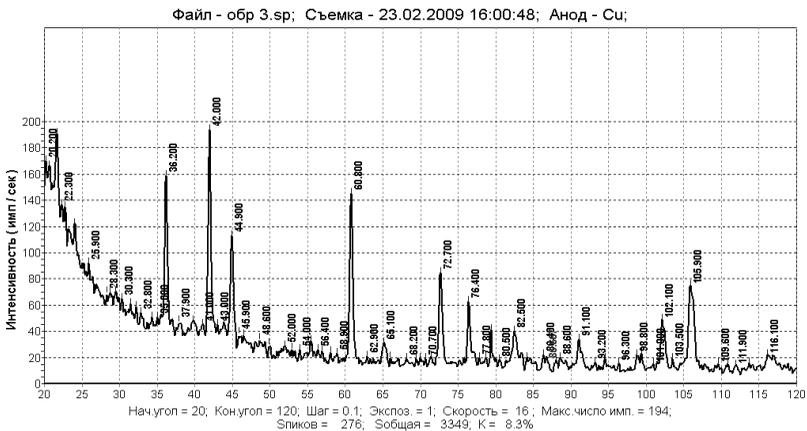


Рис. 3.2. Качественная и полуколичественная идентификация структурных составляющих ФАП

Микротвердость ферромагнитной матрицы находится в пределах 2100...3400 МПа, Ti-C – 30 000...31 000 МПа. Микроструктура в зависимости от массового содержания карбидов представляет собой спектр от карбида в виде сферических включений в железной матрице, хлопьевидного карбида в этой же матрице и структуры только литого карбида.

В системе Fe+C+Ti на нетравленных шлифах видны две фазы: на светлом поле железной матрицы наблюдаются темные округлые пятна (глобулы) карбида титана. Глобулы незначительно различаются по размерам и равномерно распределены по полю матрицы.

Размер глобул зависит от концентрации карбидной фазы в композиции. Увеличение концентрации карбида приводит к росту размера его зерна. Округление глобул обусловлено ограниченностью растворения карбидов титана в железе и стремлению любой системы принять форму, связанную с минимумом энергозатрат.

Углерод в основном находится в области карбидообразующего металла, а в железной матрице он практически отсутствует. С ростом концентрации абразивного компонента намагниченность снижается. Частицы ФАП имеют форму неправильных многогранников с выделяющимися выступами зерен карбида, представляющими участки абразивного резания.

Структура ФАП, получаемых из расплавов, представляет собой матрицу на основе железа с распределенными в ней включениями тугоплавких карбидов VC и (Cr, Fe)₇C₃. Ввиду высоких значений поверхностного натяжения металлических расплавов, образующиеся из железа, частицы порошка в основном приобретают сферическую форму (рис. 3.3).

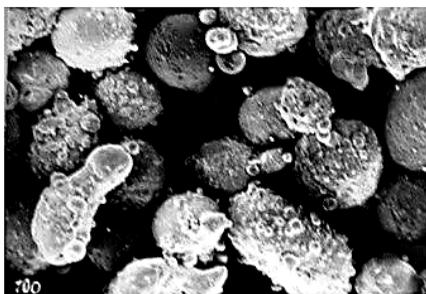


Рис. 3.3. Фотография частиц порошка на основе высокохромистого белого чугуна (x100)

При введении в двойные системы железо-ванадий и железо-титан заданного количества углерода в их структуре появляется контролируемое содержание карбидной фазы с твердостью, превышающей HV 2200, и считается оптимальным соотношение магнитной и абразивной фаз в порошке в пределах 80...70/20...30 % по объему. Микроструктура литых дробленых порошковых частиц сплавов представляет собой мартенсит с выделениями изолированных карбидов ванадия или титана округлой и угловатой формы, а также карбидов эвтектического типа. Микроструктура порошковых частиц сплава, распыленных водой, представляет собой твердый раствор углерода в α - и γ -железе, твердость металлической основы сплава возрастает от 65 до 70 HRC. Размер карбидов в порошковых частицах, полученных методом распыления, составляет 5...50 мкм. Размеры порошковых частиц находятся в пределах 100...500 мкм. Эти же фракции порошков стремились получить путем дробления слитков сплавов железо-углерод-ванадий и железо-углерод-титан.

Рентгеноструктурным анализом идентифицированы карбидные фазы в исследованных порошковых сплавах. В сплавах систем железо-углерод-ванадий и железо-углерод-титан – это, соответственно, карбиды VC и TiC.

Микроструктура порошковых частиц сплавов ФТ-2 и ФВ-4 представляет собой мартенсит на основе перенасыщенного раствора Ti или V в железе с твердостью, соответственно, 4800 и 3500 МПа. Присутствие углерода приводит к образованию карбидной сетки по границам бывших аустенитных зерен. С увеличением размера порошковых частиц количество выделившихся карбидов возрастает, что приводит к снижению твердости матрицы. На поверхности частиц, распыленных водой, образуется слой оксидов титана или ванадия. За счет этого слоя и магнитной сердцевины обеспечиваются высокие магнитные и абразивные свойства порошка.

Определены основные особенности технологии изготовления ФАП, относящихся к системам: железо-углерод-ванадий, железо-углерод-титан, железо-углерод-хром-ванадий. Порошки сплавов на основе твердых растворов с высокими магнитными характеристиками, обладающие высокой температурой плавления и повышенной вязкостью в жидком состоянии, целесообразно получать

путем дробления слитков и последующего рассева полученного продукта. Дальнейшее совершенствование литых порошковых сплавов связано с повышением в расплаве углерода, титана и других карбидообразующих элементов, а снижение себестоимости с заменой процесса распыления другими, например, механическими способами измельчения затвердевших сплавов.

3.1.4. Технологии изготовления композиционных ферроабразивных порошков

Существующие методы получения порошков подразделяют на механические и физико-химические [194, 195]. Из физико-химических методов для получения порошков химически активных металлов наиболее пригоден электролиз расплавленных солей. Однако отделение полученных частиц металла от электролита, например, с помощью отмывки водой или растворами солей для таких металлов, как кальций, магний и других, часто непригодно из-за их химической активности. Из механических методов в настоящее время применяются такие, как распыление струи расплавленного металла [196] и обработка металла резанием с получением частиц, а не сливной стружки.

Недостатком метода распыления расплава является большой расход электроэнергии на нагрев и плавление металла, а также необходимость создания защитной атмосферы для расплава. Для получения порошков используют также различные способы измельчения металлов обработкой резанием, осуществляемые с помощью мельниц и дробилок [197].

Например, известен способ, в котором получение порошка металла осуществляется фрезерование заготовки [198]. Недостатками данного способа является высокая пожаро- и взрывоопасность процесса получения порошка химически активного металла, частицы которого имеют произвольные линейные размеры, а также низкий выход металла в порошок.

Известно устройство для получения металлических порошков методом центробежного распыления [199]. Недостатком данного устройства является нестабильность процесса распыления расплава, обусловленная его подхоложиванием при контакте с диском с образованием гарниссажа на поверхности. Дисбаланс вращающихся масс

диска, возникающий при этом, приводит к нарушению процесса распыления, образованию «отрывов» – срывающихся с диска крупных частиц гарниссажа, снижению выхода годной продукции и к вынужденной остановке процесса распыления из-за вибраций и поломок.

В работе [200] предложено нанесение на абразивные частицы слоя ферромагнитного материала путем химической или электрохимической металлизации в ванне, содержащей вводный раствор солей осаждаемого металла. Таким образом, получены никелевые, железные и никель-кобальтовые покрытия толщиной 0,6–6,5 микрометра на гранулах карбидов и бора. Однако их магнитная проницаемость меньше 3,81 мкГ/м, а повышение толщины покрытия приводит к падению абразивной способности ФАП.

В работе [201] представлены композиционные ФАП на основе железа и карбидов переходных металлов 4...6 групп периодической системы элементов. Технология их изготовления содержит операции: смешивание исходных компонентов в необходимом массовом соотношении прессования брикетов под давлением 600 МПа их спекания при температуре 1473 К в течение 0,5 часа в атмосфере водорода измельчение спеков в порошок и выделения на ситах проб гранулометрического состава 250...80 мкм. Повышение свойств электрокорунда связано с процессом их электроплавки боркарбидным методом и связыванием графита введением в расплав карбидообразующего металла. Технология их производства заключается в расплаве и перегреве металла в электропечи введением присадки титана 28...35 % в виде ферротитана T_i . По окончании процесса карбидообразования расплав охлаждали, полученные слитки измельчали и рассеивали. Существенным недостатком технологии является необходимость их очистки от посторонних примесей в электромагнитном сепараторе.

Технология получения ФАП на основе железо-кремний заключается в смешивании порошков железа и карбида кремния с соответствующими модификаторами. Смесь подвергается холодной прокатке в полосе толщиной до 12 мм, затем при температуре 1023...1073 К прокатывается в инертной атмосфере толщиной 5 мм, полученная полоса охлаждается и измельчается в порошок. Прочность полученного ФАП обеспечивается механическим

сцеплением частиц ферромагнитного и абразивного компонентов. Технология получения ФАП осуществляется путем распыления капель расплава со скоростью $10^5 \dots 10^6$ °C на двух вращающихся водоохлаждаемых медных валках и их превращения в тонкие 20...100 мкм чешуйки с последующим измельчением шаровой мельницей.

Предлагаемая технология изготовления ФАП основана на смешивании распыленного порошка железоуглеродистого сплава и механически измельченного порошка ферробора, спекании смеси порошков, измельчении спека и его отсева, спекание смеси порошков осуществляют при температуре 1030...1200 °C в течение 30...60 мин, компоненты исходной смеси принимают при следующем соотношении, мас. %: порошок железоуглеродистого сплава – 40...80, порошок ферробора – 20...60. Размер частиц порошковой смеси выбирают, мкм: порошок железоуглеродистого сплава – 160...400, порошок ферробора – менее 100, причем нагрев смеси порошков, выдержку при температуре жидкофазного спекания и охлаждение осуществляют в графитовом тигле под слоем графита с размером частиц 1–10 мм. Поставленная задача решается за счет того, что ферромагнитный абразивный материал содержит углерод, кремний, карбиды бора, бориды железа, железо и примеси при следующем соотношении ингредиентов, мас. %: углерод – 0,7...3; кремний – 0,3...3,6; карбиды бора – 0,6...8; бориды железа – 1...6; железо и примеси – остальное.

Сплавы, используемые для последующего насыщения бором, выплавляли в индукционной печи с кислой футеровкой, расплав распыляли водой либо получали в виде слитка, после чего осуществляли дробление и отсеив на фракции. Частицы порошка железоуглеродистого сплава размером 160...400 мкм смешивали с механически измельченным порошком ферробора с размером частиц не более 100 мкм в соотношении (40...80 %): (20...60 %) и осуществляли жидкофазное спекание в графитовом тигле под слоем измельченного графита при температуре 1030...1200 °C в течение 30...60 мин, затем полученный спек охлаждали, размалывали и отсеивали на фракции. Эксплуатационные свойства ФАП могут быть значительно повышены при таком строении порошковых частиц, когда их сердцевина состоит в основном из ферромагнитного материала, а абразивная составляющая максимально сосредоточена в поверхностном

слое. Такие условия могут быть созданы, например, путем термической обработки, способствующей дополнительному выделению карбидов из металлической основы порошка, химическим травлением за счет повышения шероховатости частиц округлой формы, обработкой порошков в азотсодержащей плазме (образование нитридов титана и ванадия в поверхностном слое частиц); ионно-плазменной обработкой (нанесение нитрида титана на поверхность порошковых частиц) и т. п.

3.2. Исследование режущей способности композиционных ферроабразивных порошков при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей тел вращения

Установлено, что путем подбора легирующих элементов, режимов распыления и термической обработки можно избирательно влиять на структуру, форму и размеры частиц. Абразивные свойства ФАП определяются присутствием в их структуре сверхтвердых фаз [202]. Согласно [203], распределение частиц ФАП и их относительное уплотнение в сравнении со свободной насыпкой в рабочем зазоре между оппозитно расположенными полюсными наконечниками имеет скачки уплотнения по краям рабочего зазора по ширине 2...3 мм. Проведенные исследования показали, что наименьшая пористость и соответственно наибольшая относительная плотность залегания частиц ФАП в РТС наблюдаются по границе рабочего зазора, достигая максимальных значений на выходе из зазора и по его углам. Например, на участке в центре РТС коэффициент уплотнения составил 0,9934, а на участке, параллельном ему, на границе – 1,3771, на перпендикулярном – 1,3991. Это указывает на неравномерность распределения частиц ФАП в РТС и неоднородность ее структуры в рабочем зазоре. Частицы ФАП этой области из-за изменения величины и направления магнитных силовых линий не всегда перпендикулярны в отличие от периферийного их расположения. Поэтому режущий контур РТС относительно поверхности детали подразделяется на две не строго разделенные области, определяемые равномерным переходом от периметра к центру. Преваляющим фактором периферийной зоны режущего контура ввиду более жесткого закрепления зерен ФАП является процесс

резания, а по мере приближения к центру эта способность уменьшается и переходит в процесс пластического деформирования или выглаживания по причине меньшей степени влияния и величины магнитодвижущей силы.

Следовательно, процесс МАО в отличие от других видов абразивной финишной обработки осуществляется по причине специфичности природы РТС: не раздельно резание и выглаживание при последующем переходе на другие режимы (скорость, подача и др.), а в одном цикле за счет особенности распределения магнитного потока по площади магнитопровода, в частности плоского наколника.

3.2.1. Исследование режущей способности ферроабразивных порошков на основе оксидов ванадия и титана для повышения светоотражательной способности

Исследованы литые порошковые сплавы Fe-TiC и Fe-VC. Получить порошки таких составов диспергированием расплава в промышленных условиях практически невозможно из-за высокой вязкости и быстрой окисляемости, поэтому технология их изготовления включала выплавку расплава в контролируемой атмосфере в графитовом тигле, получение литых заготовок в металлических или графитовых формах, дробление слитков, рассев порошков.

Материалы для исследования: литые дробленые порошковые сплавы (С 1,5...4,0; Ti 5...15 мас. %; Fe – остальное) и (С 1,5...4,0; V 5...10 мас. %; Fe – остальное); стандартный ферроабразивный порошковый сплав Ж15КТ (ТУ 6-09-03-483–81); втулки из алюминиевого сплава Д16 (ГОСТ 4784–78); втулки из стали ШХ-15 (ГОСТ 801–78, 58–62 HRC размерами $D \times d \times L = 36 \times 29 \times 32$ мм). Оборудование и режимы МАО – станок СФТ-2.150.00.00.000; СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3%-й водный раствор, подача капельным методом при расходе 40...50 мл/мин, время обработки $t = 60$ с, величина магнитной индукции в рабочем зазоре $B = 1$ Тл, сила тока, подаваемого на катушки соленоидов электромагнитной системы, $I = 5$ А, скорость резания $V_{рез} = 1...2$ м/с, скорость осцилляции $V_o = 0,1...0,2$ м/с. Критерием оценки эффективности ФАП являлся показатель шероховатости поверхности образцов R_a , который

до обработки на тех и других марках материала составлял 0,08...0,1 мкм.

Исследованы порошковые сплавы трех составов, полученных диспергированием струи расплава воздухом или водой. Выплавку сплавов осуществляли в индукционной печи с кислой футеровкой. Технологии процесса получения порошков сплава заключались в том, что при диспергировании струи расплава контакт мелких капель с воздухом или водой приводит к образованию на поверхности порошковых частиц пленки оксидов, преимущественно титана или ванадия. Оксиды титана и ванадия и являются той фазой, которая обеспечивает абразивные свойства ФАП [187]. Исследование режущих свойств проводили на установке П-800 при следующих режимах: скорость резания обрабатываемой заготовки $V_p = 1...1,5$ м/с; магнитная индукция в рабочем зазоре $B = 0,8...1,2$ Тл; амплитуда осцилляции $A = 2$ мм; величина рабочего зазора $\delta = 1...3$ мм. В качестве образцов использовали втулки диаметром 36 мм, длиной 32 мм, и толщиной стенки 1...4 мм, материал – латунь Л63 ГОСТ 15527–70, бронза БрАЖ9-4 ГОСТ 18175–78, силумин Д16Т ГОСТ 21488–76, сталь ШХ-15 ГОСТ 801–78, 54... 60 HRC. Исходная шероховатость поверхности данных деталей составляет $R_{a1} = 1,6...2,5$ мкм. В качестве СОТС применялась СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 5%-й водный раствор. Базовый порошок – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81. Размерность как базовых, так и исследуемых ФАП составляла $\Delta = 200...315$ мкм. Выходными показателями процесса MAO являлись величина удельного массового съема металла, ΔG , г/мин и достигаемая шероховатость поверхности после MAO, R_{a2} , мкм.

Процесс изготовления металлических порошков распылением струи расплава имеет следующие особенности: при диспергировании образуются капли, которые под действием сил поверхностного натяжения стремятся получить округлую форму. При этом важную роль играют состав расплава и особенности его затвердевания. Так как при затвердевании частиц сплавов ФТ-2 и ФВ-4, имеющих значительный интервал кристаллизации и образующих оксиды тугоплавких металлов на поверхности, их форма становится угловатой, неправильной, что создает благоприятные условия для резания при MAO.

В таблице 3.4 приведены результаты сравнительных лабораторных испытаний порошковых материалов при обработке цветных сплавов.

Дисперсная структура равномерно распределенных частиц обеспечивает более низкую шероховатость поверхности по сравнению с относительно грубой структурой порошковых частиц сплава Ж15КТ.

Были исследованы данные ФАП и их результаты представлены в таблице 3.4. Установлено, что для данной зернистости ФАП на основе оксидов V (4 %, 6 %, 8 %) характерно понижение шероховатости после обработки по сравнению с Ж15КТ (рис. 3.4).

Таблица 3.4

Результаты определения режущих свойств литых порошковых материалов при магнитно-абразивной обработке

Порошок	Обрабатываемый материал							
	Латунь Л63		Бронза БрАЖ9-4		Силумин Д16Т		Сталь ШХ15	
	ΔG , г/мин	R_{a2} , мкм	ΔG , г/мин	R_{a2} , мкм	ΔG , г/мин	R_{a2} , мкм	ΔG , г/мин	R_{a2} , мкм
Ж15КТ	1,293	0,09	1,516	0,08	0,658	0,08	2,01	0,08
ФТ-2	0,328	0,04	0,465	0,05	0,299	0,04	0,633	0,04
ФВ-4	1,267	0,05	1,402	0,06	0,656	0,05	2,35	0,06

ФАП на основе оксидов Ti (5 %) имеет более низкие величины массового съема, но отличается высокими полирующими свойствами. Как видно из рис. 3.4, поверхность частиц ФАП имеет многогранную неправильную форму. На ней находится пленка оксидов, имеющая толщину 5...20 мкм. Микротвердость этой пленки колеблется от 350 до 1100 $H_{\mu(20)}$, что свидетельствует о непостоянстве ее химического состава. Вместе с тем этот вид ФАП обладает ферромагнитной матрицей, структура которой состоит из малоуглеродистого мартенсита.

Обработка порошка в дуговой азотной плазме позволяет получить порошок различной формы в зависимости от теплофизических и кинетических параметров распыления. Обработка частиц 63...100 мкм приводит к заметному сглаживанию поверхности и острых граней, а по внешнему виду порошки после распыления имеют в основном сферическую форму. Приближение формы частиц к сферической, отсутствие на поверхности частиц выступов и неровностей облегчает перемещение частиц относительно друг

друга и приводит к повышению насыпной плотности и текучести порошка.

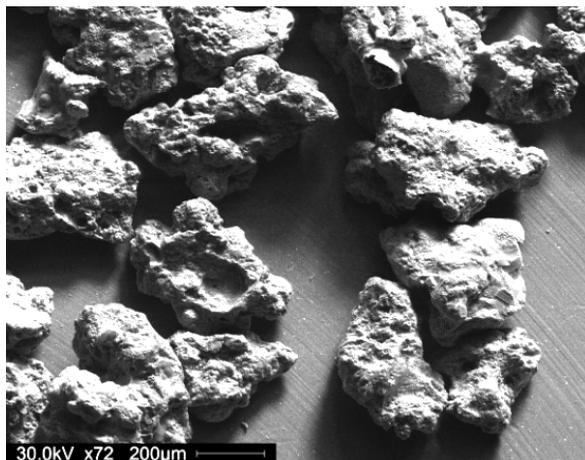


Рис. 3.4. Форма частиц ферроабразивного порошка Ж15КТ ($\times 72$)

Результаты испытаний некоторых новых порошковых материалов приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Производительность и качество обработанной поверхности материалов в зависимости от типа ФАП

Тип ФАП, 100/160 мкм		Обрабатываемые материалы				
		Дуралюмин Д16	Латунь Л63		Медь М3	
	G , г	R_{a2} , мкм	G , г	R_{a2} , мкм	G , г	R_{a2} , мкм
Ж15КТ	0,658	0,08	1,293	0,09	1,516	0,08
Fe-V 4 %	0,656	0,05	1,267	0,05	1,243	0,06
Fe-V 6 %	0,597	0,04	1,791	0,04	0,954	0,05
Fe-V 8 %	0,396	0,06	1,445	0,05	0,725	0,06
Fe-Ti 3 %	0,099	0,04	0,328	0,04	0,385	0,05

Порошки, получаемые плазменным распылением частиц размером 100...200 мкм, близки по форме частиц к порошкам после дробления, однако имеют менее развитую поверхность. Из-за больших скоростей охлаждения не происходит оплавление частиц, как это имеет место при обработке порошка мелких фракций.

Распыление на воздухе приводит к образованию мелкодисперсной структуры. Высокая скорость охлаждения при распылении в воду приводит к образованию в данном сплаве неравновесных фаз, распад которых сопровождается повышением микротвердости.

Таким образом, скорость охлаждения капель при распылении является важным параметром, влияющим на структуру и свойства распыленного порошка. Меняя технологические параметры распыления, можно изменить форму частиц и условия формирования структуры.

3.2.2. Исследование режущей способности ферроабразивных порошков на основе белого износостойкого чугуна для обработки алюминиевых сплавов

Современные белые износостойкие чугуны представляют собой отдельную группу промышленных сплавов, при затвердевании которых формируется карбидная фаза. Установлено, что высокая стойкость в условиях абразивного изнашивания типа микрорезания белых хромистых чугунов объясняется наличием в структуре значительного количества (20...50 %) твердых карбидных включений. Количество, тип и твердость карбидной фазы определяются содержанием и соотношением углерода и хрома. Для достижения максимальной износостойкости и удовлетворительной прочности чугуна содержание углерода должно составлять 2,8...3,5 %, а хрома – 12...18 %. Для исследования были выбраны порошки, полученные распылением водой расплавов высокохромистого чугуна, содержащего 2,7...3,5 % *C*, 12...14 % *Cr*, 3,8...5,2 % *V*, 2,5...3,5 % *Si*, 1,0...1,2 % *B*. Особенностью его структуры является наличие карбидных фаз двух типов. Сплавы эвтектического типа, обладающие повышенной жидкотекучестью и стойкостью к окислению, предпочтительнее получать путем распыления расплава водой и последующего рассева с выделением нужных фракций.

Металлическая основа ФАП состоит из мартенсита и остаточного аустенита. Остаточный аустенит в этом сплаве метастабилен. В процессе MAO синергетическое воздействие магнитного поля, температурного фактора, упругих и пластических деформаций приводит к частичному распаду аустенита и повышению твердости поверхностного слоя порошка. В работе исследовали влияние температуры отпуска и длительности нагрева на структурные изменения и твердость ФАП. Повышение температуры нагрева до 820 К приводит к росту твердости до 7900 МПа, что оказывает положительное влияние на величину съема (табл. 3.6) и связано с частичным превращением остаточного аустенита в мартенсит и увеличением количества карбидной фазы.

Повышению режущей способности ФАП должно способствовать обнажение из более мягкой ферромагнитной основы зерна (матрицы) абразивных компонентов. Этого можно достигнуть путем химического травления ФАП. Химическое травление было использовано для повышения абразивных свойств порошка. В качестве травителя использовали 25%-й раствор серной кислоты в воде. Продолжительность травления составляла 180 минут. В работе также исследовали возможность повышения режущей способности ФАП травлением порошка царской водкой. Съем металла травленным порошком с образцов разных сплавов больше, чем порошком базового состава.

Следует отметить отсутствие визуально наблюдаемого загрязнения поверхности деталей и рабочей зоны в отличие от применяемых в настоящее время ФАП Ж15КТ (ТУ 6-09-03-483–81) и ПолиМAM-Т (ТУ 06459–81). Сферическая форма зерен обеспечивает высокую стойкость ФАП при транспортных операциях и хранении, а также в процессе резания.

Например, микротвердость ферромагнитной матрицы находится в пределах – 6310...6350 МПа, а первичных карбидов – 12150...12400 МПа, а после MAO стали ШХ 15 в течение 2 минут эта микротвердость возросла до 7000...7100 МПа. Первичные и эвтектические карбиды белых хромистых чугунов устойчивы к высокотемпературному нагреву, что позволяет изменять структуру неметаллической основы в процессе термической обработки при практически неизменном количестве и расположении включений карбидов.

Таблица 3.6

Влияние различных видов обработки ФАП
на параметры шероховатости и съема металла

Режим обработки ФАП	Параметры качества	Марка обрабатываемого материала			
		Д16 ГОСТ 4785–74		ШХ-15 ГОСТ 801–78	
		Длительность полирования, с			
		60	180	60	180
ФАП на основе износостойкого чугуна	R_a , мкм G , мг	0,3...0,4 45	0,25...0,4 150	0,15...0,2 50	0,1...0,15 180
То же, отжиг при $T = 820$ К	R_a , мкм G , мг	0,35...0,45 70	0,3...0,4 200	0,15...0,25 100	0,1...0,2 250
То же, травление царской водкой	R_a , мкм G , мг	0,4...0,5 70	0,3...0,4 200	0,2...0,25 50	0,1...0,3 250

Отпуск при температуре 470 К не влияет на структуру и твердость ФАП. При увеличении продолжительности отпуска до 60 мин начинается распад мартенсита, что снижает твердость. Повышению режущей способности ФАП способствует обнажение из более мягкой ферромагнитной матрицы абразивных компонентов. Это достигается путем химического травления ФАП царской водкой (смесь соляной и азотной кислот). Исследование проводили на установке СФТ.2.150.00.00.000 при следующих режимах: скорость резания, $V_p = 1...1,5$ м/с; магнитная индукция $B = 0,8...1,2$ Тл; амплитуда осцилляции, $A = 2$ мм; величина рабочего зазора, $\delta = 1...3$ мм. В качестве образцов использовали втулки $D \times d \times l = 36 \times 29 \times 32$ мм, сталь – ШХ-15, твердость 52...62 HRC, и $D \times d \times l = 36 \times 34 \times 32$ мм, сплав алюминиевый – Д-16. Исходная шероховатость поверхности данных образцов составляет $R_{al} = 1,6...2,5$ мкм. СОТС СинМА-1 применялись как базовые, так и модифицированные. Результаты исследования с использованием СОТС СинМА-1 (модифицированные)

представлены в таблице 3.6 при ФАП с травлением царской водкой. Следует отметить отсутствие визуального наблюдаемого загрязнения поверхности деталей в рабочей зоны в отличие от применяемых в настоящее время Ж15КТ и ПолиМAM-Т.

3.2.3. Исследование режущей способности ферроабразивных порошков на основе боридов железа для обработки бронзовых и латунных сплавов

На диаграмме состояния системы Fe-B имеются следующие фазы: твердые растворы бора в α и γ -железе, бориды железа Fe_2B , FeB, FeB_x . Однако растворимость бора в железе незначительна. Сравнение свободных энергий образования боридов группы железа и боридов металлов VI группы (TiB_2 , ZrB_2) показывает, что термодинамически процесс образования первых выгоден. Сопоставительный анализ с оригиналом показывает, что предлагаемый сплав отличается от известного содержанием кремния, углерода, боридов железа и не содержит титана, алюминия и фосфора (табл. 3.7) [204, 205].

Выбранные пределы концентрации кремния и углерода обеспечивают высокие прочность, плотность и магнитные свойства сплава. Содержание в выбранных пределах карбидов бора и боридов железа придает сплаву высокие абразивные свойства. При содержании углерода менее 0,7 % затрудняется измельчение сплава, и снижаются его абразивные свойства. При содержании углерода более 3 % уменьшаются магнитные свойства из-за повышения количества ледебуритной составляющей. При содержании кремния менее 0,3 % падает жидкотекучесть сплава, и ухудшаются его литейные свойства, при концентрации данного элемента более 3,6 % сплав становится хрупким. При концентрации карбидов бора менее 0,6 % снижаются абразивные свойства порошка, при содержании их более 8 % падают магнитные свойства. Аналогичная ситуация наблюдается с боридами железа. При их содержании менее 1 и более 6 % падают, соответственно, абразивные и магнитные свойства материала [192].

В качестве примера осуществлено изготовление ферромагнитного абразивного материала, химический состав которого представлен в таблице 3.7. В таблице 3.8 приведены результаты испытаний

эксплуатационных свойств предлагаемого материала при обработке поверхности образцов на алюминиевой и медной основе. Наряду с опытными материалами проводили изготовление и испытания материала, выбранного в качестве образца.

Таблица 3.7

Химический состав опытных сплавов

№ п/п	Вид сплава	Уровень содержания компонентов	Содержание компонентов, мас. %							
			C	Si	BC _x	FeB _x	P	Ti	Al	Fe и примеси
1	Прото-тип	средний	1,60	8,75	0,30	0,65	0,30	2,3	1,7	остальное
2	Предла-гаемый	нижний	0,70	0,30	0,60	1,00				“
3		верхний	3,00	3,60	8,00	6,00				“
4		средний	2,35	2,95	4,30	3,50				“
5		выше верхнего	3,30	3,95	8,80	6,60				“
6		ниже нижнего	2,06	0,27	0,54	0,90				“

Таблица 3.8

Показатели MAO известного и предлагаемого ФАП

№ п/п	Латунь Л63		Бронза Бр АЖ9		Сплав Д 16	
	R _{a2} , мкм	ΔG, г/мин	R _{a2} , мкм	ΔG, г/мин	R _{a2} , мкм	G, г/мин
1	0,069	0,0169	0,058	0,0280	0,055	0,0150
2	0,040	0,0470	0,050	0,0230	0,055	0,0460
3	0,060	0,0264	0,055	0,0095	0,055	0,0140
4	0,054	0,0350	0,050	0,0180	0,060	0,0345
5	0,060	0,0140	0,055	0,0340	0,065	0,0280
6	0,063	0,0160	0,060	0,0105	0,070	0,0160

Критерием качества порошка служили следующие показатели: шероховатость обработанной поверхности, мкм, удельный съем металла, г/ мин; R_{a1} – исходная шероховатость поверхности, 1,6...2,5 мкм; R_{a2} – шероховатость поверхности после МАО, мкм; ΔG , г/мин – удельный съем материала при обработке; размер частиц ФАП – 200/315 мкм.

Испытания материала проводили при следующих режимах: магнитная индукция в рабочем зазоре B – 1 Тл, скорость вращения детали 1 м/с, скорость осцилляции полюсных наконечников 0,2 м/с, время обработки – 60 с. СОТС – 1,5%-й водный раствор СинМА-1 (ТУ 38.5901176–91). Из таблицы 3.9 следует, что предлагаемый абразивный материал по удельному съему металла с обрабатываемой поверхности значительно превосходит Ж15КТ, обеспечивая его экономичность и экологическую чистоту обработки.

Повышение температуры нагрева смеси при спекании приводит к образованию жидкой фазы преимущественно сплава железо-бор, в то время как частицы синтезированного железоуглеродистого сплава остаются в твердом состоянии. На границе жидкой и твердой фаз происходит ускоренная диффузия бора из жидкой фазы в твердую и диффузия углерода из объема твердой фазы на поверхность порошковой частицы с образованием устойчивого химического соединения B_4C . Продолжительность выдержки выбрана такой, при которой указанные процессы успевают произойти преимущественно на границе жидкой и твердой фаз, в результате чего частицы железоуглеродистого сплава оказываются обедненными углеродом. При измельчении спека разделение частиц происходит преимущественно по бывшим границам жидкой и твердой фаз. При этом частицы ФАП сохраняют первоначальную форму и размеры, их центральная часть оказывается обедненной углеродом и имеет высокие магнитные свойства, а на поверхности частиц образуется прочный твердый слой из карбидов бора и боридов железа, обеспечивая материалу высокие абразивные свойства. При соотношении компонентов порошковой смеси (40...80) % железоуглеродистого сплава и (60...20) % ферробора нагрев до температур 1030... 1200 °С и выдержка от 30 до 60 мин обеспечивают присутствие в материале карбидов бора и боридов железа на уровне, соответственно, 0,6...0,8 и 1...6 мас. %, при котором материал обладает максимальными режущими свойствами. Установлены

коэффициенты корреляции режущих свойств ферроабразивных в лигатуре сплава абразивного компонента BC_x , мас. % (8:6,5:3,2).

Таким образом, предлагаемый способ получения ФАП позволяет упростить его компонентный состав и обеспечивает высокие эксплуатационные свойства при обработке металлических изделий.

3.3. Механизм влияния смазочно-охлаждающих технологических средств на интенсивность съема металла при магнитно-абразивной обработке

Движение СОТС под влиянием градиента давления производится вынужденным путем через нерегулярно расположенные поры между частицами ФАП. Нерегулярность порового распределения обусловлена морфологией частиц ФАП и их перемещением относительно детали в трех координатных плоскостях, что обеспечивает перекрытие порового пространства как функции от времени. Это приводит к изменению проницаемости СОТС по причине изменения сопротивления РТС, в том числе и гидравлического, которое, в свою очередь, определяется течением СОТС в капиллярах пористой среды.

В работе [206] показано, что перемешивание частиц ФАП в зоне обработки обеспечивает повышение производительности процесса МАО более чем в 2 раза по сравнению с первоначальным. Поэтому следующим этапом подбора СОТС для РТС является уменьшение вязкости, но это приводит при сохранении развитого микрорельефа частиц ФАП к падению диспергирующей и смазывающей способностей при увеличении моющей и охлаждающей. Поэтому синтетические СОТС СинМА-1 и СинМА-2, обладая рядом положительных свойств, при своем использовании не обеспечивают такой производительности, как эмульсии, что приводит к повышенному износу частиц ФАП режущего контура.

В работах [207, 208] показано, что закон Дарси носит локальный характер и недостаточно полно определяет фильтрационное течение в широком диапазоне сред и режимов протекания. Также важным вопросом для процесса МАО являются критериальные соотношения основных типовых структур сред РТС по их характеристикам. Картина течения СОТС в каналах РТС представляется следующим

образом: каждый капилляр является цепочкой пор разных форм и размеров, которые соединены каналами поперечного сечения, и действуют согласно принципу гофрированного материала при условии того, что поверхности каналов обладают определенным микрорельефом.

В массе порошка-инструмента имеет место фильтрация – расслоение СОЖ, масляная составляющая концентрируется в зоне обработки и на поверхности детали, увеличивает вязкость и прочность пленки. В итоге снижается интенсивность процессов резания и выглаживания, а также затрудняется очистка-мойка обработанной детали.

В таблице 3.9 приведены данные о пленках шламов, образующихся при использовании различных СОЖ.

Таблица 3.9

Состав и характеристики прочности пленок шлама при использовании различных СОЖ [209]

Вид СОЖ	Компоненты пленки, %			Способ удаления пленки
	твердые	масляные	водные	
5 %-й водный раствор эмульсола Э2	65	12	23	Специальные растворители, ультразвуковая или механическая очистка
Водный раствор триэтанол-амин (1 %), керосина (1,5 %) и олеиновой кислоты (0,5 %)	91	2	7	Растворители
3 %-й водный раствор Аквол-10	98	-	2	Не требует специальных средств очистки

Авторами исследований [210] отмечены как наиболее важные диспергирующий и моющий эффекты СОЖ в процессе МАО. Моющий эффект СОЖ проявляется многопланово и обусловлен ее химическим составом. Применяемые при МАО СОЖ должны иметь пониженную вязкость, обладать способностью проникать в микронеровности рельефа, смачивать их поверхность и обеспечивать

абсорбцию молекул ПАВ. Кроме этого, важнейшей функцией СОЖ является удаление из зоны обработки и с поверхности детали пленки шлама, состоящей из продуктов диспергирования материала и частиц износа и разрушения ферроабразивных зерен. Присутствующие в СОЖ молекулы поверхностно-активных веществ (ПАВ) абсорбируются на стенках микротрещин, снижают поверхностную энергию, разупрочняют тонкий поверхностный слой и облегчают его диспергирование при обработке. Отмечена преимущественная концентрация молекул ПАВ на вершинах выступов микронеровностей, что благоприятно сказывается на результатах реализации абразивных способов, в том числе и МАО [211].

3.3.1. Механизм действия смазочно-охлаждающих технологических средств на сьем металла

Ювенильное состояние поверхности металла после среза, наличие микротрещин и растягивающих напряжений в приповерхностном слое при сравнительно небольших скоростях осуществления процесса финишной обработки способствуют развитию адсорбирующего эффекта – снижению прочности металла в присутствии поверхностно-активных веществ-компонентов СОЖ [211, 212]. Действие адсорбции проявляется в том, что ПАВ снижает поверхностную энергию металла, способствует зарождению пластических сдвигов и развитию дефектов структуры твердого тела, непрерывно развивающихся в процессе упругой и пластической деформации [213].

Установлено, что процесс МАО при контакте двух материалов, зерна ферроабразивного порошка и детали, резко отличающихся по твердости, абсорбционно-пластифицированный слой сосредотачивается в более мягком материале детали. Следовательно, применение СОЖ с активными компонентами позволяет управлять граничными условиями, акцентируя сдвиговые деформации в тонком слое удаляемого металла без их проникновения вглубь обрабатываемого изделия. В результате охрупчивания тонкого поверхностного слоя снижаются затраты энергии на пластическое деформирование и диспергирование металла в процессе обработки [214].

Современные представления о механизме действия СОТС, способствующих интенсификации процесса резания металлов, базируются на работах [215–217], объясняющих эффект адсорбционного

понижения прочности металлов в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ). Данными исследованиями установлено, что влияние СОТС обусловлено адсорбционным воздействием непосредственно на ювенильную поверхность обрабатываемого металла. Действие адсорбции состоит, прежде всего, в том, что ПАВ, понижая поверхностную энергию металла, способствует зарождению пластических сдвигов и развитию дефектов при значительно меньших напряжениях. Этому воздействию подвергаются, прежде всего, дефекты структуры реального твердого тела, непрерывно развивающиеся в процессе упругой и пластической деформации с образованием новых дефектов.

По данным [212], поверхностные дефекты представляют собой микроскопические и субмикроскопические трещины и щели клиновидного сечения, в которых свободная поверхностная энергия возрастает от 0 до максимально нормального значения на поверхности тела.

Установлено, что при МАО цветных металлов, каким является бронза БрАЖ9-4 ГОСТ 18175–72, из которой изготовлены детали оборудования пищевой промышленности – головки делителя теста ШЗ-ХДУ-33, имеет место явление структурной приспособляемости [209]. Одним из предлагаемых способов устранения данного недостатка служит повышение моющего действия СОТС, заключающегося в росте интенсивности вымывания из зоны обработки продуктов диспергирования металла и изношенных частиц ферроабразивного порошка (ФАП) [210].

На рис. 3.5 представлено адсорбционно-расклинивающее действие полярных молекул. Отличительной особенностью эффекта П.А. Ребиндера является его действие только при совместном участии среды и определенного напряженного состояния поверхностного слоя. Когда молекулы ПАВ достигают мест, где ширина трещины равна размеру одной, двух молекул, адсорбционный слой своим давлением стремится расклинить эту трещину. Давление на стенки трещины ее вершины может достигать до 10 ГПа. Таким образом, деформация поверхностного слоя создает предпосылки для проявления расклинивающего действия, которое затем интенсифицирует саму деформацию. Следовательно, речь идет о принципе самоорганизации деформированных процессов, реализующихся на уровне очагов деформации, переходных областей и связей между ними.

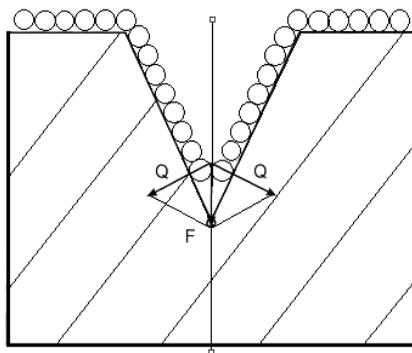


Рис. 3.5. Схема адсорбционно-расклинивающего действия полярных молекул

Разработка СОТС для МАО представляет собой переход от грубодисперсных систем типа эмульсий к высокодисперсным полукolloидным, размер частиц дисперсной фазы которых равняется $10^{-4} \dots 10^{-6}$ мм. Это обусловлено как интенсивным фильтрованием вязких компонентов эмульсий рабочей среды, так и магнитно-электрическими явлениями, способствующими расслоению сложных грубодисперсных систем.

3.3.2. Механизм действия смазочно-охлаждающих технологических средств при магнитно-абразивной обработке эвольвентных поверхностей

При МАО тип потока СОТС различен в начале его формирования и в зоне обработки (при выходе СОТС из сопла – движение жидкости ламинарно, а при контакте с вращающейся деталью и инструментом поток жидкости турбулентен). Тип потока СОТС в зоне обработки оказывает существенное влияние на эффективность его функционального действия. С повышением турбулентности потока усиливается охлаждающее, моющее действия, а при ламинаризации – смазочное и проникающее действия.

Величиной, определяющей изменение типа потока, является число Рейнольдса (Re), а устойчивость течений – число Стюарта (N):

$$Re = \frac{w_0 R}{\nu}; \quad N = \frac{\sigma B^2 R}{\rho w_0}, \quad (3.1)$$

где w_0 – скорость потока жидкости, м/с; R – радиус канала, мм; ν – кинематическая вязкость, сСт; δ – электрическая проводимость, см; B – магнитная индукция, Тл; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

На рис. 3.6 приведены линии потока СОТС для различных случаев положения пазов при обработке зубчатого колеса (рис. 3.7) при наложении магнитного поля. При наложении поперечного магнитного поля (область I, рис. 3.6) зона вихря резко сокращается (рис. 3.6, а), и течение стремится к безотрывному. При $Re = 50$ и $N = 12$ отрыв потока, т. е. вихрь, при течении в поперечном поле не обнаруживается [218].

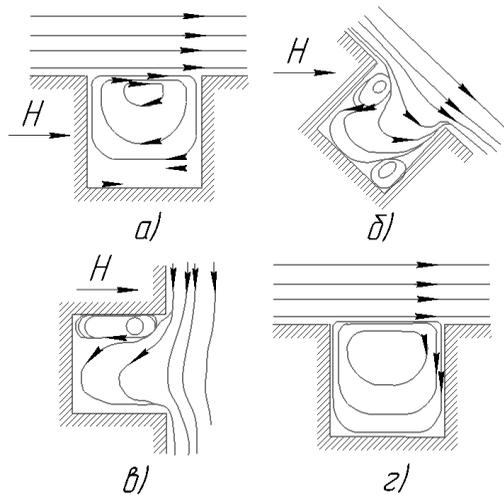


Рис. 3.6. Линии потока СОТС при обтекании паза зубчатого колеса:
а – область I; б – область II; в – область III; г – без магнитного поля

Совершенно иная картина наблюдается в продольном магнитном поле (область III, рис. 3.6). В этом случае вблизи дна образуется еще один вихрь с противоположным направлением (рис. 3.6, в). По мере возрастания поля размер этого вихря возрастает, и при $Re = 50$ и $N = 50$ этот вихрь занимает около половины паза. Своеобразная картина течения получается, когда магнитное поле наклонено к оси паза под некоторым углом (область II, рис. 3.6). Течение в пазу как бы ориентируется вдоль поля (рис. 3.6, б).

Наблюдается также тенденция к безотрывности течения, хотя в правом углу образуется второй небольшой вихрь.

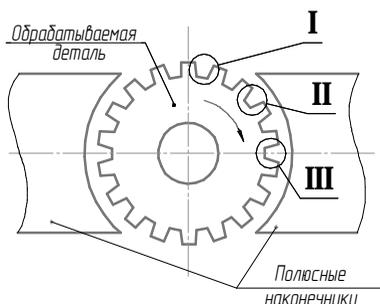


Рис. 3.7. Схема магнитно-абразивной обработки зубчатого колеса

На основании вышеизложенного можно отметить, что для улучшения качества поверхности зубчатых колес при MAO целесообразно применять реверсивное движение детали, по несколько раз меняя направление движения. Полученные расчеты показывают, что градиент давления, образуемый магнитной индукцией в зоне паза зубчатого колеса и определяемый давлением и типом потоков СОТС, направлен по ходу вращения обрабатываемой детали.

Таким образом, для получения при MAO одинакового значения шероховатости с двух сторон эвольвентной поверхности зуба целесообразно использовать реверсивное вращение детали, обеспечивающее равномерное распределение РТС на рабочие поверхности зуба. Цикл обработки детали необходимо выполнять 2 мин в одну сторону и 30 с – в обратную.

3.3.3. Механизм анодного растворения углеродистых сталей

Известно, что процесс анодного растворения металлов и сплавов является гетерогенным, происходящим на границе раздела фаз «металл-электролит» и состоящим из ряда одновременно протекающих последовательных или последовательно-параллельных элементарных стадий [219–220]. Диспергирование и пластическое деформирование поверхностного слоя при абразивной обработке усиливается химическими и адсорбционными процессами,

происходящими на поверхности детали в присутствии химических или поверхностно-активных веществ. Процесс микрорезания при МАО сопровождается разрушением и удалением непрерывно образующихся на обрабатываемой поверхности химических пленок, преимущественно оксидных, прочность которых ниже прочности основного металла. Под действием сил резания, трения и адгезии в этих микрообъемах металла создаются растягивающие напряжения и развиваются микротрещины, создаются благоприятные условия для миграции в них активных молекул.

В работах [67] установлено, что интенсификации процесса съема металла при МАО способствуют электрохимические явления, связанные с циклическим появлением и взаимодействием электрических зарядов на поверхности перемещающейся в магнитном поле детали. В работе [221] выявлено, что СОЖ выступают не только как носители ПАВ, но как электролит, что обеспечивает в зоне обработки процесс электролиза, и в результате электрохимического растворения производится съем поверхности с обрабатываемой заготовки.

В работе [222] осуществлено электрохимическое травление при МАО. При вращении заготовки под катодом образуется химическая пленка, которая затем легко удаляется при прохождении этого участка обрабатываемой поверхности мимо полюсных наконечников электромагнита с размещением в рабочем зазоре ферроабразивным порошком.

Магнитно-абразивное полирование закаленной стали марки У8А подтвердило возможность повышения производительности полирования [222]. В качестве электролита использовали 10 %-й раствор NaCl. Проведение МАО с электрохимическим травлением позволило увеличить интенсивность удаления припуска в 1,5 раза по сравнению с обработкой без электрохимии в присутствии СОЖ – 5 %-го раствора эмульсов Э2.

Согласно современным общепринятым представлениям об анодном растворении металлов по механизму комплексообразования с переходом в раствор простых ионов, ионизация металла начинается с образования комплекса металла с анионами раствора путем адсорбции анионов и (или) молекул воды на поверхности металла [223–226]. В роли анионов могут также выступать и гидроксильные ионы OH^- [223]. На первой стадии (1) происходит обратимая

адсорбция аниона раствора электролита A^- на поверхности металла. Затем на стадиях (2) и (3) по электрохимическому процессу происходит последовательное присоединение к образованному комплексу $Me^-_{\text{адс}}$ дополнительных $(n-1)$ анионов с потерей $(n-1)$ электронов до образования адсорбционного комплекса $Me^-_{\text{адс}}$ со степенью окисления металла Me^{n+} .

В [227] экспериментально установлено, что на первых стадиях растворения железа в галоидных и сульфатных растворах на поверхности железа происходит образование как адсорбционных комплексов с участием хемосорбированных молекул воды, так и короткоживущих адсорбционных комплексов соответственно и с участием хлорид- и сульфат-ионов. Образуются короткоживущие адсорбционные комплексы и прочные адсорбционные комплексы.

Поверхностный комплекс с участием хлорид- и сульфат-ионов обладает пониженной стойкостью из-за деформации связей под влиянием отрицательного заряда аниона Cl^- [227]. На поверхности железа формируется солевая пленка $Fe|$. На завершающей стадии происходят образование и переход в раствор электролита хорошо растворимого адсорбционного комплекса с последующим его распадом на простые ионы.

Для объяснения анодного растворения железа в сульфатных растворах по механизму комплексообразования предложено несколько схем [224, 225]. Их основной отличительной особенностью является первая стадия ионизации – стадия адсорбции. Предполагается, что на поверхности железа первоначально адсорбируются либо гидроксильные ионы OH^- , либо сульфат-ионы So_4^{2-} , либо молекулы воды. Анодное растворение металлов, входящих в состав конструкционных углеродистых сталей, происходит по механизму комплексообразования через ряд последовательных или последовательно-параллельных промежуточных стадий. На первой стадии на поверхности металлов образуются адсорбционные комплексы с участием хемосорбированных молекул воды. В последующих стадиях принимают участие анионы раствора электролита и (или) молекулы воды. На заключительной стадии растворения на поверхности анода образуются растворимые в воде соединения, которые при переходе в раствор диссоциируют на простые ионы.

3.3.4. Влияние активирующих технологических сред на процесс резания материалов

Установлено, что на интенсивность процесса резания при МАО оказывают силы трения, возникающие между поверхностью стружки и абразивного зерна [228]. Специфика трения при МАО состоит в том, что частица ФАП при резании, будучи структурирована энергией электромагнитного поля, является подвижно координированной, что обуславливает изменение ее переднего угла при контакте с обрабатываемой поверхностью. Изменение переднего угла приводит к изменению коэффициента трения, который, в свою очередь, зависит от следующих факторов: материалов обрабатываемого и обрабатывающего, режимов обработки, применяемых СОТС.

Рассмотрим комплекс явлений, происходящих в результате контакта единичного абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью детали, среди которых наиболее важны: упругая деформация, пластическая деформация, деформация сдвига. Данный вид деформации происходит как последовательно, так и одновременно, но каждая последующая стадия не произойдет, не минуя предыдущую [229]. Это зависит от отношения a/ρ (где a – толщина среза приходящегося на единичное зерно, ρ – радиус закругления вершины зерна), характеризующего процесс стружкообразования.

Характеризующее начало стружкообразования примет вид:

$$\frac{a}{\rho} > 1 + \frac{1}{1 + \mu^2} \left(\frac{\mu^2}{\eta} - \sqrt{1 + \mu^2 - \frac{\mu^2}{\eta^2}} \right). \quad (3.2)$$

Зависимость деформации сдвига a/ρ в значительной степени связана с коэффициентом трения μ . В свою очередь, данный коэффициент, поскольку относительный сдвиг происходит в масляном слое, во многом связан с вязкостью этой среды [214]. Наличие свободных ненасыщенных связей в кристаллической решетке ювенильных поверхностей приводит к схватыванию, что в зависимости от масштаба процесса может привести к снижению шероховатости слоя обрабатываемого материала. Поскольку в современном производстве на обрабатываемый материал заготовки для ее формообразования используются средства механического

и немеханического воздействия (электрофизическое, магнитное, электронное и т. д.), то данное наложение концентрированных потоков энергии приводит к ряду изменений физико-химических показателей среды, в частности вязкости.

Следовательно, при подборе СОТС для MAO необходимо учитывать ее влияние на коэффициент трения. Показатели среды, в которой происходит процесс резания, существенно влияют на его критические параметры. Поверхность обрабатываемого материала представляет собой многоэлектродный гальванический элемент, состоящий из двух или более электродов и характеризующийся как система участков «катод–анод» [221]. При наличии в дисперсионной среде СОТС ионов ионостабилизированных примесей под влиянием ЭМП проявляется электрический характер процессов, что сопровождается нарушением водородных связей и приводит к протеканию электромеханических реакций ввиду нарушения электронейтральности и выделению водорода. В случае абразивной обработки, в частности методом MAO, электрохимическая неоднородность поверхности такого металла приводит к дифференциации последней на анодные (с более отрицательным электронным потенциалом) и катодные (с более положительным электронным потенциалом) составляющие.

В результате проведенных исследований установлено, что при наложении МП в электролите происходит отклонение пути перехода образующегося водорода от анода к катоду в соответствии с расположением электролита при величине магнитной индукции $B = 0,15$ Тл (что указывает на активность процесса поляризации).

3.3.5. Разработка смазочно-охлаждающих технологических средств для магнитно-абразивной обработки цветных материалов

Природным прототипом композиций СОТС для MAO служит белково-фосфолипидный комплекс, из которого состоят все биологические мембраны и оболочки естественных эмульсий [232]. Однако наибольшее влияние на выбор СОТС при MAO оказывают экономические и производственные факторы, включающие сырьевую базу, технологию изготовления, энергетические ресурсы. Одним из важных проявлений свойств СОТС служит их моющее действие. Ранее для MAO в качестве СОТС применялись эмульсии

на основе эмульсов ЭТ, ЭГТ, Э-2. Однако наличие грубодисперсной ($10^{-1} \dots 10^{-2}$ мм) фазы таких эмульсий приводило к прекращению фильтрации СОТС ферроабразивной «щеткой» [63]. Следующий этап исследования [233] показал, что наиболее приемлемой заменой такого рода СОТС являются ПАВ на базе гликолей. Однако необходимость обработки методом MAO вязких и пластичных материалов, в том числе и цветных, требует создания нового типа СОТС. Это обусловлено тем, что синтетические жирные кислоты, на основе которых разработаны широко применяемые СОТС СинМА-1 и 2 ТУ 38.5901176–91 имеют низкую (70...80 С) термостойкость, вследствие чего происходит падение эффективности моющего действия [234]. Интенсивность накопления субстрата обработки после MAO зависит от соотношения частиц субстрата и поровых сужений (горло поры). В случае если характерный размер частиц субстрата больше характерного размера порового сужения, то частицы оседают на поверхности РТС, образуя внешнюю фильтрационную корку с отсутствием проницаемости. Такими свойствами обладают представители полусинтетических СОТС, которые в своем составе имеют некоторое количество нефтяных масел. Примером эффективного использования полусинтетических СОТС является применение Аквапол-1 ТУ 38.1011061-86 при MAO цветных сплавов. На рис. 3.8–3.11 представлены результаты исследования прохождения различных видов СОТС при наложении магнитного поля и в его отсутствие в поровом пространстве ФАП, что указывает на воздействие фактора энергетического воздействия магнитного поля.

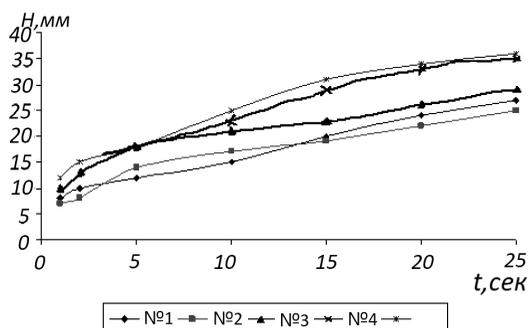


Рис. 3.8. Зависимость высоты H столба от времени протекания t жидкости через ФАП без магнитного поля:
 1 – СОЖ 1; 2 – СОЖ 2; 3 – NaCl; 4 – техническая вода; 5 – дистиллированная вода

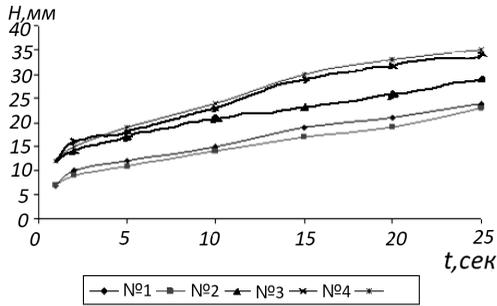


Рис. 3.9. Зависимость высоты H столба от времени протекания t жидкости через ФАП с магнитным полем:
 1 – СОЖ 1; 2 – СОЖ 2; 3 – NaCl; 4 – техническая вода; 5 – дистиллированная вода

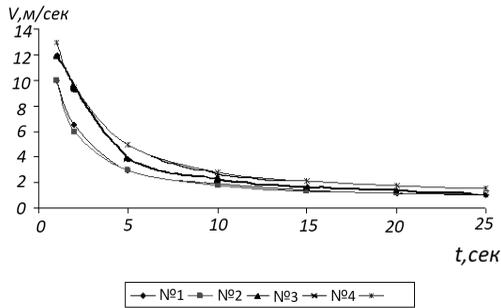


Рис. 3.10. Зависимость скорости V от времени протекания t жидкости через ФАП без магнитного поля:
 1 – СОЖ 1; 2 – СОЖ 2; 3 – NaCl; 4 – техническая вода; 5 – дистиллированная вода

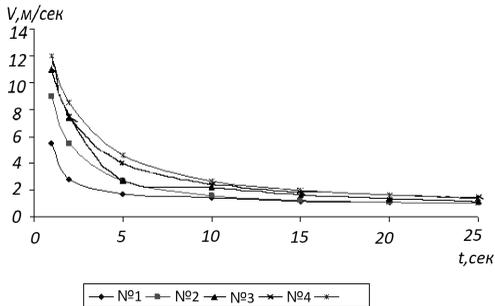


Рис. 3.11. Зависимость скорости V от времени протекания t жидкости через ФАП с магнитным полем:
 1 – СОЖ 1; 2 – СОЖ 2; 3 – NaCl; 4 – техническая вода; 5 – дистиллированная вода

Однако наличие доли нефтяного масла в СОТС приводит к сводовой кольматации порового пространства РТС. С целью образования механизма мобилизации частиц в поток СОТС, совпадения их физических скоростей и создания ситуации, когда данные частицы полностью увлекаются несущей фазой, были применены СОТС с высокой пенообразующей способностью типа Пенол-1 и Пенол-2 ТУ 38-5901218–90. [235]. Пена и пористая среда в виде РТС вместе создают физический объект, который обладает рядом особых свойств. Кинетика трансформации и динамики течения газожидкостной системы при циклической подаче пенообразующего раствора СОТС Пенол-1 и Пенол-2 в насыщенную субстратом отходов РТС обеспечивается механизмом гидродинамической неустойчивости течения многофазной системы при наличии в данной системе волн давления, создаваемых вибрацией щеток ФАП. Пена в пористой среде представляет собой систему, эффект которой заключается в образовании аномально высокого сопротивления движению (на 1...3 порядка выше, чем у материальной жидкости), что является возможным инженерным решением задачи удаления субстрата отходов из РТС в процессе MAO. Большим достоинством использования пенного столба служит то, что для его получения требуется до 1 % пенообразующих ПАВ в СОТС, достаточно доступных и дешевых. Это гарантирует рост эффективности процесса MAO, так как подобные структуры субстрата снижают диспергирование обрабатываемого материала.

Проблемой для процесса MAO является обработка алюминиевых сплавов из-за потемнения обработанной поверхности при обработке железосодержащими ФАП. Для устранения данного эффекта необходимо применять СОТС на основе сульфогрупп и их производных, которые обеспечивают образование избыточной фазы FeS и ее укрупнение. Это объясняется тем, что любое количество серы или ее соединений образует сульфид железа, инертный по отношению к алюминию, и поэтому данный сульфид железа практически в нем не растворим. Это позволяет эффективно выводить сульфид железа из рабочей зоны в виде шлама, что обеспечивает высокую светоотражательную способность обработанной поверхности. Механизм действия МП на РТС представляется следующим образом: в СОТС происходит разрушение агрегатов, состоящих из субмикронных ферромагнитных частиц Fe, находящихся

в определенной концентрации, которая по мере увеличения продолжительности процесса MAO возрастает, так как зерна ФАП обладают ферромагнитной матрицей. Подобное разрушение агрегатов приводит к резкому повышению центров кристаллизации масляных глобулей и формированию на поверхности ферроабразивных частиц пузырьков газов микронных размеров, обеспечивая газлифтный эффект. В результате разрушения агрегатов парафинированные масляные глобулы выпадают в виде тонкодисперсной и объемной взвеси, осаживающейся на микрорельефе частиц ФАП [236]. Известную роль при этом играет повышение температуры, но решающим фактором столь быстрого засаливания РТС в отличие от шлифования выступает значительное ускорение коагуляции и коалесценции масляных глобулей под действием МП [237].

В качестве оборудования применялись установки СФТ 2.150.00.00.000 для MAO и СФТ 10.125.00.00.000 для производства СОТС методом эжекционно-волновой технологии. Образцы – прутки диаметром 45 мм. Материал – бронза Бр ОФ 10-5 ГОСТ 18175–78, латунь Л63 ГОСТ 15527–70 и медь М3 ГОСТ 859–81. СОТС – 5 %-е водные растворы СинМА-1 и -2, и Э-2 ГОСТ 4244–75, ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-483–81, размер зерна, $\delta = 100/160$ мкм. Производительность обработки определялась по величине удельного массового съема материала.

В работе [237] выявлено, что использование СОТС Аквапол-1 ТУ 38.1011061–86 обеспечивало интенсификацию процесса MAO цветных металлов в сравнении с СинМА-1 и СинМА-2. Анализ представленного состава СОТС Аквапол-1 позволил сделать вывод, что наличие в нем нефтяного масла приводит к увеличению дисперсности системы и оптимизации физико-химических показателей для производительного протекания процесса MAO. Требуемый результат достигается применением эжекционно-волновой технологии для получения эмульсии с дисперсностью 10^{-3} или близкой к этому показателю. Данная технология обеспечивает средний диаметр частиц 1...5 мкм. Однородность эмульсии достигается 3...5-кратностью протекания смеси через эжекторную камеру. Проведение испытания СОТС, приготовленной таким образом с использованием эжекционно-волновой технологии на установке СФТ 10.125.00.00.000, показали, что производительность

и качество MAO цветных материалов этой эмульсии превышают аналогичные показатели СОТС СинМА-1 и 2 в среднем на 20 % (табл. 3.10).

Таблица 3.10

Производительность и качество обработки методом MAO при использовании различных составов СОТС

Вид материала	СинМА-1		СинМА-2		Э-2	
	ΔQ , мг/см ² · мин	R_{a2} , мкм	ΔQ , мг/см ² · мин	R_{a2} , мкм	ΔQ , мг/см ² · мин	R_{a2} , мкм
Латунь Л63	6,31	0,12	6,49	0,1	6,58	0,12
Бронза Бр ОФ 10-5	5,71	0,16	6,01	0,09	7,27	0,1
Медь М3	11,52	0,08	10,37	0,11	12,11	0,09

Также необходимо установление некоторого критерия для обеспечения прогнозирования эффективного протекания процесса MAO. Предлагаемым вариантом этого критерия является показатель динамической вязкости СОТС.

Например, согласно формуле Ньютона, удельный тепловой поток q от твердого тела с температурой t_τ к жидкости определяется:

$$q = \alpha(t_\tau - t_{ж}), \quad (3.3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи Дж/(м²·К); $t_{ж}$ – температура жидкости, К.

Наиболее очевидной причиной насыщения остаточным углеродом поверхностного слоя обрабатываемых изделий является снижение моющих свойств, традиционно применяемых при MAO

СОТС СинМА-1 и СинМА-2 ТУ 38.5901176–91. Вместе с тем существенный недостаток производной гликоля заключается в высокой склонности к окислению с образованием кислотных, коррозионно-активных агентов в процессе эксплуатации. Кроме того, гликоли не обладают достаточной огнестойкостью, имеют низкую температуру вспышки, что затрудняет их хранение и консервацию. Установлено [212], что жидкости с молекулами большой длины, содержащие растворы ПАВ, образуют над монослоем полярных молекул граничный слой, в котором молекулы правильно ориентированы (рис. 3.12). Граничные слои находятся в особом агрегатном состоянии, имея квазикристаллическую структуру. При определенной температуре силы продольной когезии между молекулами исчезают, происходит дезориентация адсорбированных молекул и теряется способность растворов к адсорбции. Температура дезориентации на химически неактивных металлах для жирных кислот близка к температуре плавления (70...80 °С), а квазикристаллическая структура граничных фаз распадается.

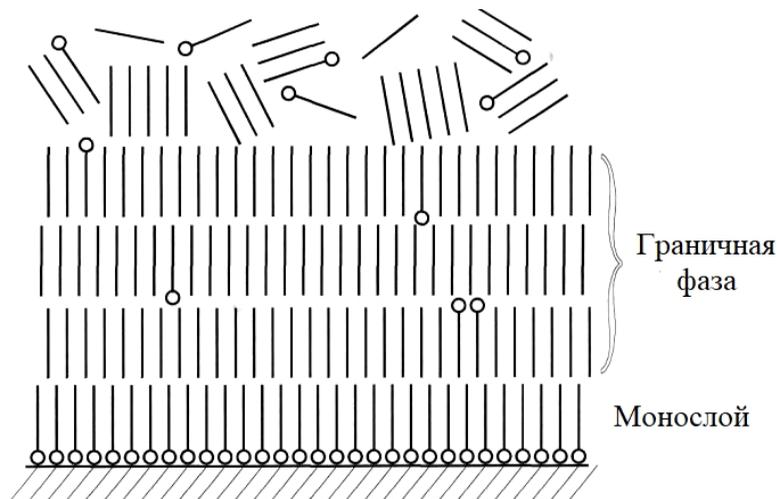


Рис. 3.12. Схема адсорбированного монослоя полярных и ориентации неполярных молекул

Для ликвидации постоянно образующихся вторичных пленок, физико-механические показатели которых превышают показатели

матрицы основного металла, что отчасти характеризует явление структурной приспособляемости, требуется большой расход энергии. Это приводит к росту рабочих температур в зоне резания. Поскольку СОТС СинМА-1 и СинМА-2 созданы на основе синтетических жирных кислот, то для них повышение температуры от установившейся (50...70 °С) в зоне резания даже на 10...20 °С уже является критическим. Следовательно, падает способность растворов к адсорбции, а отсюда резко снижается моющее действие СОТС, чем и объясняется невозможность устранения остаточного углерода с поверхности обрабатываемых деталей.

Известно, что степень влияния СОТС на коэффициент теплоотдачи определяется их тепло- и температуропроводностью, скоростью движения в зоне обработки, площадью охлаждаемой поверхности и динамической вязкостью. При прочих равных условиях данный коэффициент во многом зависит от показателя динамической вязкости, определяемого по формуле:

$$\mu = \nu \rho, \quad (3.4)$$

где ν – кинематическая вязкость, сСт; ρ – плотность жидкости, кг/м⁻³.

Установлено, что число Нуссельта уменьшается при увеличении этого показателя [238]. Это приводит к росту рабочей температуры в пограничном слое между жидкостью и поверхностью твердого тела. Как указывалось выше, в таком случае применение СОТС Аквапол-1 в сравнении с СинМА-1 обеспечило рост эффективности и качества обработки цветных материалов при прочих равных условиях протекания процесса МАО. Следовательно, в результате сопоставления этих показателей можно прогнозировать степень влияния СОТС на интенсивность обработки методом МАО (в данном случае моющего действия) цветных материалов. Например, μ СОТС Аквапол-1 равен $1200 \cdot 30 = 3,6 \cdot 10^4$, а μ СинМА-1 и -2 – $900 \cdot 100 = 9 \cdot 10^4$. Таким образом, зная представленные физико-химические характеристики различных СОТС, производится прогноз эффективности финишной обработки различных цветных сплавов и металлов.

3.3.6. Исследование влияния составов и физико-химических характеристик смазочно-охлаждающих технологических средств на интенсивность съема металла

Моющий эффект является многопараметрическим и обусловлен ее физико-химическими свойствами. СОЖ должны обеспечивать смачивание поверхности, абсорбцию ПАВ, проникать в микронеровности рельефа, удалять из зоны обработки с поверхности деталей шлам, состоящий из продуктов диспергирования материала и частиц износа и разрушения ферроабразивных зерен [210].

Применялся способ свободной подачи СОТС в зону резания, поскольку при резании для МАО при повышении давления СОТС выше 5 МПа возникает нарушение концентрации «щетки» ферроабразивного инструмента. Параметры МАО и шлифования, традиционно применяемого для обработки указанных выше деталей, стабилизировались на уровнях, обеспечивающих оптимальные условия процесса, и приняты следующими: МАО – магнитная индукция, $B = 1$ Тл; скорость резания $V_p = 1,5$ м/с; скорость осцилляции, $V_o = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции, $A = 1$ мм; величина рабочего зазора, $\delta = 1$ мм; зернистость ФАП $A = 0,16/0,20$ мм; время обработки, $t = 60$ с. ФАП – ФАПД-ФТИ-25 паспорт-сертификат БГАТУ от 15.12.1998 г. Шлифование – скорость круга, $V_k = 30$ м/с; подача, $S = 1,5$ м/мин; глубина резания, $t = 0,01$ мм; инструмент – круг алмазный АСМ зернистостью № 25 твердостью СМ1 на связке Б1. Исходная шероховатость поверхности образцов (кол-во 10 шт.) составляла $R_{a1} = 2,2-2,6$ мкм. Выходными показателями являются производительность обработки по величине удельного массового съема, мг/см² мин и достигаемая шероховатость поверхности R_{a2} , мкм.

На рис. 3.13 и 3.14 приведены сравнительные исследования по определению совместного влияния на процесс обработки методом МАО и шлифования. Установлено, что лучшие результаты по удельному съему материала показывает шлифование, но по качеству поверхности таковым является МАО, что служит решающим условием для того, чтобы этот метод был предпочтительно принят для финишной обработки головок делителя теста ШЗ-ХДУ-33.

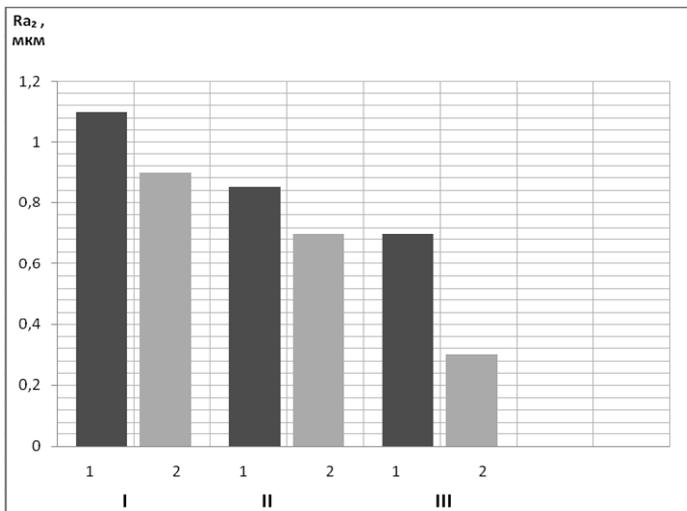


Рис. 3.13. Влияние различных СОТС на шероховатость обработки при МАО: I – ЭТ-2; II – Укринол-1; III – СинМА-1, 1 – шлифование, 2 – МАО

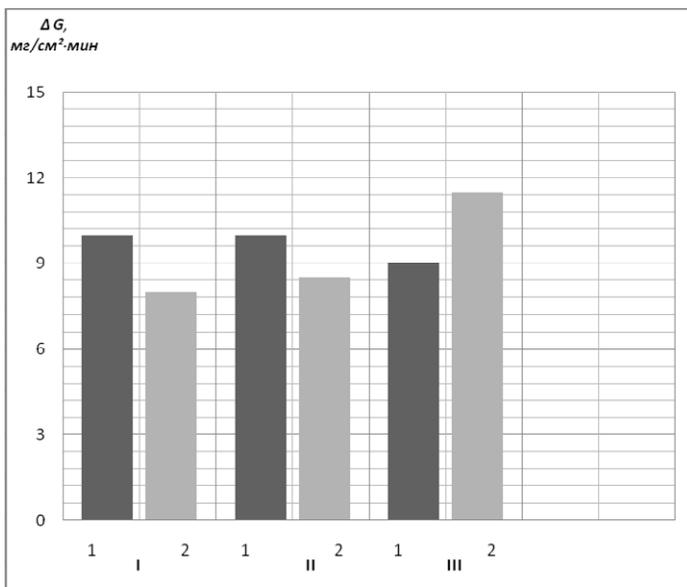


Рис. 3.14. Влияние различных СОТС на производительность процесса при МАО: I – ЭТ-2; II – Укринол-1; III – СинМА-1, 1 – шлифование, 2 – МАО

В таблице 3.11 приведены интервалы варьирования параметрами и удельный массовый съём металла при МАО с использованием трех указанных выше составов СОТС. Для оценки коэффициентов регрессии была реализована дробная ортогональная реплика 2^{4+1} . При расчете точности экспериментов и оценки дисперсии ошибок наблюдений ставились дополнительные опыты в центре плана. По результатам первой серии опытов было принято решение стабилизировать фактор скорости резания на нулевом уровне, а амплитуды осцилляции на 1,5 мм. Реализация центрального рототабельного композиционного плана второго порядка относительно магнитной индукции и скорости осцилляции позволила получить математические модели процесса для трех видов СОТС (форм. 3.6–3.11).

Таблица 3.11

Матрица планирования и результаты экспериментов
по определению взаимовлияния параметров процесса и СОТС
на удельный массовый съём металла

Обозначения		Факторы				Удельный массовый съём металла, Q , мг/см ² · мин			
		A	V_o	B	V_p				
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_0			
Интервал варьирования		0,5	0,1	0,2	1	СОТС			
Основной уровень (0)		1	0,17	0,8	2				
Верхний уровень (+1)		1,5	0,27	1,0	3				
Нижний уровень (-1)		0,5	0,07	0,6	1	ЭТ-2	Укринол	СинМА-1	
Номер опыта	1	-	-	-	-	+	7,52	8,49	9,16
	2	+	-	-	+	+	6,98	7,44	8,47
	3	-	+	-	+	+	7,01	8,07	9,05
	4	+	+	-	-	+	4,32	6,37	11,5
	5	-	-	+	+	+	5,44	6,15	10,7
	6	+	-	+	-	+	3,77	7,34	9,36
	7	-	+	+	-	+	5,74	7,06	10,16
	8	+	+	+	+	+	7,01	8,56	10,9

$$Q \quad Y_1 = 12,41 + 9,1x_1 + 6,71x_2 - 4,68x_1^2 - 9,82x_2^2 - 5,07x_1x_2 \quad (3.5)$$

$$Y_2 = 10,5 + 6,79x_1 + 8,34x_2 - 2,48x_1^2 - 9,62x_2^2 - 0,9x_1x_2 \quad (3.6)$$

$$Y_3 = 14,1 + 8,7x_1 + 9,12x_2 + 3,63x_1^2 - 8,4x_2^2 - 1,1x_1x_2 \quad (3.7)$$

$$R_{a2} \quad Y_1 = 39,6 \cdot 10^{-3} - 5,3x_1 - 0,7x_2 + 4,13x_1^2 - 4,1x_2^2 + 2,2x_1x_2 \quad (3.8)$$

$$Y_2 = 31,7 \cdot 10^{-3} - 5,54x_1 - 3,2x_2 + 2,95 \quad (3.9)$$

$$Y_3 = 32,4 \cdot 10^{-3} - 4,13x_1 + 0,91x_2 + 1,2x_1x_2 \quad (3.10)$$

Определение по полученным математическим моделям оптимальных значений параметров МАО позволило установить режимы, при которых осуществляется получение максимальной производительности и минимальной шероховатости. Например, для СинМА-1 максимальный удельный съем будет иметь место, если $B = 1$ Тл; $A = 1,5$ мм; $V_p = 1$ м/с; $V_o = 0,27$ м/с.

Результаты исследований представлены на рис. 3.15–3.18.

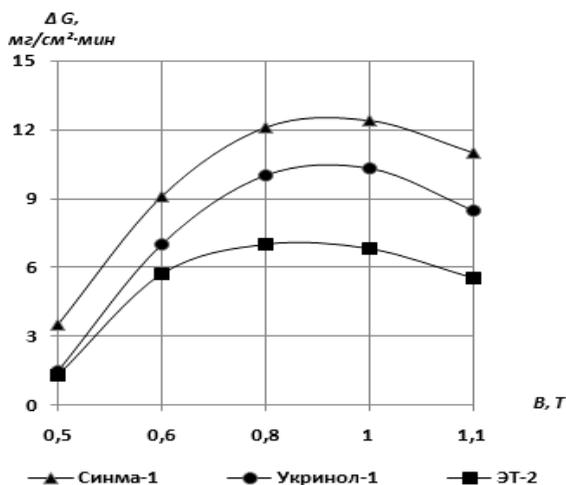


Рис. 3.15. Зависимость производительности процесса МАО от величины магнитной индукции при различных видах СОТ

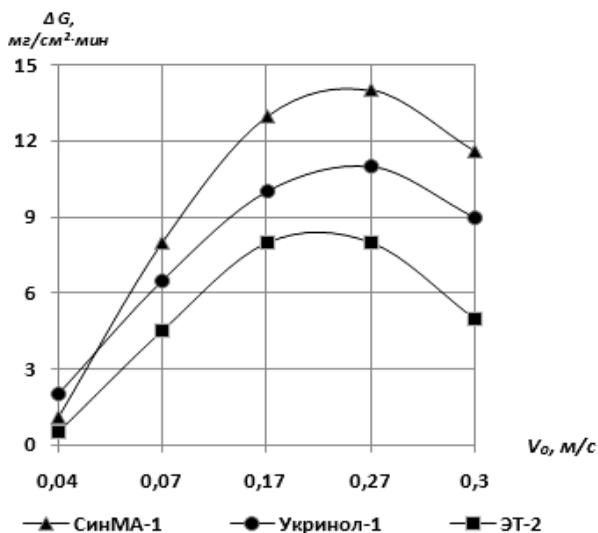


Рис. 3.16. Зависимость производительности процесса МАО от скорости резания при различных видах СОТС

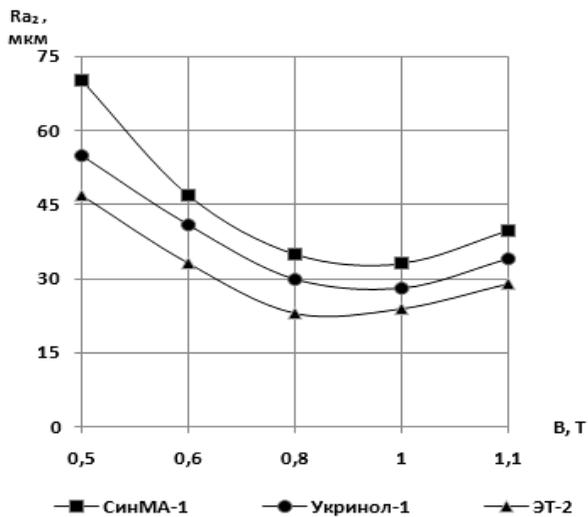


Рис. 3.17. Зависимость шероховатости поверхности от величины магнитной индукции при различных видах СОТС

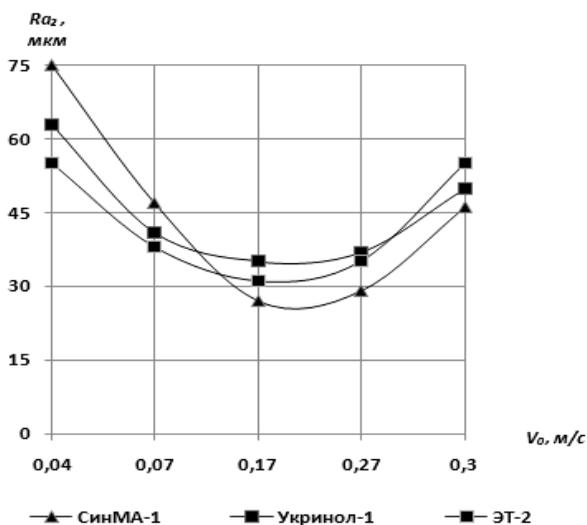


Рис. 3.18. Зависимость шероховатости поверхности от скорости резания при различных видах СОТС

3.4. Экспериментальные исследования влияния смазочно-охлаждающих технологических средств на интенсивность съема металла при магнитно-абразивной обработке

Выпускаемые полусинтетические СОТС позволяют значительно сократить расход нефтепродуктов. Кроме того, они в полной мере отвечают современным требованиям производства и представляют собой равноценную замену эмульсиям, широко применяемым в различных отраслях машиностроения [239]. К достоинствам полусинтетических СОТС относятся более высокие охлаждающая способность и пожаробезопасность, меньшая токсичность, низкая стоимость. Одновременно им присущи повышенная поражаемость микроорганизмами и необходимость утилизации отработанных водных растворов. Однако указанные выше недостатки этих СОТС не уменьшают значимости данных продуктов для всего машиностроительного комплекса и требуют проведения дальнейших научно-исследовательских и практических работ.

Исследуется эффективность магнитно-абразивной обработки с использованием смазочно-охлаждающих технологических средств СинХО-2М. В настоящее время наиболее широко применяемыми СОТС для МАО, являются синтетические СинМА-1 и СинМА-2 ТУ 38-5901176–91, разработанные в ФТИ НАН Беларуси и УкрНИИ НП «МАСМА» (г. Киев). Поскольку рабочая температура в зоне обработки при МАО с соблюдением оптимальных параметров не превышает 50...70°С, то для этих СОТС нет необходимости в интенсивном теплоотводе, а основными характеристиками служат режущие и моющие свойства. Однако стоимость данных СОТС ввиду резкого удорожания их компонентов в современных условиях оказывается достаточно высокой, что требует необходимой замены. Одним из таких видов СОТС является СинХО-2М ТУ 38-1011060-86, применяемый для алмазного хонингования чугунов вместо керосина. В таблице 3.14 представлены физико-химические характеристики СОТС СинМА-1 и СинМА-2, СинХО-2М [240].

Были проведены сравнительные исследования указанных выше видов СОТС. Режимы процесса МАО приняты следующими: скорость вращения детали $V_{вр} = 2,5$ м/с; скорость осцилляции $V_o = 0,12$ м/с; величина магнитной индукции $B = 1$ Тл; амплитуда осцилляции $A = 2$ мм; величина рабочего зазора $\delta = 1$ мм при его концентричности; время обработки $t = 60$ с. В качестве образцов представлены втулки $D \times d \times l = 36 \times 30 \times 32$ мм, материал – сталь ШХ15 ГОСТ 801–78, 58-62 HRC и дюралюминий Д16 ГОСТ 4785–74. Исходная шероховатость их поверхности составляла в среднем $R_{a1} = 1,2$ мкм. В качестве ФАП применялся Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81, зернистость которого $\Delta = 0,2...0,315$ мм. Оборудование – экспериментальная установка ЭУ-1 производства ФТИ НАН Беларуси. Выходные параметры процесса:

а) величина удельного массового съема Q , мг/(см²·мин), показатель наиболее полно отражающий эффективность процесса диспергирования;

б) достигаемая шероховатость после обработки R_{a2} . Образцы перед обработкой промывались в керосине и просушивались сжатым воздухом для уменьшения количества микропримесей на их поверхности. Результаты исследований представлены в таблице 3.12.

Производительность и качество обработки материалов
после использования видов СОТС

Вид СОТС	Обрабатываемый материал			
	ШХ15		Д16	
	$\frac{Q}{\text{мг/см}^2 \cdot \text{мин}}$	$Ra_2, \text{мкм}$	$\frac{Q}{\text{мг/см}^2 \cdot \text{мин}}$	$Ra_2, \text{мкм}$
СинМА-1	7,36	0,05	4,59	0,11
СинМА-2	6,39	0,06	4,87	0,13
СинХО-2М	10,35	0,04	7,57	0,12

Моющие свойства СинМА-1, СинМА-2 и СинХО-2М определялись визуально.

Согласно представленным данным, показатели удельного массового съема при использовании СинХО-2М в 1,2...1,4 раза превышают показатели базовых составов, а достигаемая шероховатость находится в тех же пределах, что и при применении СОТС СинМА-1 и СинМА-2.

Поскольку показатели температурного поля находятся в достаточно узком диапазоне, то обеспечение эффективности СинХО-2М определяется, во-первых, более высокими значениями полярности его вещества, чем СинМА-1 и СинМА-2, во-вторых, его летучестью, т. е. давлением насыщенного пара или динамическим состоянием молекул на поверхности обрабатываемого материала.

Моющие свойства СОТС зависят от стабилизации дисперсных систем, входящих в ПАВ, и образования гидрофильно-гидрофобных пленок на поверхности материала. Отсутствие вязких компонентов приводит к самопроизвольному удалению отдельных частиц диспергированного материала и отходов ферроабразивного порошка после вывода изделия из рабочей зоны. Установлено, что визуального присутствия посторонних примесей на обрабатываемой поверхности образцов отмечено не было как при использовании СинМА-1 и СинМА-2, так и СинХО-2М.

Таким образом, применение СОТС СинХО-2М способствует повышению удельного массового съема материала по сравнению с СинМА-1 и СинМА-2 на 20...40 % при высоком качестве очистки деталей от шлама, образующегося при данном методе. Стоимость СОТС СинХО-2М в отличие от СинМА-1 и СинМА-2 ниже, что позволяет рекомендовать их как эффективную замену.

Проводятся исследования эффективности магнитно-абразивной обработки с использованием смазочно-охлаждающих технологических средств Пенол-1 и Пенол-2.

В настоящее время в результате работы УкрНИИ НП «МАСМА», г. Киев, создан ряд составов, позволяющих осуществлять высокоэффективную обработку методом МАО различных материалов, среди которых могут быть представлены СОТС Пенол-1 и Пенол-2 ТУ 38.591218–90. Они применяются в виде 0,1...1 %-ых водных или водносолевых растворов для получения пенных промывочных систем [235].

Качественно новый состав концентрата данных СОТС представляет собой смесь на основе некоторых видов ПАВ, ингибиторов коррозии черных и цветных металлов и воды с определенным соотношением между указанными выше компонентами. Технология изготовления составов заключается в компаундировании исходного сырья при температуре не выше 50 °С. Их некоторые физико-химические характеристики представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13

Физико-химические характеристики рабочих поверхностей

Показатели	Вид рабочей жидкости	
	СинМА-1 и СинМА-2	Пенол-1 и Пенол-2
Вязкость кинематическая при 50 °С, сСт, не более	100	100
Склонность к пенообразованию, см ³ , не более	500	550
Устойчивость пены, см ³ , не более	100	200
pH раствора, не более	8,5–10	7–9,5

Оценка эффективности обработки методом МАО различных материалов при использовании СОТС Пенол-1 и Пенол-2 производилась в сравнении с СинМА-1 и СинМА-2 ТУ 38.5901176–91 при следующих режимах и параметрах, которые стабилизировались на уровнях, обеспечивающих оптимальные условия процесса: магнитная индукция, $B = 1$ Тл; скорость резания, $V_p = 1$ м/с; скорость осцилляции, $V_o = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции, $A = 1,5$ мм; величина рабочего зазора, $\delta = 1$ мм; коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_z = 1$; время обработки, $t = 60$ с. Исследования осуществлялись на установке СФТ 2.150.00.000. В качестве ФАП применялся порошок марки 100 Ф5 ТУ 232-130-004–90 на основе сплава Fe-V; зернистость ФАП, $\Delta = 160/200$ мкм. Образцами служили кольца подшипников № 984905 $D \times d \times l = 36 \times 29 \times 32$ мм, материал ШХ15 ГОСТ 801–78, 58-62 HRC и втулки $D \times d \times l = 36 \times 34 \times 32$ мм, дюралюминий Д16 ГОСТ 4785–74.

Исходная шероховатость представленных образцов составляла $R_{a1} = 1,2 \dots 1,4$ мкм. Выходными показателями эффективности обработки являлись: а) – достигаемая шероховатость поверхности деталей, R_{a2} , мкм; б) – величина удельного съема материала, Q , мг/см²·мин.

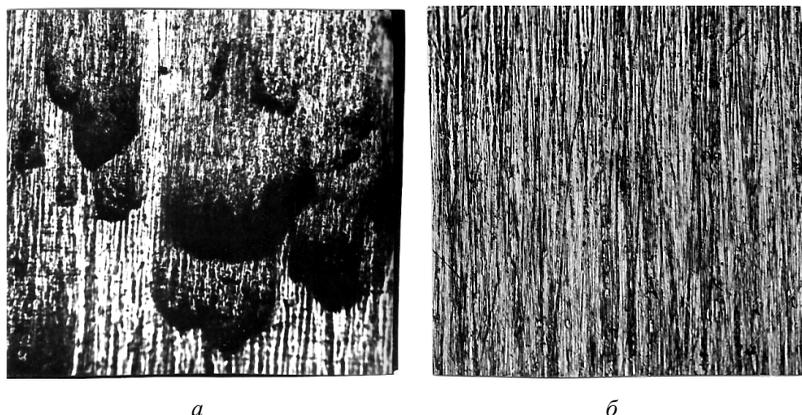


Рис. 3.19. Топография поверхности стали ШХ15 после шлифования (а) и МАО (б) (x100)

Результаты сравнительных исследований представлены в таблице 3.14. На рис. 3.19 показаны: а) – топография поверхности стали

ШХ15, образованная предшествующей операцией шлифования с отчетливо наблюдаемыми прижогами, и б) – та же поверхность, подвергнутая магнитно-абразивной обработке, использование которой привело к устранению указанного выше дефектного поверхностного слоя.

Таблица 3.14

Сравнительные исследования производительности и качества поверхности при использовании различных технологических сред

Рабочая технологическая среда	Обрабатываемый материал			
	ШХ15		Д16	
	$Q, \text{ мг/см}^2 \cdot \text{мин}$	$R_{a2}, \text{ мкм}$	$Q, \text{ мг/см}^2 \cdot \text{мин}$	$R_{a2}, \text{ мкм}$
ФАП 100Ф5+СинМА-1	6,55	0,05	4,09	0,11
ФАП 100Ф5+СинМА-2	5,69	0,06	4,31	0,13
ФАП 100Ф5+«Пенол-1»	10,12	0,04	5,22	0,17
ФАП 100Ф5+«Пенол-2»	7,63	0,05	3,26	0,19

Применение СОТС Пенол-1 и Пенол-2 позволяет повысить производительность магнитно-абразивной обработки стали ШХ15 в 1,5 раза с образованием равных показателей шероховатости поверхности деталей в сравнении с базовыми составами СинМА-1 и СинМА-2. При обработке дюралюминия Д16 рабочие жидкости Пенол-1 и Пенол-2 могут быть полноценной заменой указанных выше базовых составов.

В настоящее время исследуется эффективность магнитно-абразивной обработки с использованием смазочно-охлаждающих технологических средств на основе сульфозтоксилатов.

Однако необходимость получения более дешевого вида СОТС, изготовленного из продуктов местной сырьевой базы, требует решений данной задачи. Проведенные исследования показали, что эффективным аналогом СОТС на основе производных гликоля

могут быть ПАВ типа сульфэтоксилатов. Одним из них является эмпикол, или натрий лаурилсульфат оксиэтилированный, формула которого $RO(C_2H_4O)_3CO_3$, где $R = C_{12}...C_{14}$. Он представляет собой вязкую прозрачную, бесцветную массу, μ составляет 442. Однако для создания композиции ПАВ как концентрата СОТС необходимо знание составных элементов. Установлено, что СОТС смешивается с водой, как технического назначения, так и с водопроводной при достаточно низких температурах (10...20 °С) в отличие от эмульсолов, для которых этот диапазон составляет 95..100 °С. Известно, что чем больше интервал рН дисперсной системы, тем выше допуск наличия в этой системе различного рода загрязнений при условии сохранения ее свойств. Если у СОТС СинМА-1 и СинМА-2 диапазон показателя рН составляет 7...8, то у эмпикола он равен 6...8, что указывает на стабильность его режущих, моющих, смазывающих свойств в ходе протекания процесса съема материала [241].

Рецептура концентрата СОТС указана в таблице 3.15.

Исследование СОТС на основе эмпикола проводилось на станке модели СФТ 2.150.00.00.000 при следующих параметрах и режимах обработки: величина магнитной индукции $B = 0,9 \dots 1,1$ Тл; скорость резания $V_p = 0,5 \dots 2$ м/с; скорость осцилляции $V_o = 0,15 \dots 0,25$ м/с; амплитуда осцилляции $A = 1 \dots 3$ мм; величина рабочего зазора $\delta = 1$ мм; коэффициент величины заполнения рабочего зазора $K_3 = 1$. ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81, размер зерна 160/200 мкм.

Таблица 3.15

Рецептура концентрата СОТС

Компонент	Массовый состав, %
Эмпикол	55–60
Бензойная кислота	0,2–0,3
Спирт этиловый	3–4
Нитрит натрия	2–3

Примечание: остальное – вода.

Производительность и качество обработки
при использовании различных видов СОТС

СОТС	Величина удельного массового съема материала, Q , мг/см ² ·мин	Шероховатость R_a после обработки
СинМА-1	7,26	0,12–0,15
СинМА-2	8,19	0,11–0,16
1%-я эмульсия на основе эмпикола	8,02	0,14–0,19

В качестве образцов использовались кольца подшипников № 984905 $D \times d \times L = 36 \times 29 \times 32$ мм, материал – сталь ШХ15 ГОСТ 801–78, 58...62 HRC. Шероховатость поверхности образцов до обработки составляла $R_{a1} = 2...2,5$ мкм. Учет результатов осуществлялся как средний по 5 образцам. Базовые СОТС – СинМА-1 и СинМА-2 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор. На основании приведенных исследований установлено, что производительность и качество обработки методом MAO указанных выше деталей находятся в требуемых пределах и удовлетворяют условиям производства (табл. 3.16).

Таким образом, разработан и создан новый вид СОТС на основе ПАВ из продуктов местного сырья, обеспечивающий необходимые показатели процесса MAO, что существенно снижает себестоимость обработки.

Исследуется эффективность магнитно-абразивной обработки с использованием смазочно-охлаждающих технологических средств на основе лигносульфонатов.

Высокой диспергирующей способностью обладают СОТС, содержащие в своем составе полимерные соединения типа солей и эфиров сульфонатов. Усложненная структура макромолекулы и наличие различных функциональных групп позволяют использовать такое химическое соединение как лигносульфонаты в реакциях синтеза и комплексообразования. Лигносульфонаты – технические жидкие марки А, ТУ 2455–028–00279580–2004 представляют

собой однородную густую жидкость темно-коричневого цвета. Лигносульфونات являются побочным продуктом переработки древесины и представляют смесь натриевых и магниевых солей лигносульфоновых кислот (с примесью редуцирующих и минеральных веществ), получаемых из щелоков бисульфитной варки целлюлозы. Будучи водорастворимыми в любых соотношениях, технические лигносульфонаты обладают универсальными свойствами ПАВ и их молекулярная масса составляет величину от 200 до 200 000 и выше. Лигносульфونات – анионные ПАВ, которые незначительно понижают поверхностное натяжение воды и образуют стойкие эмульсии и пены. Установлено, что вязкость растворов лигносульфонатов зависит от природы катиона и температуры [242].

Для исключения подобного поведения требуется создание достаточно узкого коридора зоны показателя pH равного 7,5...8,5. Это обеспечивается использованием при подготовке концентрата СОТС операции этерификации и модифицирования за счет присутствия триэтаноламиновых эфиров синтетических жирных кислот (СЖК) фракции $C_7...C_9$. Поскольку лигносульфонаты по причине возможностей изменения молекулярно-массового распределения фракций обладают высокой функциональной зависимостью вязкости, то в роли стабилизатора композиции выступают триэтаноламиновые эфиры СЖК фракции $C_7...C_9$. Были проведены соответствующие исследования. Образцами являются заготовки $D \times d \times l = 32 \times 28 \times 30$ мм, материалы образцов – сталь ШХ15 ГОСТ 801–78, 20 ГОСТ 1050–88, дюралюминий Д16 ГОСТ 4785–74. Оборудование – станок магнитно-абразивный модели ЭУ-1. Режимы и параметры процесса МАО приняты следующими: величина магнитной индукции $B = 0,9$ Тл; скорость резания $V_p = 2,1...2,4$ м/с; скорость осцилляции $V_o = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции $A = 1...3$ мм; коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_3 = 1$; величина рабочего зазора $\delta = 1$ мм при его центричности; время обработки $t = 180$ с. Исходная шероховатость образцов, $R_{al} = 1,6...2$ мкм. В качестве ферроабразивного порошка применялся ФТ-2.

Физико-механические свойства различных составов СОТС представлены в таблице 3.17.

Таблица 3.17

Физико-механические свойства различных составов СОТС

Показатель	Состав СОТС			
	1	2	3	СинМА-1
Вязкость кинематическая при 50 °С, мм ² /с	38,7	41,0	42,7	40,5
pH 3 %-го раствора	8,2–8,6	8,0–8,5	8,5–8,7	8,5–8,7
Склонность к пенообразованию, см ³	до 450	до 500	до 450	до 500
Устойчивость пенообразования, см ²	до 120	до 150	до 130	до 150
Плотность, кг/м ³	1,0	1,1	1,05	1,1

Производительность процесса оценивалась по величине удельного массового съема, мг/см²·мин. В качестве базового представлен состав СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор. Результаты испытаний представлены в таблице 3.18.

Таблица 3.18

Зависимость производительности процесса MAO при различных видах СОТС

Вид СОТС	Величина удельного массового съема обрабатываемых материалов, мг/см ² ·мин		
	ШХ-15	Д16	Сталь 20
СинМА-1	10,31	6,25	12,35
Состав 1	6,12	4,78	8,07
Состав 2	10,55	7,39	11,74
Состав 3	7,44	5,31	7,98

Стабильное сложное образование в виде гексаакваалюминиевых гидратов также вызывает понижение *pH* при росте сорбирующего алюминиевого шлама и сохранении водорастворимости [243].

Вместе с тем, во-первых, сохранение в зоне обработки требуемого узкого диапазона *pH* носит стохастический характер, во-вторых, наличие раствора NaOH вызывает появление интенсивных пятен и очагов коррозии на оборудовании, что требует повышенное содержания в СОТС ингибиторов коррозии типа нитрита натрия ГОСТ 199906–74, для производства которого требуется только

высший сорт нитрата натрия ГОСТ 828–77, а сам нитрит натрия, с экологической точки зрения, является токсичным продуктом.

На рис. 3.20 представлены результаты исследований процесса МАО в зависимости от продолжительности обработки при расходе СОТС: 60 мл/мин и 100 мл/мин.

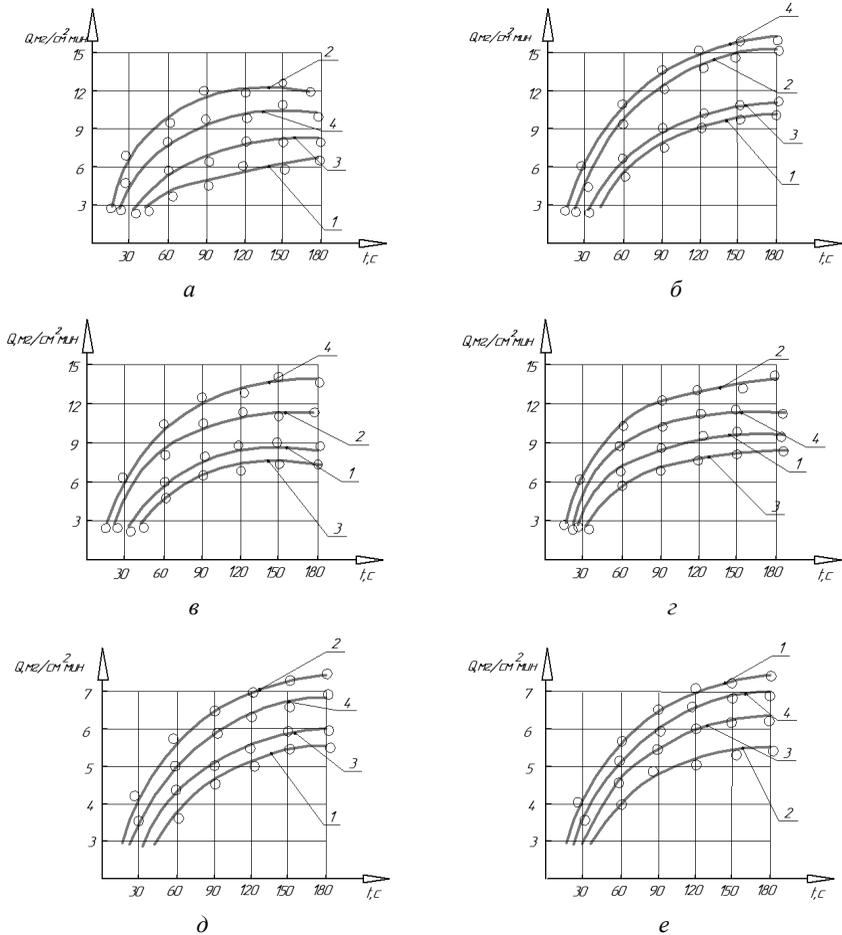


Рис. 3.20. Зависимость производительности процесса МАО от времени обработки при различных показателях расхода СОТС (1 – состав 1; 2 – состав 2; 3 – состав 3; 4 – СинМА-1): для стали ШХ15 (а, б); для стали 20 (в, г); для дюралюминия Д16 (д, е); а, в, д – 60 мл/мин, б, г, е – 100 мл/мин

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение расхода СОТС в среднем в 1,5 раза не дает существенного приращения производительности удельного съема материала для стали ШХ15, в то время как дюралюминий Д16 и особенно для стали 20 – это увеличение обеспечивает прирост вышеуказанного съема материала в среднем на 20 % и 30 % соответственно.

В результате проведенных исследований предложен новый состав СОТС для финишной обработки деталей машин из сталей: 20 и ШХ15, и дюралюминий Д16 на основе триэтаноламиновых эфиров СЖК фракции $C_7...C_9$ и лигносульфонатов технических, которые характеризуется доступностью исходных материалов, простотой технологического процесса изготовления и эффективностью использования. Товарная стоимость концентрата нового вида СОТС в 2...3 раза ниже по отношению к стоимости СинМА-1. Шероховатость образцов по параметру R_a после МАО в среднем для состава СОТС 2 и СинМА-1 составляет: ШХ15: 0,05...0,1 и 0,07...0,09 мкм; сталь 20: 0,2...0,3 и 0,1...0,2 мкм.

Глава 4

РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ МАГНИТОПРОВОДОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА УПРАВЛЕНИЕМ ПАРАМЕТРАМИ РАБОЧЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

4.1. Расчет профилирования полюсных наконечников при формировании рабочей технологической среды

Проблема распределения МП в той или иной области рабочей зоны часто решается путем построений методом сеток и интеграторов или на основе интуиции. При таких условиях конструктивное решение, производимое аналитическим путем или графическими и численными методами, обеспечивается только на базе точного знания топографии МП. В свою очередь, полученные данные служат источником анализа тепловых полей, а также параметров и режимов МАО сложнопрофильных поверхностей. Выяснение и точное обоснование особенностей конфигурации области МП при МАО является необходимым условием для правильного выбора геометрии рабочей зоны, что обеспечивает эффективность процесса. предлагается два варианта расчета профиля полюсных наконечников и образование в первом случае эквидистантного, во втором случае конхоидного контура в их радиальном сечении, что обеспечивает реализацию создания меньших по величине рабочих зазоров и рост интенсивности обработки деталей.

Используются [246] различные способы задания рабочих поверхностей инструмента, которые разработаны в инженерной геометрии: матричный, в параметрической, явной и неявной формах. С целью определения наиболее эффективного способа, который должен быть максимально универсальным и информативным, проведена оценка их пригодности, как для описания поверхности инструмента, так и возможных путей формообразования за счет финишной обработки деталей машин. Главная задача заключается не в описании свойств заданных поверхностей, а в синтезе технических решений и только затем в анализе полученных результатов.

Обрабатываемые поверхности сложного профиля задаются в виде:

а) неявных функций:

$$F(x, y) = 0; \quad (4.1)$$

б) явных функций:

$$y = f(x) \text{ или } p = f(y); \quad (4.2)$$

в) в параметрическом виде:

$$x = x(t) \text{ или } y = y(t) \text{ или } p = p(t) \text{ или } y = y(t); \quad (4.3)$$

г) таблицами значений;

д) графических решений.

Поскольку наиболее точным заданием и отображением поверхности пуансонов в виде как явных, так и неявных функций является эквидистанта, то метод расчета профиля полюсных наконечников для мягких режимов обработки ($B = 0,7 \dots 0,8$ Тл, $V_p = 1-2$ м/с, $V = 0,05$ м/с) предлагается реализовать следующим образом: профиль полюсного наконечника представлен как огибающая окружности для полюсного наконечника, центр которой O_p колеблется по дуге окружности радиуса a относительно O_b .

Расчет профиля полюсного наконечника осуществляется адекватно способу задания профиля обрабатываемой поверхности детали и, используя одну из систем уравнений 4.1...4.3, находится траектория центров инструмента O_{II} (x_{II} , y_{II}) и далее рассчитываются координаты относительного расположения центра вращения O_b (x_b , y_b) при заданном положении O_{II} . Положение O_b определяется как точка пересечения окружности радиуса R_k с центром в O_0 (x_0 , y_0) с окружностью радиуса b с центром в O_{II} (x_{II} , y_{II}).

Решим совместно уравнения:

$$\begin{aligned} x_b^2 + y_b^2 &= R_k^2; \\ (x_b - x_{II})^2 + (y_b - y_{II})^2 &= b^2. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Получаем:

$$x_b = \frac{B_1 - y_u y_b}{x_u}.$$

$$y_b = \frac{B_1 y_u \pm \sqrt{B_1^2 y_u^2 + B_2 B_2}}{B_2}, \quad (4.5)$$

где

$$B_1 = \frac{R_k^2 - b^2 + x_u^2 + y_u^2}{2}.$$

$$B_2 = R_k^2 x_u^2 - B_1^1. \quad (4.6)$$

$$B_3 = x_x^2 + y_u^2$$

$$y_u = y_\delta \pm \frac{R_u \left[x_\delta'' (y_\delta')^2 - x_\delta' y_\delta'' y_\delta \right]}{\left[(x_\delta')^2 + (y_\delta')^2 \right]^{3/2}}.$$

В приведенных зависимостях значения x_u' и y_u' вычисляются, а для вычисления x_u'' и y_u'' используются зависимости, приведенные ниже.

$$y_u' = \left(\frac{B_1 y_u \pm \sqrt{B_1^2 y_u^2 + B_2 B_2}}{B_3} \right)'$$

$$= \frac{1}{B_3^2} \left[\left(B_1' y_u + B_1 y_u' + \frac{2B_1 B_1' y_u^2 + 2B_1^2 y_u y_u' + B_1' B_2 + B_2 B_1'}{2\sqrt{B_1^2 y_u^2 + B_2 B_2}} \right) B_3 - B_1 B_3' y_u - B_3' \sqrt{B_1^2 y_u^2 + B_2 B_2} \right], \quad (4.7)$$

где

$$\begin{aligned} B'_1 &= x_u x'_u + y_u y'_u \\ B'_2 &= 2R_k^2 x_u x'_u - 2B_1 B'_1 \\ B'_3 &= 2B'_1 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Эквидистантный профиль полюсных наконечников определяется в конечном итоге как огибающая окружности радиуса $R_3 = R_u - R_p$, центр которой (x_d, y_d) движется по профилю детали. Графическое построение профиля полюсного наконечника представлено на рис. 4.1.

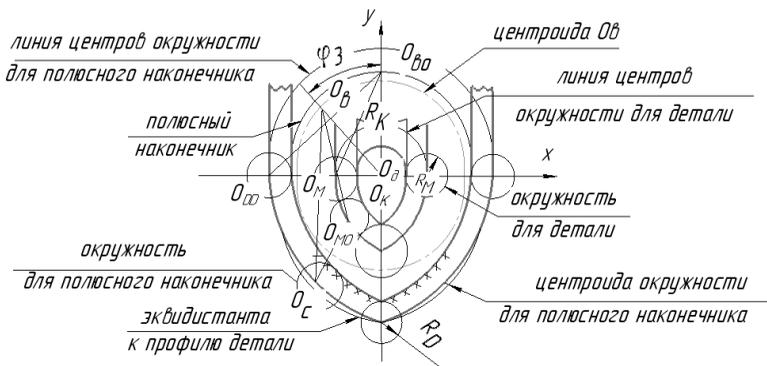


Рис. 4.1. Схема для определения профиля полюсного наконечника

В результате произведенного расчета на основе задания обрабатываемой поверхности явных и неявных функций разработаны и созданы полюсные наконечники для ЭМС станка МАРС-15 для MAO пуансонов глубокой вытяжки, при использовании которых произведена обработка вышеуказанных пуансонов (рис. 4.1).

4.1.1. Расчет эквидистантного профиля полюсных наконечников

Эквидистантный профиль полюсных наконечников определяется как огибающая окружности радиуса $R_3 = R_u - R_p$, центр которой (x_d, y_d) движется по профилю изготавливаемой детали.

При задании обрабатываемого профиля в виде функции ($F(x, y) = 0$) огибающая окружностей, образующая профиль полюсного наконечника, находится из решения

$$\begin{cases} F(\mathbf{x}, y, c) = 0 \\ F'_c(\mathbf{x}, y, c) = 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

где каждое значение C выделяет определенную окружность из их семейства.

Решение системы дает расчетные зависимости

$$x_3 = x_\delta \mathbf{m} \frac{R_3 y_{dc}}{\sqrt{(x'_{\delta c})^2 + (y'_{\delta c})^2}}, \quad (4.10)$$

$$y_3 = y \mathbf{m} \frac{R_3 x_{\delta c}}{\sqrt{(x'_{\delta c})^2 + (y'_{\delta c})^2}}. \quad (4.11)$$

При задании обрабатываемой поверхности в полярных координатах

$$\rho = \rho(\varphi) \quad (4.12)$$

$$y_3 = \frac{\arccos \chi_3}{\rho_3} = \frac{\arccos 1}{\rho_3} \left[\rho_\delta \cos \varphi + \frac{R_3 (\rho'_\delta \sin \varphi + \rho_\delta \cos \varphi)}{\sqrt{\rho_\delta^2 + (\rho'_\delta)^2}} \right] \quad (4.13)$$

где ρ_δ – радиус-вектор профиля обрабатываемой детали; φ – соответствующий ρ_δ полярный угол; ρ_3 – радиус-вектор эквидистантного профиля; y_3 – соответствующий ρ_3 полярный угол.

Если обрабатываемый профиль задается таблицами значений, то координаты эквидистанты определяются с использованием зависимостей для вышеуказанных случаев или входящие в эти зависимости

производные могут быть найдены известными методами дифференцирования табличных функций или дифференцированием интерполяционных кривых. При графическом задании профиль обрабатываемой детали, как правило, описывается дугами окружностей. Порядок графического построения эквидистанты к графически заданному профилю состоит в увеличении или уменьшении на требующуюся величину радиуса кривизны детали.

4.1.2. Расчет профиля полюсных наконечников методом интерполирования

Если обрабатываемый профиль задается таблицами значений, то координаты профиля полюсных наконечников определяются с использованием дифференцирования табличных функций

$$O_p(x_p, y_p). \quad (4.14)$$

В общем случае разделенные разности $n+1$ -го порядка находятся по разностям n -го порядка из зависимости

$$\frac{f(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n}) - f(x_{i-1}, x_i, \dots, x_{i+n-1})}{x_{i+n} - x_{i-1}} = f(x_{i-1}, x_i, \dots, x_{i+n}). \quad (4.15)$$

Разделенная разность определена и непосредственно через значения функции $f(x)$

$$\begin{aligned} f(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n}) &= \frac{f(x_i)}{(x_i - x_{i+1})(x_i - x_{i+2}) \dots (x_i - x_{i+n})} + \\ &+ \frac{f(x_{i+1})}{(x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x_{i+2}) \dots (x_{i+1} - x_{i+n})} \\ &+ \frac{f(x_{i+2})}{(x_{i+2} - x_i)(x_{i+2} - x_{i+1}) \dots (x_{i+2} - x_{i+n})} \dots \end{aligned} \quad (4.16)$$

Для дифференцирования по таблице с постоянным шагом, если разыскивается производная не в начале и не в конце таблиц, применять интерполяционную формулу Стирлинга

$$f(x) = f(x_0 + ht) = f_0 + t f'_0 + \frac{t(t^2-1)}{3!} f_0^3 + \frac{t^2(t^2-1)}{4!} f_0^4 + \frac{t(t^2-1)(t^2-2^2)}{5!} f_0^5 + \frac{t^2(t^2-1)(t^2-2^2)}{6!} f_0^6 \dots, \quad (4.17)$$

здесь

$$t = \frac{x - x_0}{h}, \quad (4.18)$$

где x – текущее значение аргумента; h – шаг; t – нормированное значение аргумента; f_{02}, f_{04}, f_{06} – конечные разности; f_{01}, f_{03}, f_{05} – центральные разности.

Конечная разность любого порядка может быть определена и непосредственно через значение функции:

$$f_i^n = y_{i+\frac{n}{2}} + C_n y_{i+\frac{n}{2}-1} + C_n^2 y_{i+\frac{n}{2}-2} + \dots + (-1)^{\frac{n}{2}} C_{\frac{n}{2}} y_i + (-1)^{\frac{n}{2}+1} C_{\frac{n}{2}+1} y_{i-1} + \dots + y_{i-\frac{n}{2}} \quad (4.19)$$

– для четных значений n .

Или

$$f_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} = y_{i+\frac{n}{2}+1} - C_{n+1} y_{i+\frac{n}{2}} + C_{n+1}^2 y_{i+\frac{n}{2}-1} + \dots + (-1)^{\frac{n}{2}} C_{\frac{n}{2}+1} y_{i+1} + (-1)^{\frac{n}{2}+1} C_{\frac{n}{2}+1} y_i + \dots + (-x_{i-\frac{n}{2}}) \quad (4.20)$$

– для нечетных значений n .

Если рассматривается производная в одном из первых узлов таблиц, то используется формула Ньютона для интерполяции «вперед».

Откуда

$$f'(x_0 + ht) = \frac{1}{h} [f'_{\frac{1}{2}} + \frac{2t-1}{2!} f'^2 + \frac{3t^2-6t-2}{3!} f'^3 + \frac{4t^3-18t^2+22t-6}{4!} f'^4 + \dots] \quad (4.21)$$

Если же производная разыскивается в одном из последних узлов таблиц, то используется формула Ньютона для интерполяции «назад».

Иногда удобнее применять формулу численного дифференцирования не через разности, а непосредственно через значение функций. Для этого используется один из вариантов формулы Лагранжа для равных промежутков.

Откуда

$$\begin{aligned}
 hf'(x) = & \sum_{i=0}^n (-1)^{n+1} \frac{C_n^i y_i}{n!} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{t(t-1)\dots(t-n)}{(t-1)} \right] \\
 & + h^{n+1} t(t-1)\dots(t-n) f(x, x_i, \dots, x_{i+n}) \frac{\partial}{\partial t} [t(t-1)\dots(t-n)] \\
 & + h^{n+2} f(x, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n}) t(t-1)\dots(t-n).
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

Последние члены выписанных зависимостей являются остаточными и в расчетах приближенных значений производных не используются.

4.2. Исследование электромагнитных устройств для магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения

Работоспособность оборудования для МАО определяется комплексом требований, в основном, обусловленным влиянием магнитного поля. В настоящее время наиболее полно разработаны схемы для МАО наружных поверхностей деталей типа вращения и плоскостей, тогда как опыт конструирования и эксплуатации оборудования МАО отверстий представлен крайне недостаточно.

Первоочередной задачей при конструировании оборудования для МАО является определение сечения магнитопроводов с учетом их магнитного насыщения при получении заданной величины индукции к рабочей зоне [247]. Например, если некоторый участок магнитной цепи достиг насыщения, значение μ понижается, и цепь фактически оказывается разорванной, иначе говоря, теряет смысл само представление о цепи. Кроме того, индукция B_i не представляет собой однозначную функцию напряженности H_i из-за наличия гистерезиса.

В связи с указанным выше данный расчет магнитной цепи осуществляется аналитическим методом как для внутренней, так

и наружной MAO путем определения полной магнитодвижущей силы (м.д.с.).

На рис. 6.2 представлены ЭМС для наружной и внутренней MAO. Закон полного тока для практического расчета магнитных цепей выражается следующей зависимостью:

$$F_0 = \sum H_k l_k, \quad (4.23)$$

где F_0 – полная магнитодвижущая сила (м.д.с.); $H_k l_k$ – падение м.д.с. на данном участке магнитопровода.

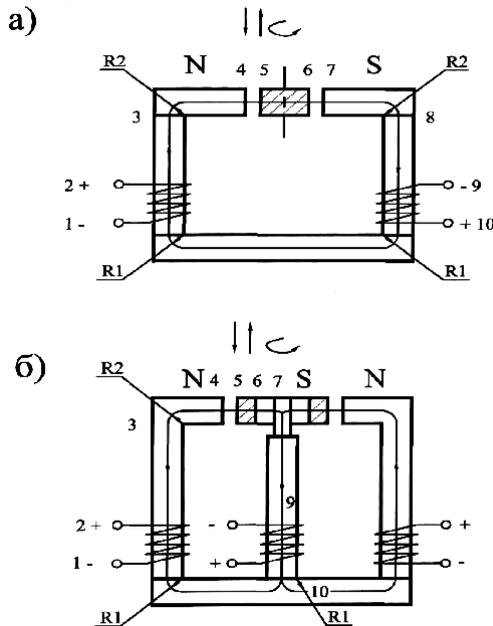


Рис. 4.2. ЭМС для наружной и внутренней MAO

Конструкция магнитопровода условно разделяется на определенное количество участков магнитной цепи. В эти участки выделяются детали с различными магнитными свойствами, рабочие зазоры и стыки в местах контакта сопрягаемых деталей магнитопровода.

Согласно указанному выше положению, в первом случае (рис. 4.2, а)

$$F_0 = 2H_1 I_{1-2} + 2H_2 I_{2-3} + 2H_3 I_{3-4} + 2H_4 I_{4-5} + H_5 I_{5-6} + H_{10} I_{10-1}, \quad (4.24)$$

во втором (рис. 4.2, б)

$$F_0 = 3H_1 I_{1-2} + 3H_2 I_{2-3} + 2H_3 I_{3-4} + 2H_4 \times \\ \times I_{4-5} + 2H_5 I_{5-6} + 2H_6 I_{6-7} + 2H_7 I_{7-8} + 2H_{10} I_{10-1}. \quad (4.25)$$

Проведенный анализ показывает, что при внутренней МАО магнитная цепь обладает большей протяженностью, чем при наружной. На основании этого расчета была разработана ЭМС для внутренней МАО.

В таблице 4.1 приведена техническая характеристика ЭМС установок ЭУ-6 и СФТ 2.150.00.00.000, которая предназначена для МАО наружных поверхностей. В результате сопоставления данных ЭМС можно утверждать, что эффективность использования одной катушки установки ЭУ-6 (0,83 кВт/шт.) приблизительно равна этому показателю СФТ 2.150.00.00.000 (0,6 кВт/шт.) несмотря на то, что общая мощность в первом случае в два раза больше.

Таблица 4.1

Техническая характеристика ЭМС для внутренней и наружной МАО

Показатели	ЭУ-6	СФТ 2.150.00.00.000
Магнитная индукция в рабочем зазоре, Т	0,6 ... 1,5	0,8 ... 1,3
Число намагничивающих катушек, шт.	3	2
Диаметр обрабатываемых деталей, мм	10 ... 220	10 ... 160
Мощность электромагнитных катушек, кВт	2,5	1,2
Масса, кг	19,6	17,1
Габариты, мм		
длина	315	270
ширина	300	265
высота	260	305

В результате проведенных исследований, расчета и проектирования разработана и создана ЭМС для внутренней МАО, а на ее основе установка для реализации этого процесса, при воздействии которого на обрабатываемую поверхность ее шероховатость уменьшается с $R_{a1} = 1,6 \dots 2$ до $R_{a2} = 0,1 \dots 0,2$ мкм согласно ГОСТ 2789–73.

Рассмотрим зависимость эффективности магнитно-абразивной обработки отверстий от оптимальности магнитных систем. Конструкция ЭМС для МАО отверстий определяется замкнутостью магнитопровода, оппозиционным расположением внешних полюсов, размещением внутреннего полюса в обрабатываемом отверстии и синхронным относительным движением или детали, или внутреннего полюса (рис. 4.3).

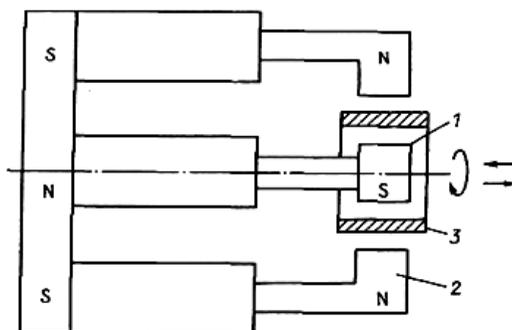


Рис. 4.3. Схема электромагнитной системы магнитно-абразивной обработки отверстий:

1 – внутренний полюсный наконечник; 2 – внешние полюсные наконечники; 3 – обрабатываемая деталь; N, S – полюса электромагнитной системы

Существует широкая номенклатура деталей, которые по своим размерам и конфигурации позволяют использовать данный вариант конструкции ЭМС.

Для оценки эффективности различных типов конструкции ЭМС были проверены сравнительные исследования. Опыты проводили для следующих условий варьирования:

1) схема включения:

а) N-S-N; б) N-O-S; в) N-S-S; г) N-S-O, где N, S – полюса магнитов; O – отсутствие подачи тока на намагничивающую катушку ЭМИ;

2) изменение величин рабочих зазоров (0,5...5 мм);
3) использование внутреннего полюса с различными углами охвата:

- а) до 45° ;
- б) в диапазоне 45° – 90° ;
- в) выше 90° ;
- г) отсутствие концентратора магнитного потока.

Измерение величины магнитной индукции в рабочих зазорах производилось при помощи тесламетра Т-3 с прямым отсчетом результатов и автоматической индикацией полярности.

Образцами служили кольца подшипников с внутренним диаметром 60 мм. Материал – сталь ШХ-15 ГОСТ 801–78, 61...65 HRC. Магнитная индукция определялась в точках рабочей зоны согласно рис. 4.4. Сила тока, подаваемого на намагничивающие катушки ЭМИ, составляет 4 А. Результаты исследований представлены в таблице 4.2 и на рис. 4.5.

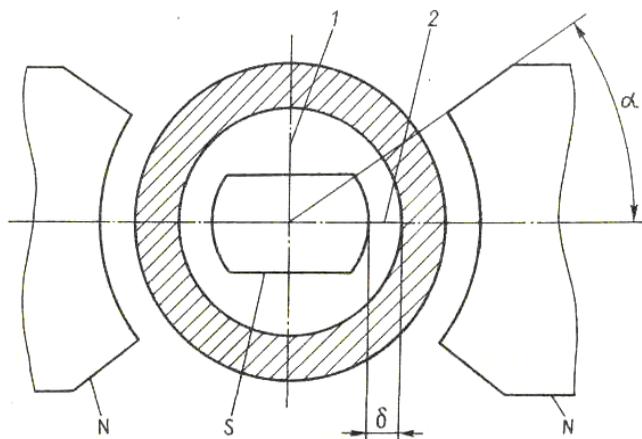


Рис. 4.4. Конструкция электромагнитного индуктора:
 α – угол охвата полюсных наконечников, град; δ – рабочий зазор, мм;
1, 2 – точки измерения магнитной индукции в рабочем зазоре

Светлый, темный кружки, треугольник – отсутствие концентратора магнитного потока, концентратор с углами охвата $\alpha = 45^\circ$ и 90° соответственно (значения магнитной индукции схемы N-S-S показаны со стороны N-S).

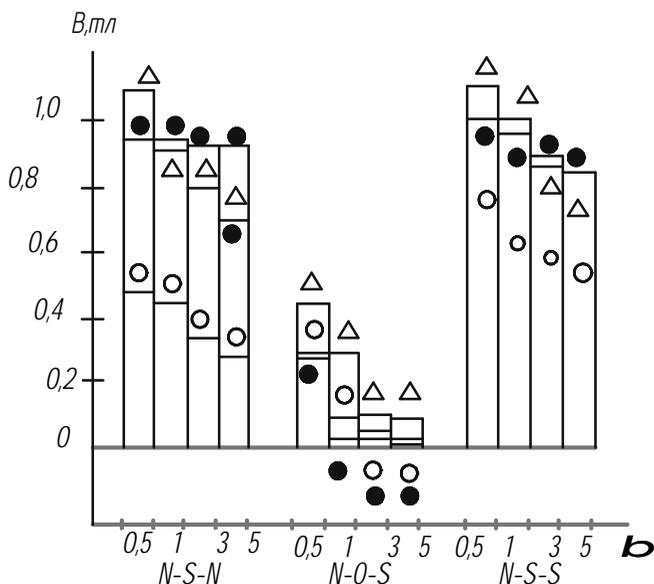


Рис. 4.5. Эффективность различных типов электромагнитных систем

Таблица 4.2
Влияние схемы включения и геометрических параметров рабочей зоны ЭМС на ее эффективность

Величина рабочего зазора δ , мм	Магнитная индукция B , Тл					
	<i>N-S-N</i>		<i>N-O-S</i>		<i>N-S-S</i>	
	1	2	1	2	1	2
Отсутствие концентратора						
0,5	0,33	0,48	0,034	0,3	0,34	0,69
Концентратор с углом охвата 30°						
0,5	0,4	0,94	0,009	0,41	0,039	0,41
Концентратор с углом охвата 45°						
0,5	0,11	0,95	0,005	0,28	0,084	1,05
1	0,11	0,95	0,005	0,13	0,08	0,97
3	0,084	0,94	0,004	0,054	0,06	0,92
5	0,08	0,94	0,004	0,027	0,057	0,89

Величина рабочего зазора δ , мм	Магнитная индукция B , Тл					
	$N-S-N$		$N-O-S$		$N-S-S$	
	1	2	1	2	1	2
Концентратор с углом охвата 90°						
0,5	0,2	1,1	0,02	0,43	0,25	1,16
1	0,14	0,92	0,015	0,28	0,17	1,05
3	0,11	0,8	0,015	0,11	0,16	0,87
5	0,11	0,72	0,01	0,09	0,11	0,64
Концентратор с углом охвата 120°						
0,5	0,26	0,86	0,004	0,31	0,06	0,96

Установлено отличие различных схем включения ЭМС, критерием которого является величина магнитной индукции в рабочем зазоре. По схеме включения $N-S-S$ эти величины на стороне $N-S$ в 3...5 раз выше, чем диаметрально ей противоположные, а отключение внешнего полюса S и образование схемы $N-S-O$ приводит к 8...10-кратному росту величины магнитной индукции со стороны $N-S$ в сравнении с $S-O$. Низкая эффективность схемы включения $N-O-S$ объясняется замыканием магнитного потока через поверхность материала, так называемым магнитным экранированием.

Углы охвата полюсных наконечников в диапазоне $45^\circ \dots 90^\circ$ обеспечивают наибольшие величины магнитной индукции в рабочей зоне. При углах охвата менее 45° уменьшается площадь контакта ФАП с обрабатываемой поверхностью изделия, что приводит к снижению производительности процесса, а при угле более 90° ослабевает силовое воздействие инструмента.

Согласно данным таблицы 4.2 и рис. 4.5, установлено, что наибольшими значениями магнитной индукции обладают наименьшие рабочие зазоры. Во избежание заклинивания ФАП величина рабочего зазора должна быть

$$\delta \geq (5-7)\Delta, \quad (4.26)$$

где Δ – зернистость ФАП, мм.

4.3. Самоорганизация и управление процессами магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения

Управление процессом магнитно-абразивной обработки ставит целью обеспечить стабильность геометрических и физико-механических параметров качества обрабатываемой поверхности за счет устойчивости параметров формирования поверхностного слоя и предполагает автоматизацию технологии, оборудования и средств оснащения, т. е. всего технологического комплекса. Магнитно-абразивная обработка основана на использовании концентрированных потоков энергии магнитного поля и сопряжена с локальным нагревом обрабатываемых поверхностей, что создает в поверхностном слое детали очаги неоднородности структурного и деформированного состояния и вызывает протекание диссипативных процессов.

Процесс МАО поверхностей целесообразно рассматривать в виде подсистем: энергетической и информационной. Первая доставляет и преобразует энергию, необходимую для воздействия на заготовку с целью изменения ее физико-механических свойств, снятия материала. Она определяется видом обработки. Вторая управляет потоками энергии и вещества, обеспечивая их доставку в необходимом количестве в заданное место рабочего пространства с целью обеспечения требуемых формы, размеров и свойств поверхности детали. Энергетическая система, воздействуя на заготовку, осуществляет переход ее из одного состояния в другое, соответствующее новому качеству [248].

4.3.1. Критерии процессов формирования поверхностей при магнитно-абразивной обработке

Изучение устойчивости процесса магнитно-абразивной обработки проводилось по критериям Re^* , Pe^* и Pr^* . Рассматривался рельеф R^* формируемой поверхности с шероховатостью Ra в зависимости от комплекса параметров. Результирующая скорость движений (V_s) складывалась из скоростей главного движения (V), подачи (S) и осцилляции с амплитудой (A). Толщина изучаемого слоя (t_p) определялась величиной (δ) рабочего зазора или относительной

величиной δ/Δ , учитывалось и упрочнение $Q/(1-\Delta H^*/H^*)$. Показатель упрочнения H^* может описываться твердостью HRC , микронапряжениями δ_{Π} или другими характеристиками. Соотношение параметров напряжений δ_M/δ_f , определялось магнитодинамическими B/t воздействиями и кинематическими характеристиками V/S .

Исследуем процесс магнитно-абразивной обработки в зависимости от основных технологических факторов: V , t , A , B , δ , представляя амплитуду осцилляции (A) движением продольной подачи (S), так как эти факторы входят в критерии самоорганизации и влияют на производительность обработки и параметры качества поверхности. Полученные экспериментальные результаты показывают, что скорость (V) и время (t) обработки влияют на производительность (Q) и шероховатость поверхности (Ra) аналогично подаче (S) и индукции (B). При этом как Q , так и Ra характеризуются, главным образом, временем обработки (t), которое вместе с магнитной индукцией (B) определяет количество абразивных зерен, участвующих в формировании поверхности. Следовательно, соотношение, описывающее вязкость технологической среды магнитодинамическими и кинематическими характеристиками (B/t) (V/S), стремится к постоянству и повышает устойчивость магнитно-абразивной обработки. В результате образующиеся цепочки абразивных частиц длиной δ обеспечивают наилучшую шероховатость поверхности, которая определяется параметрами:

$$R^* \sim \frac{Q}{(B/\tau)(V/S)}. \quad (4.27)$$

Анализ результатов экспериментов и проведенной расстановки по степени влияния технологических факторов: V , t , A , B , δ на оптимизируемые параметры позволяют представить для анализа обобщенную схему процесса формирования поверхности при магнитно-абразивной обработке в виде (амплитуда A осцилляции уподобляется подаче S):

$$Q : t \rightarrow B \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow S; \quad (4.28)$$

$$R^* : t \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow S \rightarrow B.$$

Самоорганизация процессов микрорезания и трения в магнитном поле обеспечивает максимальную производительность, при которой шероховатость поверхности минимальна. Так, при образовании R^* влияние магнитной индукции B мало по сравнению с другими факторами. Производительность обработки (Q) определяется как B , так и t путем длительной фиксации незакрепленных зерен порошка. Фиксация осуществляет обратную связь R^* с Q и посредством регулирования B в течение всего периода t повышает устойчивость формирования поверхности при магнитно-абразивной обработке.

Исследуем упрочнение поверхностного слоя при магнитно-абразивной обработке в зависимости от основных технологических факторов: t , B , Δ и с учетом факторов, обеспечивающих рациональный рельеф поверхности – V , S , заменив Δ на δ . Такой выбор обосновывается тем, что факторы эти входят в критерии самоорганизации, и основные из них определяют физико-механические параметры качества: макро- и микронапряжения σ_I , и σ_{II} , дисперсность блоков мозаики D . Результаты экспериментов показывают, что магнитная индукция (B) и длительность полирования (t) аналогично влияют на напряжения σ_I и σ_{II} . Следовательно, с учетом кинематических факторов V и S соотношение, описывающее вязкость порошковой среды (B/t) (V/S), стремится к постоянной величине и повышает устойчивость процесса упрочнения при формировании поверхности. Производительность возрастает не только в результате увеличения съема материала, но и благодаря упрочнению поверхности, с учетом которого $Q/(1-\Delta\sigma_{II}/\sigma_{II})$. Следовательно, рельеф формирующейся поверхности, можно представить параметрами:

$$R^* \sim \frac{Q/(1-\Delta H^*/H^*)}{(B/t)(V/S)}. \quad (4.29)$$

Исследования экспериментальных данных и проведенной расстановки по степени влияния основных факторов t , B , Δ на физико-механические параметры качества обработки позволяют анализировать обобщенную схему процесса упрочнения поверхности при магнитно-абразивной обработке.

$$\begin{aligned}
Q: t \rightarrow B \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow S; \\
R^*: t \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow S \rightarrow B; \\
H^*: \delta \rightarrow t \rightarrow B \rightarrow V \rightarrow S.
\end{aligned}
\tag{4.30}$$

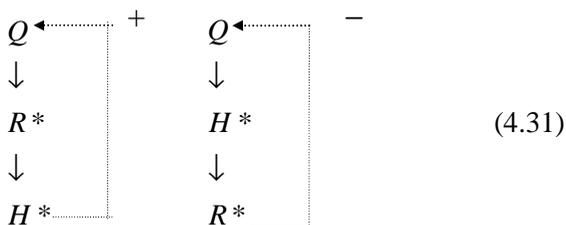
Формирующиеся при магнитно-абразивной обработке термодинамические неустойчивости, изменяющие структуру поверхностного слоя и снижающие его прочность (H^*), устраняются посредством регулирования производительности обработки (Q) [249]. Самоорганизация процессов микрорезания и трения в электромагнитном поле обеспечивает увеличение производительности (Q) и упрочнения (H^*) поверхностного слоя. Так, при формировании рельефа R^* влияние магнитной индукции B мало по сравнению с кинематическими факторами V, S , вследствие образования деформационных диссипативных структур в поверхностном слое, о чем свидетельствует его упрочнение H^* . Производительность процесса Q описывается главным образом t, B , а также V, S , обеспечивающими движения ферроабразивных частиц порошка и самой заготовки, которые осуществляют обратную связь H^* с R^* через Q . Это позволяет посредством регулирования B, V, S в течение периода t повышать устойчивость процесса упрочнения при магнитно-абразивной обработке. Таким образом, как дополнительная подвижность инструментов и частиц технологической среды, так и магнитные воздействия позволяют управлять кооперативными термомеханическими процессами формирования свойств поверхности.

При удалении поверхностного слоя с использованием магнитно-абразивной обработки образование термодинамически неустойчивых структур определяется параметрами магнитного поля в рабочей зоне. Напряженное состояние δ_f и δ_M порошковой среды зависит главным образом от магнитной индукции B . Это является одним из путей повышения устойчивости технологической системы в процессах, использующих энергию электромагнитного поля, и стабилизации параметров качества поверхностей.

При формировании поверхности свободным абразивом с увеличением f увеличивается твердость (HRC) обрабатываемой поверхности, вследствие этого возрастают скорости дополнительных перемещений абразивных частиц. Нагрев обеспечивает повышение

степени деформации, но снижает скорости дополнительных перемещений, что приводит к увеличению отклонений микрорельефа поверхности (R_a). Совместные согласованные воздействия на материал нагрева и дополнительных перемещений повышают через обратную связь устойчивость технологической системы. В результате формируется поверхностный слой максимальной твердости HRC и минимальной шероховатости R_a при скоростях дополнительных перемещений, обеспечивающих оптимальную производительность процессам MAO.

При использовании положительной обратной связи дополнительные перемещения частиц ферроабразивного порошка или инструмента, подавляя рассеяние потоков энергии, создают упрочняющие структуры в поверхностном слое и повышают производительность обработки. При использовании отрицательной обратной связи дополнительные воздействия потоками энергии, формируя упрочняющие структуры, не допускают развития неустойчивостей процесса образования рельефа поверхности и повышают качество обработки при снижении ее производительности.



В результате проведенных исследований установлены обратные связи в технологической системе: положительная при формировании поверхности или отрицательная при упрочнении поверхностного слоя.

4.3.2. Моделирование и оптимизация параметров рабочей технологической среды с учетом самоорганизации процесса магнитно-абразивной обработки

Изучение самоорганизующихся поверхностных явлений происходило в ситуации, когда аналитическая модель не разработана, а известны только критерии самоорганизации, и необходимо

использовать подходящие ортогональные ротатабельные планы для многофакторного анализа процессов и явлений. Статистическую модель MAO получали центральным композиционным ротатабельным равномерным планированием (ЦКРУП) экспериментов при $k = 5$. Параметрами оптимизации были приняты $Y_1 - Q$; $Y_2 - R_a$, а независимыми переменными – факторы $X_1 - V$, $X_2 - t$ (амплитуда осцилляции), $X_4 - B$ и $X_5 - \delta$, выбранные по критериям Re^* , Pe^* и Pr^* . Затем для наиболее значимых технологических факторов рассматривались физико-механические параметры поверхностного слоя. Условия экспериментов приведены в таблице 4.3.

Модель, определяющая характер зависимости производительности (Q , г/дм²) и шероховатости (R_a , мкм) поверхности от технологических факторов, получена при статистической обработке результатов опытов:

$$\begin{aligned}
 Q = Y_1 = & 0,745 + 0,052X_1 + 0,130X_2 - 0,001X_3 + 0,125X_4 - \\
 & - 0,101X_5 - 0,002X_1X_2 + 0,008X_1X_3 + 0,014X_1X_4 + 0,038X_1X_5 + \\
 & + 0,016X_2X_3 + 0,005X_2X_4 - 0,013X_2X_5 + 0,001X_3X_4 + \\
 & + 0,030X_3X_5 + 0,046X_4X_5 - 0,026X_1^2 - 0,060X_2^2 - 0,012X_3^2 - \\
 & - 0,002X_4^2 + 0,008X_5^2;
 \end{aligned} \tag{4.32}$$

$$\begin{aligned}
 Ra = Y_2 = & 0,080 - 0,011X_1 - 0,031X_2 + 0,006X_3 - 0,006X_4 + \\
 & + 0,022X_5 - 0,001X_1X_2 - 0,003X_1X_3 + 0,006X_1X_4 - 0,004X_1X_5 - \\
 & - 0,007X_2X_3 - 0,017X_2X_4 - 0,005X_2X_5 + 0,002X_3X_5 + \\
 & + 0,009X_4X_5 + 0,005X_1^2 + 0,020X_2^2 + 0,003X_3^2 + 0,001X_4^2 + 0,009X_5^2.
 \end{aligned} \tag{4.33}$$

Выявлено, что коэффициенты регрессий, кроме отмеченных (*), значимы с 90 %-й доверительной вероятностью, параметр Q адекватен при 5 %, R_a – при 10 %-м уровне значимости.

Графические отображения моделей (4.32), (4.33) представлены одномерными сечениями функций отклика Y_1 и Y_2 . Анализ полученной модели позволил выявить степень влияния технологических факторов на параметры оптимизации (табл. 4.4).

Из анализа данных (рис. 4.6, 4.7 и табл. 4.3, 4.4) видно, что по степени влияния, как на отдельные параметры, так и на их совокупность

в порядке убывания значимости технологические факторы магнитно-абразивной обработки можно расположить в ряды:

$$\begin{array}{l} Q: \quad t = B \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow A; \\ \hline Ra: \quad t \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow B = A; \\ \quad \quad t \rightarrow \delta \rightarrow B \rightarrow V \rightarrow A \end{array} \quad (4.34)$$

Ряды (4.34) показывают, что влияние технологических факторов на производительность (Q) аналогично влиянию на шероховатость (R_a), за исключением магнитной индукции (B), которая снижает свое влияние на качество обработки. Это объясняется тем, что с ростом B увеличивается устойчивость цепочек ферропорошка, возрастают силы резания и съем металла.

Наиболее значимыми технологическими факторами, влияющими на производительность и геометрические параметры качества магнитно-абразивной обработки, являются t , B и δ . Так как из комплексного показателя δ/Δ параметры качества больше определяет размер частицы Δ , чем величина рабочего зазора δ , то для построения статистической модели физико-механических характеристик поверхности изделия в качестве технологического фактора выбрали Δ . Постоянными принимали средние значения $V = 2,5$ м/с и $A = 1,5$ мм.

Для получения модели использовали ЦКРУП для $k = 3$. В качестве исследуемых параметров были приняты: $Y_1 - \sigma_I$; $Y_2 - \sigma_{II}$, $Y_3 - D$, а независимыми переменными $X_1 - t$, $X_2 - B$, $X_3 - \Delta$. Условия экспериментов приведены в таблице 4.3.

Модель, характеризующая величины напряжений I и II рода σ_I и σ_{II} , а также дисперсности блоков когерентного рассеяния D , определена при статистической обработке экспериментальных данных:

$$\begin{aligned} \sigma_I = Y_1 = & -0,282 - 0,029C_1 - 0,023C_2 - 0,028C_3 + 0,003C_1C_2 + \\ & + 0,002C_1C_3 + 0,007C_2C_3 + 0,024C_1^2 + 0,018C_2^2 + 0,004C_3^2; \end{aligned} \quad (4.35)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{II} = Y_2 = & 0,273 + 0,013X_1 + 0,021X_2 + 0,032X_3 - 0,003X_1X_2 - \\ & - 0,002X_1X_3 - 0,003X_2X_3 - 0,007X_1^2 - 0,009X_2^2 + 0,007X_3^2; \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$D = Y_3 = 52,16 - 7,25X_1 - 1,01X_2 - 12,25X_3 - 0,25X_1X_2 + 5,01X_1X_3 + 5,01X_2X_3 + 3,38X_1^2 + 6,50X_2^2 + 7,13X_3^2. \quad (4.37)$$

Таблица 4.3

Условия экспериментов по матрице ЦКРУП второго порядка для $k = 5$

Уровни факторов X_i	Значения факторов				
	$V, \text{ м/с}$	$t, \text{ с}$	$A, \text{ мм}$	$B, \text{ Гл}$	$\delta, \text{ мм}$
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
$-\alpha_0$	1,5	30	0,5	0,7	0,4
-1	2,0	45	1,0	0,8	0,8
0	2,5	60	1,5	0,9	1,2
+1	3,0	75	2,0	1,0	1,6
$+\alpha_0$	3,5	90	2,5	1,1	2,0

Таблица 4.4

Влияние технологических факторов на параметры производительности и качества магнитно-абразивной обработки

Факторы		Степень влияния факторов на параметры, %	
		Q	Ra
X_i		Y_1	Y_2
V	X_1	12,71	14,47
τ	X_2	31,79	40,79
A	X_3	0,25	7,89
B	X_4	30,56	7,90
δ	X_5	24,69	28,95

Коэффициенты полученных регрессий, кроме отмеченных (*), значимы с 90 %-й доверительной вероятностью, а параметры δ_1 , δ_{II} и D модели адекватны при 10 %-м уровне значимости.

Графические отображения модели (4.35)–(4.37) представлены (рис. 4.7, б-з) одномерными сечениями функций отклика Y_1 , Y_2 и Y_3 . Степень влияния факторов на физико-механические параметры качества поверхности выявлена статистическим анализом полученной модели (табл. 4.4).

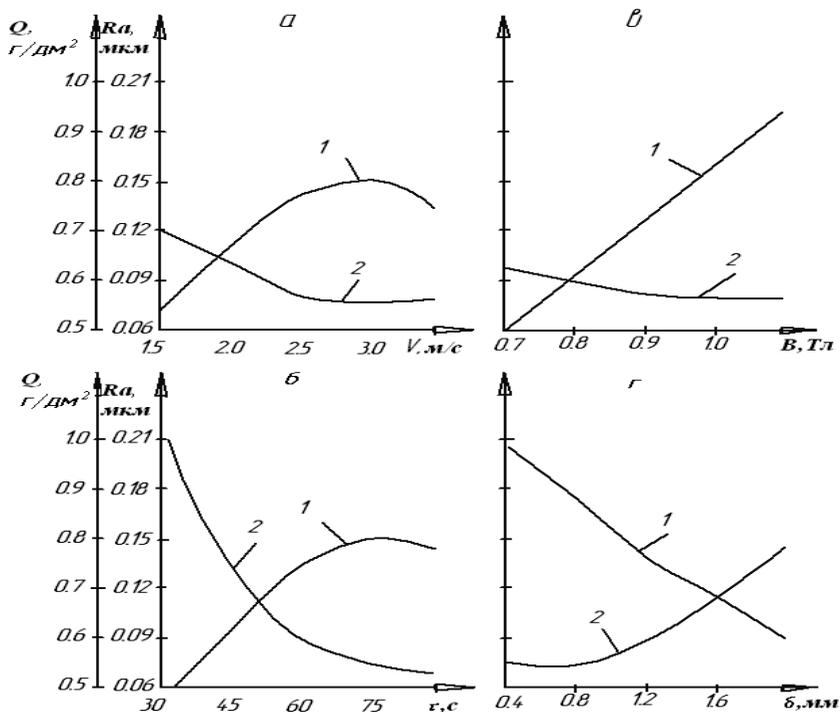


Рис. 4.6. Зависимости от скорости главного движения V (а), длительности полирования t (б), магнитной индукции B (в), рабочего зазора δ (г) показателей производительности (Q) и шероховатости поверхности (Ra) после магнитно-абразивной обработки: 1 – Q , 2 – Ra

Анализ данных (рис. 4.7, б–г и табл. 4.4) показывает, что по степени влияния на отдельные параметры и их совокупность в порядке убывания значимости основные технологические факторы можно расставить в ряды:

$$\begin{aligned}
 \sigma_I: & t \rightarrow \Delta \rightarrow B; \\
 \sigma_{II}: & \Delta \rightarrow B \rightarrow t; \\
 D: & \Delta \rightarrow t \rightarrow B; \\
 & \underline{\Delta \rightarrow t \rightarrow B}
 \end{aligned}
 \tag{4.38}$$

Порядок значимости основных технологических факторов (4.38) показывает, что на характеристики тонкой кристаллической структуры (σ_{II} и D), в значительной мере обеспечивающие прочность покрытия, наибольшее влияние оказывает зернистость порошка (Δ), характеризующая контактные процессы магнитно-абразивной обработки. Макронапряжения первого рода (σ_I), обеспечивающие предел выносливости и зависящие от соотношения силовых и температурных воздействий, определяются в первую очередь длительностью процесса (t) и имеют тот же порядок значимости факторов, что и геометрические характеристики (Ra) и производительность обработки (Q).

Оптимизация параметров технологического процесса магнитно-абразивной обработки проводилась для геометрических параметров качества и производительности процесса, так как на заключительной операции требовалось, прежде всего, обеспечить эти показатели. Физико-механические параметры оценивались отдельно, а оптимальные режимы для производительности и геометрических показателей сравнивались и уточнялись по режимам, рациональным для формирования физико-механических характеристик обрабатываемой поверхности.

Время t оказывает наибольшее влияние на результат магнитно-абразивной обработки (рис. 4.6, б). Такое влияние связано с изменением числа контактирующих зерен, зависящего от количества поданного в рабочий зазор порошка. С увеличением времени обработки остаточные напряжения сжатия возрастают, увеличиваются искажения кристаллической решетки и измельчаются блоки когерентного рассеяния (рис. 4.7, б). При $t = 60$ с они достигают оптимальных значений. Дальнейшее увеличение длительности обработки повышает температуру обрабатываемой поверхности за счет сил трения, возникающих в рабочем зазоре, и поэтому целесообразной является длительность обработки $60 \text{ с} < t < 70 \text{ с}$.

Условия экспериментов и влияние технологических факторов на физико-механические свойства поверхности после магнитно-абразивной обработки представлены в таблицах 4.5 и 4.6.

Магнитная индукция (B), являясь силовой характеристикой поля, определяет электромагнитные явления в рабочей зоне и силы абразивного резания. С повышением B увеличивается устойчивость цепочек порошка в зазоре и возрастают силы резания, поэтому

интенсифицируется съём материала покрытия, а шероховатость поверхности снижается не существенно (см. рис. 4.6, в). Обусловлено это тем, что частицы порошка, прижимаемые к обрабатываемой поверхности, имеют возможность проскальзывать и вращаться под действием моментов резания и сил трения [250]. Поэтому предпочтительной является $B > 0,9$ Тл, а при ее значении 1,1 Тл увеличиваются макронапряжения до максимальных значений (рис. 4.7, в). Последствие того, что из цепочек зерен создается более жесткая и менее проницаемая для СОТС масса, то резко повышается давление на обрабатываемую поверхность и происходит переход от преобладающего микрорезания к выглаживанию. Это приводит к увеличению сил трения, росту теплоты, выделяющейся в рабочей зоне, развитию в поверхностном слое растягивающих напряжений. Аналогично растут микронапряжения, измельчается блочная структура (рис. 4.7, в), так как при наличии в исходном материале разнообразных дефектов кристаллической решетки требуется приложение относительно небольших усилий, чтобы в этих микрообъемах металла была достигнута величина критического сдвигающего напряжения. Следовательно, для формирования геометрических и физико-механических параметров качества наиболее благоприятной является магнитная индукция $0,9 \text{ Тл} < B < 1,1 \text{ Тл}$.

Таблица 4.5

Условия экспериментов по матрице ЦКРУП второго порядка для $k = 3$

Уровни факторов X_i	Значения факторов		
	$t, \text{с}$	$B, \text{Тл}$	$\Delta, \text{мкм}$
	X_1	X_2	X_3
$-\alpha_0$	35	0,5	190
-1	45	0,7	220
0	60	1,0	260
+1	75	1,3	300
$+\alpha_0$	85	1,5	330

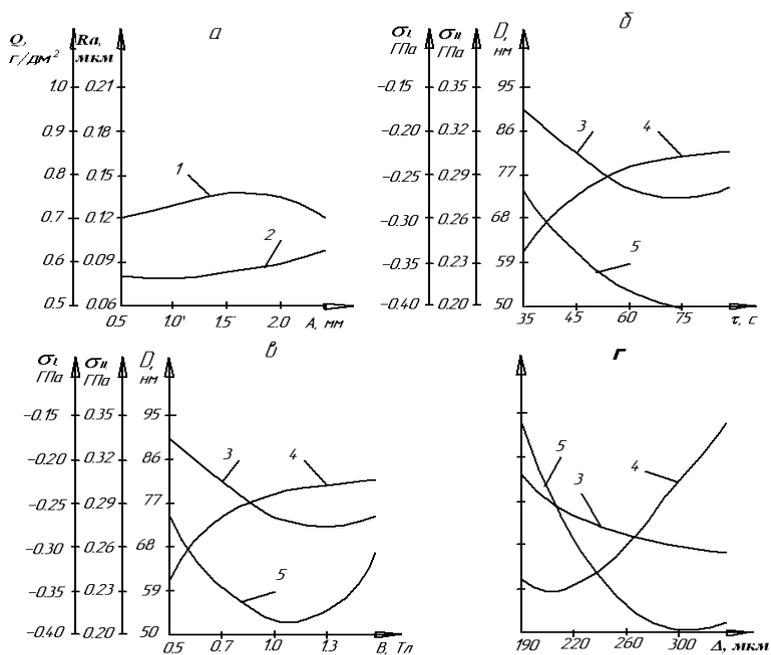


Рис. 4.7. Зависимости от амплитуды осцилляции A (а), длительности обработки t (б), магнитной индукции B (в), размера зерен Δ (г) показателей производительности и качества магнитно-абразивной обработки

1 – Q ; 2 – Ra ; 3 – δ_I ; 4 – δ_{II} ; 5 – D

Таблица 4.6

Влияние технологических факторов на физико-механические свойства поверхности после магнитно-абразивной обработки

Факторы X_i		Степень влияния факторов на параметры, %		
		σ_I	σ_{II}	D
		Y_1	Y_2	Y_3
T	X_1	36,25	19,70	35,35
B	X_2	28,75	31,82	4,92
Δ	X_3	35,00	48,48	59,73

Величина рабочего зазора (δ) определяет длину цепочки, а зернистость порошка (Δ) – количество ферромагнитных зерен в ней, влияя таким образом на плотность порошковой массы. При увеличении Δ и уменьшении δ возрастает жесткость цепочек и увеличивается сила резания. Рост рабочего зазора приводит к увеличению расхода порошка и снижению производительности процесса (рис. 4.7, з). Экспериментально установлено, что наиболее эффективен рабочий зазор $0,6 \text{ мм} < \sigma < 1,0 \text{ мм}$.

Таблица 4.7

Шкала желательности значений параметров производительности и шероховатости поверхности процесса магнитно-абразивной обработки

Параметры Y_i		Желательность значений параметров					
		A_i	B_i	C_i	D_i	E_i	F_i
Q	Y_1	0,10	0,50	0,60	0,75	0,85	1,10
Ra	Y_2	0,16	0,13	0,12	0,11	0,10	0,08

Таблица 4.8

Физико-механические параметры качества и обеспечивающие их факторы процесса магнитно-абразивной обработки

Параметры Y_i		Значения параметров	Значения факторов		
			t , с	V , Тл	Δ , мкм
σ_I , ГПа	Y_1	-0,30	56	0,9	300
σ_{II} , ГПа	Y_2	0,35	62	1,2	330
D , нм	Y_3	45,0	60	1,2	300

Так как при росте зернистости увеличиваются радиусы закругления вершин зерен и уменьшается глубина их внедрения в поверхность металла, на смену микрорезанию приходит процесс частичного выглаживания поверхности. Установлено, что минимальный зазор должен превышать удвоенный размер частиц порошка, т. е. наиболее целесообразна зернистость порошка 260/320. Скорость главного движения (V) определяет путь, пройденный зерном за единицу времени, и оказывает влияние на кинематику и динамику процесса, а осцилляции предназначена роль придания

частицам порошка осевых перемещений. В результате совокупности таких движений частицы порошка активно используют свою поверхность, что приводит к снижению шероховатости (R_a) и повышению производительности (Q) обработки (рис. 4.6, а и 4.7, а). Наиболее целесообразны для такого процесса скорости $2,5 \text{ м/с} < V < 3,0 \text{ м/с}$ и амплитуды $1 \text{ мм} < A < 2 \text{ мм}$.

Оптимизация режимов магнитно-абразивной обработки проводилась по шкале (табл. 4.7) обобщенной функции желательности. Полученные результаты показывают, что при максимальном значении функции желательности $D_0 = 0,98$ производительность и качество обработки обеспечивают параметры $Q = 1,1 \text{ г/дм}^2$ и $R_a = 0,1 \text{ мкм}$ на технологических режимах $V = 3 \text{ м/с}$; $t = 65 \text{ с}$; $A = 1,5 \text{ мм}$; $B = 1,1 \text{ Тл}$; $\delta = 0,8 \text{ мм}$. Оптимальные значения физико-механических характеристик (табл. 4.8) позволяют рекомендовать полученные режимы для обеспечения не только геометрических, но и физико-механических параметров при максимальной производительности процесса. Значения параметров качества образцов, обработанных на рекомендуемых режимах, отличаются от расчетных не более чем на 8 %.

4.3.3. Управление параметрами рабочей технологической среды с учетом самоорганизации процесса магнитно-абразивной обработки

Анализ процессов магнитно-абразивной обработки по предложенным критериям позволил определить пути управления технологической системой, обеспечивающие повышение производительности и качества формирования поверхности. Формирование поверхностного слоя при МАО, во-первых, описывается ориентацией ферроабразивных частиц порошка в рабочей зоне и образованием из них электродов-цепочек, во-вторых, характеризуется перемещением электродов-цепочек относительно поверхности детали. Организация обратной связи в технологической системе через дополнительные перемещения частиц порошка и формообразующих инструментов, а также посредством регулирования степени воздействия потоками энергии на обрабатываемую поверхность позволяет управлять устойчивостью процессов магнитно-абразивной обработки. Управлять устойчивостью нестационарных технологических

процессов обработки, каким является магнитно-абразивная обработка, можно путем реализации схемы управления, основанной на поддержании заданного уровня устойчивости протекающих диссипативных процессов и на использовании явлений их самоорганизации [250].

Управлять процессами упрочнения поверхностных слоев при магнитно-абразивной обработке позволяют тепловое воздействие и дополнительные степени свободы ферроабразивных частиц порошка путем изменения потоков магнитной энергии (рис. 4.8), когда съем металла осуществляется незакрепленными частицами абразивного порошка. Вследствие трения частиц ферроабразивного порошка с обрабатываемой поверхностью «абразивная щетка» несколько смещается в направлении движения поверхности детали и пересекает магнитные силовые линии, в результате чего возникает электродвижущая сила. Таким образом, методология управления процессами магнитно-абразивной обработки основана на стабилизации заданных значений магнитной индукции, температуры в рабочей зоне и связанных с ними коэффициентов распределения энергии K_H и трения скольжения K_T путем организации обратных связей для управления производительностью и качеством обработки.

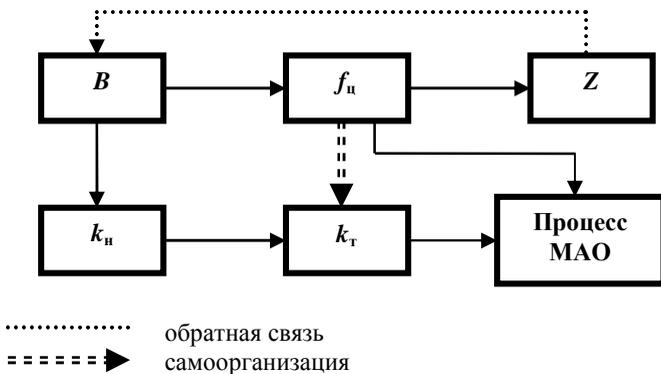


Рис. 4.8. Функциональная схема управления устойчивостью процессов MAO:
 f_n – усилие прижима ферроабразивного порошка к поверхности заготовки;
 K_H – коэффициент распределения энергии;
 K_T – коэффициент трения скольжения; Z – высота микронеровности;
 B – магнитная индукция

Следовательно, в соответствии с последовательностью протекающих в рабочей зоне при магнитно-абразивной обработке процессов движения и обмена материальными потоками, согласно критериям Пекле-Рейнольдса-Прандтля, термодинамические неустойчивости, возникающие при микрорезании и микровыглаживании поверхности, снижаются посредством управления величиной магнитной индукции B , определяющей величину микротоков, температуру в зоне обработки и напряжения в поверхностном слое.

Таким образом, организация обратных связей в технологической системе создает условия для самоорганизации процессов формирования поверхностного слоя, позволяет оптимизировать производительность и качество обработки.

Глава 5

РАЗРАБОТКА И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МАГНИТНО- АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ С УПРАВЛЕНИЕМ ПАРАМЕТРАМИ РАБОЧЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

5.1. Исследование физико-механических характеристик поверхностного слоя в зависимости от параметров рабочей технологической среды при магнитно-абразивной обработке

Существенное влияние на износостойкость и усталостную прочность деталей машин оказывают физико-механические свойства поверхностного слоя [261]. Практика и результаты исследований показали, что в некоторых случаях одинаковые по точности и шероховатости поверхности деталей машин имеют различные эксплуатационные свойства [262–265]. Это объясняется тем, что шероховатость как самостоятельный параметр не может характеризовать физическое состояние поверхностного слоя металла. У поверхностей с одинаковой конечной шероховатостью могут быть неодинаковый характер и величина остаточных напряжений, различная микротвердость. Установлено [266–270], что каждый метод обработки оказывает определенное воздействие на геометрические параметры и физические свойства поверхностного слоя деталей машин.

Влияние МАО на физическое состояние металла поверхностного слоя обусловлено абразивным резанием (диспергирование металла), пластической деформацией микронеровностей (выглаживание), химическими реакциями (воздействие на металл химически активных веществ, находящихся в рабочей среде), а также электромагнитными и адгезионными явлениями [271, 272]. Это вызывает необходимость проведения исследований влияния ряда технологических факторов МАО на физико-механические свойства поверхностного слоя [274, 275].

5.1.1. Исследование шероховатости поверхности

В соответствии с современными представлениями для сохранения параметров жидкостного трения следует иметь оптимальное значение шероховатости поверхностного слоя $R_a = 0,08 \dots 0,63$ мкм. При неупорядоченном расположении микронеровностей, образованных традиционными методами обработки, наиболее благоприятным является профиль, обладающий развитой несущей поверхностью [267].

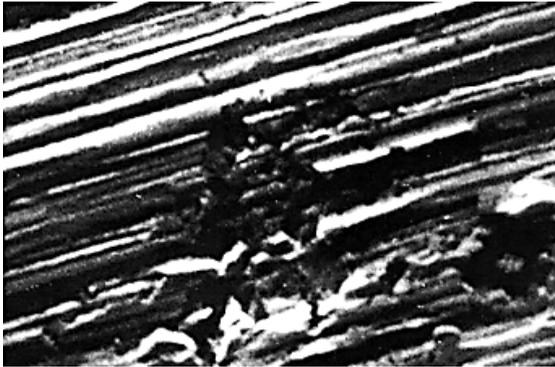


Рис. 5.1. Дефект поверхности стали 12Х2Н4А после шлифования, х500

На рис. 5.1 показана поверхность после шлифования, когда под действием высокой температуры процесса происходят локальные фазовые и структурные превращения. Это проявляется в виде «шлифовочных прижогов» и сопровождается потемнением обработанного участка, в отдельных случаях обнаруживаемого визуально.

Структурные превращения в этих местах приводят к локальным объемным изменениям, вызывающим рост внутренних напряжений разного знака. Если напряжения превышают временное сопротивление металла, происходит разрыв поверхностного слоя в центре или на границах участка «прижога», как в точке наибольшей их концентрации. Возникновение микротрещин на поверхности резко снижает сопротивление усталости изделия [268].

На рис. 5.2 показана топография поверхности деталей после различных операций финишной обработки. Шероховатость после шлифования, хонингования и МАО составляет R_a 0,6, 0,2 и 0,1 мкм

соответственно. Варьирование режимами осуществлялось следующим образом: V – скорость вращения, 5 м/с; δ – рабочий зазор, 1 мм; Δ – зернистость ферроабразивного порошка, 160/200 мкм. Смазочно-охлаждающие технологические средства – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, ФАП Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81. Переменными факторами являлись: B – магнитная индукция, 0,8–1,1 Тл; A – амплитуда осцилляции, 1...3 мм; V_0 – скорость осцилляции, 0,15...0,25 м/с; t – время обработки, 45...120 с. Оборудование – магнитно-абразивный станок МАС-1.

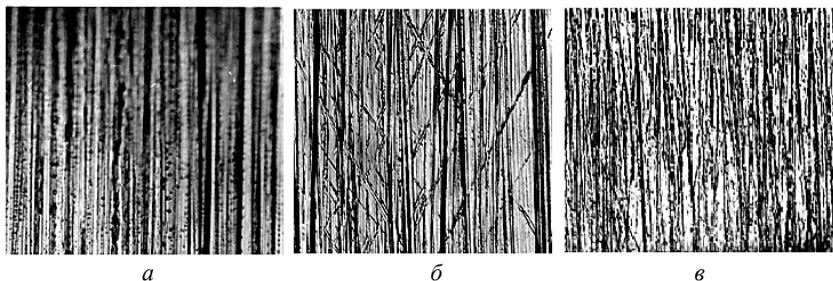


Рис. 5.2. Топография поверхности стали 12Х2Н4А после финишной обработки ($\times 200$):

a – шлифование; b – хонингование; c – магнитно-абразивная обработка

Для поверхностного слоя, созданного шлифованием, характерна большая высота микронеровностей, чем для хонингования и МАО, что может привести к снижению его несущей способности и повышению вероятности падения давления в масляном слое. МАО образует наиболее приближенный к оптимальному микрорельеф, который, однако, по сравнению с хонингованием отличается меньшей упорядоченностью. Вместе с тем присутствует рост выглаженности вершин и впадин микронеровностей, что увеличивает действительную площадь контакта трущихся поверхностей.

Согласно исследованиям [254, 270, 271, 272], контактная жесткость и износостойкость поверхностей тем выше, чем больше их опорная площадь и меньше углы профиля микронеровностей, что и характерно для слоя, созданного МАО. Геометрические характеристики сформированного шлифованием и МАО поверхностного слоя представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Геометрические характеристики сформированного шлифованием
и МАО поверхностного слоя

Параметр	Значение параметров	
	шлифование	МАО
Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм	0,22	0,09
Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z , мкм	2,06	1,12
Небольшая высота неровностей профиля R_{max} , мкм	3,80	2,70
Средний шаг неровностей S_m , мкм	44	32
Средний шаг неровностей по вершинам S , мкм	34	19
Относительная опорная длина профиля на уровне $P = 0,5 R_{max}$ t_p %	51	64
Средний радиус округления вершин выступов r , мкм	385	267

Для получения модели процесса в качестве независимых переменных брались следующие факторы: X_1 – магнитная индукция, В, Т; X_2 – пористость РТС, П, %; X_3 – концентрация СОТС, К, %; X_4 – размерность частиц на величину рабочего зазора, У; X_5 – удельный расход СОТС на объем РТС, С, мл/см³; X_6 – время обработки на площадь обрабатываемой поверхности, t/S , с/см². В опытах постоянными принимались степень заполнения порошком рабочей зоны $K_3 = 1$, порошок Ж15КТ, зернистость порошка $\Delta = 160/100$ мкм, смазывающе-охлаждающие технологические средства – СинМА-1. Эксперименты выполняли на станке модели СФТ 2.150.00.00.000. Образцами служили кольца подшипников из закаленной стали ШХ-15, 61...65 HRC.

Для достигаемой шероховатости поверхности R_{a2}

$$Y = 0,18 + 0,57x_1 + 0,05x_2 + 0,036x_3 - 0,059x_1x_3 + 0,026x_2x_3 + 0,21(x_2^2 - \lambda).$$

Таким образом, с помощью этого метода получены модели процесса МАО, которые позволяют определить степень влияния технологических факторов на параметры процесса и установить режимы обработки, обеспечивающие и достигнутую шероховатость. Графическое изображение моделей показано при помощи двухмерных сечений функций отклика Y_1 и Y_2 . Для этого из общей математической модели для параметров процесса составлялось уравнение регрессии, которое включало в себя две переменные – исследуемый технологический фактор (аргумент) и функцию отклика. Значение всех остальных факторов стабилизировали на нулевых для данной матрицы уровней.

Была составлена серия таких уравнений и для достигаемой шероховатости поверхности R_{a2} в зависимости от трех переменных: X_1 – магнитная индукция, B, T ; X_2 – пористость РТС, $\Pi, \%$; X_3 – концентрация СОТС, $K, \%$. По ним были рассчитаны исходные данные для построения графиков в виде двухмерных сечений в трехмерной системе координат (рис. 5.3).

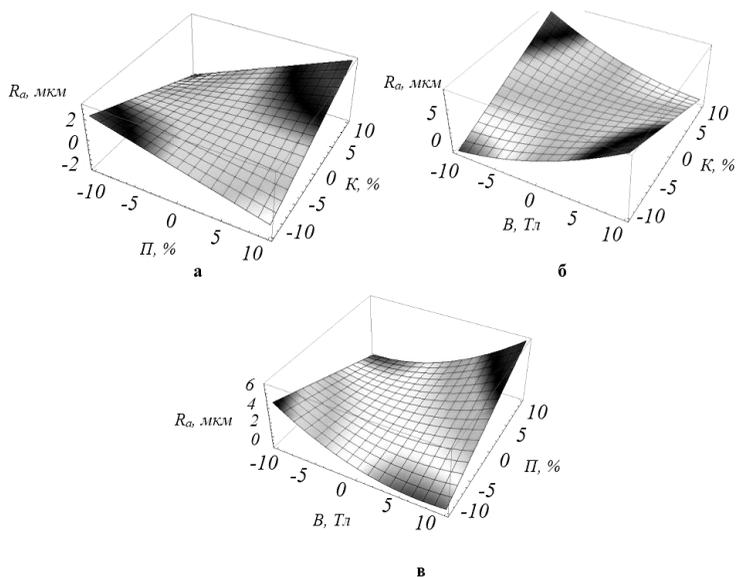


Рис. 5.3. Зависимости достигаемой шероховатости поверхности R_a от магнитной индукции B, T (б, в); пористости РТС, $\Pi, \%$ (а, в); концентрации СОТС, K (а, б)

Анализ полученных моделей позволил выявить степень влияния технологических факторов на функции отклика достигаемой шероховатости поверхности. Из всех исследованных факторов наибольшее влияние на достигаемой шероховатости оказывают магнитная индукция, пористость РТС, концентрация СОТС. На рис. 5.4 представлены зависимости качества обработанной поверхности от наиболее значимых факторов, определяющих эффективность использования РТС, как сложной гетерогенной термодинамической системы при учете анализа линейно-геометрических параметров и изометричности частиц ФАП, свойств дисперсной среды в виде СОТС, анизотропности пропускной способности и геометрической характеристики материального носителя формы РТС.

5.1.2. Исследование светоотражательной способности поверхности

Проведены экспериментальные исследования МАО поверхности плафонов (материал Л63 ГОСТ 15527–2004) для достижения высокой светоотражательной способности Φ (75–80 %). Параметры и режимы МАО: величина магнитной индукции $B = 0,5 \dots 1,0$ Тл; частота вращения детали $n = 1 \dots 3$ м/с; скорость осцилляции $V_o = 0,1 \dots 0,25$ м/с; величина рабочего зазора, $\delta = 1 \dots 4$ мм; коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_z = 1$; размерность частиц ФАП $\Delta = 63/100$ мкм; ФАП – Полимам-Т ТУ 06459–81 и магнитно-абразивный порошок АСМ (ГОСТ 9206–70) – керметная технология, абразив алмаз; СОТС – СинМА-1 ТУ 38.59.01176–91, 3%-й водный раствор; расход СОТС 50 мл/мин, 100, 150 мл/мин, 200, 250 мл/мин; скорость подачи СОТС $w = 0,55$ м/с; время обработки $t = 120$ с. Черновая обработка плафонов производилась путем использования ФАП Полимам-Т ТУ 06459–81 в течение 60 с, а окончательная обработка проводилась с применением магнитно-абразивного порошка АСМ также в течение 60 с.

Размеры обрабатываемого плафона $D \times d \times l = 55 \times 100 \times 90$ мм, толщина стенки составляет 0,25–1,0 мм. Волнообразность образующей профиль плафона не превышает 3 мм, при проведении численных расчетов и экспериментальных исследований она принята путем корреляции как прямая по максимальному размеру

диаметра плафона. Величину светоотражательной способности Φ определяли блескомером БФ5-20/20 по ГОСТ 896–69. Изменение величины магнитной индукции производилось варьированием силы тока, подаваемого на электромагнитные катушки соленоидов электромагнитной системы. При малых значениях величины магнитной индукции ($B = 0,5$ Тл) (рис. 5.4) осуществляется меньший сьем вершин микронеровностей на поверхности детали. При $B = 0,75$ Тл достигается максимальная отражающая способность.

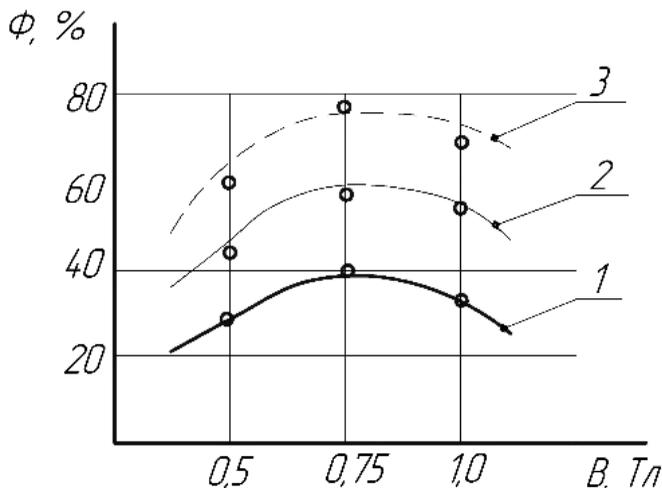


Рис. 5.4. Зависимость светоотражательной способности Φ плафонов от величины магнитной индукции B при различном расходе СОТС: 1, 2, 3 – 50; 100; 150 мл/мин

Повышение скорости резания $V_{рез}$ не приводит к существенному изменению светоотражательной способности. Увеличение скорости осцилляции V_0 не оказывает значительного влияния на светоотражательную способность, однако требуется интенсивная подача СОТС, в противном случае на поверхности плафонов появляются цвета побежалости, что снижает светоотражательную способность плафонов. При увеличении величины рабочего зазора δ образуется пространство за зоной резания по направлению вращения детали, куда устремляется поток СОТС, что требует повышенного его расхода для более эффективного охлаждения.

При чрезмерной подаче СОТС (более 150 мл/мин) в рабочем зазоре величиной $\delta = 4$ мм и магнитной индукции $B = 1,2$ Тл образуется противоток жидкости, т. е. поток СОТС устремляется в направлении, противоположном вращению плафона, и в сторону меньшего по размеру конуса. Это указывает на то, что увеличение подачи СОТС не обеспечивает его полное проникновение в зону резания, а при увеличении скорости резания наблюдается рост пенного столба и моющей способности. При этом светоотражательная способность плафона ухудшается.

В результате проведенных экспериментальных исследований определены оптимальные режимы МАО: $B = 0,75$ Тл; $V_0 = 0,15$ м/с; $\delta = 1,5$ мм, которые обеспечивают высокую светоотражательную способность плафонов (75...80 %).

5.1.3. Исследование микротвердости и структуры поверхностного слоя

Рядом исследований установлено, что улучшение микрогеометрии поверхности деталей способствует повышению их прочности, но не является определяющим фактором, характеризующим работоспособность [273–277]. Процесс упрочнения поверхностного слоя в значительной степени связан с характеристиками его тонкой кристаллической структуры: размерами блоков мозаики (областей когерентного рассеивания), величиной искажений решетки и др. [278, 279].

Важным фактором, определяющим долговечность деталей машин, является микротвердость их рабочей поверхности. В данной работе рассмотрено влияние основных технологических факторов МАО на микротвердость поверхностного слоя. Обработка осуществлялась при следующих технологических факторах: скорость резания $V_p = 1,5$ м/с; скорость осцилляции $V_0 = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции $A = 2$ мм; магнитная индукция в рабочем зазоре $B = 1$ Тл; рабочий зазор $\delta = 1,2$ мм; степень заполнения порошком рабочей зоны $K_a = 1$; магнитно-абразивный порошок Fe-TiC (15 %), зернистость порошка $\Delta = 160/125$ мкм, время обработки $t = 30$ с. Формируемый магнитно-абразивной обработкой слой характеризуется плавным уменьшением микротвердости по мере удаления от поверхности.

Глубина поверхностного слоя с повышенной микротвердостью составляет 4...6 мкм. Как было установлено, такой плавный характер изменения микротвердости положительно сказывается на эксплуатационных свойствах деталей машин [278].

Глубина и степень изменения микротвердости поверхностного слоя по мере увеличения магнитной индукции в рабочем зазоре возрастают и достигают максимального значения при $B = 1,2...1,3$ Тл. При изменении времени обработки сначала происходит интенсивное изменение микротвердости по глубине, а затем наступает стабилизация. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя стали ШХ-15 при МАО представлено на рис. 5.5.

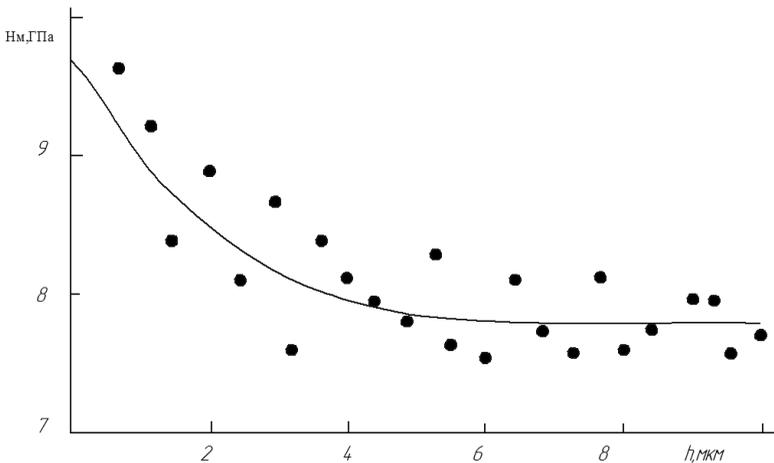


Рис. 5.5. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя стали ШХ-15 при МАО

Наиболее заметное изменение наблюдается в первые 15...20 с обработки, а затем этот процесс замедляется, что, связано с дальнейшим удалением металла с поверхности изделия и выходом на поверхность слоев с меньшим количеством остаточного аустенита. Измерение на этих же образцах твердости (на косых шлифах с нагрузкой 03 Н) свидетельствует об ее увеличении у поверхности. Причем, чем крупнее была зернистость магнитно-абразивного порошка при полировании, тем глубже от поверхности распространяется упрочненная область [93].

Наибольшие значения остаточных напряжений после МАП действуют у самой поверхности, резко уменьшаются по мере удаления вглубь приповерхностного слоя и достигают нуля на глубине 2...5 мкм, часто не переходя на больших глубинах в растягивающие напряжения. Микроструктура приповерхностного слоя после магнитно-абразивного полирования у сталей отличается увеличенным числом равномерно распределенных карбидов. Рентгеновские исследования сталей позволили установить, что после шлифования в их приповерхностном слое содержится до 36 % остаточного аустенита. Наибольшее массовое содержание аустенита вторичной закалки, образовавшегося во время предварительного шлифования, наблюдается у самой поверхности и постепенно уменьшается по глубине приповерхностного слоя. В процессе полирования основная часть остаточного аустенита удаляется вместе с припуском. Оставшаяся часть его распадается в результате пластического деформирования поверхности зернами магнитно-абразивного порошка и под воздействием циклически изменяющихся магнитострикционных напряжений в обрабатываемом материале. Распад остаточного аустенита сопровождается перестройкой кристаллической решетки железа и увеличением ее объема.

Поскольку названные превращения происходят в тончайшем приповерхностном слое, то размеры заготовки при этом не изменяются, а в приповерхностном слое возникают напряжения сжатия. Таким образом, распад остаточного аустенита является второй причиной появления напряженного состояния сжатия при магнитно-абразивном полировании закаленных сталей.

Рентгеновские исследования показали, что в результате МАП в приповерхностном слое сталей наблюдается изменение параметров a и c кристаллической решетки мартенсита, увеличение параметра решетки карбида Me_6C (табл. 5.2). Установлено также уменьшение массового содержания углерода в мартенситной фазе, что закономерно ведет к увеличению параметра a и уменьшению параметра c решетки мартенсита. Увеличение параметра a является также следствием превращения высоколегированного аустенита в высоколегированный неотпущенный мартенсит. При этом могут наблюдаться снижение твердости мартенсита и увеличение твердости карбидной фазы.

Таблица 5.2

Результаты рентгеновского исследования поверхности
различных марок сталей [93]

Контролируемый параметр	Способ обработки	Марка стали		
		Р6М5	Р9К5	Р6М5К5
Массовое содержание остаточного аустенита, %	Шлифование МАП	36±13 %	29,0	47,0
		0	0	0
		30±10 %	9,0	37,0
Параметр <i>a</i> кристаллической решетки мартенсита, А	Шлифование МАП	2,8693	2,870	2,872
		2,9481	2,884	2,874
		2,8740	2,883	2,873
Параметр <i>c</i> кристаллической решетки мартенсита, А	Шлифование МАП	2,8854	2,882	2,888
		2,8730	2,842	2,838
		2,8671	2,866	2,855
Параметр кристаллической решетки карбида Me_b С,А	Шлифование МАП	10,992	11,005	10,996
		11,005	11,042	11,000
		10,992	11,036	10,989
Массовое содержание углерода в мартенсите, %	Шлифование МАП	0,41	0,60	0,65
		0,31	0,48	0,38
		0,38	0,40	0,45

В качестве образцов использовались кольца подшипников $d_{вн} = 215$ мм из стали 12Х2Н4А (ГОСТ 4543–71), твердостью 61...63 HRC. Финишная обработка деталей по заводской технологии состояла из шлифования и последующего хонингования, по сравниваемой – из шлифования и магнитно-абразивной обработки [10–А, 280]. Режущим инструментом при MAO является ферроабразивный порошок Ж15КТ (ТУ 6-09-03-483–81) на основе карбидов титана, зернистость которого составляет 160/200 мкм.

Согласно специальным техническим условиям структура подшипниковых сталей должна состоять из скрытокристаллического или мелкокристаллического мартенсита и мелких избыточных карбидных включений.

На рис. 5.6 показана исходная структура стали 12Х2Н4А после цементации, закалки и отпуска. Данная структура имеет типовую морфологию кристаллов в составе твердого раствора (мартенсита) и полностью отвечает особенностям фазовых мартенситных превращений [281].

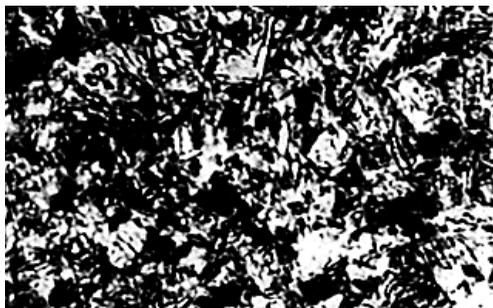


Рис. 5.6. Структура стали 12Х2Н4А после термообработки (цементация, закалка, отпуск), $\times 200$

В таблице 5.3 представлены данные по определению остаточных напряжений в поверхностном слое деталей после различных операций финишной обработки. Поскольку при МАО процесс преимущественно носит характер тонкого пластического деформирования, то происходит образование сжимающих напряжений, как после хонингования.

При шлифовании высоколегированной закаленной стали, в результате вторичной закалки, образуется поверхностный слой, имеющий аустенитно-мартенситную структуру. Его структура отличается от структуры стали после обычной закалки повышенным содержанием остаточного аустенита (до 80 %) и увеличенным параметром кристаллической решетки. Поскольку пластической деформации в первую очередь подвергаются зерна остаточного аустенита, то в процессе обработки скопления дислокаций сосредотачивается именно в аустенитной фазе, что часто приводит

к образованию микро- и макротрещин. В связи с этим при циклическом воздействии контактных нагрузок деформированные зоны остаточного аустенита служат концентраторами напряжений и способствуют снижению прочности [282].

Таблица 5.3

Величина остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое после различных методов финишной обработки

Метод обработки	Величина остаточных напряжений, МПа
Исходное состояние (цементация, закалка, отпуск)	660
Шлифование	750
Хонингование	810
Магнитно-абразивная обработка	980

На рис. 5.7 показана структура поверхностного слоя стали 12Х2Н4А после шлифования (а), хонингования (б) и МАО (в).

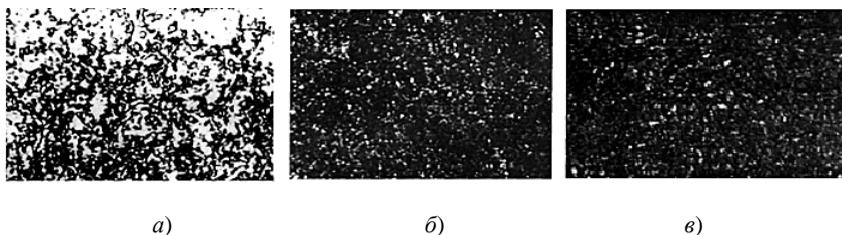


Рис 5.7. Микроструктура поверхностного слоя после шлифования (а), хонингования (б), МАО (в), $\times 200$

При травлении детали после шлифования не ее поверхности выявлены границы зерен остаточного аустенита. Глубина этого слоя составляет 30...50 мкм. Как указывалось выше, в деталях, подвергшихся контактным циклическим нагрузкам, на последующих финишных операциях следует удалять образовавшийся белый

поверхностный слой. После хонингования и МАО структура имеет мелкодисперсное строение с равномерно распределенными мелкими округленными зёрнами карбидов. Такая структура способствует росту контактной прочности и износостойкости и в полной мере соответствует требованиям специальных технических условий.

В таблице 5.4 представлены сравнительные результаты определения остаточного аустенита и размеров кристаллической решетки в поверхностном слое деталей после различных методов обработки. Время обработки при МАО в среднем составляет 60 с.

Изменения микроструктуры наблюдаются на закаленных углеродистых сталях. Например, структура стали марки У10А, прошедшей закалку, низкий отпуск и шлифование, представляла собой пластинчатый мартенсит с редкими крупными зёрнами карбида железа. После полирования структура приповерхностного слоя преобразовалась в мелкодисперсную с трудно различимыми размерами зёрен. Карбиды пластинчатой формы исчезли, превратившись в мелкие округлые зёрна, равномерно распределенные по всему полю косо́го шлифа.

Таблица 5.4

Влияние метода финишной обработки на количество остаточного аустенита и величину блоков когерентного рассеяния

Метод обработки	Остаточный аустенит, %	Размер областей когерентного рассеяния, нм
Исходное состояние (цементация, закалка, отпуск)	20,7	36,7
Шлифование	25,1	48,2
Хонингование	16,2	43,9
МАО	14,8	42

Применение таких финишных операций как хонингование и МАО приводит к устранению дефектного слоя глубиной 50 мкм и образованию характерного микрорельефа и структуры поверхности, обеспечивающих более качественные характеристики

материала по сравнению со шлифованием. В отличие от хонингования, МАО обеспечивает увеличение остаточных сжимающих напряжений на поверхности деталей в среднем на 20 % при равных размерах областей когерентного рассеяния. Физико-механические параметры качества исходного поверхностного слоя представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5

Физико-механические параметры качества исходного поверхностного слоя

Параметр	Значение
Содержание остаточного аустенита A , %	12
Величина напряжений I рода δ_1 , ГПа	0,40
Величина напряжений II рода δ_2 , ГПа	0,09
Дисперсность блоков когерентного рассеяния D , нм	85

Уменьшение содержания остаточного аустенита при МАО обусловлено деформациями, возникающими в поверхностном слое при обработке, так как остаточный аустенит имеет низкую устойчивость в условиях деформации даже при небольших температурах. Кроме того, при МАО удаляется искаженный шлифованием поверхностный слой, который характеризуется большим количеством остаточного аустенита, чем матрица.

Известно [283–288], что остаточный аустенит имеет низкую устойчивость в условиях деформации даже при небольших температурах. Меньшая интенсивность распада аустенита обусловлена, очевидно, возрастанием теплового воздействия и относительным снижением деформационного. Кроме того, можно предположить, что уменьшение остаточного аустенита происходит и за счет того, что низкая температура в зоне обработки приводит к распаду пересыщенного твердого α -раствора с когерентным выделением мельчайших частиц карбидов и распаду аустенита, соответствующему низкотемпературному отпуску.

Установлено [289], что напряжения I рода (макронапряжения), уравнивающиеся в макрообъемах металла, не оказывая существенного влияния на твердость и предел прочности металла, существенно повышают предел устойчивости, если их знак противоположен знаку напряжений, вызываемых внешней нагрузкой.

Исследованиями [284–287] установлено, что если возникающая под действием сил резания упругопластическая деформация преобладает, то возникают сжимающие остаточные напряжения I рода, если же превалирует фактор теплового воздействия, то в поверхностном слое формируются растягивающие остаточные напряжения I рода. Проведенные исследования показывают, что при MAO в тонком поверхностном слое возникают остаточные напряжения сжатия. Это свидетельствует о том, что основной причиной их возникновения является пластическая деформация. Так, рост магнитной индукции в рабочем зазоре от 0,4 до 1,25 Тл вызывает увеличение макронапряжений от $-0,02$ до $-0,92$ ГПа (рис. 5.8).

Характеристики тонкой кристаллической структуры поверхностного слоя (остаточные напряжения II рода и блоки когерентного рассеивания) значительно влияют на прочность металлов и сплавов. Состояние высокой прочности сталей и сплавов характеризуется наличием больших искажений решетки и значительной дисперсностью блоков. Наибольшее влияние на остаточные напряжения II рода и дисперсность блоков когерентного рассеяния оказывают магнитная индукция в рабочем зазоре и зернистость порошка, меньшее влияние оказывает время обработки.

Измельчение структуры блоков когерентного рассеяния при всех исследованных значениях B и Δ свидетельствует о том, что при наличии в исходном материале разнообразных дефектов кристаллической решетки требуется приложить небольших усилий, чтобы в этих микрообъемах металла была достигнута величина критического сдвигающего напряжения и произошли пластические сдвиги. Последние являются причиной интенсивного дробления ранее существовавших блоков на отдельные фрагменты, когерентно рассеивающие рентгеновские лучи. Видно, что в исследуемом диапазоне времени обработки с увеличением t напряжения II рода увеличиваются, а величина блоков когерентного рассеяния уменьшается. Это свидетельствует об упрочнении поверхностного слоя, формируемого MAO.

Величина и характер распределения остаточных напряжений I рода по глубине поверхностного слоя после MAO показаны, что в тонком поверхностном слое формируются остаточные напряжения сжатия, достигающие 1,1 ГПа. Максимальные значения напряжения имеют непосредственно у поверхности и снижаются до 0 на глубине 10 мкм.

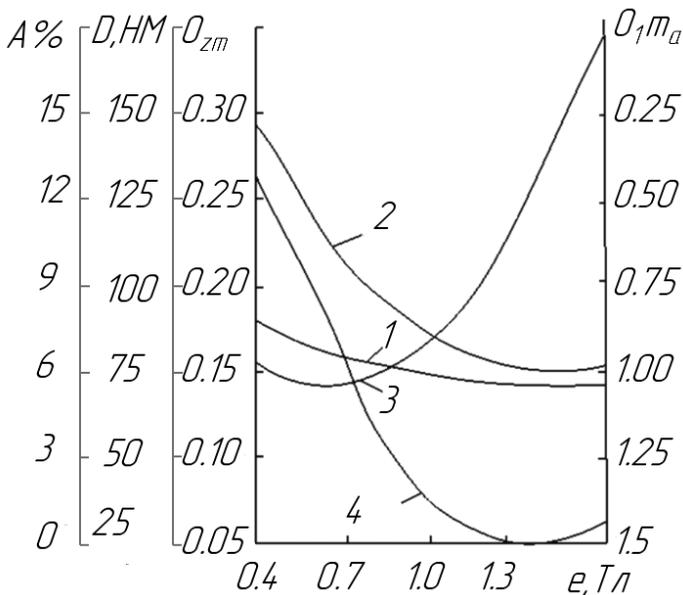


Рис. 5.8. Влияние магнитной индукции в рабочем зазоре на изменение содержания остаточного аустенита (1); напряжения I рода (2); напряжения II рода (3); дисперсности блоков когерентного рассеяния (4) в поверхностном слое У10А при МАО

Таблица 5.6

Физико-механические параметры качества сформированного МАО поверхностного слоя и технологические факторы, их обеспечивающие

Параметр	Значение параметра	Технологические факторы		
		B , Тл	t , с	Δ , мкм
Содержание остаточного аустенита A , %	6	1,00	42	160
Величина напряжений I рода δ_1 , ГПа	-1,17	1,25	30	200
Величина напряжений II рода δ_2 , ГПа	0,26	1,15	42	240
Дисперсность блоков когерентного рассеяния D , нм	29	1,00	42	200

Таким образом, в процессе МАО образуются остаточные сжимающие напряжения значительно большей величины, чем при механическом полировании, когда величина их составляет 0,3...0,4 ГПа (табл. 5.6). Полученные данные согласуются с результатами исследований [291–299].

5.2. Исследование эксплуатационных характеристик поверхностного слоя после магнитно-абразивной обработки

Период установившегося изнашивания и время наступления аварийного в высокой степени зависит от свойств поверхностного слоя, образовавшегося в период приработки. В связи с вышеизложенным одним из основных путей достижения такого условия является технологическое обеспечение оптимальных параметров качества поверхностного слоя. Для оценки влияния условий обработки на износостойкость штоков гидропривода в период изнашивания были проведены сравнительные исследования методами магнитно-абразивной обработки и шлифования.

5.2.1. Исследование износостойкости поверхностного слоя

Испытания проводились на машине трения 2070 СМТ-1 в условиях трения качения [300]. Параметры и режимы при шлифовании: скорость вращения детали, $V_d = 50$ м/мин; скорость вращения круга, $V_k = 20$ м/с; продольная подача; $S_{пр} = 0,5$ м/мин; круг алмазный АСВ 125/100 МП 1; при МАО: величина магнитной индукции, $B = 0,9$ Тл; скорость резания, $V_p = 1$ м/с; скорость осцилляции, $V_o = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции, $A = 1$ мм; величина рабочего зазора, $\delta = 1$ мм; ферроабразивный порошок – Ж15КТ ТУ 6-09-483–81; смазочно-охлаждающие технологические средства – при шлифовании – 1–3 %-й водный раствор эмульсии Укринол, при МАО – 2 %-й водный раствор СинМА – 1 ТУ 38.5901176–91. Материал контртела – бронза. Обрабатываемый материал – сталь 20Х ГОСТ 4543–71, 56-62 НРС. Сами наклонные срезы изготавливались на плоскошлифовальном станке ЗГ71 с магнитной плитой при интенсивном охлаждении эмульсией Укринол – 1,3 %-й водный раствор.

Коэффициент трения определялся по измерению момента трения, который регистрировался с помощью индуктивного датчика, встроенного в кинематическую схему машины. Температура в зоне контакта образцов измерялась с помощью термопары, которая устанавливалась в просверленном отверстии колодки диаметром 1,5 мм на глубине 1 мм от поверхности трения. Испытания проводились при частоте вращения 1500 об/мин и номинальном давлении $P_{\text{ном}} = 17,5$ МПа. Интенсивность изнашивания определялась методом искусственных баз, которые наносились твердомером ПМТ-3. Массовый износ регистрировался на аналитических весах ВЛА-200 с погрешностью, равной 0,0001 г. В качестве смазочного материала использовалось индустриальное масло И-20А ГОСТ 20779–88. Измерение шероховатости Ra образцов до и после обработки осуществлялось на профилометре мод. 252-Калибр. Исследование остаточных напряжений 1-го рода σ осуществлялось методом Н. Н. Давиденкова. Удаление слоев металла производилось электрохимическим методом со скоростью 0,05 мкм/с. Вычисление величин напряжений осуществлялось путем уточнений, внесенных М. А. Бабичевым и Л.А. Гликманом. Остаточные напряжения исследовались на глубине 5 мкм [301].

Продукты износа после испытаний с образцов удаляли 10 %-м раствором лимоннокислого аммония, нейтрализованного аммиаком. Испытания проводились без доступа воздуха, по результатам испытаний построены графики изменения момента трения и температуры в зоне контакта на пути трения 15000 м, что соответствует 1,5 ч работы машины трения при угловой скорости 1500 мин⁻¹ (рис. 5.9).

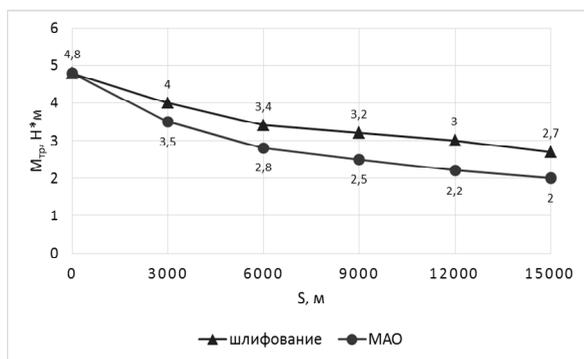


Рис. 5.9. График изменения момента трения ($M_{\text{тр}}$) на пути трения (S) 15000 м

По рис. 5.10 можно установить период приработки и период, соответствующий установившемуся износу. На пути трения от 0 до 6000 м кривые отличаются на 15 %. Это свидетельствует о том, что пары трения после шлифования и MAO имеют различный период приработки. На пути трения от 6000 до 15 000 м, соответствующему установившемуся износу, момент трения образцов после MAO меньше, чем момент трения образцов после шлифования в среднем на 0,7 Нм. В период приработки (от 0 до 3000 м) температура в зоне контакта ролика с колодкой при MAO в сравнении со шлифованием начинает увеличиваться (рис. 5.10).

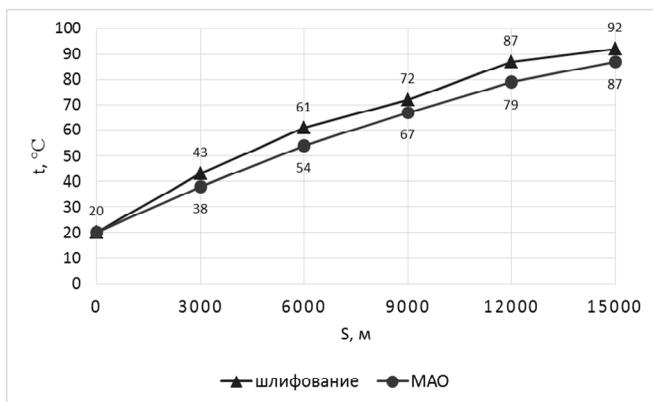


Рис. 5.10. График изменения температуры в зоне контакта (t) на пути трения (S) 15000 м

На пути трения от 3000 до 15 000 м температура в зоне контакта образцов при MAO значительно отличается от температуры в зоне контакта образцов при шлифовании. Максимальная разница температур составляет 8 С, что свидетельствует о более низкой степени контактного взаимодействия трущихся поверхностей после MAO в сравнении со шлифованием.

Коэффициент трения скольжения $f_{тр}$ штока по колодке вычисляется по формуле:

$$f_{тр} = \frac{M_{тр}}{F_N \cdot R}, \quad (5.1)$$

где $M_{тр}$ – момент трения, Нм; F_N – сила прижатия штока к колодке, Н; R – радиус штока, м.

Из рис. 5.11 можно отметить, что практически на всем пути трения коэффициент трения штока при МАО меньше, чем коэффициент трения штока по колодке при шлифовании. Эти данные свидетельствуют о том, что использование процесса МАО при обработке штоков гидроцилиндров позволяет снизить трение в исследуемых образцах на 15...20 %. После испытаний на машине трения СМТ-1 был определен массовый износ штоков гидроцилиндра. В результате обработки данными методами получаются различные степени неоднородности структуры и физико-механические характеристики качества поверхности. Форма и связь между данными факторами, имеющими стохастическую природу, определялись на основе множественного регрессионно-корреляционного анализа. В качестве независимых переменных были выбраны параметры Ra , мкм; $H_{ц}$, МПа; δ , МПа; h , мкм.

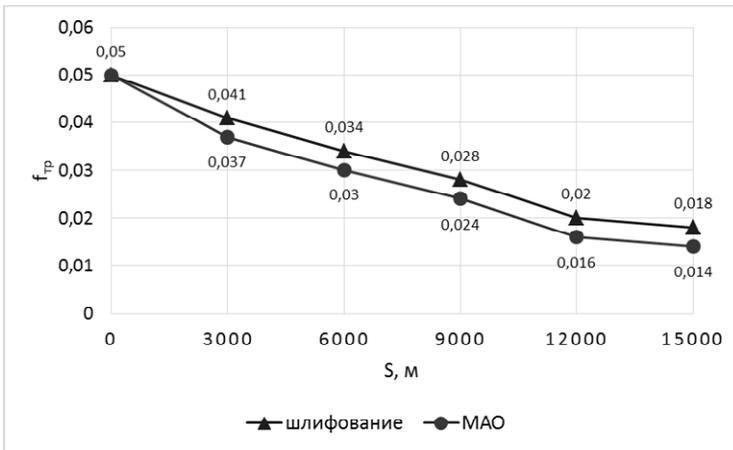


Рис. 5.11. Изменение коэффициента трения ($f_{тр}$) на пути трения (S) 15000 м

Поэтому при анализе влияния характеристик качества поверхности на износостойкость учитывался модуль параметра δ/h , значения которого определены по зависимости остаточных напряжений δ от параметров режима обработки и глубины поверхностного слоя h .

Средние показатели качества поверхности для 5 образцов и результаты испытаний на износ приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7

Результаты испытаний на износостойкость после различных финишных методов

Шлифование				Магнитно-абразивная обработка			
R_a , мкм	H_μ , МПа	δ/h , МПа/мкм	J , мг	R_a , мкм	H_μ , МПа	δ/h , МПа/мкм	J , мг
0,89	582	4,21	218	0,09	675	6,03	107
0,74	468	3,09	194	0,08	593	5,12	97
0,9	606	4,91	177	0,11	715	5,47	109
0,79	677	5,03	190	0,1	803	636	115
0,83	515	4,37	183	0,09	611	5,88	104

В результате обработки экспериментальных данных получена следующая адекватная зависимость износа от характеристик качества поверхности для процесса МАО:

$$J = 22,74 Ra^{0,163} \cdot H_\mu^{0,214} \cdot \frac{\sigma}{h}^{0,307} \quad (5.1)$$

Множественный коэффициент корреляции равен 0,9, коэффициент множественный детерминации – 0,81. Следовательно, 81 % всей вариации износа объясняется изменением характеристик качества поверхности, используемых в анализе. Степень влияния каждой из этих характеристик на износ определяли с помощью коэффициентов частной детерминации.

Как видно из зависимости, наибольшее влияние на износ оказывает параметр δ/h . Положительное влияние сжимающих остаточных напряжений на износостойкость согласуется с основными положениями фрикционно-усталостной и молекулярно-механической теорий трения [49, 59]. Остаточные сжимающие напряжения, возникающие в наружных слоях детали, приводят к повышению сопротивления распространению микротрещин в изделии. Деформирование под действием остаточных сжимающих напряжений снижает пики напряжений и выравнивает структурную неоднородность.

В результате проведенных испытаний на износостойкость штоков гидроцилиндров методами MAO и шлифования установлено, что применение MAO обеспечивает уменьшение момента трения в среднем на 0,7 Н*м, температуры на 8 °С и коэффициента трения на 15...20 %. Получение данных результатов объясняется более благоприятным микрорельефом и меньшей структурной неоднородностью поверхности штоков гидроцилиндров после MAO по сравнению со шлифованием.

5.2.2. Исследование коррозионной стойкости поверхностного слоя

Проблемы коррозии постоянно обостряются из-за непрерывного роста производства различных металлов и ужесточения условий их эксплуатации. Поэтому вопросы защиты металлических материалов от коррозии становятся все более актуальными. Полностью предотвратить коррозию металлов невозможно, поэтому единственным путем борьбы с ней является поиск способов ее замедления [302].

Для возможности реализации магнитно-абразивной обработки были проведены экспериментальные исследования по определению технологических режимов обработки поверхности закаточного ролика.

Материал ролика Х12М, НВ 90...120. В качестве оборудования для MAO применяется станок СФТ 2.150.00.00.000. ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81, зернистость ФАП, $\Delta = 100/160$ мкм, СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 5 %-й водный раствор. Величина рабочего зазора варьировалась от $\delta = 1...3,5$ мм, коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_3 = 1$, время обработки составляло $t = 120$ с. Исходная шероховатость поверхности ролика $R_{a1} = 0,8...1$ мкм. Выходными показателями служит величина удельного массового съема материала, Q мг и достигаемая шероховатость поверхности, R_{a2} , мкм. Изменение массового съема производили на весах аналитических ВЛА 200 г с точностью до 10^{-6} кг, шероховатость – на профилографе-профилометре «Калибр-252».

Методика проведения эксперимента включает ускоренные испытания при полном погружении при воздействии солевого раствора в специальных коррозионных камерах (емкостях). В ходе исследований установлены особенности влияния защитных слоев,

полученных термической обработкой, шлифованием и магнитно-абразивной обработкой, на коррозионные свойства исследуемого закаточного ролика. Для этого проводились коррозионные испытания в 10 % водном растворе NaCl при температуре 20 °С. Методика определения коррозионной стойкости заключалась в оценке площади поверхности, занятой продуктами коррозии.

Испытаниям были подвергнуты образцы после токарной обработки, шлифования и MAO. На рис. 5.12 представлены образцы после MAO до проведения испытаний на коррозионную стойкость. На рис. 5.12, 5.13 показана кинетика развития коррозии на образце, обработанном методом MAO, которая наблюдалась в течение 336 часов. На основании полученных данных измерений площади, занятой продуктами коррозии, были построены зависимости покрытия коррозией исследуемого образца в зависимости от времени.



Рис. 5.12. Фотография образца после MAO до начала эксперимента



Рис. 5.13. Фотография образца после MAO через 240 часов

Данные измерения покрытия коррозией образцов представлены в таблице 5.8. График коррозии образцов в зависимости от времени проведения эксперимента представлен на рис. 5.14.

Таблица 5.8

Данные измерения покрытия коррозией образцов

Время проведения эксперимента, ч	Площадь покрытия образца коррозией, %			
	после	после	после	после
	токарной обработки	термической обработки	шлифования	МАО
48	7	5	5	3
96	14	7	8	5
168	18	12	10	8
240	25	16	12	10
336	32	18	15	12

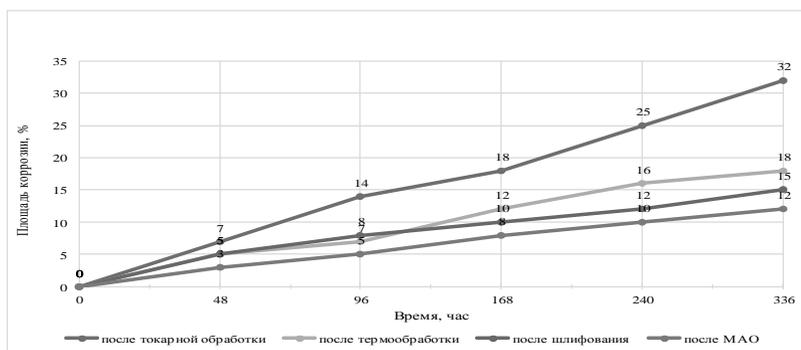


Рис. 5.14. График коррозии образцов в зависимости от времени проведения эксперимента

Поверхность после токарной обработки (рис. 5.15, а) имеет регулярную структуру, определяемую режимами обработки, геометрией режущей кромки инструмента и т. д. Структура поверхности после шлифования (рис. 5.15, б) представляет собой множество неглубоких, параллельно расположенных царапин, произведенных абразивными зернами, находящихся на периферии шлифовального круга. В процессе магнитно-абразивной обработки поверхность (рис. 5.15, в) формируется частицами ферроабразивного порошка

приблизительно равного размера, внедряющимися в нее в произвольных местах и под произвольными углами.

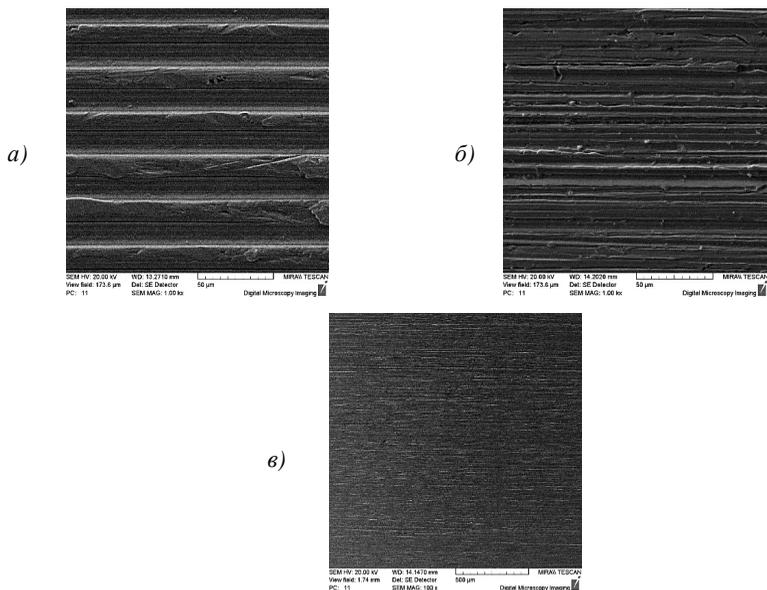


Рис. 5.15. Топографии поверхностей исследуемых образцов, $\times 100$
а – после токарной обработки; б – после шлифования;
в – после магнитно-абразивной обработки

Образец после магнитно-абразивной обработки, выдержавший 336 часов испытаний в 10 %-м растворе NaCl, покрылся продуктами коррозии только на 12 % (коррозия была выявлена лишь на необработанном участке), в отличие от остальных образцов – после токарной обработки, после термообработки и после шлифования, процент покрытия продуктами коррозии которых составил 32, 18, 15 %, соответственно.

5.3. Разработка типового технологического процесса магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения

Проектирование технологических процессов (ТП) имеет целью дать подробное описание процессов изготовления детали

с необходимыми технико-экономическими расчетами и обоснованиями выбранного варианта. Все это служит основой для организации обеспечения производства основными и вспомогательными материалами, календарного планирования, технического контроля, инструментального и транспортного обеспечения, а также для определения производственных площадей, потребных топливно-энергетических ресурсов, рабочей силы и т. п. [303].

При проектировании технологического процесса МАО используют формы карт на механическую обработку:

- маршрутную карту ГОСТ 3.1118–82, которая содержит описание технологического процесса изготовления и контроля изделия по всем операциям различных видов работ в технологической последовательности с указанием данных по оборудованию, оснастке, материальным и трудовым нормативам;

- операционную карту ГОСТ 3.1404–86, содержащую описание операции технологического процесса изготовления изделия с расчленением по переходам и указанием соответствующих данных по оборудованию, оснастке и режимам резания;

- карту эскизов ГОСТ 3.1105–84, содержащую графическую иллюстрацию технологической операции.

5.4. Освоение в производстве технологии и оборудования для магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения

Движение ферроабразивных частиц в рабочем зазоре при МАО и интенсивность съема микронеровностей с обрабатываемой поверхности определяются характером действия на контактирующие частицы сил на различных стадиях процесса абразивного воздействия. Оборудование и технологическая оснастка для МАО создаются как индивидуальные образцы, так и путем модернизации различных МРС. В последнем варианте разрабатывается принципиальная рабочая схема и механизмы привода обрабатываемых изделий и их осцилляция (рис. 5.16).

Оборудование для МАО включает следующие основные системы:

- магнитную, состоящую из электрических магнитных катушек на постоянном выпрямленном токе и предназначенную для удержания ФАП;

- механическую, обеспечивающую позиционирование и закрепление обрабатываемых деталей в зоне обработки и соотношения ими рабочих и вспомогательных движений, а также выполняющую функцию несущей системы;
- электрическую, предназначенную для питания ЭМС, привода и управления механизации МРС;
- систему подачи СОТС и ФАП в зону обработки.

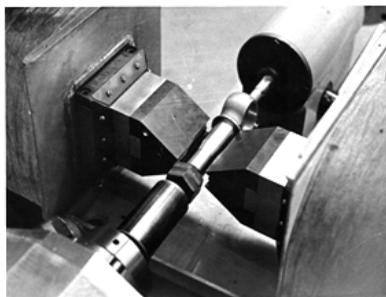


Рис. 5.16. Фотография рабочей зоны при МАО деталей типа «вал»

Станок СФТ 2.150.00.00.000, созданный на базе токарного станка 16К20, предназначен для магнитно-абразивной обработки деталей типа валов, штоков, гильз, поршней и других деталей типа тел вращения с прямолинейной и сложно профильной образующей. Общий вид станка показан на рис. 5.17.

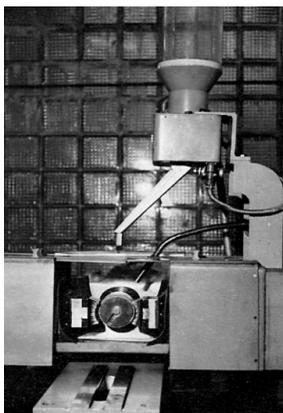


Рис. 5.17. Фотография рабочей зоны станка СФТ 2.150.00.00.000

Станок состоит из следующих основных узлов: электромагнитной системы с двумя намагничивающими катушками; механизма осцилляции, включающего электродвигатель со сменными шкивами, и узла осцилляции; механизма перемещения полюсных наконечников и пульта управления. Техническая характеристика установки приведена в таблице 5.9.

Таблица 5.9

Техническая характеристика станка СФТ 2.150.00.00.000

Магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл	0,8–1,3
Частота осцилляции полюсных наконечников, дв. ход/с	0–20
Амплитуда осцилляции полюсных наконечников, мм	1–5
Габариты обрабатываемых деталей, мм: Диаметр	10–160
Число намагничивающих катушек	2
Максимальный ток, подаваемый на катушки, А	6
Мощность электродвигателей осцилляции, кВт	1,0
Мощность электромагнитных катушек, кВт	0,6
Производительность обработки, дет/ч	10...100
Габариты устройства, мм: длина ширина высота (с электродвигателями)	1800 380 800
Масса электромагнитного контура с приводом наконечников, кг	400

Станок МАРС-15 включает станину с концевым магнитопроводом, на котором находятся полюсные наконечники, имеющие концентраторы МП. Внутреннюю часть магнитопровода охватывает электромагнитная система (ЭМС). Работа станка производится следующим образом: включается ЭМС, в рабочий зазор между полюсными наконечниками помещают деталь, туда же вводится ФАП, заполняющий данную зону (рис. 5.18). Техническая характеристика станка МАРС-15 приведена (табл. 5.10).

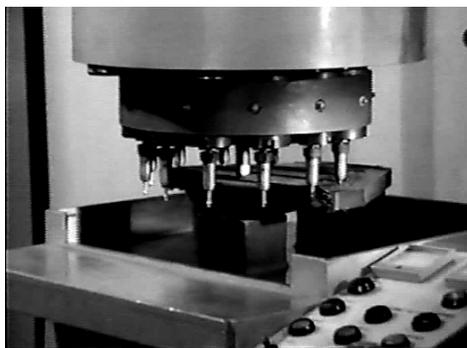


Рис. 5.18. Фотография рабочей зоны станка МАРС-15

Таблица 5.10

Техническая характеристика станка МАРС-15

Магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл	0,6...1
Частота осцилляции полюсных наконечников, дв. ход/мин	280
Амплитуда осцилляции полюсных наконечников, мм	0,8
Габариты обрабатываемых деталей, мм: Диаметр	2...10
Число намагничивающих катушек	2
Максимальный ток, подаваемый на катушки, А	5
Мощность электродвигателей осцилляции, кВт	0,79
Мощность электромагнитных катушек, кВт	0,79
Напряжение питания, В	380/220
Габариты устройства, мм: длина	1700
ширина	1200
высота (с электродвигателями)	1600
Масса электромагнитного контура с приводом наконечников, кг	600

Станок СФТ 2.111.00.00.000 предназначен для обработки проволоки и длинномерных деталей из черных и цветных металлов (табл. 5.11).

Таблица 5.11

Технические характеристики станка СФТ 2.111.00.00.000

Диаметр обрабатываемой проволоки, мм	0,5...3,0
Скорость протягивания проволоки, м/мин	2...6
Частота вращения полюсных наконечников, об/мин	800...1300
Величина рабочих зазоров, мм	1...5
Магнитная индукция в рабочей зоне, Тл	0,3...1,0
Параметры электрической питающей среды: напряжение, В частота, Гц потребляемая мощность, кВт	380/220 50 2,5
Габариты, мм длина ширина высота	1400 360 1735
Масса, кг	1200

Техническая характеристика станка АА 15.002 для МАО шариков с торообразной формой рабочей поверхности полюсов магнита представлена (табл. 5.12).

Таблица 5.12

Техническая характеристика станка АА.15.002

Магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл	0,3...1,2
Габариты обрабатываемых деталей, мм: диаметр	2...15
Число намагничивающих катушек	2
Максимальный ток, подаваемый на катушки, А	8
Мощность электродвигателей осцилляции, кВт	1,2
Напряжение питания, В	380/220
Габариты устройства, мм: длина ширина высота (с электродвигателями)	900 600 500
Масса электромагнитного контура с приводом наконечников, кг	150

Техническая характеристика АС 10.008 обработки плоскостей приведена (табл. 5.13).

На рис. 5.19, а приведена представленная к восстановлению головка делителя типа ШЗ-ХДУ-33 после 12 мес. эксплуатации. Материал головки – бронза БрАЖНМц (ГОСТ 18175–72). Суммарный износ достигает 0,3...0,5 мм.

Таблица 5.13

Техническая характеристика АС 10.008 обработки плоскостей

Максимальная величина рабочего зазора, мм	5
Габариты обрабатываемых деталей, мм:	
Ширина	175
Длина	175
Число катушек	7
Максимальная величина тока, А	3
Максимальная магнитная индукция, Тл	1,5
Максимальная частота вращения, об/мин	
Шпинделя ротора	280
Ротора	0,5
Рабочего стола	330
Мощность электродвигателя, кВт	5
Габариты устройства, мм:	
длина	1340
ширина	1180
высота (с электродвигателями)	1980
Масса, кг	2100

Напыление производят бронзовым порошком, применяемым в порошковой металлургии, например, ПР-БрОФЮ-3 (ТУ 48-42-3-85), с помощью термораспылительной горелки «Mogul-U9», работающей на пропан-бутан-кислородной смеси. Наличие остаточной пористости составляет 8–10 % от всего объема напыляемого материала. Толщина напыленного покрытия достигает 4–5 мм на радиус восстанавливаемой детали [304].

Однако образование присущего шлифованию микрорельефа способствует питтингу поверхности и снижает долговечность детали.

Поэтому замена данной операции магнитно-абразивной обработкой на станке СФТ 2.150.00.00.000 позволяет повысить истирающую способность материала. Режимы обработки: магнитная индукция $B = 1,1$ Тл, скорость резания $V_0 = 1,2$ м/с, скорость осцилляции $V_0 = 0,1 \dots 0,2$ м/с, амплитуда осцилляции $A = 1$ мм, рабочий зазор $\delta = 1$ мм, коэффициент заполнения рабочего зазора $K_3 = 1$. Смазочно-охлаждающие технологические средства – СинМА-1 и СинМА-2 (ТУ 38.5901176–91), ферроабразивный порошок – ФАПД-1 (ТУ РБ 00493801.001–00), зернистость $\Delta = 160/200$ мкм.

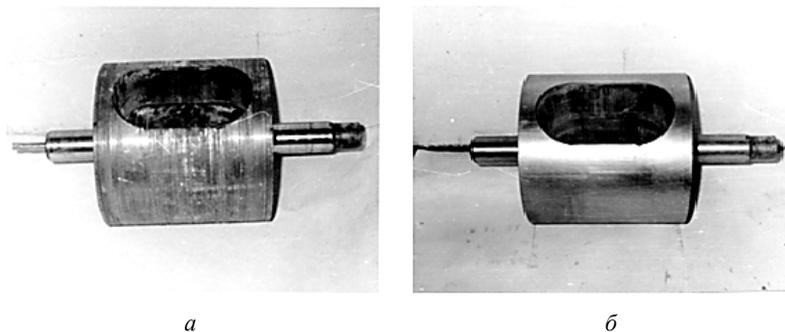


Рис. 5.19. Фотографии головки делителя теста ШЗ-ХДУ-33: до (а) и после (б) восстановления

Результаты проведенных испытаний для оценки износостойкости рабочих поверхностей головок делителей теста ШЗ-ХДУ-33 (ГОСТ 23.220–84) показали, что средняя интенсивность изнашивания после магнитно-абразивной обработки и шлифования $8,2 \cdot 10^{-8}$ и $12,2 \cdot 10^{-8}$ соответственно. Стоимость восстановленной и покупной головок выражается соотношением 0,6 : 1. Показатель шероховатости после финишной обработки $R_a = 0,6 \dots 0,8$ мкм, что соответствует требованиям технической документации (рис. 5.24, б).

Разработаны, созданы и приводятся рекомендуемые наборы компонентов РТС (ФАП, СОТС, ЭМП) как традиционно применяемых, так и вновь разработанных при учете их химической инертности, пенообразующей способности и ряда других факторов в условиях их взаимного влияния и взаимодействия, обеспечивающих ковариантность контактирования трущейся пары и рост эффективности процесса.

5.5. Перспективные области применения магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения

Перспективы развития МАО лежат в области интенсификации процесса за счет управления режимами обработки и индукции магнитного поля, а также использования новых режущих материалов и СОТС в виде интегрированной рабочей технологической среды.

Отличительной особенностью технологии машиностроения на современном этапе является комплексный подход к созданию и совершенствованию последовательных технологий промежуточной упрочняющей и финишной обработки, обеспечивающих повышение производительности и возможность управления и прогнозирования качества получаемых деталей, энерго- и ресурсосбережение, экологическую чистоту производства. Основные тенденции и перспективы ее развития можно представить из анализа схемы, приведенной на рис. 5.20. Решение указанных задач обеспечит достижение устойчивых темпов наращивания производства, повышение эффективности и конкурентоспособности выпускаемой продукции на внешнем и внутреннем рынках.

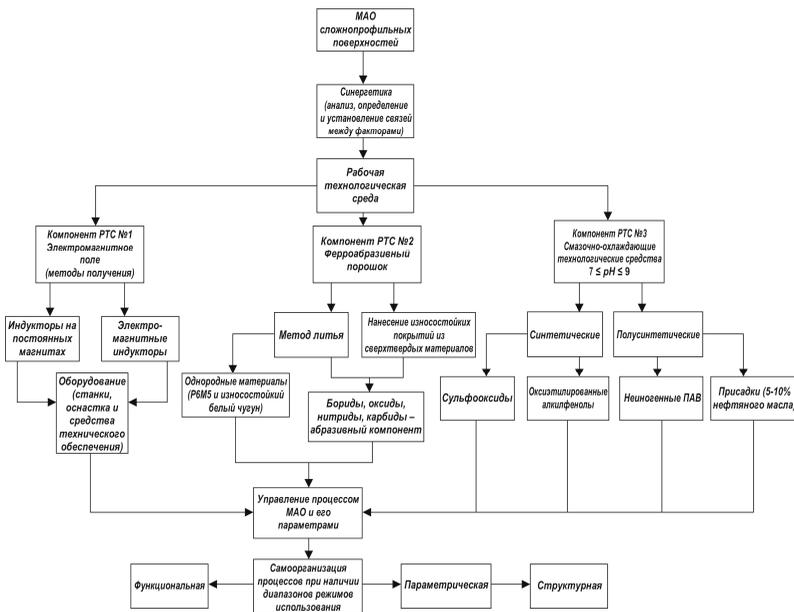


Рис. 5.20. Перспективы развития МАО сложнопрофильных поверхностей

Как следствие, наиболее перспективным является внедрение «безлюдной» технологии, обеспечивающей наибольшую механизацию и автоматизацию технологических и производственных процессов и высвобождение квалифицированных станочников.

5.5.1. Магнитно-абразивная обработка мелкомодульных зубчатых колес

Среди различных методов производства мелкомодульных ($m \leq 2,5$ мм) зубчатых колес применяется процесс холодного накачивания, который позволяет получить зубчатые колеса 6...7 степени точности по ГОСТ 1643–81. Однако в результате взаимного скольжения заготовки и инструмента (накатника) друг относительно друга на противоположных рабочих сторонах профиля зуба заготовки материал течет в разных направлениях. Такой характер деформации металла по этим сторонам зуба создает трудности в получении симметричного профиля. Несмотря на ряд мер, направленных на устранение данного недостатка, полностью удалить этот наплыв не удастся.

На основании вышеизложенного были проведены исследования, направленные на оценку технологических возможностей метода MAO при обработке мелкомодульных зубчатых колес ($m = 1,5$ мм).

Основная задача обработки методом MAO заключалась в скруглении фаски зубчатого колеса по контуру, устранении заусенцев, образованных предшествующей операцией шлифования по наружному диаметру колеса, и снижении шероховатостей рабочей поверхности зуба.

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

предшествующей операцией шлифования по наружному диаметру деталей.

Обязательным условием этого процесса является реверсирование вращения заготовки. Полное время обработки составляет 60 с, из них соответственно 30 с – вращение по часовой стрелке и 30 с – против. Возможно использование пакетного способа обработки при наличии разделительных колец толщиной 1...3 мм. Общая длина пакета вдоль оси обработки должна равняться в среднем 70 мм. Испытаниями установлено, что после обработки методом MAO зубчатые колеса после различных методов обработки имеют следующие отклонения:

- на торцах зубьев образуются фаски в форме запятой, ширина которой уменьшается, в направлении дна впадины зуба;

- зона обработки характеризуется полным отсутствием заусенцев и следов термического разложения закалочной среды, часто имеющих место после нарушений технологического процесса термообработки;

- угол фаски на боковой поверхности зуба находится в пределах $30...35^{\circ}$, ширина фаски – не более 0,8 мм.

Таким образом, на основании проведенных испытаний установлено, что в качестве эффективного метода финишной обработки мелко-модульных зубчатых колес выступает процесс MAO, позволяющий получить высокие эксплуатационные характеристики этих деталей.

5.5.2. Применение магнитно-абразивной обработки для скругления фасок и удаления заусенцев

Ввиду этого поставлена задача определения возможности использования метода MAO для указанных выше технологических операций (в частности, после токарной обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей и зубо- и шлицешлифования). В качестве оборудования применялись экспериментальные установки: для наружной MAO – П-80, для внутренней – ЭУ-6 с оппозитно расположенными магнитными полюсами электромагнитной системы. Для устранения заусенцев и скругления фасок после токарной обработки образцами служили круг $\varnothing 40$ мм и труба $D \times d = 42 \times 34$ мм, сталь 20 ГОСТ 1050–88, после зубошлифования – зубчатые колеса с $m = 2$ мм, сталь 40Х ГОСТ 4543–71,

41...45 HRC; после шлифшлифования – шлицевые валы с $m = 3$ мм, сталь 40Х ГОСТ 4543–71, 35-40 HRC. Параметры и режимы обработки методом MAO данных заготовок: величина магнитной индукции $B = 0,6...1,2$ Тл; скорость резания $V = 0,8...1,4$ м/с; скорость осцилляции $V_o = 0,15...0,25$ м/с; амплитуда осцилляции $A = 0,5...1,5$ мм; величина рабочего зазора $\delta = 0,5...1$ мм; ферроабразивный порошок – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81; зернистость ФАП $\Delta = 100/315$ мкм; смазочно-охлаждающие технологические средства СинМА-1 ТУ 38.5901176–91 с капельной подачей; время обработки $t = 0,5...3$ мин.

Устранение заусенцев на кромочных выступах заготовки определяется их расположением в пространстве и размерами, а также процессом их образования. Например, диапазон размеров заусенцев при зубо-шлифшлифовании составляет 0,04...0,07 мм по высоте и 0,01...0,03 мм по толщине, в то время как при токарной обработке размеры соответственно равнялись 0,2...0,5 и 0,1...0,2 мм. Данные различия потребовали указанного выше расширения применяемых параметров и режимов MAO. Профиль кромки пруткового материала и труб измерялся со стороны внешней и внутренней цилиндрических поверхностей и торца заготовки, а зубчатых колес и шлицевых валов, во-первых, по наружному диаметру и торцу зуба и, во-вторых, по наружному диаметру и рабочей поверхности зуба. Критерием степени скругления фаски при обработке методом MAO был выбран ее радиус, который определялся согласно ГОСТ 10948–84 (для пруткового материала и труб), 13755–81 (для зубчатых колес) и 6033–80 (для шлицевых валов с эвольвентным профилем зуба) при помощи шаблонов.

На рис. 5.21, а показаны результаты измерений на каждом отрезке времени обработки путем отметки, сделанной на обрабатываемой поверхности зубчатого колеса после шлифования по наружному диаметру. Шлифовальный круг образует заусенцы во взаимно перпендикулярных плоскостях, что усложняет последующую операцию как лезвийным, так и жесткосвязанным абразивным инструментом. MAO, обладая подвижно скоординированным зерном в режущем инструменте, устраняет этот недостаток, связанный с пространственным расположением заусенцев, снимая их по обеим поверхностям и производя зачистку поверхности и скругление фасок [306].

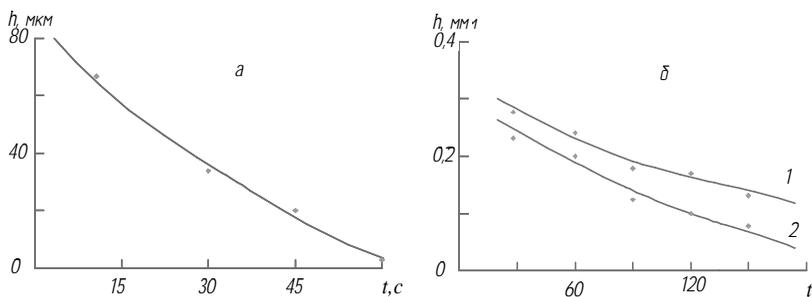


Рис. 5.21. Зависимость размерности заусенцев, образованных зубошлифованием (а) и токарной обработкой в результате продольного (1) и поперечного (2) точения (б), от времени, затраченного на их удаление

Заусенцы, полученные зубо- и шлицешлифованием, были полностью устранены за 45 с, а применение пакетного способа обработки уменьшает это время в 8...10 раз. Одновременно достигается требуемое скругление кромки в течение 60 с обработки. На основании проведенных исследований установлено, что обработка методом MAO кромок зубчатых колес и шлицевых валов и снятие заусенцев осуществляются с высокой производительностью и качеством. Например, для указанного типоразмера (прутковый материал $\varnothing 40$ мм) диапазон радиусов скругления составил 0,2...0,3 мм; для труб $D \times d = 42 \times 34$ мм – 0,2...0,3 мм; для зубчатых колес – 0,2...0,3 мм и для шлицевых валов – 0,2...0,25 мм, что соответствует приведенным выше требованиям ГОСТ.

На рис. 5.21, б показаны результаты экспериментальных данных, характеризующих параметры заусенцев, которые образованы токарной обработкой. Заусенцы, полученные при продольном точении, не были ликвидированы за 3 мин обработки методом MAO и при «жестких» режимах $B = 1,1 \dots 1,2$ Тл. Высота исходного контура по сравнению с обработанным уменьшилась примерно вдвое (с 0,3...0,35 до 0,18...0,22 мм). Заусенцы, образованные поперечным точением, устраняются полностью, например, при его исходной высоте 0,25...0,3 мм их удаление происходит за 1 мин обработки. Скругление фасок в обоих случаях отвечает требованиям ГОСТ и удовлетворяет как по производительности, так и по размерным параметрам.

Наиболее точное приближение поперечной формы кромки к дуге окружности получено после магнитно-абразивной обработки с обеспечением меньших значений радиуса округления и с равномерным округлением кромки по всей длине зуба. Исследования показали, что на шестернях 260-1006244 ($m = 2,5$ мм) из стали 18 ХГТ (62...64 HRC) после MAO образуется округление продольной кромки зуба $r = 40...50$ мкм. Измерения геометрической точности обработанных деталей подтвердили округление продольных кромок зуба после MAO. Продольная кромка зуба после обработки соответствует ГОСТ 16531–83 (рис. 5.22).

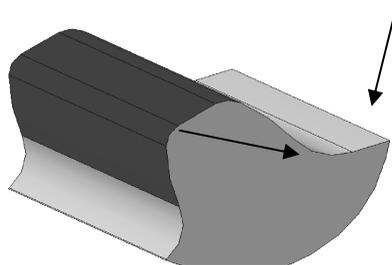


Рис. 5.22. Обрабатываемая поверхность зуба (стрелками показаны скругленные продольные кромки зуба)

5.5.3. Магнитно-абразивная обработка длинномерных отверстий

В настоящее время освоено производство постоянных магнитов КС-25 ТУ 48-0521-270–83; остаточная индукция намагничивания $B = 1,1...1,2$ Т, КСД-25 ТУ 48-0531-29–84, $B = 0,9$ Т; еще более высокими магнитными свойствами обладают магниты на основе сплава Fe, Nd, В ТУ 48-0548-305-85, $B = 1,3$ Т, кроме того, у них хорошая ударная стойкость [307]. Исследования при использовании ИПМ с параллельным расположением магнитов на стали Х10Н19Т ГОСТ 5632–72 показали снижение шероховатости с исходной $Ra_1 = 0,9...1,2$ до $Ra_2 = 0,1...0,2$ мкм. В качестве СОТС применялись СинМА-1 ТУ 38.5901176-91; ферроабразивный порошок Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81 и ФАП на основе высокохромистого чугуна; зернистость $\Delta = 100...160$ мкм; скорость вращения ИПМ $V_{вр} = 0,5$ м/с; число двойных ходов $n = 700...800$ дв. х/мин.

Необходимо отметить, что при использовании этого метода макрогеометрические характеристики (в частности, значения овальности) остаются на уровне предшествующей технологической операции.

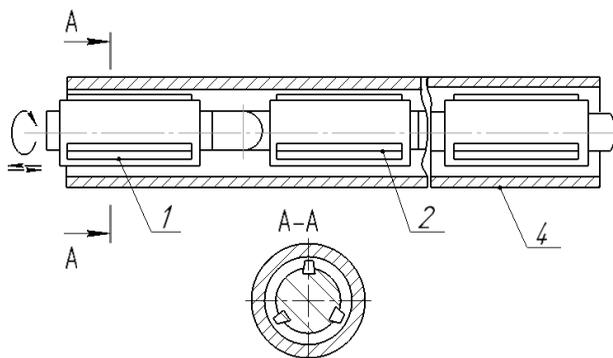


Рис. 5.23. Конструкция индуктора на постоянных магнитах с их параллельным расположением:
 1 – каркас из немагнитного материала; 2 – постоянные магниты;
 3 – ферроабразивный порошок; 4 – обрабатываемая деталь

Таблица 5.14

Основные технические данные моделей станков для обработки длинномерных отверстий различными финишными методами

Параметр	Доводка			Хонингование			МАО
	ОФ-16А	ОФ-10	ОФ-30	3815	3820Д	3821Д	СФТ 2.143.00.00.000
Диаметр обрабатываемых отверстий, мм	8,5–15	До 12	До 30	До 20	50–200	125–500	15–18
Наибольшая длина обрабатываемых отверстий, мм	220	80	100	295	1050	1600	3030
Шероховатость обработанной поверхности $R_{a, \text{мкм}}$	0,16–0,04	0,04–0,02	0,04–0,02	0,32–0,16	0,32–0,16	0,32–0,16	0,32–0,16

Параметр	Доводка			Хонингование			МАО
	ОФ-16А	ОФ-10	ОФ-30	3815	3820Д	3821Д	СФТ 2.143.00.00.000
Габариты станка, мм:							
длина	1845	1100	1310	1120	2290	3325	8350
ширина	1220	630	770	1350	1820	1465	710
высота	2228	2020	2400	2225	4935	7050	1250

На основании приведенных данных и полученных результатов разработана установка СФТ 2.143.00.00.000 для МАО каналов длинномерных отверстий (рис. 5.23), и ее техническая характеристика представлена в таблице 5.14. Следует отметить эффективность такой обработки сборных изделий, изготовленных из различных материалов. Результаты по шероховатости обработанной поверхности представлены для Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81.

5.5.4. Применение магнитно-абразивной обработки для металлооптических элементов с высоким коэффициентом светоотражения изделий

В настоящее время в фотометрических приборах типа коллиматоров широко применяют, как металлооптические, так и оптические элементы типа зеркал и линз. Для достижения необходимой светоотражательной способности поверхностного слоя применяют различные методы финишной обработки и нанесения покрытий. Вместе с тем, обладая несомненным рядом достоинств, эти методы имеют и недостатки. К ним относят сложность оборудования, низкую долговечность покрытий, экологические проблемы. Однако необходимость получения заданных показателей качества продукции требует как интенсификации традиционных методов обработки, так и введение в производство новых [308].

Для достижения требуемого показателя светоотражательной способности металлооптических элементов была проведена МАО кольцевых дисков ($D \times d \times L = 90 \times 25 \times 2$ мм, материал – сталь 30, ГОСТ 1050–88). Оборудование – станок ЭУ-5, ФАП – ПФА Р6М5-1

ТУ 27-104-02–88, СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор, размер зерна $\Delta = 100/160$ мкм. Параметры режима МАО: $B = 1$ Тл; угловая скорость шпинделя $\omega = 50 \text{ с}^{-1}$; скорость вращения детали $V = 0,6$ м/мин; рабочий зазор $\delta = 1$ мм; время обработки $t = 180$ с; параметр шероховатости поверхности до обработки $R_a = 0,3 \dots 0,5$ мм. Блеск поверхности оценивали при дневном рассеянном свете на расстоянии 0,3 м визуальным путем сопоставления с образцом-свидетелем при помощи лупы ЛИ-3 ($\times 10$) по ГОСТ 25706–83. В качестве образца-свидетеля использовали покрытие медь-олово, характеризующееся высоким коэффициентом отражения (80...75 %).

В результате проведенных испытаний установлено, что коэффициент светотрагательной способности гладкой однотонной поверхности, полученной МАО, на кольцевом диске – 75...70 %. Параметр шероховатости поверхности – 0,05...0,07 мкм. На поверхности дисков отсутствуют следы шаржирования инструментом, риски, царапины и другие дефекты.

Согласно ГОСТ 15150–69 при обработке зеркал и линз коллиматоров необходимо обеспечить следующие параметры: шероховатость поверхности по параметру R_a не более 0,0025 мкм; коэффициент светотрагения – 85...95 %. При этом, к минимальным значениям должны быть приведены такие параметры как хроматическая абберация и шаржирование поверхностного слоя. Для достижения требуемого показателя светотрагательной способности металлооптических элементов была проведена МАО тонкого сплошного диска ($D \times h = 100 \times 0,5$ мм). Оборудование – станок ЭУ-5, СОТС – СинМА-1 (ТУ 38.5901176–91), 3%-й водный раствор. Параметры режима МАО: магнитная индукция $B = 0,9$ Тл; угловая скорость шпинделя $\omega = 50 \text{ с}^{-1}$; скорость осцилляции детали $V = 1$ м/мин; амплитуда осцилляции $A = 1 \dots 5$ мм; рабочий зазор $\delta = 1$ мм; время обработки $t = 210$ с; параметр шероховатости поверхности до обработки $R_a = 0,4 \dots 0,6$ мм. Светотрагательную способность поверхности оценивали при дневном рассеянном свете на расстоянии 0,3 м визуальным путем сопоставления с образцом-свидетелем при помощи лупы ЛИ-3 ($\times 10$) по ГОСТ 25706–83. В качестве образца-свидетеля использовали покрытие медь-олово, характеризующееся высоким коэффициентом отражения (80...75 %). Также использовался блескомер Ф-1.

Другим необходимым аспектом для достижения требуемой шероховатости поверхностного слоя металлооптических элементов является использование ФАП различной грануляции и морфологии. На первом этапе обработки применялся порошок на основе алмаза, $\Delta = 0,2/0,315$ мм, в течение $t = 30...45$ с. Затем осуществлялся процесс окончательного полирования порошком «Ферабраз-310», $\Delta = 0,63/0,1$ мм, в течение $t = 135...150$ с.



Рис. 5.24. Фотография металлооптического элемента после МАО

В результате проведенных испытаний установлено, что коэффициент светотражательной способности гладкой однотонной поверхности, полученной при МАО, составляет на металлооптическом элементе более 85 % (рис. 5.24). Параметр шероховатости поверхности – $0,002...0,0025$ мкм. На поверхности тонкого металлооптического элемента отсутствуют следы шаржирования инструментом, риски, царапины и другие дефекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дальский, А. М. Энциклопедия машиностроения : в 3 т. / А. М. Дальский [и др.]. – М. : Машиностроение, 2000. – Т. 3. – 420 с.
2. Радзевич, С. П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ / С. П. Радзевич. – Киев : Вища школа, 1991. – 192 с.
3. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 264 с.
4. Ящерицын, П. И. Обработка изделий со сложным профилем в магнитном поле / П. И. Ящерицын, Т. Л. Деев, Л. М. Кожуро // Вестник машиностроения. – 1994. – № 3. – С. 42–44.
5. Витязь, П. А. «Индустрия 4.0» : от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 2. – С. 54–72.
6. Леонов, С. Л. Автоматическое регулирование рабочего зазора при магнитно-абразивной обработке пространственно сложных поверхностей / С. Л. Леонов, А. М. Иконников, Р. В. Гребеньков // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – № 1. – С. 162–165.
7. Коновалов, Е. Г. Основы электроферромагнитной обработки / Е. Г. Коновалов, Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1974. – 272 с.
8. Минин, Л. К. Магнитно-абразивное полирование наружных поверхностей вращения высокоточных деталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Л. К. Минин ; Физико-технический ин-т АН БССР. – Минск, 1975. – 24 с.
9. Юнусов, Ф. С. Формообразование сложнопрофильных поверхностей шлифованием / Ф. С. Юнусов. – М. : Машиностроение, 1987. – 248 с.
10. Дружинский, И. А. Сложные поверхности: математическое описание и технологическое обеспечение / И. А. Дружинский. – М. : Машиностроение, 1985. – 264 с.
11. Браилов, И. Г. Моделирование формообразования на станках с ЧПУ / И. Г. Браилов [и др.]. – Воронеж : М-во общ. и проф. образования РФ, 1998. – 147 с.

12. Карелин, И. М. Бескопирная обработка цилиндрических деталей машиностроения / И. М. Карелин. – М. : Машиностроение, 1996. – 188 с.

13. Маляренко, А. Д. Технологические основы управляемого формообразования / А. Д. Маляренко, И. П. Филонов. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ БГПА, 1999. – 212 с.

14. Налян, Г. А. Создание процессов обработки сложнопрофильных деталей схемами поверхностного формообразования с поступательными циклическими движениями : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Г. А. Налян ; Груз. Техн. Ун-т. – Тбилиси, 1990. – 36 с.

15. Филонов, И. П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович, А. С. Козерук. – Минск : Дизайн ПРО, 1995. – 208 с.

16. Ящерицын, П. И. Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении / П. И. Ящерицын. – Минск : Наука и техника, 1974. – 606 с.

17. Зарайский, Л. А. Механическая обработка гребных винтов / Л. А. Зарайский. – Л. : Судпромгиз, 1957. – 168 с.

18. Ящерицын, П. И. Тепловые явления при шлифовании свойства обработанных поверхностей / П. И. Ящерицын, А. К. Цокур, М. Л. Еременко. – Минск : Наука и техника, 1973. – 148 с.

19. Кальченко, В. В. 3D моделирование шлифования винтовых поверхностей на станках с ЧПУ с управляемым углом скрещивания осей круга и ходового винта качения / В. В. Кальченко // Резание и инструмент в технологических системах. – 2002. – Вып. 61. – С. 84–89.

20. Хмельницкий, Р. С. Технология скоростной обработки неполных сферических поверхностей деталей машин вращающимся лезвийным инструментом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / Р. С. Хмельницкий ; Бел. нац. техн. ун-т. – Минск, 2018. – 27 с.

21. Бабичев, А. П. Вибрационная обработка деталей машин / А. П. Бабичев. – М. : Машиностроение, 1974. – 134 с.

22. Бабичев, А. П. Конструирование и эксплуатация вибрационных станков для обработки деталей / А. П. Бабичев, Л. К. Зеленцов, Ю. М. Самодумский. – Ростов : изд-во Рост. гос. ун-та, 1981. – 160 с.

23. Бабичев, А. П. Проблемы вибрационной технологии / А. П. Бабичев // Вестник ДГТУ. – 2001. – Т. 1. – № 2. – С. 5–21.

24. Бурштейн, И. Е. Объемная вибрационная обработка / И. Е. Бурштейн, В. В. Балицкий, А. Ф. Духовский. – М. : Машиностроение, 1981. – 52 с.
25. Бабичев, А. П. Упрочняемость закаленных шлифованных сталей при вибрационной обработке / А. П. Бабичев [и др.] // Вестник машиностроения. – 1980. – № 7. – С. 55–59.
26. Кулик, В. К. Прогрессивные процессы обработки фасонных поверхностей / В. К. Кулик, Ю. В. Петриков, В. В. Изотов. – Киев : Техника, 1987. – 176 с.
27. Орлов, П. Н. Процессы доводки прецизионных деталей пастами и суспензиями / П. Н. Орлов, Ю. И. Нестеров, В. А. Полухин. – М. : Машиностроение, 1975. – 55 с.
28. Трилисский, В. Д. Технология и оборудование для объемной центробежно-ротационной обработки деталей / В. Д. Трилисский. – М. : НИИМАШ, 1983. – 53 с.
29. Трилисский, В. Д. Технология и оборудование для объемной центробежно-ротационной обработки деталей / В. Д. Трилисский [и др.]; под общей ред. В. Д. Трилисского. – М. : ЦНИИТЭИприборостроения, 1989. – 39 с.
30. Мнджоян, К. А. Эффективность абразивно-жидкостной обработки с прерывистой подачей струи / К. А. Мнджоян, Н. В. Аветисян // Станки и инструмент. – 1977. – № 8. – С. 35.
31. Пичко, А. С. Струйно-абразивная обработка поверхности отверстий цилиндрических деталей / А. С. Пичко // Вестник машиностроения. – 1978. – № 10. – С. 65–67.
32. Ящерицын, П. И. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива / П. И. Ящерицын, А. Н. Мартынов, А. Д. Гридин. – Минск : Наука и техника, 1978. – 244 с.
33. Карташов, М. Н. Обработка деталей свободным абразивом в вибрирующих резервуарах / М. Н. Карташов [и др.]; под общей ред. М. Н. Карташова. – Киев : Вища школа, 1975. – 188 с.
34. Лурье, Г. Б. Шлифование деталей в барабанах с планетарным вращением / Г. Б. Лурье, А. Н. Синотин // Вестник машиностроения. – 1974. – № 8. – С. 38–40.
35. Усанкин, И. Г. Шероховатость поверхностей деталей при полировании шарами в планетарных центробежных установках / И. Г. Усанкин // Вестник машиностроения. – 1980. – № 9. – С. 57–58.

36. Фролов, А. И. Установка УОР-2 с планетарным вращением барабанов / А. И. Фролов // Информ. листок № 267-76. – Ярославль : Яросл. ЦНТИ, 1976. – 3 с.

37. Подвигин, Б. С. Механизированная зачистка деталей в центробежно-планетарной установке / Б. С. Подвигин, В. В. Розенблаг // Вестник машиностроения. – 1980. – № 4. – С. 65–66.

38. Трилисский, В. О. Шпиндельная центробежно-ротационная установка для отделочно-зачистной обработки деталей / В. О. Трилисский [и др.] // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента : межвуз. сб. науч. тр. / Пенз. политехн. институт ; редкол. А. Н. Мартынов [и др.]. – Пенза, 1981. – Вып. 10. – С. 63–67.

39. Мартынов, А. Н. Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненными инерционными силами / А. Н. Мартынов. – Саратов : Изд-во СГУ, 1981. – 212 с.

40. Левко, В. А. Влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки сложнопрофильных деталей / В. А. Левко, Е. Б. Пшенко // Вестник Сибир. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2006. – № 4. – С. 64–68.

41. Gorana, V. K. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining / V. K. Gorana, V. K. Jain, G. K. Lal // Wear. – 2006. – Vol. 260. – P. 128–139.

42. Лурье, Г. Б. Шлифование абразивными лентами / Г. Б. Лурье – М. : Высшая школа, 1980. – 47 с.

43. Иванов, Ю. И. Определение составляющих тангенциальной суммарной силы при шлифовании алмазными лентами / Ю. И. Иванов, Н. В. Носов // Изв. вузов. Машиностроение. – М. : МВТУ им. Н. Э. Баумана. – 1980. – № 10. – С. 127–131.

44. Панько, Л. А. Повышение эффективности шлифования абразивной лентой / Л. А. Панько, Н. В. Костин, В. П. Антонов // Станки и инструмент. – 1976. – № 7. – С. 32–36.

45. Соколов, С. П. Обработка деталей абразивными брусками / С. П. Соколов, З. И. Кремень. – Л. : Машиностроение, 1967. – 124 с.

46. Кириенко, А. С. Ленточный шлифовальный инструмент с ориентированным рельефом абразивосодержащего поверхностного слоя / А. С. Кириенко // Вес. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. Промышленность. – 2018. – № 6. – С. 90–95.

47. Способ отделочной обработки винтов проволочно-абразивным охватывающим инструментом : пат. 2230648 РФ, МКИ В 24 В/00, В 23 G 1/36 / Ю. С. Степанов, Б. И. Афанасьев, А. И. Поляков ; заявитель

Орловский ГТУ. – № 2002129555/02 ; заявл. 04.11.2002 ; опубл. 20.06.2004 // БИ. – 2004. – № 8. – С. 28.

48. Устройство для шлифования и полирования отверстий : пат. 2228248 РФ, МКИ В 24 И 5/16, В 24 D 17/00 / Ю. С. Степанов, Б. И. Афанасьев, А. И. Поляков ; заявитель Орловский ГТУ. – № 2002127096/02 ; заявл. 10.10.2002 ; опубл. 10.05.2004 // БИ. – 2004. – № 6. – С. 94.

49. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.

50. Гриб, В. В. Лабораторные испытания материалов на трение и износ / В. В. Гриб, Г. Е. Лазарев. – М. : Наука, 1968. – 141 с.

51. Полянсков, Ю. В. Методы оценки качества очистки СОЖ / Ю. В. Полянсков, Е. А. Карев, Е. М. Булышев // Станки и инструменты. – 1976. – № 10. – С.30–32.

52. Лавров, И. В. Закономерность геометрия частиц измельченных материалов / И. В. Лавров // Абразивы и алмазы. – 1965. – № 6. – С. 17–22.

53. Лавров, И. В. Морфологическая характеристика остроты шлифовального зерна / И. В. Лавров, Л. А. Лобарева // Абразивы и алмазы. – М. : НИИМАШ, 1975. – С. 5–8.

54. Лавров, И. В. Основные результаты изучения связи остроты абразивного зерна с его крупностью / И. В. Лавров // Абразивы и алмазы. – М. : НИИМАШ, 1975. – Вып. 11. – С. 1–4.

55. Лавров, И. В. Некоторые результаты электронно-микроскопического исследования поверхности излома основы абразивных материалов / И. В. Лавров // Абразивы и алмазы. – М. : НИИМАШ, 1971. – Вып. 8. – С. 7–10.

56. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974. – 319 с.

57. Лурье, Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г. Б. Лурье. – М. : Машиностроение, 1981. – 52 с.

58. Богомолов, Н. И. Основные процессы при взаимодействии абразива и металла : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.03.01 / Н. И. Богомолов ; Киев. ин-т инженеров гражд. авиации. – Киев, 1967. – 46 с.

59. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М. : Высшая школа, 1985. – 304 с.

60. Зорев, Н. Н. Исследование элементов механики процесса резания / Н. Н. Зорев. – М. : Машгиз, 1952. – 364 с.

61. Коновалов, Е. Г. Основы новых способов металлообработки / Е. Г. Коновалов. – Минск : Изд-во АН БССР, 1961. – 297 с.
62. Кадильников, А. В. Повышение эффективности высокоскоростного шлифования путем использования абразивного зерна рациональной формы и его ориентации в связки инструмента : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / А. В. Кадильников ; Волж. ин-т строит-ва и технологий Волгоград. арх.-строит. ун-та. – Волгоград, 2007. – 16 с.
63. Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 326 с.
64. Хомич, Н. С. Высококачественное полирование крупногабаритных валов / Н. С. Хомич // Советский экспорт. – 1983. – № 5. – С. 5.
65. Хомич, Н. С. Исследование возможности получения ферромагнитных частиц с заданными линейно-геометрическими характеристиками / Н. С. Хомич // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С. 59–66.
66. Барон, Ю. М. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса абразивной обработки деталей машин в магнитном поле : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Ю. М. Барон ; Ленингр. политех. ин-т. – Л., 1969. – 18 с.
67. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение, 1986. – 176 с.
68. Скворчевский, Н. Я. Научные основы повышения эффективности магнитно-абразивной обработки созданием сверхсильных магнитных полей и новых технологических сред : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.02.08 ; 05.03.01 / Н. Я. Скворчевский ; БГПА. – Минск, 1994. – 35 с.
69. Кишкин, С. Т. Эффекты электропластического и магнитного воздействия на ползучесть металлов и сплавов / С. Т. Кишкин, А. А. Клыпин // Докл. АН СССР. – 1973. – Т. 211. – № 2. – С. 325–327.
70. Сакулевич, Ф. Ю. Магнитно-абразивная обработка точных деталей / Ф. Ю. Сакулевич, Л. К. Минин, Л. А. Олендер. – Минск : Вышэйшая школа, 1977. – 287 с.
71. Майборода, В. С. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий. – Житомир : ПП «Рута», 2017. – 272 с.
72. Тодоров, Н. Х. Система за автоматизировано проектиране на процеси за МАО / Н. Х. Тодоров, Р. Д. Пиперкова // Докл.

III Междунар. науч.-техн. сем. по технологиям финишной обработки «АМО'87», Варна, Централния машиностроителен ин-т; редкол. Б. Г.Македонски [и др.] – Варна, 1987. – С. 82–86.

73. Сакулевич, Ф. Ю. Объемная магнитно-абразивная обработка / Ф. Ю. Сакулевич, Л. М. Кожуро.– Минск : Наука и техника, 1978. – 238 с.

74. Витязь, П. А. Управление свойствами технологической среды при обработке изделий в комбинированных физических полях / П. А. Витязь [и др.] // Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса с/х техники : материалы МНПК (6–8 апреля 2004 г.): в 3 ч. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т.; редкол. И. Н. Шило [и др.]. – Минск, 2006. – Ч. 3. – С. 81–90.

75. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий / Н. С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 218 с.

76. Хоменко, В. А. Магнитно-абразивная обработка метчиков / В. А. Хоменко, А. М. Иконников, А. В. Богданов // Ползуновский вестник, 2012. – № 1.– С. 318–320.

77. Барон, Ю. М. Повышение стойкости метчиков и производительности резбонарезания в высокопрочных сталях / Ю. М. Барон, С. Ю. Иванов / Прогрессивные методы обработки резанием, 1981. – № 6. – С. 70–73.

78. Способ магнитно-абразивной обработки режущих инструментов : а. с. 1419867 СССР, МКИ В 24 В 31/112 / П. И. Ящерицын, Н. Я. Скворчевский, В. Д. Ефремов, В. Н. Калина, А. А. Савков ; заявитель Физ.-техн. ин-т АН БССР. – № 4094009/31-08 ; заявл.14.07.86 ; опубл. 30.08.88 // Открытия. Изобретения – 1988.– № 32. – С. 3.

79. Татаркин, Е. Ю. Проектирование магнитных индукторов для полирования рабочих поверхностей режущих инструментов / Е. Ю. Татаркин, А. М. Иконников // Обработка металлов. – 2012. – № 1. – С. 66–68.

80. Майборода, В. С. Магнитно-абразивная обработка многогранных непереключаемых твердосплавных пластин в условиях больших рабочих зазоров / В. С. Майборода [и др.] // Наукові праці ДонНТУ. – 2009. – № 6. – С. 157–165.

81. Yamaguchi, H. Development of a new precision internal machining processing on alternating magnetic field / H. Yamaguchi, T. Shinmura, M. Takenada // Prec. eng. – 2003. – № 27. – P. 51–58.

82. Майборода, В. С. Основи створення і використання порошкового магнітноабразивного інструменту для фінішної обробки

фасонных поверхнонь : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.03.01 / В. С. Майборода ; Киев. политех. ин-т. – Киев, 2001. – 36 с.

83. Иконников, А. М. Совершенствование технологии магнитно-абразивной обработки фасонных поверхностей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / А. М. Иконников ; Алтайский политех. ин-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул, 2004. – 18 с.

84. Singh, L. Performance of Abrasives used in Magnetically Assisted Finishing: a state of the art review / L. Singh, S. Khangura, P. Mishra // *Int. J. of Abrasive Technology*. –2010. – Vol. 3, № 3. – P. 215–227.

85. Wantuch, E. Magnetic-abrasive Beatbeitung / E. Wantuch, H. Zutze // *New Fertigungs technologies*. – 2002. – № 5. – S. 232–237.

86. Kodacsy, J. Magneto-abrasives Polieren und Entgraten Witerenwickelte Feinbearbeitung / J. Kodacsy // *Tech. Rdsch*. – 1990. – Vol. 82, № 37. – S. 76–79.

87. Zhen Bing, H. Magnetic Field assisted Finishing of Ceramics. Part 3. On the Thermal aspects of Magnetic abrasive Finishing (MAF) of Ceramics Rollers / H. Zhen Bing, R. Komanduri // *Journal of Tribology*. – 1998 – Vol. 120, № 5. – P. 660–667.

88. Kampschulte, G. Magnesisches Nechsfeld und Relativbewegung senken Fehlerrate heim magnet-abrasiven Feinschlieden / G. Kampschulte // *Maschinenmarkt*. –1990. – Vol. 96, № 41. – S. 54–59.

89. Kim, J. D. Polishing of ultra-clean inner surfaces using magnetic force / J.D. Kim // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2003. – Vol. 21. – P. 91–97.

90. Wang, Y. Study on Inner Surface Finishing of Tubing by Magnetic Abrasive Finishing / Y. Wang, D. Hu // *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2005. – Vol. 45. – P. 43–49.

91. Блум, Э. Я. Тепло- и массообмен в магнитном поле / Э. Я. Блум, Ю. А. Михайлов, Р. Я. Озолс. – Рига : Зинатне, 1980. – 355 с.

92. Сальман, В. Р. Повышение эффективности процессов абразивной обработки при электрической поляризации обрабатываемой заготовки / В. Р. Сальман, Н. И. Мозолев // Смазочно-охлаждающие технологические средства в процессах обработки резанием : Ульяновск, 1990. – С. 16–23.

93. Ящерицын, П. И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле/ П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1988. – 272 с.

94. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченко. – Минск : Наука и техника, 1977. – 225 с.

95. Хусу, А. П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А. П. Хусу, Ю. Р. Виттенберг, В. А. Пальмов. – М. : Наука, 1975. – 343 с.

96. Кремень, З. И. Влияние микро- и макрогеометрии измерительных поверхностей на их притираемость / З. И. Кремень // Измерительная техника. – 1963. – № 2. – С.31–33.

97. Ящерицын, П. И. Влияние магнитно-абразивного полирования на микротвердость и сопротивление износу поверхностного слоя ферромагнитных металлов / П. И. Ящерицын [и др.] // Успехи технологии машин и устройств. – 1994. – № 2. – С. 3–8.

98. Панченко, В. М. Исследование технологических возможностей магнитно-абразивной обработки для повышения эксплуатационных свойств деталей машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / В. М. Панченко ; Физ.-техн. ин-т АН БССР. – Минск, 1977. – 24 с.

99. Кремень, З. И. Микрогеометрия поверхности и состояния приповерхностного слоя металла деталей, обработанных суперфинишированием // Передовая технология и автоматизация управления процессами обработки деталей машин / З. И. Кремень, В. И. Дугин. – Л. : Машиностроение, 1970. – С. 393–398.

100. Кожуро, Л. М. Качество поверхностного слоя при магнитно-абразивном полировании / Л. М. Кожуро, Э. И. Ремизовский, Г. Б. Ярошевич // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. – 1985. – № 9. – С. 146–150.

101. Загорский, Г. Г. Износостойкость и микротвердость поверхностного слоя деталей, обработанных абразивными порошками в магнитном поле / Г. Г. Загорский // Вопросы прочности и пластичности металлов. – Минск, 1972. – С. 127–128.

102. Майборода, В. С. Кинетика формирования микропрофиля поверхности режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке / В. С. Майборода, Н. В. Ульяненко // Вісник СумДУ. – 2003. – № 2. – С. 104–111.

103. Миронов, А. М. Повышение эффективности магнитно-абразивной обработки зубчатых колес механическим уплотнением ферроабразивного порошка в рабочей зоне : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / А. М. Миронов ; ГНУ ФТИ НАН Беларуси. – Минск, 2007. – 24 с.

104. Кожуро, Л. М. Влияние магнитно-абразивного полирования на тонкую кристаллическую структуру поверхностного слоя ферромагнитных изделий / Л. М. Кожуро, Г. Б. Ярошевич, Э. И. Ремизовский // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. – 1984. – № 10. – С. 92–96.

105. Благодарная, О. В. Технологическое обеспечение качества рабочих поверхностей швейных игл магнитно-абразивным полированием : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / О. В. Благодарная. – Бел.-Рос. ун-т. – Могилев, 2012. – 182 с.

106. Сакулевич, Ф. Ю. Порошки для полирования в магнитном поле стержневого инструмента сложной формы для патронного производства / Ф. Ю. Сакулевич [и др.] // Вопросы оборонной техники. – 1975. – № 16. – С. 62–65.

107. Шушкевич, В. А. Исследование процесса объемного магнитно-абразивного полирования / В. А. Шушкевич, Л. М. Кожуро, В. А. Шиманский // Вестник машиностроения. – 1978. – № 4. – С. 63–64.

108. Жданович, В. И. Качество поверхностей после магнитно-абразивной обработки / В. И. Жданович, И. Ф. Морозов, Э. С. Барковский // Технология автомобилестроения. – 1974. – № 1. – С. 41–45.

109. Сакулевич, Ф. Ю. Использование энергии магнитного поля для полирования деталей машин / Ф. Ю. Сакулевич [и др.] // Создание и внедрение оборудования с использованием энергии электромагнитных и других полей для интенсификации технологических процессов : тез. докл. / Всес. науч.-техн. совещ ; редкол. Э. В. Рыжов [и др.]. – Полтава, 1976. – С. 48–53.

110. Кожуро, Л. М. Исследование и совершенствование финишной и абразивной обработки изделий / Л. М. Кожуро // Конструирование и производство сельскохозяйственных машин. – Ростов н/Д, 1985. – С. 125–126.

111. Дьяченко, П. Е. Определение площади фактического контакта поверхностей / П. Е. Дьяченко // Изучение износа деталей машин при помощи радиоактивных изотопов / П. Е. Дьяченко. – М. : Машгиз, 1957. – С. 41–47.

112. Демкин, Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1981. – 244 с.

113. Силантьев, В. С. Магнитно-абразивная обработка твердосплавного режущего инструмента / В. С. Силантьев, Д. Ю. Кружалин, В. Ю. Басов // Инновационная наука. – 2015. – № 8. – С. 69–73.

114. Способ внутреннего шлифования : а. с. 55507 СССР, МПК В 24 б 37/00 / Н. И. Каргалов. – № 123546/25-8 ; заявл. 1.04.38 ; опубл. 2.10.39. – Бюл. № 8. – 3 с.

115. Шулев, Г. С. Физико-технические основы обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Г. С. Шулев ; Физ.-техн. ин-т АН БССР. – Минск, 1965. – 22 с.

116. Жданович, В. И. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / В. И. Жданович ; Физ.-техн. ин-т. – Минск, 1974. – 18 с.

117. Кравченко, Л. Н. Магнитно-абразивное полирование плоских деталей машин и приборов / Л. Н. Кравченко [и др.]. – М. : Машиностроение, 1987. – 48 с.

118. Method and the device for magnetic abrasive machining of partes : Patent WO/2000/051784 , B24B 1/04(2006.01), B24B 5/50(2006.01), B24B 7/22 / G. Kremen, etc ; SCIENTIFIC MANUFACTURING TECHNOLOGIES, PCT / US 1999/018854 ; заявл. 14.09.1999 ; опубл. 08.09.2000.–3 P.

119. Kodacsy, J. Apparatus for cleaning deburring and polishing parts in magnetic field / J. Kodacsy // Proc. of 7-th international conference on debarring and surface finishing. – Berkeley, 2004. – P. 375–378.

120. Kamble, P. D. Use of Magneto Abrasive Flow Machining to Increase Material Removal Rate and Surface Finish / P. D. Kamble, S. P. Untawale, S.B. Sahare // Int, Journal of Mechanical, Automobile& Production Engineering. – 2012. – Vol. 2(7). – P. 249–262.

121. Полетаев, В. А. Исследование процесса магнитной галтовки в магнитно-абразивном устройстве / В. А. Полетаев, Л. К. Чернов, Т. Ю. Степанова // Вестник ИГЭУ. – Вып. 4. – 2012. – С. 1–5.

122. Добронравов, В. В. Основы аналитической механики / В. В. Добронравов. – М. : Высшая школа, 1976. – 264 с.

123. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1988. – Т. 1. – 216 с.

124. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский – М. : Наука, 1960. – 340 с.

125. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1988. – Т. 6. – 533 с.

126. Румерн, Ю. Б. Термодинамика, статистическая физика и кинетика / Ю. Б. Румерн, М. Ш. Рывкин. – М. : Наука, 1972. – 400 с.

127. Седов, Л. И. Механика сплошной среды : в 2 т. / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1970. – Т. 1. – 492 с.
128. Седов, Л. И. Механика сплошной среды : в 2 т. / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1970. – Т. 2. – 568 с.
129. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1988. – Т. 2. – 512 с.
130. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1988. – Т. 8. – 506 с.
131. Тимошенко, С. П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М. : Наука, 1975. – 576 с.
132. Теребушко, О. И. Основы теории упругости и пластичности / О. И. Теребушко. – М. : Наука, 1984. – 320 с.
133. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука, 1988. – 712 с.
134. Работнов, Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю.Н. Работнов. – М. : Наука, 1977. – 384 с.
135. Ильюшин, А. А. Основы математической теории термовязко-упругости / А. А. Ильюшин, Б. Е. Победря. – М. : Наука, 1970. – 280 с.
136. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – М. : Высшая школа, 1980. – 368 с.
137. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – М. : Наука, 1974. – 690 с.
138. Партоп, В. З. Динамика хрупкого разрушения / В. З. Партоп, В. Г. Борисковский. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.
139. Иванова, В. С. Синергетика. Прочность и разрушение металл-ческих материалов / В. С. Иванова. – М. : Наука, 1992. – 160 с.
140. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.
141. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.
142. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники : в 2 т. / Л. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1978. – Т. 1. – 230 с.
143. Сливинская, А. Г. Электромагниты и постоянные магниты / А. Г. Сливинская. – М. : Энергия, 1972. – 240 с.
144. Акулович, Л. М. Технологические основы термомеханического упрочнения и восстановления деталей в электромагнитном поле : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.03.01 ; 05.02.08 / Л. М. Акулович ; Белорус. гос. аграрный техн. ун-т. – Минск, 2000. – 40 с.

145. Янушаускас, А. И. Трехмерные аналоги конформных отображений / А. И. Янушаускас. – Новосибирск : Наука, 1982. – 173 с.

146. Лаврентьев, М. А. Методы теории функций комплексного переменного / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М. : Наука, 1987. – 688 с.

147. Подшипники качения. Справочник // под ред. В. Н. Нарышкина, Р. В. Коросташевского. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.

148. Шаповалов, В. В. Триботехника / В. В. Шаповалов, В. А. Кохановский, А. Ч. Эркенов. – М. : Феникс, 2017. – 351 с.

149. Трение, изнашивание и смазка. Справочник / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М. : Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 400 с.

150. Никифоров, А. Д. Современные проблемы науки в области технологии машиностроения / А. Д. Никифоров. – М. : Высшая школа, 2006. – 356 с.

151. Ящерицын, П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Минск : Вышэйшая школа, 1990. – 416 с.

152. Леонов, С. Л. Расчет магнитной индукции в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке плоских поверхностей заготовок из ферромагнитных и немагнитных материалов индуктором на постоянных магнитах / С. Л. Леонов, А. М. Иконников, Р. В. Гребеньков // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – № 3. – С. 49–55.

153. Коновалов, Е. Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е. Г. Коновалов, Г. С. Шулев. – Минск : Наука и техника, 1967. – 125 с.

154. Коцура, Ю. С. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки колец прядильных и крутильных машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Ю. С. Коцура ; Москов. технол. ин-т. – М., 1976. – 20 с.

155. Нестеров, В. М. Магнитно-абразивная обработка отверстий использованием индукторов на постоянных магнитах : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / В. М. Нестеров ; Ленинград. политехн. ин-т. – Л., 1989. – 20 с.

156. Ваксер, Д. Б. Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании / Д. Б. Ваксер. – Л. : Машиностроение, 1964. – 123 с.

157. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка: технология и оборудование / Н. С. Хомич. – Минск : БелНИИНТИ, 1991. – 48 с.

158. Мур, Д. Основы применения трибоники / Д. Мур. – М. : Мир, 1978. – 483 с.

159. Оликер, В. Е. Применение, классификация и тенденция развития абразивной обработки ферромагнитными порошками / В. Е. Оликер. – Киев : ИПМ АН УССР, 1984. – 66 с.

160. Способ магнитно-абразивной обработки наружных поверхностей инструментов : а. с. 975357 СССР, МПК В 24 В 31/10 / Ю. М. Барон, С. Ю. Иванов ; Ленинград. политехн. ин-т. – № 3294154/25-08 ; заявл. 01.06.81 ; опубл. 23.11.82 // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 43. – 3 с.

161. Парселл, Э. Электричество и магнетизм / Э. Парселл. – М. : Наука, 1983. – 328 с.

162. Устройство для магнитно-абразивной обработки : а. с. 1815185 СССР, МПК В 24 В 31/112 / С. А. Болкисев, Ю. В. Забавин, С. Н. Ермин ; Всесоюз. науч.-исслед. технолог. ин-т. – № 4882923/08 ; заявл. 19.11.90 ; опубл. 15.05.93 // Открытия. Изобретения. – 1993. – № 18. – 5 с.

163. Бинс, К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсен. – М. : Энергия, 1970. – 215 с.

164. Fushchych, W. I. О новых и старых симметриях уравнений Максвелла и Дирака / В.И. Фушич, А. Г. Никитин // Scientific Works. – 2000. – Vol. 2. – P. 233–278.

165. Андрушкевич, И. Е. Методы разделения переменных в волновых уравнениях / И. Е. Андрушкевич. – Новополоцк : ПГУ, 2010. – 239 с.

166. Альпер, Н. Я. Расчет магнитных полей в зазоре индукторной машины с постоянным потоком / Н. Я. Альпер // Вестник электропромышленности. – 1962. – № 3. – С. 10–13.

167. Апсит, В. В. Синхронная машина с когеобразными полюсами / В. В. Апсит. – Рига : Изд-во АН Латв. ССР, 1959. – 356 с.

168. Домбур, Л. Э. Магнитное поле в воздушном зазоре индукторной машины с трапецеидальными зубцами ротора / Л.Э. Домбур // Бесконтактные электрические машины. – Рига : Изд-во АН Латв. ССР, 1963. – Вып. III. – С. 57–71.

169. Домбровский, В. В. Справочное пособие по расчету электро-магнитного поля в электрических машинах / В. В. Домбровский. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. – 256 с.

170. Иванов-Смоленский, А. В. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А. В. Иванов-Смоленский [и др.] ; под ред. А. В. Иванова-Смоленского. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.

171. Скрузитис, К. Э. Расчет магнитного поля зубчатого ротора // Бесконтактные электрические машины / К. Э. Скрузитис. – Рига : Изд-во АН Латв. ССР, 1962. – Вып. II. – С. 51–60.

172. Брынский, Е. А. Электромагнитные поля в электрических машинах / Е. А. Брынский, Я. Б. Данилевич, В. И. Яковлев. – Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 176 с.

173. Jayswal, S. C. Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process / S. C. Jayswal, V. K. Jain, P. M. Dixit // Int. J. Adv. Manuf. Technology. – 2005. – № 26. – P. 477–490.

174. Ким, Дж. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 215 с.

175. Монтгомери, Д. К. Планирование эксперимента и анализа данных / Д. К. Монтгомери. – Л. : Судостроение, 1980. – 384 с.

176. Гайдышев, И. П. Моделирование стохастических и детерминированных систем : руководство пользователя программы AtteStat / И. П. Гайдышев. – Курган : КГУ, 2013. – 484 с.

177. Елисеева, И. И. Общая теория статистики / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 480 с.

178. Меледина, Т. В. Методы планирования и обработки результатов научных исследований / Т. В. Меледина, М. М. Данина. – СПб. : НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2015. – 110 с.

179. Хомич, Н. С. Повышение эффективности магнитно-абразивной обработки деталей применением новых ферромагнитных абразивных материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Н. С. Хомич ; Физ.-техн. ин-т АН БССР. – Минск, 1981. – 24 с.

180. Крымский, М. Д. Оптимизация свойств магнитно-абразивного материала на основе железа и карбида кремния / М. Д. Крымский, О. А. Катрус, А. И. Дубров // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С. 25–33.

181. Билык, И. И. Получение магнитно-абразивных порошков с неравномерным распределением абразивной составляющей / И. И. Билык, А. Н. Степанчук // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С. 43–46.

182. Степанчук, А. Н. Исследование и оптимизация условий получения магнитно-абразивных материалов на основе композиции Fe-B / А. Н. Степанчук, А. В. Карасева, В. С. Ратошнюк // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С. 47–49.

183. Оликер, В. Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В. Е. Оликер. – М. : Металлургия, 1990. – 176 с.

184. Гнесин, Г. Г. Принципы создания магнитно-абразивных материалов / Г. Г. Гнесин, М. Д. Крымский, Л. Н. Тульчинский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев: ИПМ АН УССР, 1980. – С. 17–25.

185. Абразивный материал для магнитно-абразивной обработки : а. с. 234184 СССР, МПК В 24 D 3/06 / В. А. Блюмберг, Ю. М. Барон, З. И. Кремень, Б. П. Грохольский ; Ленинград. политехн. ин-т. – № 1222241 ; заявл. 28.11.68 ; опубл. 24.12.68 // Открытия. Изобретения. – 1968. – № 3. – 5 с.

186. Полещук, В. С. Композиционные магнитно-абразивные порошки на основе железа, карбидов титана, ванадия и хрома / В. С. Полещук, Г. Д. Наливка, Н. Г. Кисель // Порошковая металлургия. – 1983. – № 3. – С. 94–100.

187. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка поверхностей ответственных изделий / Н.С. Хомич. – М. : Наука и инновации. – 2015.– № 6. – С. 24–26.

188. Крымский, М. Д. Оптимизация свойств магнитно-абразивного материала на основе железа и карбида кремния / М. Д. Крымский, О. А. Картус, А. Н. Дубов // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытаний. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С. 25–33.

189. Наливка, Г. Д. Порошковые материалы для магнитно-абразивной обработки / Г. Д. Наливка, А. Н. Степанчук, Л. Н. Тучинский // Порошковая металлургия. – 1976. – № 12. – С. 63–69.

190. Хомич, Н. С. Работоспособность композиционных материалов при МАП / Н. С. Хомич, Г. Д. Наливка // Новые материалы испытаний и обработки материалов : сб. науч. тр. / ФТИ АН БССР ; ред. П. И. Ящерицын – Минск : Наука и техника. – 1975. – С. 189–195.

191. Ясинская, Г. А. Смачиваемость тугоплавких карбидов, боридов и нитридов расплавленными металлами / Г. А. Ясинская // Порошковая металлургия. – 1966. – № 7. – С. 53–56.

192. Kim, J. D. Simulation for the prediction for surface-accuracy in magnetic abrasive machining / J. D. Kim, M. S. Choi // J. Mater. Process. Technology. – № 53. – 1995. – P. 630–642.

193. Майборода, В. С. Применение магнитно-абразивной обработки для упрочнения режущего инструмента / В. С. Майборода [и др.] // Вестник ЖДГУ. – 2003. – № 3 (27). – С. 22–31.

194. Baron, Y. M. Characterization of the Magnetic Abrasive Finishing Method and Its Application to Deburring / Y. M. Baron, S. L. Ko, J. I. Park // Key Engineering Materials. – Vol. 6. – 2005. – P. 291–296.

195. Кнорозов, Б. В. Технология металлов и металловедение / Б. В. Кнорозов [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1987 – 800 с.

196. Способ электрохимического анализа : пат. 2199734 РФ, МПК7 G 01 N 27/48 / С. В. Соколов [и др.] ; заявитель Соколов С. В. – № 2000130511 ; заявл. 04.12.00 ; опубл. 27.02.03 // Бюл. / Роспатент. – 2003. – № 15. – С. 174.

197. Schubert, G. Aufbereit ungemetallischer Sekundarrohstoffe / G. Schubert. – Leipzig : VEB Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie, 1984. – 368 s.

198. Кипарисов, С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. – М. : Metallurgiya, 1991. – 430 с.

199. Кононов, И. А. Установка для получения порошков методом центробежного распыления вращающейся заготовки / И. А. Кононов [и др.] // Металлургия гранул. – 1984. – Вып. 2. – С. 242–250.

200. Composite abrasive particles for magnetic abrasive polishing and process for preparing the same: пат. 4685937 США, МКИ C09C 1/68 / S. Hori, N. Watanabe (Япония) ; Kureha Chemical Industry Company Limited (Япония). – № 856726; заявл. 28.04.1986; опубл. 11.08.1987 // НКИ 51/309. – 13 с.

201. Наливка, Г. Д. Некоторые свойства магнитно-абразивных порошков из псевдоплавленных композиций Fe-TiC / Г. Д. Наливка, В. С. Полещук, А. Н. Степанчук // Порошковая металлургия. – 1979. – № 8. – С. 83–86.

202. Крымский, М. Д. Методика оценки абразивной способности порошковых магнитно-абразивных материалов / М. Д. Крымский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытаний : сб. науч. тр. / ИПМ АН УССР ; ред. Н. И. Богомолов. – Киев, 1980. – С. 84–92.

203. Крымский, М. Д. Распределение уплотнения магнитно-абразивного порошка в рабочем зазоре станка / М. Д. Крымский //

Магнитно-абразивные материалы и методы их испытаний : сб. науч. тр. / ИПМ АН УССР ; ред. Н. И. Богомолов. – Киев, 1980. – С. 92–97.

204. Порошковые и магнитные материалы / под ред. И. Д. Радомысльского и Л. Н. Тучинского. – Киев : Наукова думка, 1984. – 142 с.

205. Способ получения магнитно-абразивных порошков : а. с. 677813 СССР, МПК В 22 F 1/00, С 22 С 29/00 / В. И. Трефилов, В. П. Майборода, Г. В. Гаврилюк ; Ин-т проблем материаловедения АН УССР. – № 3541782/22-02 ; заявл. 04.03.77 ; опубл. 10.08.79 // Открытия. Изобретения. – 1977. – № 5. – С. 74.

206. Оликер, В. Е. Особенности выбора оптимальной формы частиц магнитно-абразивного порошка / В. Е. Оликер, А. Ф. Жорняк, Т. Я. Гридасова // Порошковая металлургия. – 1983. – № 10. – С. 81–86.

207. Швидлер, М. И. Статистическая гидродинамика пористых сред / М. И. Швидлер. – М. : Недра, 1985. – 288 с.

208. Куршин, А. П. Гидравлическое сопротивление насыпных слоев при фильтрации жидкости / А. П. Куршин, Л. В. Гусева // Теплоэнергетика. – 1989. – № 9. – С. 51.

209. Сакулевич, Ф. Ю. Роль смазывающе-охлаждающих жидкостей при магнитно-абразивной обработке / Ф. Ю. Сакулевич, Н. Я. Скворчевский. – Минск : БелНИИТИ, 1981. – 64 с.

210. Скворчевский, Н. Я. Смазочно-охлаждающие жидкости для магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский // Технология машино-строения. Сер. 17. – 1981. – Вып. 124. – С. 6–12.

211. Сакулевич, Ф. Ю. Исследование влияния различных составов СОЖ на положение области оптимума параметров магнитно-абразивной обработки // Ф. Ю. Сакулевич, Н. Я. Скворчевский, Е. А. Хлопяник ; Физ.-техн. ин-т АН БССР. – Минск, 1980. – 8 с.

212. Гаркунов, Д. Н. Триботехника. / Д. Н. Гаркунов. – М. : Машино-строение, 1989. – 342 с.

213. Абрамзон, А. А. Поверхностно-активные вещества. Синтез, анализ, свойства, применение / А. А. Абрамзон, Л. П. Зайченко, С. И. Файнгольд. – Л. : Химия, 1988. – 200 с.

214. Ящерицын, П. И. Теория резания / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн. – Минск : Новое знание, 2005. – 511 с.

215. Гроховский, Г. Я. Полимеры в технологии обработки металлов / Г. Я. Гроховский. – Киев : Наукова думка, 1975. – 224 с.

216. Ахматов С. А. Молекулярная физика граничного трения / С. А. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – 472 с.

217. Ящерицын, П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Минск : Вышэйшая школа, 1990. – 510 с.

218. Брановер, Г. Г. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред / Г. Г. Брановер, А. Б. Цинобер. – М. : Наука, 1970. – 380 с.

219. Исследование морфологии и химического состава электроимпульсно полированной поверхности конструкционных углеродистых и коррозионностойких сталей / Н. П. Иванова [и др.] // Наука и техника. – 2012. – № 6. – С. 3–10.

220. Механизм анодного растворения коррозионно-стойких и конструкционных углеродистых сталей в условиях электроимпульсного полирования / Н. П. Иванова [и др.] // Наука и техника. – 2013. – № 1 – С. 24–30.

221. Деведжийска, Е. Влияние на магнитного в'ърху отделяюща се газ в процеса на електрохимическо разтваряне на металите / Е. Деведжийска // Технология на машиностроенето. – София : Централен машиностроителен ин-т, 1979. – Свитък № 5. – С. 57–60.

222. Барон, Ю. М. Влияние состояния кромок лезвий на эффективность режущих инструментов / Ю. М. Барон // Инструмент и технологии. – СПб., 1997. – Вып. 5. – С. 1–11.

223. Синькевич, Ю. В. Формирование качества поверхности при электроимпульсном полировании коррозионностойких сталей / Ю. В. Синькевич // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : междунар. сб. науч. тр., Донецк, Донецк. гос. техн. ун-т. – Донецк, 2001. – Вып. 17. – С. 231–236.

224. Синькевич, Ю. В. Исследование механизма прохождения электрического тока через парогазовую оболочку при анодном процессе / Ю. В. Синькевич, И. Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : междунар. сб. науч. тр., Донецк, Донецк. гос. техн. ун-т. – Донецк, 2001. – Вып. 41. – С. 287–292.

225. Гайсин, А. Ф. Основные физико-химические процессы в плазменно-электролитных разрядах / А. Ф. Гайсин, Р. Н. Кашапов // V Междунар. симп. по теоретич. и прикладной плазмохимии : сб. тр., Иваново, Россия, 3–8 сент. 2008 г. : в 2 т. / Ивановский гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2008. – Т. 1. – С. 99–102.

226. Атанасянц, А. Г. Анодное поведение металлов / А. Г. Атанасянц. – М. : Металлургия, 1989. – 151 с.

227. Шеин, А. Б. Влияние анионов на анодное растворение силицида никеля в серноокислом электролите / А. Б. Шеин,

О. С. Иванова, Р. Н. Минх // Вестник Удмуртского университета. – 2006. – № 8. – С. 63–74.

228. Николов, В. Обработка на равнини повърхни с феромагнитни прахове / В. Николов // Научни трудове на ВТУ «Ангел Кънчев». Сер. Технология на машиностроенето и металорежещи машини. – 1981. – Т. XXIII. – С. 3–37.

229. Никифоров, И. П. Условия стружкообразования при шлифовании / И. П. Никифоров // Инструмент и технологии. – 2003. – № 2. – С. 8–13.

230. Хейфец, М. Л. Синергетический анализ структурообразования в металлах при термических, деформационных и комбинированных воздействиях / М. Л. Хейфец / Доклады НАН Беларуси. – 2014. – Т. 58. – № 3. – С. 106–111.

231. Абдуллин, И. Г. Техника эксперимента в химическом сопротивлении металлов / И. Г. Абдуллин., В. И. Агапчев, С. Н. Давыдов. – Уфа : изд. УНИ, 1985. – 100 с.

232. Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества : справочник / под ред. А. А. Абрамзона и Е. Д. Щукина. – Л. : Химия, 1984. – 392 с.

233. Концентрат смазочно-охлаждающей жидкости для магнитно абразивной обработки металлов : а. с. № 1300931 СССР, МПК С 10 М 173/02, С 10 М 125/20, С 10 М 129/40, С 10 М 133/08, С 10 М 133/16, С 10 N 30/06, С 10 N 40/24 / Б. С. Шаповал, И. Б. Фролова, И. С. Гирняк, Н. Я. Скворчевский ; Всесоюз. науч.-иссл. и проект.-констр. ин-т нефтеперерабат. и нефтехим. пром-сти НПО «Масма». – № 3875038/04 ; заявл. 17.01.85 ; опубл.10.01.2014 // Открытия. Изобретения.–1985. – № 1. – 3 с.

234. Магнитно-абразивная обработка деталей машин : тез. докл. науч.-техн. конф. / спецред. Ф. Ю. Сакулевич, ред. А. С. Короткевич. – Минск : ЭППП БелНИИНТИ, 1979. – 55 с.

235. Бердичевский, Е. Г. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки материалов : справочник / Е. Г. Бердичевский. – М. : Машиностроение, 1984. – 224 с.

236. Тронов, В. П. Механизм образования смоло-парафиновых отложений и борьба с ними. – М. : Недра, 1969. – 192 с.

237. Хайдаров, Ф. Р. Повышение долговечности промысловых трубопроводных систем путем регулирования свойств перекачиваемых жидкостей методами магнитной обработки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.0017. 25.00.19 / Ф. Р. Хайдаров ; ОАО «Северо-западные магистральные нефтепроводы». – Уфа, 2002. – 24 с.

238. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение : справочное издание / под ред. В. М. Школьников. – М. : Машиностроение, 1989. – 432 с.

239. Худобин, Л. В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке / Л. В. Худобин, Е. Г. Бердичевский. – М. : Машиностроение, 1977. – 189 с.

240. Худобин, Л. В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием / Л. В. Худобин. – М. : Машиностроение, 2006. – 544 с.

241. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием : справочник / под ред. С. Г. Энтелеса, Э. М. Берлинера. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.

242. Ивкович, Б. Трибология резания (смазочно-охлаждающие жидкости) / Б. Ивкович. – М. : Наука и техника, 1982. – 144 с.

243. Никитин, В. М. Химия древесины и целлюлозы / В. М. Никитин. – М. : Лесная промышленность, 1978. – 366 с.

244. Гусак, А. А. Высшая математика : в 2 т. / А. А. Гусак. – Минск : ТетраСистемс, 2009. – Т. 1. – 544 с.

245. Гусак, А. А. Высшая математика : в 2 т / А. А. Гусак. – Минск : 2009. – Т. 2. – 448 с.

246. Мышкис, А. Д. Лекции по высшей математике / А. Д. Мышкис. – М. : Наука, 1969. – 640 с.

247. Ефремов, В. Д. Технологическое обеспечение качества рабочих кромок инструмента и деталей / В. Д. Ефремов, П. И. Ящерицын. – Минск : БАТУ, 1997. – 251 с.

248. Подураев, В. Н. Динамическая модель элементов технологической системы с учетом кинематической нестабильности процесса резания / В. Н. Подураев, В. И. Малыгин, Л. В. Кремлева // Вестник машиностроения. – 1996. – № 6. – С. 18–23.

249. Панин, В. Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В. Е. Панин, В. А. Лихачев, Ю. В. Гриняев. – Новосибирск : Наука, 1985. – 217 с.

250. Хейфец, М. Л. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей / Л. М. Кожуро, Ж. А. Мрочек. – Гомель : ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.

251. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. М. Дальского [и др.]. – М. : Машиностроение, 2003. – Т. 1. – 656 с.

252. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров. – М. : Машиностроение, 2005. – 736 с.

253. Солнышкин, Н. П. Технологические процессы в машиностроении / Н. П. Солнышкин, А. Б. Чижевский, С. И Дмитриев. – СПб. : Изд. СПбГТУ, 2001. – 344 с.

254. Ящерицын, П. И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев, А. И. Барботько. – Минск : Навука і тэхніка, 1976. – 302 с.

255. Сагарда, А. А. Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А. А. Сагарда, И. Х. Чеповецкий, Л. Л. Мишнаевский. – Киев : Техніка, 1974. – 179 с.

256. Дриц, М. Е. Материаловедение и технология конструкционных материалов / М. Е. Дриц, М. А. Москалев. – М. : Высшая школа, 1990. – 448 с.

257. Евсеев, Д. Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д. Г. Евсеев. – Саратов : Изд-во Сарат. Ун-та, 1975. – 127 с.

258. Загорский, А. Г. Износостойкость и микротвердость поверхностного слоя деталей, обработанных абразивными порошками в магнитном поле / А. Г. Загорский // Вопросы прочности и пластичности металлов : сб. науч. тр., Минск, 1972. – С. 74–79.

259. Корчак, С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак. – М. : Машиностроение, 1974. – 150 с.

260. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 430 с.

261. Кудрявцев, И. В. Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин / И. В. Кудрявцев. – М. : Машиностроение, 1969. – 100 с.

262. Балакшин, Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – М. : Машиностроение, 1969. – 560 с.

263. Тененбаум, М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин / М. М. Тененбаум. – М. : Машиностроение, 1966. – 104 с.

264. Хрущов, М. М. Абразивное изнашивание / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев. – М. : Наука, 1970. – 251 с.

265. Маталин, А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, 1985. – 512 с.

266. Ящерицын, П. И. Синергетический подход к процессам резания металлов // П. И. Ящерицын, А. В. Борисенко, М. Л. Хейфец // Вес. АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1992. – № 1 – С. 48–53.

267. Ящерицын, П. И. Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин / П. И. Ящерицын, Ю. В. Скорынин. – Минск : Наука и техника, 1978. – 464 с.

268. Егоров, М. Е. Технология машиностроения / М. Е. Егоров, В. И. Дементьев, В. Л. Дмитриев. – М. : Высшая школа, 1976. – 534 с.

269. Назаров, Ю. Ф. Оптимизация маршрута обработки деталей с технологической наследственностью / Ю.Ф. Назаров, О.Н. Мельников // Вестник машиностроения. – 1986. – № 8. – С. 47–49.

270. Кравченко, Л. Н. Качество плоских поверхностей при магнитно-абразивной обработке / Л. Н. Кравченко, Л. М. Кожуро, Э. И. Ремизовский // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. – 1987. – № 3. – С. 153–157.

271. Кексин, А. И. Технологическое повышение качества сложнопровильных поверхностей методом магнитно-абразивного полирования / А. И. Кексин, В. В. Максаров // Металлообработка. – 2017. – № 1(97). – С. 47–57.

272. Устройство для магнитно-абразивной обработки : а. с. 537796 СССР, МПК В 24 В 31/10 / И. Х. Хайруллин, Н. К. Потапчук, Ю. В. Афанасьев, Ш. Г. Исмагилов ; Уфим. авиац. ин-т им. Орджоникидзе. – № 2114298/08 ; заявл. 18.03.75 ; опубл. 11.03.77 // Открытия. Изобретения.– 1977. – № 45. – 3 с.

273. Подзей, А. В. Тепловые явления и физико-механические состояния поверхностей слоя при алмазном шлифовании низкоотпущенных сталей / А. В. Подзей // Физико-химические явления при взаимодействии алмазов и абразивов с металлами в процессах обработки. – Тбилиси, 1971. – С. 104–114.

274. Смагленко, Ф. П. Остаточные напряжения в твердых сплавах группы ВК после алмазного шлифования / Ф. П. Смагленко // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 2. – С. 61–64.

275. Гавриш, А. П. Алмазно-абразивная обработка магнитных материалов / А. П. Гавриш // Киев : О-во «Знание» УССР, 1979. – 22 с.

276. Подзей, А. В. Технологические остаточные напряжения / А. В. Подзей. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.

277. Якобсон, М. О. Шероховатость, наклеп и остаточные напряжения при механической обработке / М. О. Якобсон. – М. : Машгиз, 1956. – 292 с.

278. Кравченко, Б. А. Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов / Б. А. Кравченко. – Куйбышев : Куйбышев. кн. изд-во, 1962. – 180 с.

279. Лахтин, Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : Эколит, 2013. – 528 с.

280. Перель, Л. Я. Подшипники качения, расчет, проектирование и обслуживание опор / Л. Я. Перель. – М. : Машиностроение, 1983. – 545 с.

281. Металловедение и термическая обработка стали : справочник : в 3 т. / под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. – М. : Металлургия, 1991. – Т. 1, кн. 2. – 462 с.

282. Воронков, В. Н. Некоторые особенности тепловых явлений при алмазном шлифовании инструментальных материалов / В. Н. Воронков [и др.] // Сверхтвердые материалы. – 1986. – № 3. – С. 45–48.

283. Редько, С. Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов / С. Г. Редько. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1962. – 231 с.

284. Ящерицын, П. И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П. И. Ящерицын, А. К. Цокур, М. Л. Еременко. – Минск : Наука и техника, 1973. – 182 с.

285. Абрамов, В. В. Остаточные напряжения и деформация в металлах / В. В. Абрамов. – М. : Машгиз, 1963. – 355 с.

286. Сулима, А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.

287. Рудзит, Я. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства поверхностей / Я. А. Рудзит. – Рига : РПИ, 1984. – 101 с.

288. Ящерицын, П. И. Чистовая обработка деталей в машиностроении / П. И. Ящерицын, А. Н. Мартынов. – Минск : Вышэйшая школа, 1983. – 220 с.

289. Ящерицын, П. И. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей / П. И. Ящерицын [и др.]. – Новополюк : ПГУ, 1997. – 136 с.

290. Минин, Л. К. Определение оптимальных режимов магнитно-абразивной обработки наружных поверхностей вращения на основе математического планирования эксперимента / Л. К. Минин // Вопросы прочности и пластичности металлов. – Минск : Наука и техника, 1972. – С. 24–28.

291. Вайнер, Г. М. Качество поверхностного слоя при магнитно-абразивном полировании некоторых материалов / Г. М. Вайнер // Докл. III Междунар. н.-т. сем. по технологиям финишной обработки «АМО'87» (г. Варна, окт. 1987 г.). – Варна, 1987. – С. 42–47.

292. Македонски, Б. Г. Развитие комбинированных завершающих технологических процессов в НРБ / Б. Г. Македонски // Проблемы машиностроения и автоматизации. – Москва–Будапешт : 1989. – № 25. – С. 21–28.

293. Барон, Ю. М. Физические основы работы магнитно-абразивных материалов / Ю. М. Барон // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С. 10–17.

294. Скворчевский, Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 216 с.

295. Lin, C-T. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method / C-T. Lin, L-D. Yang, H-M. Chow // Int. Journal of Advance Manufacturing Technology. – 2007. – Vol. 34, P. 122–130.

296. Иконников, А. М. Расчет параметров процесса магнитно-абразивной обработки поверхностей сложного профиля / А. М. Иконников, В. А. Федоров // «Обработка металлов» ОАО НТП и ЭИ «ОРГСТАНКИНПРОМ». – Новосибирск, 2003. – № 4. – С. 10–11.

297. Kawakubo, H. Study on Partical-Brush in Magnetic Field Assisted Machining – Finishing Characteristics of Grooves // H. Kawakubo // International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21 Century, Niigata, 3–6 Nov, 2003. – LEM21. – Japan, 2003. – P. 385–390.

298. Способ магнитно-абразивной обработки : а. с. № 1537486 СССР, МКИ В 24 В 31/112 / Н. Я. Скворчевский, Д. Ф. Устинович, В. Н. Калина ; Физ.-техн. ин-т АН БССР. – № 4401725/31-08 ; заявл. 04.04.88 ; опубл. 23.01.90 // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 3. – 4 с.

299. Полищук, В. С. Магнитно-абразивная обработка – высокоэффективный метод в машиностроении / В.С. Полищук // Физика и техника высоких давлений. – 2003. – № 1. – С. 127–138.

300. Дроздов, Ю. Н. Прочность и износостойкость деталей машин / Ю. Н. Дроздов, В. П. Когаев. – М. : Машиностроение, 1991. – 320 с.

301. Давиденков, Н. Н. Избранные труды : 2 т. / Н. Н. Давиденков. – Киев : Наукова думка, 1981. – Т. 1 : Динамическая прочность и хрупкость металлов. – 656 с.

302. Туфанов, Д. Г. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей, сплавов и чистых металлов / Д. Г. Туфанов. – М.: Metallurgia, 1990. – 320 с.

303. Норенков, И. П. Автоматизированное проектирование / И. П. Норенков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 188 с.

304. Лащенко, Г. И. Плазменное упрочнение и напыление / Г. И. Лащенко. – Киев : Экотехнология, 2003. – 64 с.

305. Барбарич, М. В. Накатывание цилиндрических зубчатых колес / М. В. Барбарич, М. В. Хорунженко. – М. : Машиностроение, 1970. – 220 с.

306. Кириллов, О. Н. Комбинированное гидроабразивное с локальным электрохимическим растворением удаление заусенцев / О. Н. Кириллов, Е. В. Гончаров, В. И. Котуков // Вес. Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 24–26.

307. Постоянные магниты : справочник / под ред. Ю. М. Пятина. – М. : Энергия, 1980. – 488 с.

308. Афанасьев, В. А. Оптические измерения / В. А. Афанасьев. – М. : Высшая школа, 1981. – 229 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Научное издание

Акулович Леонид Михайлович,
Сергеев Леонид Ефимович

**МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА
СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

Ответственный за выпуск *И. С. Крук*
Корректор *Г. В. Анисимова*
Компьютерная верстка *Д. О. Бабаковой*
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 27.12.2019. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 15,81. Уч.-изд. л. 12,36. Тираж 100 экз. Заказ 891.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.