

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

НАО "Казахский агротехнический исследовательский университет  
им. С. Сейфуллина

Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Романюк Н.Н., Мендалиева С.И.

**ФИНИШНАЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ  
ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

Утверждено Академическим советом университета  
в качестве учебного пособия

УДК 621.923 (075.8)

Астана 2023

**ББК 34.5 я73  
Ф59**

Рецензенты:

Абулхаиров Д.К. - д.т.н., профессор, вице-президент Казахстанской Национальной Академии естественных наук.

Гришин А.Н. - к.т.н., доцент кафедры «Технологические машины и оборудование» КАТИУ им. С.Сейфуллина

**Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Романюк Н.Н., Мендалиева С.И.**

Финишная магнитно-абразивная обработка деталей сельскохозяйственной техники: учебное пособие. – Астана: КАТИУ имени С. Сейфуллина, 2023. – 244 с.

**ISBN 978-601-257-423-4**

В учебном пособии описаны технологии магнитно-абразивной обработки поверхностей различной геометрической формы деталей машин. Отражены особенности формирования режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке. Представлены результаты моделирования магнитного поля в рабочей зоне при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей. Приведены результаты исследований режущих и магнитных свойств ферроабразивных порошков, влияния активирующих технологических сред на интенсивность съема металла, синергетизма свойств металлических поверхностей при магнитно-абразивной обработке.

Данное пособие предназначено для научно-технических работников, занимающихся исследованием и разработкой технологий механической обработки поверхностей деталей машин. Также полезна докторантам, магистрантам и студентам машиностроительных специальностей высших учебных заведений.

**УДК 621.923 (075.8)**

**ББК 34.5 я73**

**Ф59**

**ISBN 978-601-257-423-4**

©Акулович Л.М. и др., 2023

©КАТИУ им.С.Сейфуллина, 2023

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

	<b>Введение</b>	7
<b>1.</b>	<b>Способы финишной абразивной обработки поверхностей деталей машин</b>	11
1.1	Финишная обработка инструментами с закрепленными абразивными частицами	11
1.2	Обработка потоком свободного абразива	17
1.3	Обработка поверхностей подвижно-скоординированными абразивными частицами	25
1.4	Магнитно-абразивная обработка поверхностей деталей машин	28
1.4.1	Разновидности способов магнитно-абразивной обработки	31
1.4.2	Магнитно-абразивная обработка различных материалов	33
1.4.3	Магнитно-абразивная обработка поверхностей различной геометрической формы	38
1.4.4	Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей	45
<b>2.</b>	<b>Формирование профиля режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке</b>	54
2.1	Представление топографии магнитного поля матричными формами системы уравнений Максвелла	54
2.2	Формирование ферроабразивной щетки в рабочем зазоре	68
2.3	Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей	70
2.3.1	Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке сферических поверхностей	70
2.3.2	Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке мелкозубчатых колес	73
2.3.3	Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке торцевых поверхностей для достижения высокого коэффициента светоотражения	77
2.3.4	Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке внутренних конических поверхностей для достижения высокого коэффициента светоотражения	82
2.3.5	Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке длинномерных изделий	86
2.3.6	Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке биметаллических наружных конических поверхностей	91
2.3.7	Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке крупнозубчатых колес	96
2.3.8	Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке прерывистых поверхностей металлорежущего инструмента	104
2.4	Профилирование криволинейных поверхностей при магнитно-абразивной обработке	109
<b>3.</b>	<b>Ферроабразивные порошки для магнитно-абразивной</b>	117

	<b>обработки</b>	
3.1	Виды ферроабразивных порошков и способы их изготовления	117
3.2	Структура ферроабразивных порошков	120
3.3	Магнитная проницаемость ферроабразивных порошков	125
3.4	Режущие свойства структурированного инструмента	129
3.4.1	Магнитно-абразивная обработка с использованием механических щеток	129
3.4.2	Магнитно-абразивная обработка длинномерных отверстий	134
3.4.3	Магнитно-абразивная обработка на основе ферроабразивных композиционных волокон	138
3.4.4	Магнитно-абразивная обработка отверстий на основе гибких абразивных щеток	142
4.	<b>Смазочно-охлаждающие технологические средства для магнитно-абразивной обработки</b>	148
4.1	Механизм действия смазочно-охлаждающих технологических средств на интенсивность съема металла	148
4.2	Смазочно-охлаждающие технологические средства для магнитно-абразивной обработки углеродистых сталей	151
4.3	Смазочно-охлаждающие технологические средства для магнитно-абразивной обработки цветных материалов	154
4.4	Влияние составов смазочно-охлаждающих технологических средств на интенсивность съема металла	161
4.5	Методы оценки качества смазочно-охлаждающих технологических средств	164
5.	<b>Самоорганизация процесса магнитно-абразивной обработки</b>	165
5.1	Синергизм свойств металлических поверхностей в процессе их изготовления	166
5.1.1	Факторы нестабильности магнитно-абразивной обработки	166
5.1.2	Неоднородность пластической деформации при резании	166
5.1.3	Формирование абразивной щетки из массы ферроабразивных частиц в результате их самоорганизации	168
5.1.4	Критерии процессов формирования поверхностей при магнитно-абразивной обработке	170
5.1.5	Самоорганизация процессов образования и регенерации абразивной щетки	173
5.1.6	Моделирование и оптимизация параметров магнитно-абразивной обработки с учетом самоорганизации процесса	176
5.1.7	Управление процессами обработки в электромагнитном поле с использованием явлений их самоорганизации	184
5.2	Активация технологических сред и оптимизация их составов	190
5.2.1	Повышение эффективности смазочно-охлаждающих	190

технологических средств для магнитно-абразивной обработки	
5.2.2 Методика исследования структурных характеристик смазочно-охлаждающих технологических средств на основе использования компьютерной микроскопии	192
5.2.3 Исследование процессов ультразвукового диспергирования смазочно-охлаждающих технологических средств	194
<b>6. Физико-механические и эксплуатационные свойства поверхностей после магнитно-абразивной обработки</b>	<b>201</b>
6.1 Качество обработанных поверхностей после магнитно-абразивной обработки	201
6.2 Влияние реверсивного вращения зубчатого колеса в процессе магнитно-абразивной обработки на качество обрабатываемых поверхностей зубьев	208
6.3 Формирование шероховатости рабочих поверхностей при магнитно-абразивной обработке уплотненным во впадине ферроабразивным порошком	210
6.4 Формирование остаточных напряжений при магнитно-абразивной обработке деталей машин	213
6.5 Технологическое обеспечение коррозионной стойкости внутренних колец подшипников	219
6.6 Эксплуатационные свойства поверхностного слоя	229
<b>Заключение</b>	<b>232</b>
<b>Список литературы</b>	<b>233</b>

## СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

МАО - магнитно-абразивная обработка  
РТС - рабочая технологическая среда  
СОТС - смазочно-охлаждающие технологические средства  
ФАП - ферроабразивный порошок  
КПД - коэффициент полезного действия  
ТП - технологический процесс  
ЭМП - электромагнитное поле  
ЭМС - электромагнитной системы  
МП - магнитный поле  
ИПМ - индуктор на постоянных магнитах  
ЭМИ - электромагнитный индуктор

## **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие технических средств характеризуется непрерывным увеличением силовых и скоростных параметров машин, что предъявляет повышенные требования к надежности и долговечности входящих в них деталей. Срок службы деталей машин во многом зависит от показателей качества поверхностного слоя, которые окончательно формируются на финишных операциях. Вместе с тем, удельный объем финишных операций в технологических процессах изготовления деталей непрерывно увеличивается. Это вызвано развитием высокоэффективных технологий изготовления заготовок деталей машин (точная штамповка, прокатка, точное литье, порошковая металлургия и т.п.), что все более приближает заготовки к требованиям чертежей самих деталей, как по форме, так и по точности. Вследствие этого снижаются припуски на механическую обработку, то есть имеет место тенденция увеличения доли чистовой обработки материалов резанием.

В связи с этим, актуальным является создание новых и совершенствование известных методов и технологических процессов финишной обработки с целью обеспечения формообразования, точности и требуемых показателей качества рабочих поверхностей деталей. В то же время для обеспечения конкурентоспособности выпускаемых изделий к технологическим процессам механической обработки предъявляются требования высокой производительности и низкой энергоемкости. Решение указанных задач кроется в использовании инновационных технологий, основанных на управляемом характере взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки.

Из финишных методов наибольшее применение в машиностроении получила абразивная обработка. Различают абразивную обработку закрепленным, свободным и подвижно-скоординированным зерном. Среди абразивной финишной обработки преобладает шлифование абразивным инструментом. Этому методу обработки нет альтернативы при обработке поверхностей простой геометрической формы (плоских, цилиндрических, конических). Для абразивной обработки поверхностей инструментом с закрепленным зерном требуется профилирование инструмента при его изготовлении и частая правка в процессе шлифования с целью поддержания формы и точности профиля режущего контура. При традиционном шлифовании геометрически сложных поверхностей профилированным инструментом существует проблема обеспечения высокой точности и низкой шероховатости поверхности в труднодоступных (переходных) зонах.

Финишную обработку сложнопрофильных поверхностей производят, как правило, эластичными абразивными инструментами. В технологии абразивной обработки шлифование и полирование эластичными инструментами занимает промежуточное место между шлифованием жесткими кругами и обработкой свободным абразивным

зерном. Инструменты, изготовленные из шлифовальной шкурки или на специальных органических связках, являются эластичными. Конструкция таких инструментов и свойства материалов, из которых они изготовлены, допускают в процессе резания значительное упругое перемещение абразивных зерен в направлении, перпендикулярном к рабочей поверхности инструмента. В связи с эластичностью инструментов при обработке не может быть заранее установлена определенная глубина резания, как, например, при шлифовании кругами на связке. Необходимые условия для резания создаются путем прижима рабочей поверхности инструмента к обрабатываемой заготовке с определенным давлением. При этом часть инструмента, прижимаемая к обрабатываемой поверхности, деформируется, в контакте с заготовкой находится значительно большее число зерен, чем у инструмента на жесткой связке.

Эластичные абразивные инструменты позволяют обрабатывать поверхности заготовок сложной формы из разнообразных материалов – металлов, древесины, кожи, стекла, керамики, пластмассы. Их используют при шлифовании и полировании с помощью ручных машинок, на стационарных станках, станках-автоматах и автоматических линиях. Например, ленточное полирование широко используют в автомобиле-, авиа-, судостроении, турбиностроении, деревообрабатывающей промышленности при чистовой и отделочной обработке заготовок с обеспечением малой шероховатости. Этот метод используют для обработки наружных и внутренних поверхностей. Ленточным полированием обрабатывают также плоские и сложные криволинейные поверхности (турбинные лопатки, кулачковые и коленчатые валы, посуду, ложки, вилки и др.). Особенность процесса: постоянство скорости резания, эластичность режущего контура. Большая площадь зоны контакта ленты с поверхностью заготовки приводит к большему числу активно работающих зерен и снижению в 2...3 раза коэффициента трения по металлу в сравнении с жесткими кругами.

Шлифование фибровыми дисками и полирование лепестковыми кругами применяют в машиностроении для подготовки поверхности под защитно-декоративные покрытия, для обработки заготовок из пластмасс, резины, древесины.

Суперфиниширование применяется для обработки поверхностей деталей, работающих в условиях трения скольжения и качения: роликов и дорожек качения колец подшипников, поршневых пальцев, шеек коленчатых валов и др. Режущий инструмент (алмазные бруски) самоустанавливаются на обрабатываемой поверхности, копируя ее профиль. Однако суперфиниширование не позволяет производить качественную обработку поверхностей сложного профиля и конструктивных элементов, расположенных на основных поверхностях деталей машин.



Притирка обеспечивает эквидистантность обрабатываемой поверхности рабочей поверхности инструмента-притира, на который наносят слой абразивных зерен (пасты или суспензии), осуществляющих сьем материала. Притирка является основным технологическим процессом финишной обработки высокоточных плоских деталей, отверстий малого (менее 6...8 мм) диаметра, шариков подшипников качения, фасонных поверхностей пуансонов, матриц и др.

К числу перспективных методов финишной обработки эластичным инструментом относится магнитно-абразивная обработка (МАО). Особенностью способа является ориентированное абразивное резание. В результате явлений самоорганизации частицы незакрепленного абразива под действием магнитного поля ориентируются перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Процесс микрорезания производится постоянно обновляющимися острыми кромками, т.е. на протяжении всего цикла обработки имеет место процесс ориентированного абразивного резания. Для реализации МАО не требуется изготавливать профилирующий абразивный инструмент, а также периодически его править, что в 2...3 раза снижает затраты на инструмент. МАО стабильно обеспечивает шероховатость поверхности  $R_a = 0,01...0,4\text{ мкм}$ , снижение температуры резания по сравнению с традиционными методами абразивной обработки, что способствует образованию нового качества поверхности и структуры поверхностного слоя. Однако конечный результат обработки зависит также и от магнитных характеристик обрабатываемого материала.

Проблема МАО поверхностей сложной геометрической формы состоит в том, что на участках сопряжения нарушаются однородность ферроабразивной щетки и режимы резания. Это вызвано возникновением в этих зонах градиента магнитной индукции и изменением кинематических параметров процесса резания.

В данном учебном пособии приведены результаты научных исследований процесса МАО, выполненных в течении последних десяти лет в Белорусском государственном аграрном техническом университете и Физико-техническом институте НАН Беларуси под научным руководством авторов. При подготовке данного труда авторы ставили задачу на основе обобщения достигнутых результатов исследований МАО выработать основные подходы комбинированного энергетического, механического и химического воздействия на стадии формирования рабочих поверхностей деталей машин.

Впервые введено понятие «рабочая технологическая среда» (РТС). Воздействие на обрабатываемую поверхность компонентов магнитного поля, ферроабразивного порошка и смазывающе-охлаждающих технологических средств рассматриваются как автономно, так и во взаимодействии.

Первая глава посвящена анализу достигнутых результатов МАО

поверхностей различной геометрической формы. Во второй главе рассмотрены особенности рабочей технологической среды, анализ их динамических характеристик, совместимость компонентов РТС и способы активации процесса съема металла.

Последующие главы раскрывают механизмы воздействия на обрабатываемую поверхность компонентов РТС: магнитного поля в рабочей зоне, режущих и магнитных свойств ферроабразивных порошков, активирующих технологических сред, синергетизм свойств металлических поверхностей при МАО.

Учитывая, что в казахстанских образовательных программах по направлению "Инженерия и инженерное дело", в частности по группе образовательных программ "Механика и металлообработка" для уровней образования докторантуры и магистратуры имеются дисциплины, изучающие современные методы металлообработки, и недостаточностью учебной литературы в этом направлении, авторы приняли решение разработать данное учебное пособие. Предполагается, что представленный в настоящем учебном пособии материал, полученный на основе научных исследований одного из известных научно-образовательных учреждений Республики Беларусь окажет большую научно-методическую помощь для магистрантов, аспирантов и докторантов, изучающих проблемы совершенствования методов финишной обработки деталей в машиностроении.

Участие авторов в написании учебного пособия: Акулович Л.М. Мендалиева С.И. – введение, структура и общее редактирование, главы 1, 3, 4; Сергеев Л.Е. – главы 2, 3, 4; Романюк Н.Н. – глава 1.

# **1. СПОСОБЫ ФИНИШНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Современное машиностроение располагает достаточно большим числом методов формирования рабочих сложнопрофильных поверхностей деталей машин с обеспечением заданных шероховатости и физико-механических свойств. Среди них доминирующим является механическая абразивная обработка, которая нередко является единственно возможным способом обеспечения требуемого качества поверхности.

Качество поверхности во многом определяется состоянием поверхностного слоя. Для деталей, к которым предъявляются требования повышенного сопротивления пластической деформации, прочности, износостойкости, важными являются такие характеристики поверхности, как шероховатость, отсутствие микротрещин, микротвердость, коррозионная стойкость. Основные свойства поверхности формируются в процессе изготовления и особенно на отделочных операциях, поэтому им в технологических процессах уделяется особое внимание. Возрастающие требования к надежности изготавливаемых деталей вызывают необходимость совершенствования технологических процессов их изготовления.

Существующие методы финишной обработки деталей машин достаточно эффективны при обработке различных поверхностей: цилиндрических, конических, сферических, сложнопрофильных.

По виду режущего инструмента существующие методы финишной абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей можно разделить на абразивную обработку закрепленным, свободным и подвижно-координированным зерном.

## **1.1 Финишная обработка инструментами с закрепленными абразивными частицами**

При обработке поверхностей закрепленным (жестко-связанным) зерном абразивные частицы порошка неподвижно закрепляются (цементируются) в механической связке и образуют режущий инструмент в виде абразивных кругов, брусков и т.п. Процесс резания осуществляется путем придания заготовке и (или) абразивному инструменту нескольких относительных движений.

Одним из видов сложнопрофильных поверхностей, широко применяемых в машиностроении и подвергаемых абразивной финишной обработке, являются профили зубьев зубчатых колес. Повышение

силовых и скоростных параметров современных машин привело к увеличению передаваемой мощности и частоты вращения деталей зубчатых соединений. В связи с этим проблема уменьшения уровня шума и вибраций в зубчатых передачах, повышения срока их службы является актуальной. Решение указанной проблемы кроется в повышении показателей качества и точности обработки рабочих поверхностей зубчатых колес.

Установлено [1], что уменьшение высоты микронеровностей поверхности на профилях зубьев с 12мкм до 2мкм соответствует увеличению контактной прочности незакаленных цилиндрических колес в 4 раза. Повышение точности цилиндрических колес с 7-й до 5-й степени (ГОСТ 1643–81) приводит к уменьшению уровня шума на 5... 8дБ. Из приведенных данных видно, что качество поверхности профилей зубьев и точность зубчатых колес оказывают существенное влияние на их прочность и уровень шума.

Несмотря на совершенствование технологий лезвийной формообразующей обработки резанием материалов твердостью до 54...58HRC, как показывает промышленный опыт, финишная обработка профиля зубьев зубчатых колес базируется на преимущественном использовании абразивных методов [2].

Основными способами чистовой обработки зубьев зубчатых колес являются зубошлифование, зубохонингование, обкатка и притирка.

**Зубошлифование** представляет собой дорогостоящий и низкопроизводительный процесс. Его применяют, когда требуется повышенная точность зубчатых колес, термически обработанных до твердости свыше 40 HRC [3].

При изготовлении зубчатых колес высокой точности (7-й степени и выше) основным методом окончательной обработки зубьев является шлифование, которое позволяет значительно повысить точность формы зубьев и снизить шероховатость их рабочих поверхностей.

Различают два метода шлифования боковых поверхностей зубьев: копирование (рисунок 1.1, а) и обкатка (рисунок 1.1, б...г). При обработке закаленных зубчатых колес шлифование часто является единственным технологическим способом достижения необходимой степени точности и шероховатости рабочих поверхностей зубьев.

При шлифовании по методу копирования шлифовальный круг повторяет профиль впадины обрабатываемого зубчатого колеса, а по методу обкатки – боковые поверхности круга воспроизводят профиль зуба рейки в зацеплении с обрабатываемым колесом.

Наиболее производительной и точной является обработка по методу обкатки с использованием в качестве инструмента абразивного червячного круга. Обработка по методу копирования применяется в основном для обработки прямозубых колес.



зернами. Это способствует образованию более ровного, по сравнению с обычным шлифовальным кругом, режущего контура. Шлифование гибкими абразивными кругами позволяет эффективно обрабатывать фасонные и криволинейные участки наружной поверхности деталей, так как в этом случае обеспечивается полное копирование профиля обрабатываемой поверхности [5]. Процесс обработки обычно сопровождается меньшим выделением тепла, что существенно снижает вероятность образования шлифовочных прижогов. При этом наблюдается увеличение микротвердости обработанной поверхности за счет создания в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений. В процессе шлифования такими кругами, вследствие наличия ровного режущего контура, глубоких рисок не образуется и стабильно обеспечивается шероховатость по параметру  $R_a=0,32\text{мкм}$  при исходной высоте микронеровностей  $R_a = 0,63...1,25\text{мкм}$ .

Однако обработка гибкими абразивными кругами не может быть использована в качестве самостоятельной финишной операции при обработке наружных поверхностей вращения сложного профиля, так как требуется предварительное шлифование поверхностей для придания им заданной геометрической формы. Кроме того, обработка гибкими абразивными кругами не дает возможности обеспечивать шероховатость поверхности по параметру  $R_a$  ниже  $0,32\text{мкм}$ , так как гибкий круг непрерывно работает в режиме резания.

Исследованиями [6,7] установлен характер распределения температурных полей и их влияние на качественные показатели шлифования. Высокие скорости резания и неблагоприятная геометрия режущих зерен приводит к резкому повышению температуры до  $1270...1770^\circ\text{К}$  в зоне контакта шлифовального круга с деталью. Это существенно изменяет структурное и напряженное состояние металла в поверхностном слое, происходит появление прижогов и понижение физико-механических свойств поверхностей деталей.

Необходимо отметить, что абразивное зерно при шлифовании снимает стружку не по всей длине дуги контакта с обрабатываемым металлом [6]. Экспериментально установлено, что процесс резания занимает в зависимости от условий и режимов шлифования от 30 до 50% длины дуги контакта. Остальное приходится на пластическую деформацию, приводящую к упрочнению металла на стадиях входа зерна в металл и его выхода. Это упрочнение поверхностного слоя приходится преодолевать следующему ряду зерен, существенно увеличивая силу резания.

Широкое распространение при обработке наружных поверхностей цилиндрических деталей получило суперфиниширование. Суперфиниширование – процесс отделочной обработки наружных поверхностей деталей мелкозернистыми брусками, упруго прижатыми к обрабатываемой поверхности с небольшим давлением ( $0,20...0,40\text{МПа}$ ) и совершающими

колебательные движения относительно вращающейся детали [6]. Обработка происходит в пределах высоты микронеровностей без существенного изменения размеров.

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 съем металла с различных участков профиля. Кроме того, для получения высоких качеств точности обработанных поверхностей необходимы предварительная обработка деталей шлифованием и высокая степень очистки смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС).

**Зубохонингование** осуществляют по следующим схемам [8]:

- двухпрофильное зацепление зубчатого хона с обрабатываемым колесом и радиальной нагрузкой «в распор» (рисунок 1.2, а);
- однопрофильное зацепление зубчатого хона с обрабатываемым колесом и тормозным моментом на колесе (рисунок 1.2, б);
- «коронарное» зубохонингование при использовании в качестве инструмента «охватывающего» хона (колеса с внутренним зацеплением) с обрабатываемым колесом наружного зацепления (рисунок 1.2, в).

В процессе зубохонингования обрабатываемое колесо и хон устанавливаются на скрещающихся осях. При этом происходят движения: вращательное – хона и колеса; осевое возвратно-поступательное – хона или колеса; осциллирующее возвратно-поступательное – хона для некоторых типов станков с целью увеличения производительности.

Рисунок 1.2 - Схемы зубохонингования: а – при двухпрофильном зацепления; б – при однопрофильном зацеплении; в – «коронарное» зубохонингование охватывающим хонем

Припуск под хонингование зубьев обычно составляет не более 0,02...0,03 мм на сторону зуба. Для улучшения качества обработки колеса в каждом конкретном случае следует устанавливать оптимальную величину припуска, так как повышенный съём его при зубохонинговании приводит к возникновению дополнительных погрешностей.

Хоны делятся на алмазные и абразивные [9]. Алмазный хон представляет собой зубчатое колесо, на профильную поверхность зубьев которого нанесен гальваническим методом алмазный слой. Абразивный хон изготавливается литьем в пресс-форму смеси белого электрокорунда с эпоксидными акриловыми или полиуретановыми связками.

Зубчатый хон имеет сходство со стальным шевером, имеет тот же модуль, что и обрабатываемое колесо, его проектируют для каждого зубчатого колеса. Разница между внешними диаметрами нового и предельно изношенного хона составляет 15...25мм [1]. Внешний диаметр хона выбирают в пределах 220...250мм. Число зубьев хона не должно быть кратным числу зубьев обрабатываемого колеса.

Зубохонингование позволяет устранить небольшие (до 0,3мм) заусенцы и забоины, уменьшить шероховатость боковых поверхностей зубьев с  $R_a=0,4...0,8\text{мкм}$  (предшествующее шлифование) до  $R_a=0,2\text{мкм}$ . Погрешности параметров зубчатого зацепления устраняются при съеме металла порядка 0,01...0,03мм. Все это обеспечивает повышение качества формы пятна контакта и плавности работы зубчатых передач, уровень шума передачи уменьшается на 2...4 дБ, срок службы и нагрузочная способность увеличиваются на 30 % [10].

Благодаря высокой производительности процесс зубохонингования получил широкое распространение в качестве отделочной операции при массовом крупносерийном производстве шестерен.

Для большинства рассмотренных способов абразивной обработки характерным является наличие ряда недостатков:

- неравномерный съём металла с поверхностей сложной геометрической формы из-за менее эффективного воздействия абразивных наполнителей на труднодоступные участки профиля;

- разброс показателей качества поверхности по параметрам шероховатости и физико-механическим свойствам из-за различия скоростей резания;

- сложность реализации способов при обработке поверхностей крупногабаритных деталей.

Указанные недостатки ограничивают область применения данных методов при обработке деталей, форма которых отличается от традиционной. В связи с чем, возникает необходимость использования других эффективных методов и способов финишной обработки поверхностей деталей, состоящих из материалов с различными физико-



механическими и магнитными свойствами, а также имеющих сложный профиль.

Установленные в результате сравнительных испытаний зависимости показателей качества зубчатых колес, профили зубьев которых были обработаны различными технологическими способами, дает основание для целесообразности поиска новых технологических процессов финишной обработки профиля зубьев с целью повышения показателей качества работы зубчатых передач и их долговечности [4].

## 1.2 Обработка потоком свободного абразива

При обработке поверхностей свободными абразивными частицами зерна абразивного порошка не закрепляют с целью формирования режущего инструмента какой-либо формы. Процесс резания производится за счет сообщения частицам порошка кинетической энергии изделий, относительно находящихся в покое, вибрирующих или движущихся с установленной скоростью.

Одним из распространенных методов высокоточной отделочной обработки поверхностей деталей является доводка.

Абразивная доводка (*притирка*) осуществляется абразивно-доводочной смесью, нанесенной на поверхность инструмента (притира), который по форме имитирует поверхность сопрягаемой детали. Материалом притира обычно является чугун или материал более мягкий по сравнению с обрабатываемым. При доводке применяются различные абразивные материалы, в том числе алмаз и эльбор [11]. Абразивные частицы перемешивают со смесью керосина и машинного масла и в виде пасты или суспензии подают в зазор между притиром и обрабатываемой поверхностью.

Для повышения эффективности обработки применяют шаржированные притиры. В этом случае притиры изготавливают из мягкого или пористого материала и в него механическим путем внедряют абразивные зерна.

Из абразивной доводки сложнопрофильных поверхностей наибольшее применение получила зубопритирка – процесс искусственного изнашивания рабочих поверхностей с помощью абразивной массы. Притирка применяется для ответственных передач с целью уменьшения шума, повышения плавности их хода и увеличения пятна контакта.

В настоящее время широко используются два основных метода притирки зубьев закаленных колес: с параллельными осями с тормозной нагрузкой (рисунок 1.3) (односторонняя обработка) или со скрещенными осями в плотном зацеплении (рисунок 1.4) (двухсторонняя

обработка). Припуск под притирку обычно составляет не более 0,05мм [3].

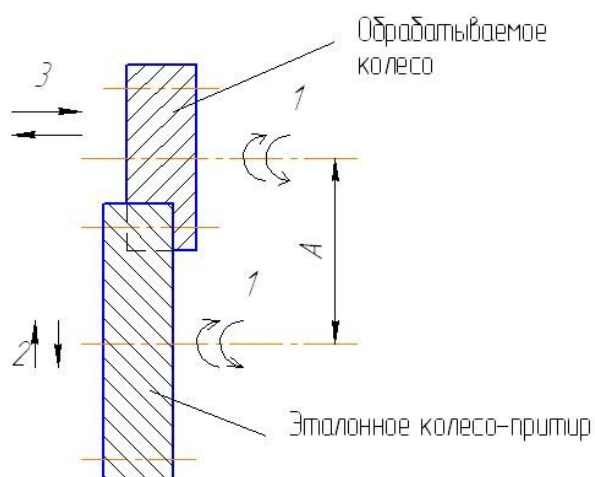


Рисунок 1.3 - Схема притирки зубьев на параллельных осях

Притирку выполняют в присутствии абразива (например, притирочная смесь корунд зернистостью 180...280– 40% и вазелиновая связка 60%; для точных работ: пылевидный кварц 50% с веретенным маслом и тавотом, а также пасты ГОИ). Притиркой достигается уменьшение отклонений профиля зубьев, а также снижение шероховатости поверхностей зубьев на один–два разряда. При этом значительно увеличивается пятно контакта, снижается шум при работе передачи и повышается долговечность и плавность работы передачи.

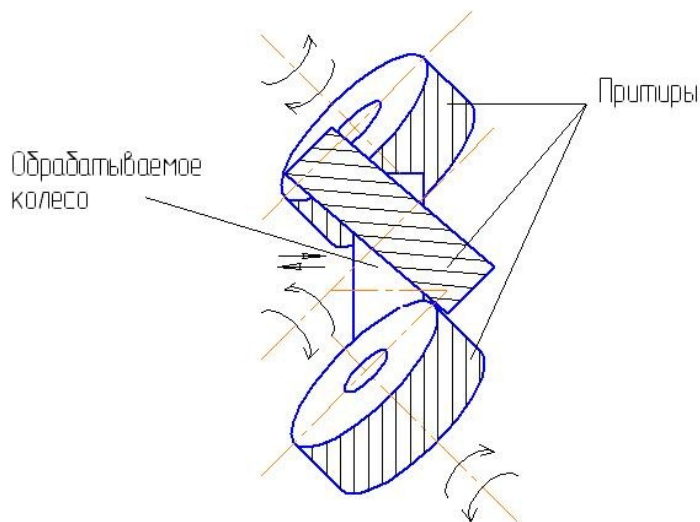


Рисунок 1.4 - Схема притирки зубьев тремя притирами со скрещенными осями

Абразивная доводка может обеспечить точную и качественную обработку наружных поверхностей тел вращения сложного профиля.

Однако обрабатываемая поверхность детали предварительно должна быть обработана с высокой точностью и иметь малую шероховатость поверхности. Сам процесс доводки является трудоемким, малопроизводительным, содержит большой объем ручного труда, требует частой правки притиров для восстановления их исходной формы.

При обработке методами, основанными на использовании свободного абразива, зерна более полно используют свои режущие способности, так как происходит равномерное распределение режущих кромок относительно обрабатываемых поверхностей, а также переориентация и перемещение их в процессе обработки. Такие методы позволяют, при сравнительно простых кинематических схемах оборудования, осуществлять обработку деталей сложной конфигурации из различных материалов. Значительно снижается температурный режим процесса, так как скорости резания меньше, чем при обычном шлифовании, а зоны микрорезания обильно омываются технологической жидкостью. Это позволяет получать высокое качество обработанной поверхности без прижогов, микротрещин и нежелательных структурных изменений. Обработке могут подвергаться детали, размеры которых находятся в широких пределах – от нескольких миллиметров до нескольких метров.

К числу наиболее распространенных способов обработки свободными абразивами можно отнести и **вибрационную обработку** (рисунок 1.5).

Рисунок 1.5 - Схема процесса вибрационной обработки: 1 – рабочая камера; 2 – пружины; 3 – дебалансный вибратор; 4 – основание; 5 – шланги для подачи и слива ТЖ; 6 – помпа; 7 – бак-отстойник

Вибрационная обработка в зависимости от характера применяемой рабочей среды представляет собой механический или химико-механический процесс съема мельчайших частиц и оксидов с обрабатываемой поверхности, а также сглаживание микронеровностей путем их пластического деформирования частицами рабочей среды, совершающими в процессе работы колебательное движение. Большое количество микроударов, воздействующих на обрабатываемую деталь

одновременно в различных направлениях, способствует в некоторой степени удержанию ее во взвешенном состоянии, чем исключаются грубые забоины и повреждения. Это позволяет обрабатывать детали малой жесткости. В результате циркуляции обработка происходит во всех зонах рабочей камеры, наиболее эффективно – около дна камеры, где давление рабочей среды выше.

К особенностям вибрационной обработки можно отнести: возможность одновременной обработки большого количества деталей без закрепления, возможность обработки деталей различных размеров, возможность обработки деталей малой жесткости. Обработка производится в основном в пределах профиля исходной шероховатости, т.е. является «безразмерной», однако при необходимости удаления дефектного слоя (после литья, штамповки) можно снимать большой припуск за счет увеличения времени вибрационной обработки.

Возможно использование вибрационной обработки на операциях отделочной обработки сложнопрофильных изделий. Однако при этом наблюдается неравномерный съем металла с различных участков поверхностей деталей. Плохо обрабатываются труднодоступные участки – канавки, углубления, внутренние поверхности деталей. Для получения шероховатости, соответствующей  $R_a=0,16...0,32\text{мкм}$ , необходима длительная обработка в несколько переходов со сменой наполнителя и составов технологической жидкости, что существенно увеличивает трудоемкость финишной операции. Кроме этого, из-за уменьшения амплитуды колебаний частиц рабочей среды и деталей по мере удаления от стенок рабочей камеры имеет место неравномерная обработка деталей в различных ее точках. Высокий уровень шума, сопровождающий работу виброустановок, ухудшает условия труда рабочих.

Способ объемной **центробежно-ротационной обработки** (рисунок 1.6) заключается в том, что гранулированная обрабатывающая среда и детали приводятся во вращательное движение вокруг вертикальной оси таким образом, что приобретают форму тора, в котором частицы движутся по спиральным траекториям.

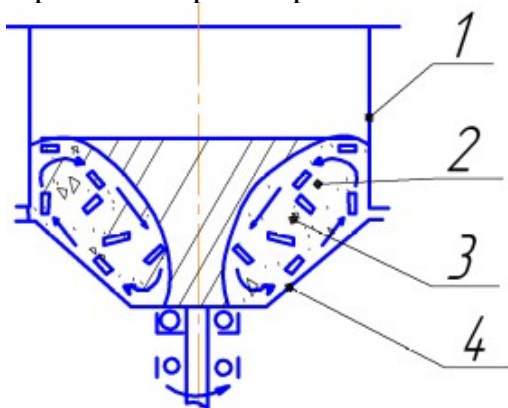


Рисунок 1.6 - Схема центробежно-ротационной обработки:

- 1 - неподвижная обечайка; 2 - гранулы абразива;  
3 - обрабатываемые детали; 4 - вращающийся ротор

Тороидально-винтовой поток обеспечивается конструкцией рабочей камеры станка, состоящей из неподвижной обечайки и примыкающего к ней вращающегося ротора, имеющего в наиболее распространенном варианте форму тарелки.

Достоинства центробежно-ротационной обработки – высокая интенсивность обработки, одновременная обработка партии деталей, обработка деталей небольших размеров. Недостатки центробежно-ротационной обработки – повышенный расход абразивной среды и возможность деформации деталей малой жесткости. Центробежно-ротационная обработка не позволяет эффективно обрабатывать крупные детали (>100г), в процессе обработки происходит вертикальное расслоение в рабочей зоне: обрабатываемые детали находятся внизу, абразивная масса вверху.

Сущность процесса **струйной абразивно-жидкостной обработки** (рисунок 1.7) заключается в направлении струи суспензии, состоящей из транспортирующей среды (например, воды) и абразивных зерен, на поверхность обрабатываемой детали. Суспензия подается чаще всего сжатым воздухом, который увеличивает скорость ее истечения. Взаимодействие абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью непродолжительно и носит ударный характер, общее количество ударов на всю поверхность колеблется от  $2 \cdot 10^6$  до  $26 \cdot 10^6$  в секунду. Данный способ обработки нашел широкое применение на отделочных операциях деталей сложной конфигурации. Однако при обработке деталей гидроабразивной струей имеет место неравномерный съем металла с различных участков профиля, что приводит к искажению геометрической формы детали.

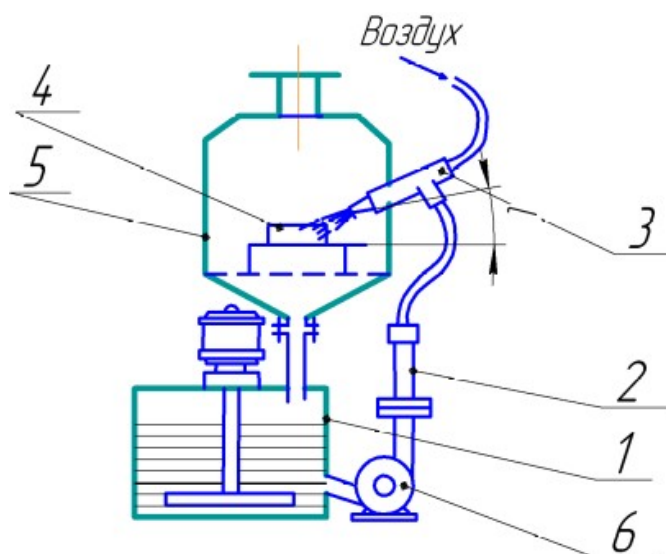


Рисунок 1.7 - Схема струйной абразивно-жидкостной обработки:  
 1 - бак; 2 - трубопровод; 3 - струйный аппарат; 4 - заготовка;  
 5 - герметичная камера; 6 - насос

В установках для абразивно-жидкостной обработки часто наблюдается выход из строя сопел, связанный с их интенсивным разрушением истекаемой с высокой скоростью гидроабразивной струей. Стойкость твердосплавных сопел также невелика и составляет 4...6 ч. Существует необходимость перемещения сопла вдоль поверхности детали, требуются устройства для сбора и возврата в струйный аппарат абразивных частиц. Эти недостатки ограничивают область применения струйной абразивно-жидкостной обработки.

Способ **турбоабразивной обработки** (рисунок 1.8) основан на создании абразивного кипящего (псевдосжиженного) слоя, в который помещают обрабатываемую деталь, задавая в зависимости от ее формы различные виды движения.

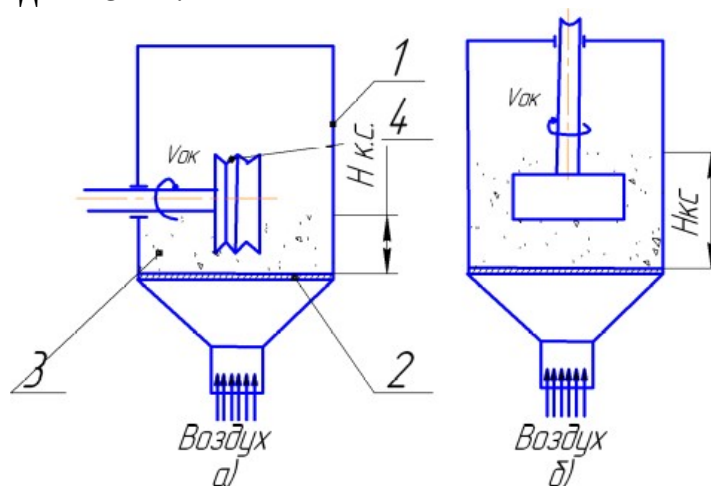


Рисунок 1.8 - Схема процесса турбоабразивной обработки: а – с горизонтальной осью вращения заготовки; б – с вертикальной: 1 – рабочая камера; 2 – воздухораспределительная решетка; 3 – абразивное зерно; 4 – заготовка

После турбоабразивной обработки поверхность имеет кратерообразный микрорельеф, состоящий из большого количества коротких царапин, которые создают матовую поверхность. Точность размеров и формы детали может быть повышена направленным образом, т. к. отсутствует достаточно жесткий, имеющий определенную форму инструмент. Вместе с тем величина размерного съема материала составляет 1...5 мкм, что не позволяет осуществить устранение дефектного слоя материала от предшествующей механической обработки.

В промышленности используют также способ абразивной обработки поверхностей деталей **во вращающихся барабанах**. Это обусловлено простотой конструкции установок, реализующих данный метод, сравнительно высокой степенью механизации, возможностью одновременной обработки большого количества деталей. В настоящее время разработано много различных схем данного метода обработки, но все они в основном сводятся к вращению круглых или граненых барабанов вокруг горизонтальной или наклонной оси. Обрабатываемые детали и абразивные наполнители загружаются в барабан, который равномерно вращается вокруг оси. При вращении абразивная среда и детали совершают относительное движение, сопровождающееся их соударениями, скольжением и микрорезанием обрабатываемых поверхностей частицами абразивного наполнителя, что обеспечивает сьем металла. Силы взаимодействия деталей с частицами наполнителя невелики, поэтому обработка во вращающихся барабанах продолжается от 5 до 100 часов.

Разновидностью обработки во вращающихся барабанах является полирование деталей в барабанах с планетарным вращением. В этом случае обрабатываемые детали и абразивная среда под действием инерционных сил, возникающих при вращении барабана вокруг оси планшайбы и собственной оси, совершают сложное пространственное движение. Детали и наполнитель перемещаются с разными скоростями в разных направлениях, в результате чего происходит интенсивное взаимодействие деталей с частицами абразивного наполнителя. Степень уплотнения абразивной среды в барабанах регулируется изменением скорости вращения планшайбы, а скорость относительного перемещения деталей и абразивных частиц определяется скоростью вращения барабанов вокруг собственной оси. Частота вращения планшайбы обычно составляет  $7...10\text{ с}^{-1}$ , а барабанов –  $5...40\text{ с}^{-1}$ . Производительность процесса обработки в планетарных установках значительно выше, чем во вращающихся барабанах. Это позволяет снизить продолжительность полирования до 60...90 мин. При этом, учитывая то, что в барабан одновременно загружается большое количество деталей, данный способ обработки считается весьма эффективным, а потому находит широкое применение в производстве. К недостаткам относятся: неравномерный сьем 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. Эти и другие недостатки ограничивают область применения данного метода в производстве.

Перспективным способом обработки деталей является полирование абразивом, уплотненным **инерционными силами**. Обработку

осуществляют в специальных устройствах, позволяющих трансформировать гидроабразивную суспензию в уплотненный инерционными силами абразивный слой, контактирующий с обрабатываемой поверхностью, и обеспечить их относительное перемещение. При этом способы уплотнения и относительного перемещения деталей и обрабатываемого слоя могут быть различными. Для практической реализации данного метода требуются различного рода устройства, обеспечивающие формирование уплотненного слоя абразива и возможность контактирования его с поверхностью обрабатываемой детали. Абразивное воздействие осуществляется свободными абразивными частицами, находящимися в суспензии в уплотненном состоянии в процессе их перемещения относительно обрабатываемой поверхности детали при определенном контактном давлении на нее. Обработка производится во вращающемся барабане, в котором за счет сил инерции на внутренней стенке располагается абразивная суспензия. Для обработки деталь вводят в контакт с уплотненным абразивным слоем. Деталь и барабан имеют встречные направления вращения. Уплотненный абразивный слой вращается вместе с барабаном, обтекает погруженную в него деталь и обрабатывает ее поверхности. Абразивный слой в уплотненном состоянии обладает определенной упругостью и за счет податливости точно копирует профиль поверхностей, производя обработку всех их участков. Способ обработки инерционными силами имеет ряд характерных и отличительных особенностей: возможность обработки различных видов поверхностей; автоматическое копирование профиля обрабатываемой поверхности «режущим инструментом»; активное действие технологической жидкости, проникающей непосредственно в зону обработки; эффективный отвод тепла и другие. Однако данный способ обладает определенными недостатками при обработке деталей со сложной формой наружного профиля и значительными перепадами диаметров, т. к. линейная скорость, а значит, и кинетическая энергия абразивной частицы зависят от ее расстояния до центра вращения барабана. Частицы, движущиеся по удаленным траекториям, обладают большей кинетической энергией, и при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью интенсивнее происходит срез металла. В связи с этим при глубоком профиле поверхности детали наблюдается его неравномерная обработка, так как наиболее эффективно снимается металл с выступающих участков профиля. 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.



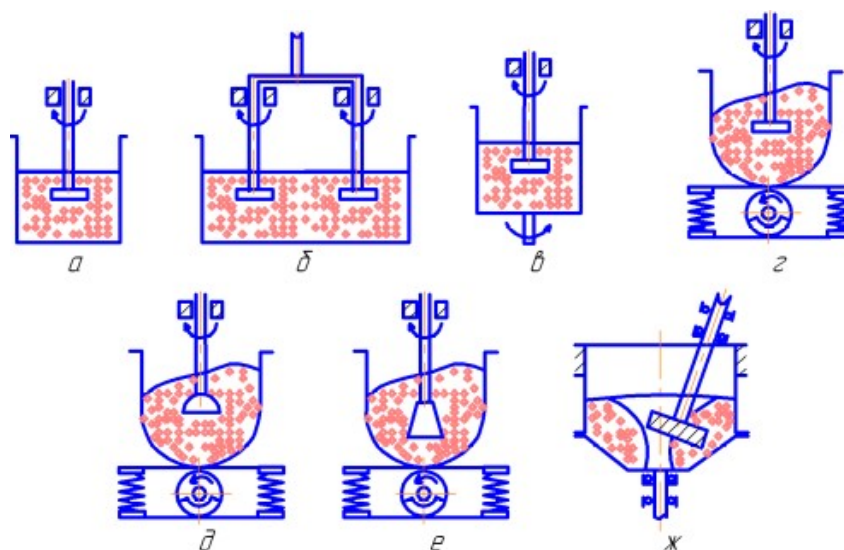


Рисунок 1.9 - Схемы шпиндельной обработки деталей: *а...в* - шпиндельная обработка в чистом виде; *г...е* - шпиндельная вибрационная обработка; *ж* - шпиндельная центробежно-ротационная обработка

На операциях отделочной обработки наружного профиля деталей типа колец, втулок и т. п. находит применение **шпиндельная обработка** (рисунок 1.9).

Закрепленная на шпинделе и вращающаяся с высокой скоростью обрабатываемая деталь вводится в соприкосновение с абразивной средой, находящейся, например, в вибрационной камере. В отличие от виброабразивной обработки, в данном случае главным движением является вращение обрабатываемой детали, а не колебание частиц рабочей среды. Вибрация поддерживает рабочую среду во взвешенном состоянии, обеспечивает ввод детали в рабочую зону и вывод из нее по окончании обработки, перемешивает и непрерывно подает свежие абразивные частицы к обрабатываемой поверхности. Иногда обрабатываемой детали, помимо вращательного, сообщают возвратно-поступательные или осциллирующие осевые движения, которые интенсифицируют процесс обработки. Более высокая производительность достигается при сообщении детали планетарного вращения. Величина съема металла с обрабатываемых поверхностей в основном зависит от влажности абразивной среды, определяющей ее давление на обрабатываемую поверхность, скорости вращения детали и продолжительности обработки. Сравнительно высокая интенсивность съема металла дает возможность ограничить цикл обработки до 5...7 мин. За это время шероховатость поверхности снижается по параметру  $R_a$  до 0,20...0,32 мкм и в дальнейшем не изменяется. При этом в поверхностном слое деталей возникают сжимающие остаточные напряжения с глубиной залегания до 10...15 мкм. Погрешности макрогеометрии (волнистость, огранка) данный способ обработки практически не устраняет. Недостатком шпиндельной виброобработки

является то, что для получения деталей с шероховатостью попараметру  $R_a=0,16\dots0,32\text{мкм}$  необходимо, чтобы исходная шероховатость была по параметру  $R_a$  не выше  $0,64\dots1,25\text{мкм}$ . При обработке деталей типа колец, втулок на их геометрическую точность существенное влияние оказывает осевое биение шпинделя, величина которого не должна превышать  $0,1\text{мм}$ . В противном случае наблюдается образование овала.

### 1.3 Обработка поверхностей подвижно-скоординированными абразивными частицами

Рассмотренные методы финишной обработки поверхностей закрепленным и свободным абразивом наиболее приемлемы для обработки однородных изделий простой геометрической формы. Для большинства рассмотренных методов присущ ряд недостатков, таких, как неравномерный съем металла с поверхностей сложной формы; отсутствие эффективного воздействия абразивных наполнителей на труднодоступные участки профиля; взаимные соударения деталей, приводящие к появлению забоин и вмятин на обрабатываемых поверхностях; трудность при обработке изделий с массой более  $100\text{г}$ ; значительное время обработки. Эти и другие недостатки ограничивают область применения указанных методов при окончательной обработке поверхностей сложной формы, а также финишной обработке деталей, состоящих из материалов с различными физико-механическими свойствами.

В этой связи для финишной обработки сложнопрофильных поверхностей получил развитие метод обработки подвижно-скоординированными абразивными частицами. Сущность метода состоит в том, что абразивные частицы охватывают контур обрабатываемой поверхности, фиксируются в этом положении и формируют режущий контур инструмента. Таким образом, режущий контур абразивных частиц является гибким и каждый раз самоустанавливается на обрабатываемой поверхности, копируя ее.

Широкое применение на операциях отделочной обработки поверхностей сложной конфигурации получило **полирование абразивными лентами** (рисунок 1.10).

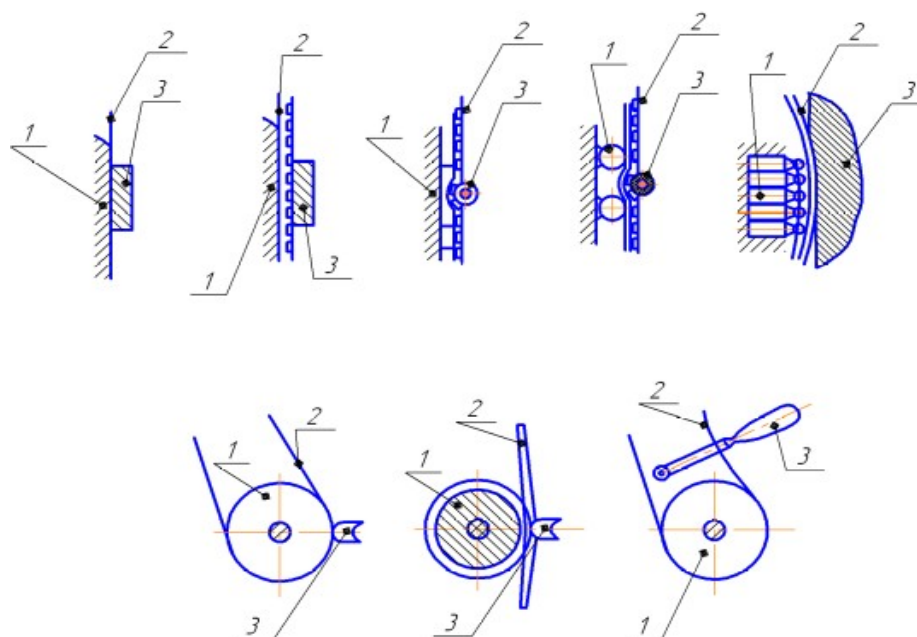


Рисунок 1.10 - Схемы полирования абразивными лентами поверхностей заготовок: 1 – прижим; 2 – абразивная лента; 3 – обрабатываемая заготовка

Обработка производится движущейся с высокой скоростью абразивной лентой. Контакт ленты с деталью осуществляется с помощью контактных роликов. Полирование абразивными лентами позволяет получать высокую точность обработки и наиболее рациональные характеристики шероховатости поверхности. Одним из основных преимуществ данного способа является возможность обработки сложных криволинейных поверхностей. При этом, чем сложнее форма обрабатываемой поверхности и чем меньше должна быть ее шероховатость, тем более мелкозернистой и гибкой должна быть лента.

В последнее время все большее распространение получает полирование алмазными лентами, а также прерывистое и реверсивное ленточное полирование, позволяющее повысить стойкость лент.

Однако и обработке абразивными лентами присущи недостатки при работе с наружными сложнопрофильными поверхностями. Это вызвано тем, что абразивная лента обладает определенной упругостью, из-за чего отдельные труднодоступные участки профиля остаются непрошлифованными. Поэтому не исключается необходимость в применении ручной дополировки, что снижает технико-экономические показатели процесса обработки.

Близкой к полированию абразивными лентами является обработка деталей профильными **алмазными брусками на эластичной связке**, упруго прижатыми к поверхности вращающейся детали. Алмазные зерна, закрепленные в эластичной связке, в процессе резания подвижны, что позволяет создавать плотный режущий контур, подобный тому, который образуется при полировании лентой. Шероховатость

поверхности после обработки закаленных сталей составляет по параметру  $R_a=0,08...0,16\text{мкм}$  при исходной величине  $R_a=0,63...1,25\text{мкм}$ . Несмотря на эффективность съема металла при резании, данный способ обработки пока 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.

Одним из перспективных методов, позволяющих решать проблему финишной обработки поверхностей сложной формы, является способ **магнитно-абразивной обработки** (МАО). При МАО в качестве инструмента используется ферроабразивный порошок (ФАП), который находится в рабочем зазоре в подвижно-связанном состоянии. При абразивной обработке подвижно-скоординированным зерном роль связующего элемента выполняет энергия электромагнита [12], обладающая упругими силами воздействия на абразивные частицы порошка. Если частицы механической связки дискретны, то электромагнитное поле непрерывно распределено в пространстве рабочего зазора и может изменять свои параметры (напряженность, магнитную индукцию и др.). Способность электромагнитного поля интерферировать, то есть, взаимодействуя, усиливать или ослаблять сцепление частиц абразивного порошка между собой, а также изменять их давление на обрабатываемую поверхность, создает возможность объединения в одном рабочем цикле черновой, чистовой и финишной операций. При закреплении абразивных частиц в механической связке интерференции не наблюдается и изменение давления абразивного инструмента на обрабатываемую поверхность осуществляется дискретно механизмами станка.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований в промышленности реализован ряд технологических процессов МАО различных изделий (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Области применения МАО

Операция	Обрабатываемый материал
Удаление заусенцев	Ферромагнитные и немагнитные материалы
Округление острых кромок	Ферромагнитные и немагнитные материалы
Полирование режущей части инструмента	Инструментальные стали и твердые сплавы
Удаление окалины и проката	Ферромагнитные и немагнитные материалы
Очистка печатных плат от окалины	Фольгированные диэлектрики
Получение рельефного изображения; обработка отверстий	Хрупкие немагнитные материалы
Упрочнение поверхностей	Немагнитные материалы

Способ МАО прост в осуществлении, экологически чист, обеспечивает высокое качество обработанных поверхностей деталей и су-

ществленное повышение их сопротивляемости износу, коррозии и механическим нагрузкам, обладает высокой производительностью и успешно заменяет некоторые виды электрохимической и механической обработки.

#### 1.4 Магнитно-абразивная обработка поверхностей деталей машин

Магнитно-абразивная обработка осуществляется при движении относительно друг друга заготовки и абразивных частиц в магнитном поле (ГОСТ 23505–79). Впервые метод магнитно-абразивной обработки был предложен в 1938 году Н.И.Каргаловым, который получил авторское свидетельство на способ полирования деталей машин с использованием энергии магнитного поля [13].

Сущность и особенности способа МАО рассмотрим на примере обработки наружных цилиндрических поверхностей, получившей наиболее широкое практическое применение (рисунок 1.11) [13].

Обрабатываемая деталь 4 помещается с зазором  $\delta$  между полюсными наконечниками 2, установленными на электромагнитной системе 1. Зазоры заполняются ФАП 3. Частицы порошка под действием энергии магнитного поля, создаваемого катушками 2, удерживаются в зазоре и, ориентируясь наибольшей осью по направлению магнитных силовых линий, создают ферроабразивную щетку, которая прижимается к обрабатываемой поверхности 4.

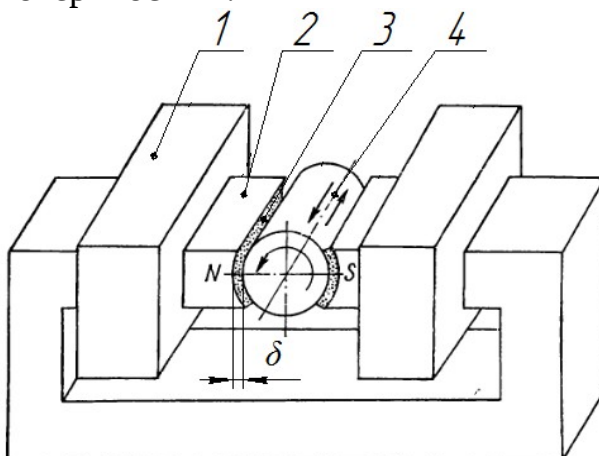


Рисунок 1.11 - Схема МАО наружных цилиндрических поверхностей: 1 – электромагнитная система; 2 – полюсные наконечники; 3 – ФАП; 4 – обрабатываемая деталь

Детали сообщаются вращательное и возвратно-поступательное осциллирующее движения, что обеспечивает перемещение обрабатываемой поверхности относительно абразивного порошка и ее абразивную обработку.

Для предотвращения засаливания ферроабразивной щетки в рабочие зазоры подается смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС). Поскольку каждая частица ФАП, ориентируясь по направлению магнитных силовых линий, то к обрабатываемой поверхности обращены наиболее острые режущие кромки.

В процессе обработки режущие кромки притупляются, прежняя наибольшая ось элемента уменьшается. Появляются две новые наиболее удаленные точки, которые являются геометрическим местом новой наибольшей оси зерна.

Происходит переориентация ферромагнитного элемента таким образом, что его новая наибольшая ось совпадает с направлением магнитных силовых линий, в результате чего обработка поверхности детали производится всегда острыми кромками.

Данная особенность известна как процесс ориентированного абразивного резания.

Особенностями способа MAO являются:

- непрерывный контакт абразива с поверхностью изделия, что снижает циклические нагрузки на технологическую систему и способствует повышению точности геометрических размеров и формы обрабатываемой поверхности;

- отсутствие жесткого крепления абразивного зерна в связке, что способствует самопроизвольному нивелированию режущего инструмента относительно топографии (макрорельефа) обрабатываемой поверхности, устраняет вероятность появления в зоне резания критических давлений и температур, увеличивает стойкость зерна и обеспечивает стабильность физико-механических показателей качества поверхностного слоя детали;

- возможность управления жесткостью абразивного инструмента в осевом и продольном направлениях путем плавного регулирования величины тока в катушках электромагнита, что позволяет управлять величиной съема металла с обрабатываемой поверхности изделия;

- возможность совмещения черновой, чистовой и финишной обработки без смены технологических баз и переустановки детали;

- отсутствие трения связки о поверхность изделия, что обеспечивает абразивную обработку поверхности в условиях низких температур;

- возможность осуществлять как размерную, так и безразмерную обработку, обеспечивающую за 10...120 секунд съем металла 0,002... 0,5мм на диаметр.

Указанные особенности MAO обуславливают целесообразность применения способа для обработки сложнопрофильных поверхностей по следующим соображениям:

- отсутствие необходимости в изготовлении профилирующего абразивного инструмента, копирующего профиль обрабатываемых поверхностей, а также его периодической правки, что в 2...3 раза снижает затраты на инструмент;

– возможность полной автоматизации (механизации) операций обработки сложнопрофильных изделий, что позволяет повысить производительность труда в 3...5 раз по сравнению с существующими методами поштучной абразивной обработки.

Сравнительный анализ различных способов отделочной абразивной обработки поверхностей (таблица 1.2 и 1.3) показывает, что MAO по сравнению с другими способами обработки поверхностей обеспечивает положительный эффект, заключающийся в следующем:

– исключается шаржирование обработанной поверхности зернами абразивного материала, обеспечивается высокая точность (до 6-го качества);

– ускоряется процесс обработки;

– уменьшается стоимость обработки ввиду того, что ФАП во много раз дешевле корундовых и алмазных инструментов. Инструментальная оснастка для обработки зубчатых колес имеет небольшую стоимость. Она изготавливается из дешевых сортов стали и ее функция состоит в удерживании зерна ФАП в рабочем зазоре, но сама поверхность оснастки в контакт с обрабатываемой поверхностью не вступает, в результате чего значительно увеличивается время ее эксплуатации.

Таблица 1.2 - Значения параметров шероховатости поверхности при различных способах обработки

Вид обработки	Параметры шероховатости			
	$R_a$ , мкм	$S_m$ , мм	$S$ , мм	$t_{20}$ , %
1	2	3	4	5
Шлифование:				
– предварительное	1,6...3,2	0,25...0,1	0,1...0,8	10
– чистовое	0,32...1,6	0,063...0,25	0,032...0,16	10
– тонкое	0,08...0,32	0,008...0,025	0,003...0,016	10
Хонингование:				
– предварительное	1,25...3,2	0,063...0,25	0,085...0,16	10
– чистовое	0,25...1,25	0,02...0,1	0,008...0,08	10
– тонкое	0,04...0,25	0,006...0,2	0,003...0,16	10
Притирка (доводка)	0,02...0,16	0,005...0,04	0,002...0,02	10...15
MAO	0,02...0,16	0,08...1,25	0,03...0,16	10...30

Таблица 1.3 - Характеристики некоторых технологических параметров при различных видах отделочной обработки

Вид обработки	Давление на инструмент	Температура в зоне обработки,	Припуск на обработку, мм
---------------	------------------------	-------------------------------	--------------------------

	(давление порошка), МПа	°К	
Шлифование	1,2...12	970...1270	0,05...0,18
Хонингование	0,2...1,5	370...420	0,005...0,15
ритирка	0,05...0,2	300...400	< 0,03
МАО	0,4...2,0	320...350	не требуется

Установлено [14], что характеристики поверхностного слоя деталей после МАО, такие как количество остаточного аустенита, напряжения I и II рода, блоки когерентного рассеяния, имеют предпочтительные значения, чем после шлифования и хонингования.

#### 1.4.1 Разновидности способов магнитно-абразивной обработки

Разработанные способы МАО можно классифицировать по форме обрабатываемой поверхности [23]: обработка наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, плоскостей, кромок, поверхностей вращения с криволинейной образующей, сферических поверхностей (рисунок 1.12).

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. Съем металла происходит за счет наличия относительных перемещений детали и инструмента (вращательных, поступательных и осциллирующих). В схемах (рисунок 1.12, а, г, 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 (рисунок 1.12, б, в, ж, з) осуществляется выполнение трех движений формообразования, при этом главное движение резания совершает инструмент. Обработку по схеме (рисунок 1.12, г) выполняют с осциллирующим движением детали.



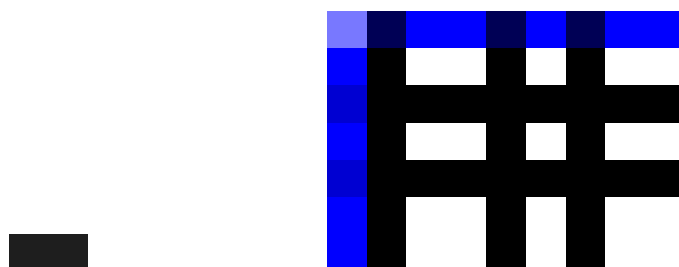


Рисунок 1.12 - Схема МАО: *a, б* – валов; *в* – прутков и труб; *г* – цилиндрических и стержневых деталей; *д, ж* – листов и лент; *з* – сферических поверхностей

Эффективная работа схем МАО зависит от того, как силы магнитного поля смогут удерживать рабочую среду в виде ФАП и СОТС в зоне резания и насколько будут соответствовать условиям процесса их плотность и характеристики [24].

#### **1.4.2 Магнитно-абразивная обработка различных материалов**

Промышленное применение способ получил, начиная с 70-х годов прошлого века, благодаря разработкам, выполненным в ФТИ НАН Беларуси под руководством Е.Г.Коновалова. В разработку технологических процессов МАО внесли существенный вклад работы 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, Э.Н.Кудиновой и др. [12, 16, 20, 23, 25, 26, 27, 28, 29].

Проведенные исследования посвящены в основном определению принципиальной возможности и разработке технологических основ МАО различных материалов, используемых для изготовления деталей, к качеству поверхностей которых предъявляются повышенные требования.

МАО за время порядка 60...100 с позволяет сформировать поверхность детали, микрорельеф которой не имеет следов предшествующей обработки. Высокая пластичность и вязкость сплавов затрудняют достижение полированием высокого класса шероховатости поверхности образцов. Этим объясняются малые значения шероховатости по параметру  $R_a$  у материалов, обладающих повышенной хрупкостью и относительно высокой магнитной проницаемостью.

На качество формируемой в процессе МАО поверхности оказывают влияние, в основном, следующие факторы: магнитная индукция в рабочем зазоре, величина рабочего зазора, скорость вращения изделия, время обработки, зернистость ФАП, физико-химические свойства порошка.

Исследованию напряженного состояния и микроструктуры поверхностного слоя закаленных сталей после МАО посвящены работы Ю.М.Барона. Установлено [25], что при обработке наружных цилиндрических поверхностей образцов их закаленной стали У10А в поверхностном слое появляются тангенциальные остаточные напряжения сжатия, которые распространяются на глубину 2...4мкм. С увеличением магнитной индукции от 0,6 до 1,4Тл напряжения сжатия повышаются от 750 до 1400МПа, а на глубине 0,5мкм они могут достигать значений 1400...1600МПа. Однако с дальнейшим увеличением индукции напряжений сжатия в поверхностном слое уменьшаются. Увеличение скорости резания приводит к увеличению напряжений сжатия. Данное явление автор [26] объясняет тем, что при больших скоростях резания пластическая деформация обрабатываемой поверхности не успевает произойти в большом объеме и распространяется на меньшую глубину.

В работе [30], также установлено, что после МАО образцов из стали с 60...62 HRC в поверхностном слое возникают напряжения сжатия. По мнению автора [30] это свидетельствует о том, что основной причиной их возникновения является пластическая деформация обрабатываемой поверхности заготовки. Отмечается, что наибольшее влияние на уровень остаточных напряжений сжатия оказывают магнитная индукция и зернистость порошка. Так, повышение магнитной индукции от 0,4 до 1,25 Тл вызывает увеличение микронапряжений от 0,02 до 0,92 ГПа. Дальнейшее увеличение индукции приводит к снижению последних.

Одновременно с возникновением напряжений сжатия в поверхностном слое детали, независимо от режима обработки, наблюдается

увеличение микротвердости. Последнее свидетельствует о наличии тонкого упрочненного слоя, являющегося, по-видимому, результатом пластической деформации.

Увеличение твердости поверхностного слоя после МАО отмечали также и другие авторы. Г. С.Шулев при полировании закаленной стали ХВГ впервые зафиксировал это явление и объяснил его измельчением мартенситной структуры металла, частичным распадом мартенсита и обогащением в связи с этим поверхностного слоя карбидами [31].

Исследования тонкой кристаллической структуры поверхностного слоя заготовки после МАО проводились в работах [32, 33, 34]. Авторами работы [34] отмечается, что наибольшее влияние на остаточные напряжения II – рода и дисперсность блоков когерентного рассеивания оказывают также характеристики процесса: магнитная индукция в рабочем зазоре, а также зернистость применяемого порошка, значительно в меньшей степени влияет время обработки. По мере увеличения магнитной индукции и зернистости порошка происходит рост микронапряжений и дисперсности блоков мозаики, затем наблюдается замедление в интенсивности их увеличения. При магнитной индукции более 1,3 Тл и зернистости более 200 мкм микронапряжения и дисперсность блоков когерентного рассеивания понижаются. С увеличением времени обработки напряжения II рода увеличиваются, что свидетельствует об упрочнении поверхностного слоя.

Эффективность магнитно-абразивной обработки зависит от магнитной проницаемости обрабатываемого материала. Чем выше величина магнитной проницаемости материала обрабатываемой детали  $\mu$ , тем интенсивнее процесс резания при МАО. В качестве показателя обрабатываемости материалов методом МАО принят показатель  $R_a$ , характеризующий шероховатость формируемой поверхности. Данный показатель тем выше (величина  $R_a$  меньше), чем более хрупким является полируемый материал и чем выше его магнитная проницаемость.

Выполненные исследования качества поверхностного слоя были проведены на изделиях из различных материалов. Исследования по влиянию МАО на качество поверхностного слоя сложнопрофильных изделий к настоящему времени имеют крайне ограниченный характер. Проведенный анализ и полученные данные по обработке сложнопрофильных изделий, часто состоящих из материалов с различными физико-механическими и магнитными свойствами, позволяют сделать вывод, что финишная обработка данного класса деталей не может быть выполнена известными методами и носит проблемный характер.

В работе [35] установлено определяющее влияние структуры и химического состава материалов на их обрабатываемость. Другие авторы [36] связывают этот показатель с твердостью сплавов и их

микроструктурой. Обнаружено также [37] наличие тесной связи между обрабатываемостью и жаропрочностью сталей.

Представляет интерес рассмотрение принципиальной возможности MAO различных материалов, применяемых при изготовлении деталей, к качеству поверхностей которых предъявляются повышенные требования. Важным с точки зрения более широкого распространения процесса MAO является установление области применения данного метода для обработки различных материалов.

К тому же следует принимать во внимание отличительную особенность способа MAO – использование энергии магнитного поля при формировании поверхности изделий. В связи с этим логично предположить зависимость конечного результата обработки и от магнитных характеристик обрабатываемого материала (таблица 1.4) [37, 38, 39].

Полученные результаты можно объяснить так: чем выше магнитная проницаемость обрабатываемого образца, тем больше величина магнитного потока в зазоре и тем интенсивнее процесс резания при MAO.

Таблица 1.4- Показатели обрабатываемости материалов

Обрабатываемый материал	Показатели обрабатываемости		Механические характеристики			Магнитная проницаемость $\mu \cdot 10^{-5}$ , Гн/м
	$\Delta\sigma$ , мг/(см <sup>2</sup> ·мин)	$R_c$ , мкм	Предел прочности при растяжении	Отн. удлинение при	Твердость НВ	
Сталь 10		0,38	3400	31	137	5,292
Сталь 45	30	0,075	6100	16	197	4,912
Сталь 40Х	29	0,11	10000	10	207	4,914
Сталь У8А	27	0,06	8000	–	187	4,850
Сталь 4Х13	22,5	0,125	5200	20	229	2,262
Латунь Л59-1	20	0,19	3000	35	90	0,126
	10	0,22	5200	40	197	0,126
Сталь Х18Н10Т	7,5	0,45	8000	30	60	0,126
Титановый сплав ОТ4						

Важным является определение основных закономерностей одновременной обработки деталей из различных материалов с различными физико-механическими свойствами. Г.М.Вайнер в работе [40] приводит результаты исследований воздействия магнитно-абразивной обработки на физико-механические и эксплуатационные свойства поверхностного слоя стали ЭИ-961, титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ-9. Результаты экспериментальных исследований показали, что магнитно-абразивная обработка является эффективным способом отделочной обработки

хромистой коррозионно-стойкой стали ЭИ-961 и титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ-9, существенно снижающим шероховатость поверхности. Установлено также отсутствие прижогов и возникновение незначительного наклепа, то есть остаточных напряжения сжатия.

В работе [25] показано, что введение в технологию производства твердосплавных пластин MAO в качестве финишной обработки позволяет повысить их эксплуатационные свойства. Достигается это снижением шероховатости рабочих элементов и увеличением радиуса округлений лезвий до оптимального радиуса (для твердосплавных пластин). Кроме повышения производительности процесса резания, округление лезвия приводит к повышению времени работы инструмента до разрушения и уменьшению интенсивности отказов, связанных с поломками. Снижение вероятности разрушения инструмента в этом случае объясняется уменьшением уровня и концентрации напряжений, интенсивности вибраций, более ровным лезвием инструмента. Положительный эффект от MAO во многом достигается в результате устранения различных поверхностных дефектов, которые имеет материал обрабатываемой детали, а также упрочнения поверхностной пластической деформацией, вследствие чего уменьшается число скалываний и микровыкрашиваний режущей кромки в процессе эксплуатации. Упрочнение подавляет рост и развитие микродефектов, способствующих зарождению усталостных микротрещин. Продолжительность операции удаления поверхностного слоя обрабатываемой детали зависит от ее обрабатываемости, абразивных свойств инструмента и режима обработки.

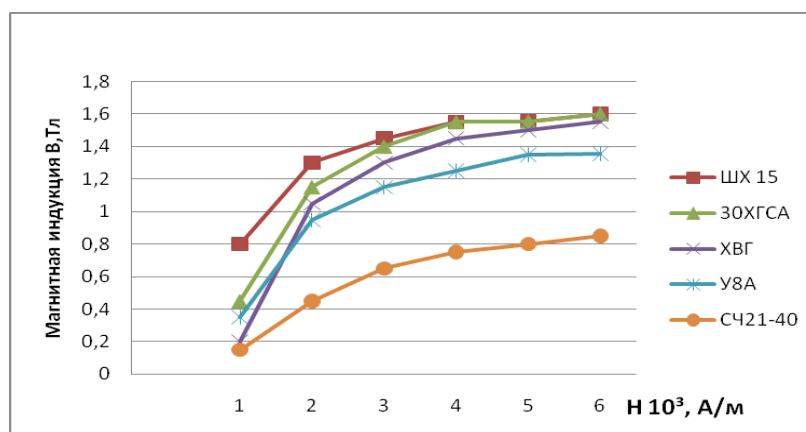


Рисунок 1.13 - Зависимость магнитной индукции от величины намагниченности ферромагнитных материалов

В работе [33], в качестве объектов исследований были выбраны стали и чугуны различных классов, используемые для изготовления ответственных деталей машин. По экспериментальным данным были

построены кривые намагничивания для исследуемых сталей и чугуна (рисунок 1.13).

Лучшими магнитными свойствами обладает сталь ШХ15, худшими чугун СЧ 21. Такой характер распределения кривых намагничивания может быть объяснен разной величиной магнитной проницаемости для рассматриваемых материалов. Лучшие результаты при МАО стальных деталей были получены при значениях магнитной индукции  $B=1,2$ Тл.

МАО проводилась для всех исследуемых материалов при следующих режимах:  $B = 1,2$  Тл;  $V_{рез}=1,6$ м/мин;  $A=2$ мм;  $\delta=1$ мм; порошок  $TiC-Fe$  зернистостью 250/315.

На рисунке 1.14 показаны зависимости съема от времени обработки  $t$  для исследуемых материалов.

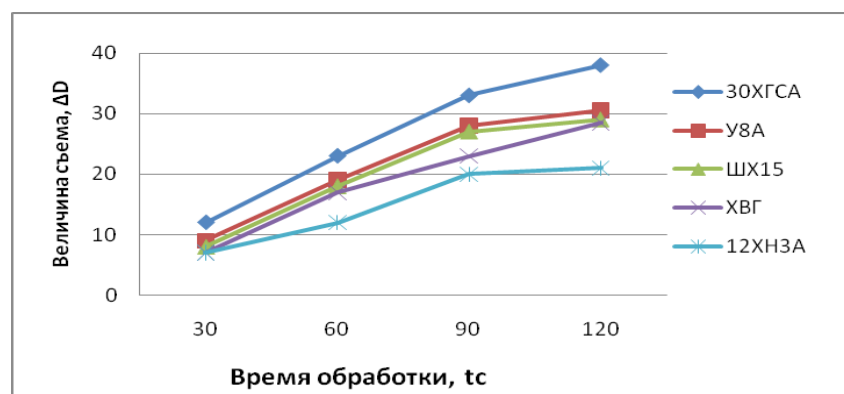


Рисунок 1.14 - Влияние времени обработки на величину съема  $\Delta D$  (мкм)

Эти зависимости имеют нелинейный характер. Основной съем металла происходит за первые 90с, что составляет до 75% общего съема за 120с. Наибольшую величину съема  $\Delta D=36$ мкм имели образцы из закаленной стали 30ХГСА, имеющие меньшую твердость ( $HRC 35...38$ ) и отличающиеся высокими магнитными свойствами. Значительно меньшую величину съема  $\Delta D=18...23$ мкм, после  $\sim 90$ с обработки имели образцы из закаленных сталей 12ХНЗА и ХВГ с твердостью  $HRC 62...64$ . Эти данные позволяют сделать вывод о том, что при постоянной величине магнитной индукции  $B$  и других показателях магнитно-абразивной обработки главным фактором является твердость обрабатываемого материала. Полученные результаты подтверждаются данными работ, отмечающими, что доминирующими факторами в процессе формирования поверхностного слоя является резание-царапание абразивными компонентами ферроабразивных зерен, а также абразивный износ поверхности в результате трения ферромагнитных и абразивных частиц о деталь, которые в первую очередь зависят от твердости обрабатываемого материала.

Из приведенного выше анализа MAO различных материалов можно сделать вывод о перспективности применения данного метода при изготовлении обширной номенклатуры деталей из различных ферромагнитных материалов (30ХГСА, ШХ15, У8А, Р6М5 и др.).

### 1.4.3 Магнитно-абразивная обработка поверхностей различной геометрической формы

Распределение устройств MAO по типу обрабатываемой поверхности и типу применяемого магнитного индуктора имеет следующий вид (рисунок 1.15) [41].

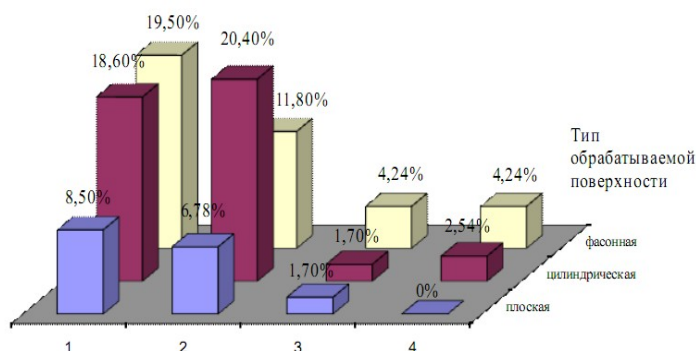


Рисунок 1.15 - Распределение по типам обрабатываемой поверхности (плоская, цилиндрическая, фасонная) и магнитного индуктора: 1 – постоянных магнитах, 2 – постоянном токе, 3 – переменном токе, 4 – трехфазном токе

Как видно из приведенных графиков, 36% устройств для MAO реализуют главное движение магнитной системой, а движение подачи – заготовкой. При этом обрабатываются плоские поверхности, внутренние и наружные цилиндрические поверхности, рулонный материал, торцовые поверхности, а также изделия сложного профиля.

Устройства, реализующие главное движение резания заготовкой, а движение подачи – магнитным полем, составляют 14 % и предназначены для обработки внутренних и наружных поверхностей труб, включая электролитическую обработку зубчатых колес и внутренних поверхностей изделий из немагнитных материалов.

Устройства, когда главное движение резания и движение подачи осуществляется магнитной системой, при неподвижной или не имеющей отдельного привода заготовке, составляют 37 %. Как правило, такие устройства позволяют обрабатывать сложные по форме заготовки, детали подшипников качения, плоские и торцовые поверхности, немагнитные заготовки различной формы, червяки.

Для оставшихся устройств главное движение и движение подачи выполняются заготовкой, а магнитная система удерживает магнитно-абразивные частицы. На этих устройствах осуществляется магнитно-абразивная обработка твердосплавных неперетачиваемых пластин, лопаток газотурбинных двигателей.

Простейшей формой осуществления способа обработки деталей с прерывистыми поверхностями (рисунок 1.16) с использованием энергии магнитного поля является схема, при которой деталь и магнитная система неподвижны, а ферромагнитный порошок совершает возвратно-поступательное движение за счет дискретного изменения полярности магнита [42]. При этом деталь 3 помещается в контейнер 2 из диамагнитного материала и в процессе обработки находится в стационарном положении.

Рисунок 1.16 - Схема устройства для обработки деталей с прерывистыми поверхностями

Полирование деталей магнитно-абразивным методом осуществляется в следующем порядке. В немагнитный контейнер устройства помещается смесь, состоящая из ферромагнитных и абразивных частиц порошка с жидкостью, и деталь, подготовленная под операцию полирования. Для обеспечения дискретного перемещения частиц порошка в переменных направлениях включается переключатель полюсов, причем скорость движения частиц и сила их удара о поверхность детали зависят от напряженности магнитного поля, создаваемого катушками электромагнита, и частоты срабатывания механизма переключения полюсов.

С двух сторон контейнера 2 укреплены магнитные катушки 1 и 4, соединенные с источником электроэнергии через переключатель 7. Практика показала [42], что может быть применен либо переменный, либо постоянный ток.



Переключатель 7 снабжен двойной парой контактов и кулачком 6, приводимым в действие двигателем 5, который контролирует среднюю контактную точку и вызывает вибрирование этой точки, в результате чего образуется переменный контакт с наружными контактными точками. Тем самым обеспечивается дискретное прохождение тока через каждую катушку 1 и 4. Под действием тока, проходящего по катушке 1, смесь смещена в одну сторону контейнера. Во время работы полирующего устройства при условии быстрого переключения тока с одной катушки на другую смеси сообщается осциллирующее движение: она перемещается с одной стороны контейнера на другую, воздействуя на все стороны обрабатываемого зубчатого колеса 3.

Для изменения силы удара порошка о деталь применяется вспомогательная катушка, установленная под прямым углом к рабочим катушкам. Постоянный ток в данном случае по-прежнему попеременно подается к катушкам 1 и 4, а источник высокочастотного переменного тока соединен со вспомогательной катушкой. Указанное переключающее устройство работает как обычный электрический звонок или зуммер, обеспечивая сдвиг электроэнергии с катушки 1 на катушку 4 через контакты 7.

Данный способ низкопроизводителен, так как процесс резания носит случайный характер контакта единичного элемента порошка о деталь. Важную роль в процессе играет вязкость жидкости, ее значением определяется возможность взвешенности порошка, в свою очередь сила удара порошка прямопропорционально зависит от вязкости жидкости; чем выше вязкость, тем больше сопротивление движению порошка.

Устройство содержит магнитную систему с чашечными полюсными наконечниками 1 (рисунок 1.17) противоположной полярности. Полюсные наконечники 1 закреплены на немагнитной оси 2, связанной с приводом вращения. Между полюсными наконечниками установлены немагнитные вставки 3 и диск 4 из ферромагнитного материала. Наружные диаметры вставок и диска равны наружному диаметру полюсных наконечников. На наружной поверхности полюсных наконечников, вставок и диска выполнена профилированная винтовая канавка, образующая рабочую поверхность. Профиль канавки выполнен под профиль зубьев 6 обрабатываемого зубчатого колеса 7 с учетом зернистости ферроабразивного порошка 5. Толщина диска 4 равна половине шага винтовой канавки. При обработке устройство вращается. Зубчатое колесо 7 устанавливается с возможностью свободного вращения на оси, перпендикулярной оси 2, и вводит в зацепление с винтовой канавкой.

### Рисунок 1.17 - Устройство для МАО зубчатых колес

Устройство работает следующим образом. Для обработки зубьев зубчатого колеса устройство устанавливают немагнитной осью 2 в шпиндель привода вращения и на его рабочую поверхность подают порцию ферроабразивного порошка 5. Зубчатое колесо 7 устанавливают с возможностью свободного вращения на оси, перпендикулярной немагнитной оси 2, и вводят в зацепление с винтовой канавкой устройства. Устройство придают вращательное движение и зубья 6 зубчатого колеса 7, неоднократно проходя по винтовой канавке с ферромагнитным диском 4, равномерно обрабатываются по всей поверхности ферроабразивным порошком 5.

Анализ схемы вышеприведенного способа показывает, что инструмент имеет сложную геометрическую форму, что удорожает его изготовление. Деталь и инструмент должны вращаться синхронно без соприкосновения, с определенным зазором, что усложняет привод устройства и его настройку. Использование данного устройства целесообразно для финишной обработки зубчатых колес червячных передач, так как будет обеспечиваться равномерность обработки рабочих поверхностей зубьев, чего нельзя сказать о применении данного устройства для цилиндрических зубчатых колес.

Устройство для магнитно-абразивной обработки зубчатых колес (рисунок 1.18), содержащее магнитную систему с двумя дисками 1, установленными на оси 2.

Рисунок 1.18 - Устройство для МАО зубчатых колес

Для обработки зубчатых колес 3 разных диаметров и с разными модулями предусмотрена возможность перемещения дисков по оси на определенное расстояние друг от друга с последующей их фиксацией. Между дисками расположена электромагнитная катушка 4. Диски входят во впадины обрабатываемого зубчатого колеса без соприкосновения с зазорами, в которые подается ФАП. При подаче электрического тока на обмотку катушки между дисками, имеющими разную полярность, протекает электромагнитный поток. При вращении электромагнитной системы относительно зубчатого колеса происходит абразивная обработка.

Инструмент должен вращаться без соприкосновения, с определенным зазором. Кроме того, обработка осуществляется после погружения кромок дисков инструмента во впадины зубчатого колеса, после чего он снова извлекается с последующим вращением детали на определенный угол и т.д. до полной обработки всех поверхностей зубьев, что усложняет привод устройства и его настройку. Использование данного устройства также целесообразно для финишной обработки зубчатых колес червячных передач, так как будет обеспечиваться равномерность обработки рабочих поверхностей зубьев, чего нельзя сказать о применении данного устройства для цилиндрических зубчатых колес.

Устройство относится к магнитно-абразивной обработке рулонного материала (Рисунок 1.19).

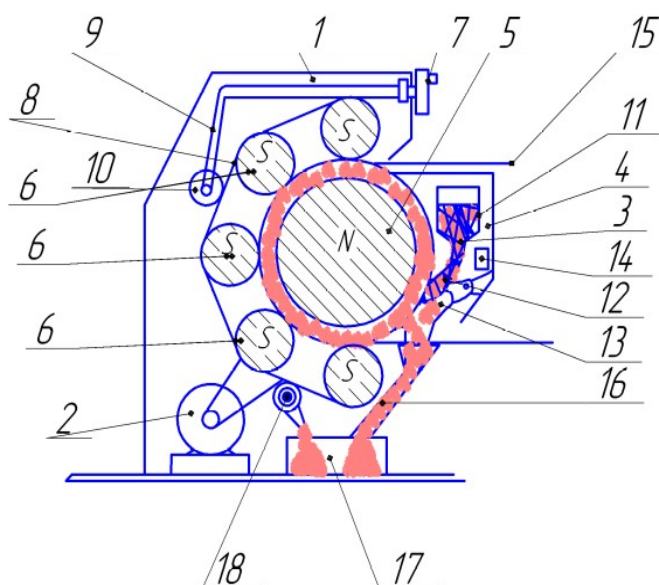


Рисунок 1.19 - Устройство для МАО рулонного материала

Станок содержит установленные в корпусе 1 привод 2 средство 3 подачи ферроабразивного порошка 4, магнитную систему 15, имеющую расположенные по разные стороны обрабатываемого материала цилиндрические полюса 5 и 6 разноименной полярности с расположенными соосно им электромагнитными катушками 7. Магнитная система выполнена так, что вокруг одного цилиндрического полюса 5 расположены не менее двух полюсов 6 противоположной полярности с зазоров по дуге окружности. Однополярные полюса охватывают бесконечное гибкое полотно 8 выполненное из ферромагнитного материала. Средство 9 для изменения конфигурации зазора, выполнено в виде контактирующего с полотном 8 натяжного ролика 10, установленного с возможностью перемещения между двумя соседними полюсами 6. Средство 3 подачи абразивного порошка 4 выполнено в виде бункера 11 с гибким патрубком 12, установленного у нерабочей части цилиндрического полюса 5 с возможностью перемещения совместно со скребком 13, размещенным впереди патрубка по ходу вращения полюса параллельно его образующей. В непосредственной близости подвижной части патрубка расположен закрепленный на корпусе постоянный магнит 14. Недостатком данного устройства является сложность конструкции и его низкая технологичность.

Устройство (рисунок 1.20) позволяет обрабатывать втулки, кольца, трубы среднего и малого диаметров.

В корпусе 1, устройства, выполненном из немагнитного материала, закреплены полюсные наконечники 2 и 3, причем наконечник 2 выполнен в виде диска, а наконечник 3 – в виде кольца, охватывающего наконечник 2. Полюсные наконечники 2 и 3 установлены концентрично с радиальным зазором 4. Цилиндрический 5 и охватывающий его кольцевой 6 постоянные магниты одним торцом жестко закреплены на

магнитопроводе 7, а другим контактируют соответственно с полюсными наконечниками 2 и 3.

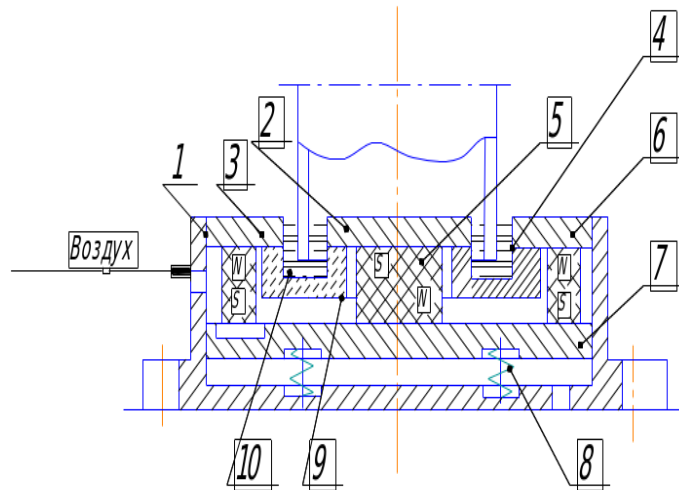


Рисунок 1.20 - Устройство для обработки втулок, колец, труб среднего и малого диаметров

Магнитопровод 7 выполнен в виде поршня, установленного в корпусе 1 с возможностью осевого перемещения, причем между дном корпуса 1 и магнитопроводом 7 установлены пружины 8, а полюсные наконечники 2 и 3 жестко соединены между собой с помощью втулки 9 с кольцевым пазом, выполненным из немагнитного материала. В радиальный зазор помещены ферроабразивный порошок 10 и обрабатываемая деталь 11. В процессе работы корпус 1 устанавливается на столе сверлильного или фрезерного станка, а обрабатываемая деталь 11 крепится в шпинделе этого же станка. Деталь 11 приводится во вращение и подается в радиальный зазор 4, заполненный ферроабразивным порошком. Деталь 11 смещает основную массу ферроабразивного порошка в кольцевой паз во втулке 9. В кольцевом пазу образуется плотная масса ферроабразивного порошка, которая осуществляет процесс обработки: снимает заусенцы, скругляет кромки с торцов втулок, колец и труб и одновременно полирует цилиндрическую часть с двух сторон. Вращению ферроабразивного порошка 10 вместе с деталью 11, а также выходу из зазора 4 препятствуют силы трения, обусловленные магнитным полем в радиальном зазоре. Для удаления ферроабразивного порошка из радиального зазора после обработки детали через отверстия в корпусе в полость между полюсными наконечниками 2 и 3 и магнитопроводом 7 подается под давлением воздух, который перемещает магнитопровод 7 с закрепленными на нем постоянными магнитами 5 и 6 так, что между полюсными наконечниками и постоянными магнитами образуется воздушный зазор.

В результате этого величина магнитной индукции в радиальном зазоре уменьшится почти до нуля, и ферроабразивный порошок 10 легко удаляется.

Для приведения устройства в рабочее положение давление воздуха в полости уменьшают, при этом пружины 8 и магнитные силы придвигают магнитопровод 7 с постоянными магнитами 5 и 6 к полюсным наконечникам 2 и 3. Магнитная индукция в радиальном зазоре 4 увеличивается до максимума.

Анализ схемы способа показывает, что инструмент имеет сложную геометрическую конфигурацию и изготовлен на основе постоянных магнитов, что удорожает его изготовление, не обеспечивает точности привода устройства и связано с низкой коррозионной стойкостью постоянных магнитов из-за контакта с СОТС.

#### **1.4.4 Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей**

Тенденция развития процесса МАО заключается в переходе от обработки цилиндрических и плоских деталей простой формы к более сложной пространственной и так же связана с увеличением геометрических размеров обрабатываемого изделия. 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, изготовленных из различных материалов, в то время как работы, посвященные МАО изделий сложнопространственной формы носят стохастический и разрозненный характер. В то же время расширение диапазона использования деталей со сложнопрофильными поверхностями позволяет в значительной мере повысить качество многих изделий. Во многих случаях только усложнение формы и повышение точности размеров рабочей поверхности детали позволяет получить новые свойства, расширить функциональные возможности, повысить надежность, увеличить ресурс, КПД и улучшить эксплуатационные характеристики машин в целом.

А.П.Соколовский считает, что технологический процесс (ТП) обработки деталей определяется: формой (конфигурацией), точностью обработки и качеством обработанной поверхности, материалом детали, размерами, объемами общего производственного задания и общей производственной обстановки, куда входят: наличный парк оборудования, наличие инструментальной базы, расположение оборудования, схема организации производства. Поэтому создание классификации сложнопрофильных поверхностей деталей следует осуществлять с учетом общих требований к разработке ТП.

В этой связи рассматриваются следующие виды сложнопрофильных поверхностей: плоские, цилиндрические, конические, внутренние и

наружные, фасонные, торцовые. Фасонные поверхности охватывают следующие их виды: сферические, сложной формы (геометрия определяется гидро-, аэродинамическими параметрами или другими требованиями). Особо рассматриваются зубья шестерен, резьбовые, шлицевые поверхности. На основании изложенного будем рассматривать обработку следующих типовых поверхностей: 1) наружных цилиндрических – гладких и ступенчатых; 2) конических наружных; 3) внутренних цилиндрических (отверстий) – гладких и ступенчатых, сквозных и глухих; 4) конических внутренних; 5) плоских (в том числе торцовых и прерывистых); 6) фасонных; 7) резьбовых; 8) шлицевых; 9) зубьев (различного профиля).

Особенности формы и геометрической структуры сложнопрофильных поверхностей является причиной имеющих проблем в технологии обработки. Поэтому построение научно обоснованной системы классификации деталей машин представляется трудной задачей. Такая классификации по необходимости должна основываться на внешних признаках, присущих деталям, и в то же время носить технологический характер, так как на ней базируется систематизация процессов. Для этого необходимо установить зависимости между свойствами детали и технологией, соответствующий этим свойствам. Это возможно лишь на основе изучения и построения классификации технологических процессов деталей машин и их элементов и затем в комплексном решении всех задач, возникающих при осуществлении процессов каждой классификационной группы.

Предлагается подход формообразования сложнопрофильных поверхностей деталей, который позволяет решать задачу синтеза наиболее эффективного способа обработки заданной поверхности детали для осуществления этого способа исходя из минимума потребной для этого исходной (входной) информации. Поэтому для магнитно-абразивной обработки деталей с рабочими поверхностями такого типа при учете выше указанной классификации характерна стационарность параметров удаляемого припуска и текущих значений кинематических геометрических факторов, допустимых в данный момент времени критическими значениями скорости резания, подач и др.

Особое внимание должно быть обращено на то, что следует разрабатывать не просто позитивные, а синтезировать наиболее эффективные варианты технологии, т.е. синтезировать именно тот из позитивных ее вариантов, в соответствии с которым достигается требуемый экстремум заданного критерия эффективности обработки, когда все звенья технологической системы реализуются наиболее интенсивно и с максимальной отдачей. Практическая реализация МАО при этих условиях позволит повысить эффективность эксплуатации технологического оборудования и оснастки и тем самым наиболее полно использовать их потенциальные возможности.

Согласно классификации поверхностей (рисунок 1.21), обрабатываемых МАО, построенных на средстве форм и размеров, отмечается, что значительную трудность при выявлении оптимальных параметров процесса представляют плоские детали, имеющие полуоткрытые и закрытые поверхности, конические, сферические, фасонные, прерывистые и т. п.

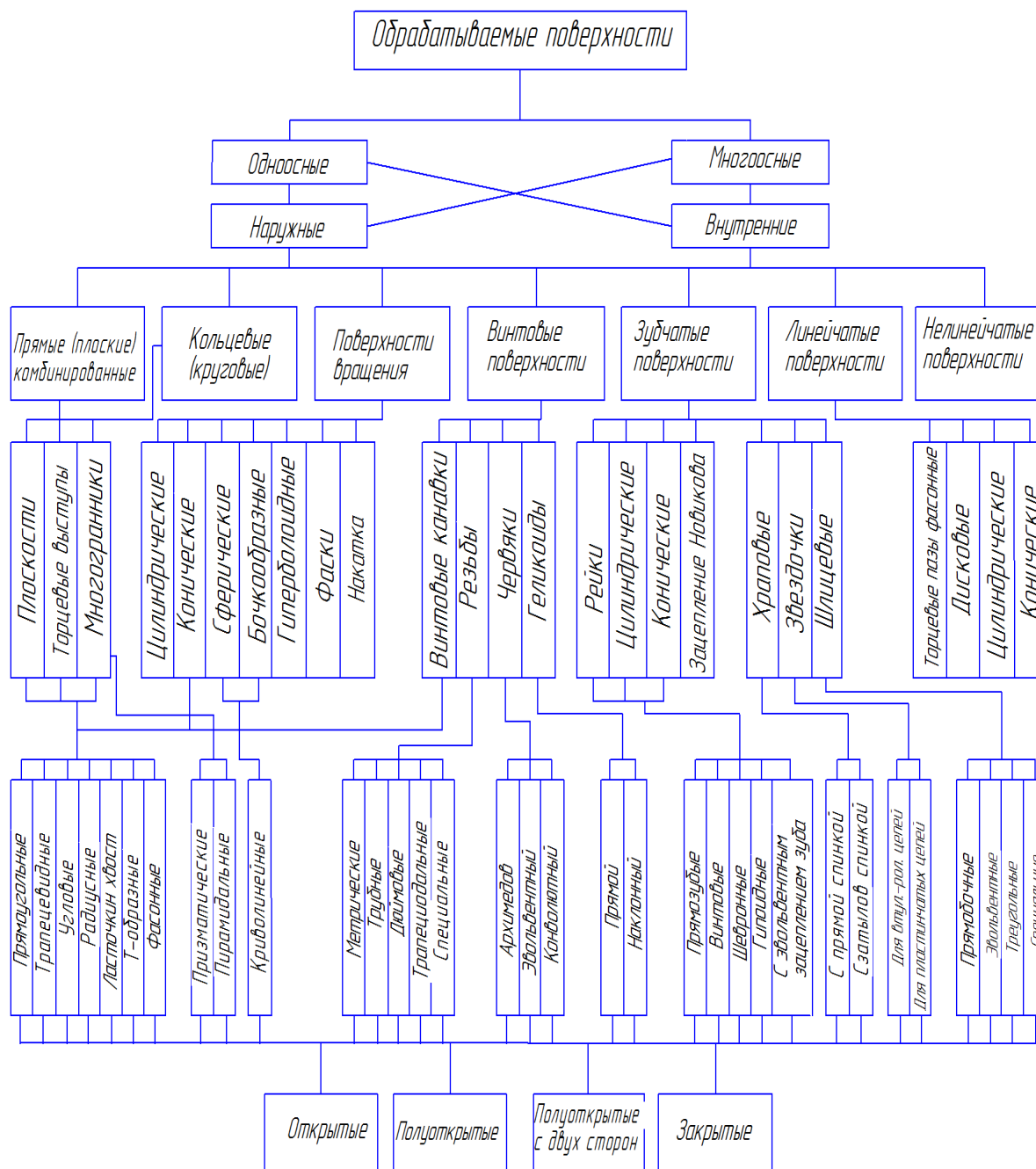


Рисунок 1.21 - Классификация сложнопрофильных поверхностей

Примеры деталей с рабочими поверхностями сложной формы представлены на рисунке 1.22. В этом случае резко возрастает трудоемкость изготовления технологического оборудования и оснастки для реализации процесса МАО и сложность нивелирования инструмента



в виде рабочей технологической среды (РТС), включающей ФАП, СОТС, электромагнитное поле (ЭМП) для финишной обработки деталей.

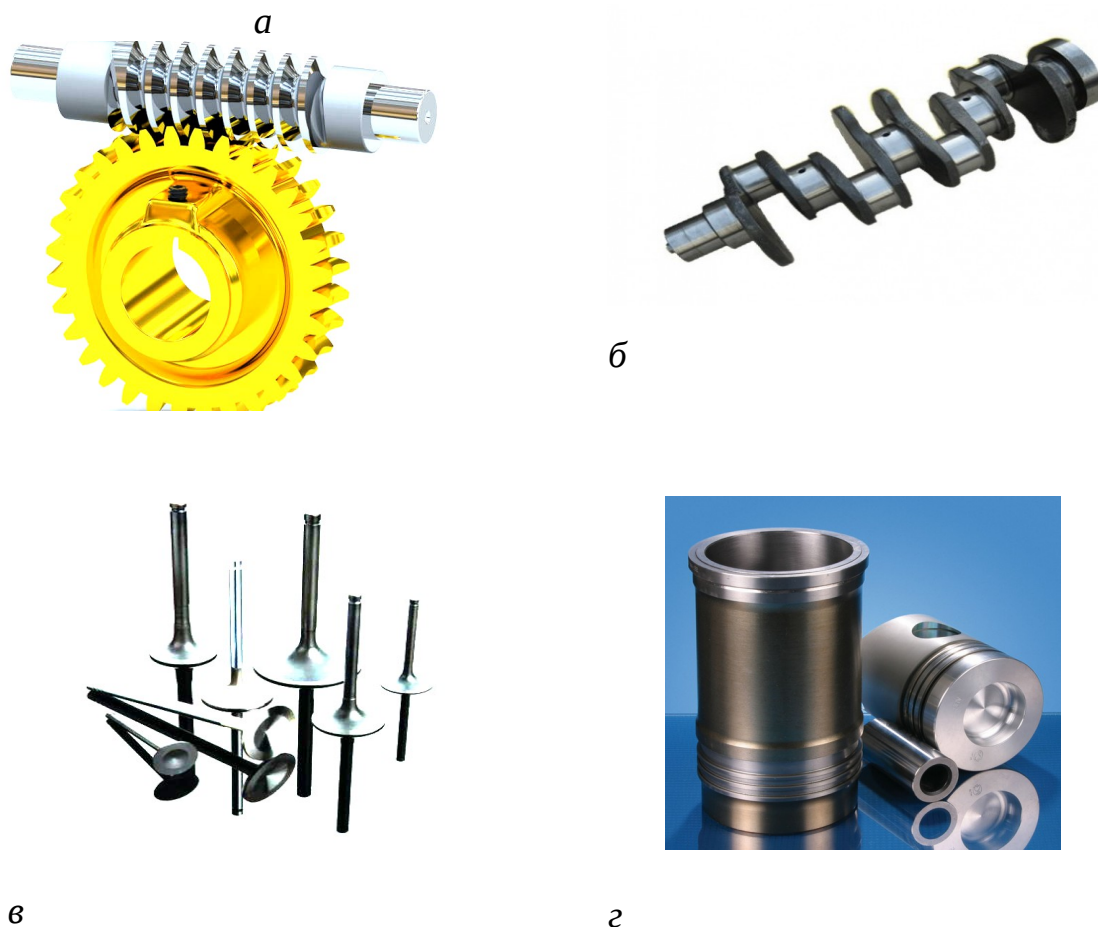


Рисунок 1.22 - Примеры деталей с рабочими поверхностями сложной формы: а – червячная пара; б – коленчатый вал; в – клапан; г – гильза, поршень, поршневой палец

Например, применение графических методов определения топографии МП в зоне обработки не позволяет провести более строгий анализ динамического и кинематического факторов процесса МАО. Поэтому не удалось получить положительного результата при финишной обработке беговых дорожек обойм подшипников [25]. Следовательно, исследование физики МАО связанное с его интенсификацией и практической реализацией обработки сложнопрофильных поверхностей деталей машин требует иного подхода для решения этой данной задачи и закладывается определением методологии построения интегрированной РТС, выявлении равномерности ее силового воздействия на обрабатываемую поверхность. Это позволяет стабилизировать структуру составов различной природы и функционального назначения, определить топографию магнитного поля в зоне обработки, устанавливает распреде-

ление сил и мощности резания, выявляет механику диспергирования различных материалов и управлении процессов микрорезания путем создания необходимой плотности магнитного поля, основанной на изменении его энергетического фронта в требуемых интервалах. Более ранние представления о силовом воздействии ФАП на обрабатываемую поверхность базируются на том, что источником величины, направления и места приложения сил резания, является магнитное поле [25]. Следует указать, что более поздняя оценка устанавливает, что магнитное поле оказывает свое внешнее воздействие только на величину сил резания, а сами силы резания возникают как результат относительных движений инструмента и изделия [41]. Вместе с тем данная оценка является неполной, поскольку базируется не на строгом учете сил резания, а предлагается как гипотеза. Однако в ней имеется правильное качественное представление о картине происходящих явлений в зоне обработки и необходимость дифференциации вышеуказанных компонентов сил резания. Однако более строгий анализ показывает, что обязательным условием достижения максимального значения силы резания необходимо считать кооперативность свойств РТС. Например, неправильный подбор ФАП и СОТС приводит к негативному изменению показателей магнитной проницаемости РТС и соответственно снижает величину силы резания; неверное сочетание переднего угла частиц ФАП и кинематической вязкости СОТС связано с полным прекращением процесса микрорезания; рост жесткости ферроабразивной щетки повышает вероятность разрушения переднего фронта частиц и потери режущей способности всего комплекса РТС из-за выкрашивания кромки инструмента и прекращения действия процесса самозатачивания. Так же если направление силы резания при эквидистантном профиле РТС для деталей простой формы носит постоянный характер, то при обработке сложного профиля детали оно должно коррелироваться в соответствии с необходимостью создания требуемой площадки контакта инструмента и детали. В связи с выше изложенным становится ясно, что интегрирование свойств ФАП, СОТС и МП во многом определяет производительность и качество процесса МАО сложно профильных поверхностей. Согласно работе [43], установлено, что направление действия сил резания определяется геометрическим контуром полюсного наконечника, ортогонально представляющим область, занимаемую РТС, поскольку величина вектора силы резания не изменяется.

В работе [44] производится расчет постоянного магнитного поля в двухмерном сечении с использованием векторного магнитного потенциала методом конечных элементов. Анализ распределения магнитного поля в эквидистантном по отношению к цилиндрическим деталям зазоре показывает, что оно носит неоднородный характер. Наибольшая величина магнитной индукции находится только в области

кромки полюсного наконечника при постоянном уменьшении при движении к его центральной области. Предложение, направленное на интенсификацию процесса МАО шестигранных деталей, заключается в их дополнительно поверхностно-пластическом деформировании при использовании металлических шаров, установленных в специальных посадочных пазах на поверхности полюсных наконечников. Однако реализация данного варианта характеризуется неоднородностью физико-механических характеристик поверхностного слоя по причине того, что некоторая его площадь не подвергается воздействию контактирующих шаров. Так же для осуществления такой обработки в зоне резания необходимо получение высоких значений магнитной индукции (3 и более Тл), что требует роста энергоемкости электромагнитной системы (ЭМС).

В работе [45] проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса МАО осевого инструмента со сложнопрофильной поверхностью диаметром до 50 мм. В результате проведенных испытаний шероховатость поверхности составляет  $R_a=1,6...0,8$  мкм, и достигнуто повышение твердости  $HV=830...870$ . Эти результаты получены на литых и порошковых быстрорежущих сталях. Обязательным условием является подмагничивание заготовки, что усложняет конструкцию устройства, увеличивает его энерго- и трудоемкость изготовления. Принятая конфигурация границ между неоднородными областями зоны обработки не позволяет выявить топографию магнитного поля, что приводит к ее замене упрощенными расчетами, имеющими большое искажение от действительной картины.

В работе [30] исследования процесса МАО малогабаритных изделий фасонной поверхности показали, что достижения требуемой производительности, стабильности и равномерности обработки обеспечивается сложным сочетанием числа движений обрабатываемой детали и видами его траектории. Использование концентраторов на рабочих поверхностях полюсных наконечников по сравнению с гладкими преимущества не дало, что связано с отсутствием правильного качественного описания топографии магнитного поля. Поэтому достижение увеличения микротвердости поверхностного слоя деталей из стали У10 на 25% и уменьшение содержание остаточного аустенита на 4...6% по сравнению с матрицей материала осуществлено за счет повышения сложности конструкции оборудования и вследствие этого большого рассеяния магнитного потока и роста энергетических затрат.

Исследование МАО керамических шариков из  $Si_3N_4$  производилась в работе [46] и было установлено, что добиться высокой производительности и стабильности результатов при использовании магнитно-абразивной пасты, размер абразивных частиц которых составляет 1...80 мкм крайне проблематично. Для того, что обеспечить получение необходимых показателей по качеству обработки потребовалось использовать более сложную конструкцию установки с до-

полнительным прижимом шариков. Следует отметить, что увеличение размеров частиц выше указанной пасты приводит к росту шероховатости (размер частиц – 1...2 мкм – достигаемая шероховатость  $R_a=0,2\text{мкм}$ , 40...60мкм –  $R_a=0,8...1,2\text{мкм}$  соответственно). Поэтому себестоимость производства шариков при применении такой дорогостоящей пасты высока, поскольку создание размерности 1...2 мкм для такой пасты сопряжено с рядом трудностей. Также седиментационная устойчивость этой пасты крайне низка, вследствие чего требуют особые условия хранения.

В работе [28] представлены результаты исследования МАО лопаток ГТД. Установлено, что существует разброс значений показателей шероховатости поверхностного слоя ( $R_a=0,11...0,26\text{мкм}$ ) и предела выносливости  $\sigma_b=265...343\text{МПа}$  на входной и выходной кромках лопаток и центрах их пера. Неравномерность съема материала обусловлена разностью величины магнитной индукции по длине пера лопатки, и поэтому, решение, связанное с достижением минимизации данной разности, заключается в создании адаптивной системы, копирующей профиль пера лопатки в области спинки и корыта, наличии широких зазоров между полюсными наконечниками и сложного комплекса относительных движений обрабатываемой детали. По вышеуказанным причинам такому оборудованию соответствует кинематическая цепь с большим количеством звеньев, высокая энергоемкость и стохастический характер полученных результатов качества и производительности процесса.

В работе [47] приведены исследования МАО зубчатого колеса помпы масляного насоса и показано, что присутствует разница значений шероховатости обработанной поверхности ( $R_a=0,12...0,36\text{мкм}$ ) при исходной ( $R_a=0,4\text{мкм}$ ). Также радиус округления фаски составляет  $r=0,05...0,1\text{мм}$  при первоначальном  $r=0,4...0,6\text{мкм}$ . Конструктивной особенностью этой схемы МАО является оппозитное расположение рабочей поверхности полюсных наконечников относительно боковых сторон зубчатого колеса помпы масляного насоса, что предполагает устранение из комплекса кинематических движений, движения осцилляции. По данной причине по высоте обрабатываемой детали имеет место неравномерность значений, как шероховатости обработанной поверхности, так и радиуса скругления фасок, что снижает эффективность процесса.

В работе [48] представлены результаты МАО бочкообразных поверхностей индуктором на постоянных магнитах, профиль которого эквидистантен вышеуказанным поверхностям. Основной проблемой процесса является сложность получения такого профиля, поскольку он носит разовый характер и пригоден только для этой специальной обработки.

В работе [49] представлены исследования МАО профиля стружечных канавок сверл  $\text{Ø}18...25\text{мм}$  и их спинок и микрогеометрии их

рабочих кромок. Установлено, что съем металла по профилю стружечной канавки обрабатываемого инструмента не равномерен. Наибольшая величина удаляемого слоя 15...20 мкм наблюдается на задней поверхности (спинке) сверл, наименьшая по внутренней 1...2мкм. Шероховатость после обработки этих участков составила соответственно  $R_a=0,03...0,04$ мкм и  $R_a=0,12...0,6$ мкм. Увеличение времени обработки до 15 мин и профилирование полюсных наконечников не обеспечило равномерности съема материала по причине различного характера распределения магнитного поля по сложному профилю стружечной канавки и ее спинки.

Проведенный анализ исследований связанных с МАО сложно-профильных поверхностей показывает, что основными проблемами является отсутствие учета геометрии исследуемой области, внутри которой определяется поле и ограничение в расчете количества факторов, что приводит к отходу от реальных условий и служит источником серьезных погрешностей. Определение топографии МП связывается с интуитивным подходом, для эффективного решения которого требуется персонал с крайне высокой квалификацией. В этих условиях грамотное конструктивное решение, возможно на основе точного знания топографии МП, а вследствие этого представление картины сил резания и возможных энергетических потерь, достоверным анализом тепловых полей, параметров и режимов процесса МАО сложнопрофильных поверхностей. Тожждественность математического описания модели МАО и физики ее процесса связана с большим рядом исследований, но получение этих важных закономерностей обеспечивает управление обрабатываемостью сложнопрофильных поверхностей деталей из различных материалов и позволяет назначить режимы, обеспечивающие высокую производительность и качество метода МАО. Реализация процесса МАО имеет эффективность в случае учета кооперативности свойств ФАП, СОТС и МП, поскольку в определенных сочетаниях существует возможность такого их положения, которое приводит к падению режущей способности и полному прекращению резания материалов. Поэтому синергетический подход, выявляющий наиболее важные стороны каждого из компонентов, приводит к интенсификации МАО сложнопрофильных поверхностей.

Таким образом, разработка высокопроизводительного процесса МАО сложнопрофильных поверхностей деталей, являющегося много-параметрическим, в котором важную роль играют физико-механические свойства РТС и обрабатываемого материала, режимы резания, теплопроводность, скорость протекания химических реакций в зоне обработки, нуждается в необходимости определения закономерности взаимного влияния физических явлений, происходящих при контактировании пары инструмент–деталь, во многом обусловлена механизмом действия магнитного поля. Знание распределения

топографии 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 развитию равномерности давления по всей площади обрабатываемого изделия.

Следовательно, рост производительности и качества МАО сложнопрофильных поверхностей связан с формированием принципа управления их обрабатываемостью через определение топографии МП и построение интегрированной рабочей технологической среды, которая через политропу стружкообразования приводит к созданию требуемого уровня деформационно-теплового баланса в зоне обработки.

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

### 2.1 Представление топографии магнитного поля матричными формами системы уравнений Максвелла

На основе обобщения эмпирических данных Дж. К. Максвеллом были сформулированы фундаментальные уравнения классической макроскопической электродинамики, описывающие электромагнитные явления, имеющие в современных обозначениях (система СИ) вид [50].:

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \text{rot} \vec{A}, \text{rot} \vec{H} = 4\pi \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \vec{E} &= - [\vec{B}, \vec{u}] - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad} \varphi, \vec{E} = \frac{4\pi}{\varepsilon} \vec{D}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \sigma \vec{E} &= \vec{j}, \vec{j}_{\text{полн}} = \vec{j} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \text{div} \vec{D} &= 4\pi \rho, \text{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

где  $\vec{B}$  – магнитная индукция магнитного поля,  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля,  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля,  $\vec{D}$  – электрическое смещение,  $\vec{A}$  – векторный магнитный потенциал,  $\varphi$  – скалярный магнитный потенциал,  $\vec{j}$  – плотность электрического тока,  $\rho$  – плотность электрического заряда,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\vec{u}$  – мгновенное значение напряжения индукции,  $\sigma$  – удельная проводимость.

Наиболее распространенной формой представления системы уравнений Максвелла является дифференциальная форма записи, предложенная Г. Герцем и О. Хевисайдом:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \text{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} + \vec{j}^{cm}, \\ \text{div} \vec{D} &= \rho + \rho^{cm}, \text{div} \vec{B} = 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Принято считать, что система уравнений (2.3) становится полной после добавления к ней так называемых материальных уравнений, в самом общем случае имеющих вид:

$$\vec{D} = \vec{D}(\vec{E}), \vec{B} = \vec{B}(\vec{H}), \vec{j} = \vec{j}(\vec{E}). \quad (2.4)$$

Базирование производится на записи системы уравнений Максвелла вида (2.3), (2.4). При этом для начала материальные уравнения (2.4) принимаются в виде

$$D=\varepsilon(r,t)\cdot E, \quad B=\mu(r,t)\cdot H, \quad j=\sigma(r,t)\cdot E. \quad (2.5)$$

Следует также заметить, что при решении конкретных задач расчета векторов  $(E, H)$  на первом этапе из уравнений Максвелла (2.3) получают отдельные волновые уравнения как для трех компонент вектора  $E$ , так и для трех компонент вектора  $H$ .

Используя математические преобразования для векторов  $(E, H)$  из уравнений Максвелла, получим следующие уравнения

$$\begin{aligned} \Delta H - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + \text{grad} \left( \frac{H \cdot \text{grad} \mu}{\mu} \right) - \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \sigma \right) \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\mu H) - \\ - \varepsilon \left( \frac{\partial^2 \mu}{\partial t^2} H + 2 \frac{\partial \mu}{\partial t} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial t} [\text{grad} \varepsilon, E] + [\text{grad} \sigma, E] = - \text{rot} j^{cm}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \Delta E - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \text{grad} \left( \frac{E \cdot \text{grad} \varepsilon}{\varepsilon} \right) - \frac{\partial \mu}{\partial t} \cdot \left( \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon E) + \sigma E \right) - \mu \frac{\partial}{\partial t} (\sigma E) - \\ - \mu \left( \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} \cdot E + 2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \cdot \frac{\partial E}{\partial t} \right) - \frac{\partial}{\partial t} [\text{grad} \mu, H] = \text{grad} \left( \frac{\rho + \rho^{cm}}{\varepsilon} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\mu j^{cm}). \end{aligned} \quad (2.7)$$

или в эквивалентном виде:

$$\begin{aligned} \Delta H - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + \text{grad} \left( \frac{H \cdot \text{grad} \mu}{\mu} \right) - \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \sigma \right) \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\mu H) - \\ - \varepsilon \left( \frac{\partial^2 \mu}{\partial t^2} H + 2 \frac{\partial \mu}{\partial t} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \right) - \varepsilon \left[ \text{grad} \frac{1}{\varepsilon}, \text{rot} H \right] + \\ + \varepsilon \left[ \text{grad} \left( \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right), E \right] + \varepsilon \left[ \text{grad} \frac{\sigma}{\varepsilon}, E \right] = - \varepsilon \text{rot} \left( \frac{1}{\varepsilon} j^{cm} \right), \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \Delta E - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \text{grad} \left( \frac{E \cdot \text{grad} \varepsilon}{\varepsilon} \right) - \frac{\partial \mu}{\partial t} \cdot \left( \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon E) + \sigma E \right) - \mu \frac{\partial}{\partial t} (\sigma E) - \\ - \mu \left( \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} \cdot E + 2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \cdot \frac{\partial E}{\partial t} \right) - \mu \left[ \text{grad} \frac{1}{\mu}, \text{rot} E \right] - \\ - \mu \left[ \text{grad} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} \right), H \right] = \text{grad} \left( \frac{\rho + \rho^{cm}}{\varepsilon} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\mu j^{cm}). \end{aligned} \quad (2.9)$$

Здесь  $\Delta$  - оператор Лапласа.

Как следует из 2.6...2.9, получить в «чистом виде» дифференциальные уравнения для вектора  $E$ , равно как и для вектора  $H$ , можно далеко не в любых средах.

Вместе с тем, уместно вспомнить опыт исследования хорошо известных в теоретической физике релятивистских волновых уравнений для частиц с целым и полуцелым спином. Наглядным примером является исследованное на предмет разделения переменных уравнение Дирака, где в качестве неизвестной функции фигурирует биспинор Дирака [50]:



$$\Psi = \begin{pmatrix} (x^1, x^2, x^3, x^4) \\ \Psi_1(x^1, x^2, x^3, x^4) \\ \Psi_2(x^1, x^2, x^3, x^4) \\ \Psi_3(x^1, x^2, x^3, x^4) \\ \Psi_4(x^1, x^2, x^3, x^4) \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

В уравнении Дирака, вообще говоря, неизвестными являются функции (их четыре). Однако, благодаря его матричной записи, проблемы получения уравнений в чистом виде отдельно для каждой компоненты  $\psi_i$  не возникает.

Считается, что первоначально идея записи системы уравнений Максвелла в виде, аналогичном релятивистскому волновому уравнению Дирака, принадлежит Э.Майорану [50], который вводит в рассмотрение вместо векторов  $E$  и  $B$  комплексную волновую функцию:

$$\Psi = E - iB, \quad (2.11)$$

матрицу-вектор  $\alpha$  с компонентами:

$$\alpha_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i \\ 0 & -i & 0 \end{pmatrix}, \alpha_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & 0 \\ -i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \alpha_3 = \begin{pmatrix} 0 & i & 0 \\ -i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.12)$$

которая имеет следующее представление:

$$[\alpha_i, \alpha_j] = -i\epsilon_{ijk}\alpha_k. \quad (2.13)$$

В итоге уравнения Максвелла в вакууме приобретают вид:

$$(E - \alpha p)\Psi = 0, \quad p\Psi = 0, \quad (2.14)$$

$$p = -i\nabla, \quad E = i\frac{\partial}{\partial t}. \quad (2.15)$$

Отметим, что вероятностная трактовка волновой функции (2.12) вполне возможна, а уравнение неразрывности приобретает вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla j = 0, \quad (2.16)$$

где

$$p = \frac{1}{2}\Psi^* \cdot \Psi, \quad j = -\frac{1}{2}\Psi^* \cdot \alpha \cdot \Psi, \quad (2.17)$$

являющиеся соответственно плотностью энергии и плотностью импульса электромагнитного поля (в формуле 2.17 символ \* означает эрмитово сопряжение).

Ранее интенсивно велись исследования «общих релятивистских уравнений» вида

$$(\gamma_k \nabla_k + i\chi)\Psi = 0; \quad k = 1, 2, 3, 4, x_4 = i\text{ct}; \quad \chi \neq 0. \quad (2.18)$$

В (2.18) выбор матриц  $\gamma_k$  осуществлялся исходя из требований:

- возможность получения уравнения (2.18) из инвариантной функции Лагранжа;
- инвариантность уравнения (2.18) относительно преобразований собственной группы Лоренца;
- инвариантность уравнения (2.18) относительно отражений.

В (2.18) постоянная  $\chi$  считалась пропорциональной массе частицы, что исключало возможность его применения для описания частиц с нулевой массой покоя (например, фотонов).

Ф.И.Федоровым предложено обобщенное релятивистское волновое уравнение [50]:

$$(\gamma_k \nabla_k + i\gamma_0)\Psi = 0; \quad k = 1, 2, 3, 4; \quad x_4 = i\text{ct}. \quad (2.19)$$

где  $\gamma_0, \gamma_k$  – некоторые матрицы.

Впоследствии, автором [84] предприняты интенсивные усилия для исследования уравнения (3.17). Его принято записывать в виде

$$(\beta_\mu p^\mu + \beta_\chi)\Psi = 0, \quad (2.20)$$

где  $\beta_\mu$  – матрицы Кеммера-Дэффина-Петье размерности  $10 \times 10$ , удовлетворяющие алгебре:

$$\begin{aligned} \beta_\mu \beta_\nu \beta_\lambda + \beta_\lambda \beta_\nu \beta_\mu &= g_{\mu\nu} \beta_\lambda + g_{\nu\lambda} \beta_\mu, \quad \beta = \beta_5^2, \\ \beta_5 &= \frac{\varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \beta_\mu \beta_\nu \beta_\rho \beta_\sigma}{4!}, \quad g_{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1). \end{aligned} \quad (2.21)$$

При выборе  $\beta_\mu, \psi$  в виде:

$$\begin{aligned} \beta_0 &= \begin{pmatrix} 0_1 & 0_1 & 0_1 & \lambda_a \\ 0_1 & 0_1 & -\alpha_a & 0_2 \\ 0_1 & \alpha_a & 0_1 & 0_2 \\ -\lambda_a^* & 0_3 & 0_3 & 0 \end{pmatrix}, \quad \beta_5 = \begin{pmatrix} 0_1 & -1_1 & 0_1 & 0_2 \\ 1_1 & 0_1 & 0_1 & 0_2 \\ 0_1 & 0_1 & 0_1 & 0_2 \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0 \end{pmatrix}, \\ \Psi &= \begin{pmatrix} E \\ H \\ A \\ A_0 \end{pmatrix} = (E_1, E_2, E_3, H_1, H_2, H_3, A_1, A_2, A_3, A_0)^T, \end{aligned} \quad (2.22)$$

где

$$\alpha_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \alpha_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & 0 \\ -i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \alpha_3 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} i \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ i \\ 0 \end{pmatrix}, \lambda_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \theta_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \theta_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \theta_3 = (0, 0, 0),$$

$$1_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, 1_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, 1_3 = (1, 1, 1). \quad (2.23)$$

Из (2.20) следует система уравнений Максвелла в отсутствие зарядов и токов.

В случае наличия зарядов и токов для записи уравнений Максвелла Ф.И. Федорову приходится использовать два уравнения типа (2.22). Действительно, вводя в рассмотрение функцию

$$\Psi = \begin{pmatrix} E \\ H \\ j \\ j_0 \end{pmatrix} = (E_1, E_2, E_3, H_1, H_2, H_3, j_1, j_2, j_3, j_0)^T, \quad (2.24)$$

и два оператора:

$$\tilde{L}_1 = (1 - \beta_5^2)(\beta_\mu p^\mu + 1), \quad \tilde{L}_2 = \beta_\mu p^\mu \beta_5. \quad (2.25)$$

для уравнений Максвелла получаем:

$$\tilde{L}_1 \tilde{\Psi} = 0, \quad \tilde{L}_2 \tilde{\Psi} = 0. \quad (2.26)$$

Таким образом, Ф.И. Федорову удалось охватить единой схемой все релятивистские уравнения, включая уравнения Максвелла и Дирака. Тем не менее, несмотря на это, уравнение (2.26) не нашло применения при решении задач прикладной электродинамики.

Считается, что начало исследованиям, целью которых являлось представление системы уравнений Максвелла в виде, аналогичном уравнению Дирака, положено А.А. Боргардтом [51].

В рассмотрение вводятся матрицы

$$\alpha_1 = i \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \alpha_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \alpha_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.27)$$

удовлетворяющие алгебре Клиффорда, функция-столбец

$$\Psi = i \begin{pmatrix} 0 \\ E_1 - iH_1 \\ E_2 - iH_2 \\ E_3 - iH_3 \end{pmatrix}, \quad (2.28)$$

и уравнения Максвелла в отсутствие зарядов и токов приобретают вид:

$$\left( i \frac{\partial}{\partial t} - \alpha \cdot p \right) \Psi = 0. \quad (2.29)$$

Аналогичная форма записи уравнений Максвелла предложена В.И. Фущичем [50], с той лишь разницей, что вместо (2.20) использована функция-столбец:

$$\Psi = \begin{pmatrix} H \\ \phi_1 \\ E \\ \phi_2 \end{pmatrix} = (H_1, H_2, H_3, \phi_1, E_1, E_2, E_3, \phi_2)^T,$$

$$\phi_1 = \text{const}, \quad \phi_2 = \text{const}. \quad (2.30)$$

Автором также используются следующие матрицы:

$$\alpha_a = 2i \begin{pmatrix} 0_1 & -\tau_a \\ \tau_a & 0_1 \end{pmatrix}, \quad \Xi_a = \begin{pmatrix} S_a & 0 \\ 0_1 & S_a \end{pmatrix}, \quad 0_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\tau_1 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & -i & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \tau_2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & i \\ -i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \tau_3 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & -i & 0 \end{pmatrix},$$

$$S_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad S_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad S_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & -i & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.31)$$

Уравнения Максвелла приобретают вид:

$$\hat{L}_1 \Psi = 0,$$

$$\hat{L}_2 \Psi = 0, \quad (2.32)$$

где

$$\hat{L}_1 = i \frac{\partial}{\partial t} - \alpha \cdot p,$$

$$\hat{L}_2 = \Xi_a p_a.$$

Рассмотрим систему уравнений Максвелла в декартовой системе координат в виде матрицы

$$\begin{aligned}
\xi^1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & \xi^2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
\xi^3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & \xi^4 &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.33)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M &= \text{diag} \left( \frac{\varepsilon}{\mu}, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \mu, \mu, \mu, \frac{\mu}{\varepsilon} \right), & P &= \text{diag} \left( 0, 0, 0, 0, 0, 0, \frac{\rho}{\varepsilon}, 0 \right), \\
J &= (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)^T, \quad (2.34)
\end{aligned}$$

$$\Psi = (\varphi_1, E_X, E_Y, -E_Z, -H_Z, H_Y, H_X, \varphi_2)^T, \quad (2.35)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial z} & \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial y} & \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sigma - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial \mu}{\partial t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \mu}{\partial t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} & \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} & -\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \mu}{\partial t} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.36)$$

где  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\mu$  – проводимость, диэлектрическая и магнитная проницаемости соответственно;

$\rho$ – плотность заряда,  $E_X, E_Y, E_Z, H_X, H_Y, H_Z$  – компоненты векторов  $E$  и  $H$ ;

$\varphi_1, \varphi_2$ – произвольные функции.

Легко убедиться, что с использованием только что введенных матриц система уравнений Максвелла (2.3), (2.5) может быть записана в виде

$$\left\{ \xi^1 \frac{\partial}{\partial x} + \xi^2 \frac{\partial}{\partial y} + \xi^3 \frac{\partial}{\partial z} + \xi^4 M \frac{\partial}{\partial t} + \Theta \right\} \Phi = PJ. \quad (2.37)$$

Уравнение (2.37) будем называть алгебраической формой представления системы уравнений Максвелла.

Матрицы (2.33) назовем матрицами Максвелла.

Они обладают рядом свойств:

1. Матрицы Максвелла удовлетворяют следующим коммутационным состояниям

$$\xi^i \xi^j + \xi^j \xi^i = 2g^{ij} I, \quad g^{ij} = \begin{cases} \delta_{i,j}, i=1,2,3,6; \\ -\delta_{i,j}, i=4,5,7. \end{cases} \quad (2.38)$$

2. Количество матриц, составленных из произведения каких-либо двух или более из них, равно  $2^6-1=63$ . Добавляя к ним единичную матрицу  $I$ , получаем 64 матрицы:

$$\begin{aligned} \Gamma^0 &= I, \Gamma^1 = \xi^1 \xi^3 \xi^5, \Gamma^2 = \xi^1 \xi^4 \xi^6, \Gamma^3 = \xi^2 \xi^3 \xi^4, \Gamma^4 = \xi^2 \xi^5 \xi^6, \\ \Gamma^5 &= \xi^1 \xi^2 \xi^3 \xi^6, \Gamma^6 = \xi^1 \xi^2 \xi^4 \xi^5, \Gamma^7 = \xi^3 \xi^4 \xi^5 \xi^6, \Gamma^8 = i^3 \xi^4, \\ \Gamma^9 &= i \xi^1 \xi^6, \Gamma^{10} = i \xi^2 \xi^3, \Gamma^{11} = \xi^1 \xi^2 \xi^5, \Gamma^{12} = \xi^3 \xi^5 \xi^6, \\ \Gamma^{13} &= \xi^1 \xi^3 \xi^4 \xi^5, \Gamma^{14} = \xi^2 \xi^4 \xi^5 \xi^6, \Gamma^{15} = i \xi^1 \xi^2 \xi^3 \xi^4 \xi^6, \Gamma^{16} = i \xi^5, \\ \Gamma^{17} &= i \xi^1 \xi^3, \Gamma^{18} = i \xi^2 \xi^6, \Gamma^{19} = \xi^1 \xi^2 \xi^4, \Gamma^{20} = \xi^3 \xi^4 \xi^6, \\ \Gamma^{21} &= \xi^1 \xi^4 \xi^5 \xi^6, \Gamma^{22} = \xi^2 \xi^3 \xi^4 \xi^5, \Gamma^{23} = i \xi^1 \xi^2 \xi^3 \xi^5 \xi^6, \Gamma^{24} = i \xi^1 \xi^2, \\ \Gamma^{25} &= i \xi^3 \xi^6, \Gamma^{26} = i \xi^4 \xi^5, \Gamma^{27} = \xi^1 \xi^3 \xi^4, \Gamma^{28} = \xi^1 \xi^5 \xi^6, \\ \Gamma^{29} &= \xi^2 \xi^3 \xi^5, \Gamma^{30} = \xi^2 \xi^4 \xi^6, \Gamma^{31} = i \xi^1 \xi^2 \xi^3 \xi^4 \xi^5 \xi^6, \Gamma^{32} = \xi^2, \\ \Gamma^{33} &= \xi^3 \xi^4, \Gamma^{34} = \xi^5 \xi^6, \Gamma^{35} = i \xi^1 \xi^3 \xi^6, \Gamma^{36} = i \xi^1 \xi^4 \xi^5, \\ \Gamma^{37} &= i \xi^1 \xi^2 \xi^3 \xi^5, \Gamma^{38} = i \xi^1 \xi^2 \xi^4 \xi^6, \Gamma^{39} = i \xi^2 \xi^3 \xi^4 \xi^5 \xi^6, \Gamma^{40} = \xi^3, \\ \Gamma^{41} &= \xi^1 \xi^5, \Gamma^{42} = \xi^2 \xi^4, \Gamma^{43} = i \xi^1 \xi^2 \xi^6, \Gamma^{44} = i \xi^4 \xi^5 \xi^6, \\ \Gamma^{45} &= i \xi^1 \xi^3 \xi^4 \xi^6, \Gamma^{46} = i \xi^2 \xi^3 \xi^5 \xi^6, \Gamma^{47} = \xi^1 \xi^2 \xi^3 \xi^4 \xi^5, \Gamma^{48} = \xi^6, \\ \Gamma^{49} &= \xi^1 \xi^4, \Gamma^{50} = \xi^2 \xi^5, \Gamma^{51} = i \xi^1 \xi^2 \xi^3, \Gamma^{52} = i \xi^3 \xi^4 \xi^5, \\ \Gamma^{53} &= i \xi^1 \xi^3 \xi^5 \xi^6, \Gamma^{54} = i \xi^2 \xi^3 \xi^4 \xi^6, \Gamma^{55} = \xi^1 \xi^2 \xi^4 \xi^5 \xi^6, \Gamma^{56} = \xi^1, \\ \Gamma^{57} &= \xi^3 \xi^5, \Gamma^{58} = \xi^4 \xi^6, \Gamma^{59} = i \xi^2 \xi^3 \xi^6, \Gamma^{60} = i \xi^2 \xi^4 \xi^5, \\ \Gamma^{61} &= i \xi^1 \xi^2 \xi^3 \xi^4, \Gamma^{62} = i \xi^1 \xi^2 \xi^5 \xi^6, \Gamma^{63} = \xi^1 \xi^3 \xi^4 \xi^5 \xi^6. \end{aligned} \quad (2.39)$$

3. Для любого  $i \neq j$  найдется  $k \neq i, k \neq j$ , то такое тождество справедливо

$$\Gamma^i \Gamma^j = \beta^{i,j} \Gamma^k, \quad \beta^{i,j} = \pm 1 \quad \text{или} \quad \beta^{i,j} = \pm i. \quad (2.40)$$

4. Равенство

$$\Gamma^i \Gamma^j = I, \quad (2.41)$$

выполняется тогда и только тогда, когда  $i = j$ .

5. Для любых  $i, j$  справедливо соотношение

$$\Gamma^i \Gamma^j = \pm \Gamma^j \Gamma^i. \quad (2.42)$$

6. Для любого  $i \neq 0$  существует такое  $k$ , такое, что:

$$\Gamma^k \Gamma^i \Gamma^k = -\Gamma^i. \quad (2.43)$$

7. Для любого  $i \neq 0$  след матрицы  $\Gamma^i$  (след матрицы – сумма ее элементов, расположенных на главной диагонали) равен нулю, т. е.:

$$\text{Sp}(\Gamma^i) = 0, \quad i \neq 0. \quad (2.44)$$

8. Сумма:

$$\sum_{i=0}^{63} \alpha_i \Gamma^i = 0, \quad (2.45)$$

тогда и только тогда, когда  $\alpha_i = 0, i = 0, 1, 2, 3 \dots 63$ .

9. Любая матрица  $\mathbf{A}$ , коммутирующая со всеми матрицами  $\xi^1, \xi^2, \xi^3, \xi^4, \xi^5, \xi^6$ , кратна единичной.

10. Если заданы два набора различных матриц размерности  $8 \times 8$   $\xi^a$  и  $\tilde{\xi}^a$ , удовлетворяющие соотношениям (2.30), то существует несингулярная матрица  $\mathbf{S}$ , такая, что:

$$\tilde{\xi}^a = \mathbf{S} \xi^a \mathbf{S}^{-1}. \quad (2.46)$$

Пусть, далее  $(x, y, z)$  – декартова система координат. Выберем произвольную ортогональную систему координат  $(u, v, w)$ , такую, что

$$x = X(u, v, w), \quad y = Y(u, v, w), \quad z = Z(u, v, w); ,$$

$$u = U(x, y, z), \quad v = V(x, y, z), \quad w = W(x, y, z). \quad (2.47)$$

Для коэффициента Ламе имеем

$$h_u^2 = \left( \frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial u} \right)^2,$$

$$h_v^2 = \left( \frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial v} \right)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial v} \right)^2,$$

$$h_w^2 = \left( \frac{\partial x}{\partial w} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial w} \right)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial w} \right)^2. \quad (2.48)$$

Тогда система уравнений (2.37) приобретет вид:

$$\left\{ \xi^1 k_u \frac{\partial}{\partial u} + \xi^2 k_v \frac{\partial}{\partial v} + \xi^3 k_w \frac{\partial}{\partial w} + \xi^4 \tilde{k}_t M \frac{\partial}{\partial t} + \Theta_0 \right\} \Phi_0 = \mathbf{P} \mathbf{J}, \quad (2.49)$$

где

$$\varphi_1 = h_t E_t, \quad \varphi_1 = h_t H_t,$$

$$\Phi_0^T = [h_t E_t, h_u E_u, h_v E_v, -h_w E_w, -h_w H_w, h_v H_v, h_u H_u, h_t H_t],$$

$$k_u = \text{diag} \left( k_{u1,1}, \frac{h_v h_w}{h_u}, 1, 1, 1, 1, \frac{h_v h_w}{h_u}, k_{u8,8} \right), \quad (2.50)$$

$$k_v = \text{diag} \left( k_{v1,1}, \frac{h_u h_w}{h_v}, 1, 1, \frac{h_u h_w}{h_v}, 1, k_{v8,8} \right), \quad (2.51)$$

$$k_w = \text{diag} \left( k_{w1,1}, 1, 1, \frac{h_u h_v}{h_w}, \frac{h_u h_v}{h_w}, 1, 1, k_{w8,8} \right), \quad (2.52)$$

$$\tilde{k}_t = \text{diag} \left( k_{t1,1}, \frac{h_v h_w}{h_u}, \frac{h_u h_w}{h_v}, \frac{h_u h_v}{h_w}, \frac{h_u h_v}{h_w}, \frac{h_u h_w}{h_v}, \frac{h_v h_w}{h_u}, k_{t8,8} \right), \quad (2.53)$$

$$\Theta_0 = \Theta_\mu + \Theta_\varepsilon + \Theta_\sigma, \quad (2.54)$$

$$\Theta_\mu = \begin{pmatrix} \theta_{1,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{1,8} \\ \theta_{2,1} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial w} \left( \frac{h_u h_v}{h_w} \mu \right) & \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial v} \left( \frac{h_u h_w}{h_v} \mu \right) & \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial u} \left( \frac{h_v h_w}{h_u} \mu \right) & \theta_{2,8} \\ \theta_{3,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{3,8} \\ \theta_{4,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{4,8} \\ \theta_{5,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h_u h_w}{h_v} \mu \right) & 0 & \theta_{5,8} \\ \theta_{6,1} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h_u h_v}{h_w} \mu \right) & 0 & 0 & \theta_{6,8} \\ \theta_{7,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{7,8} \\ \theta_{8,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h_v h_w}{h_u} \mu \right) & \theta_{8,8} \end{pmatrix}, \quad (2.55)$$

$$\Theta_\varepsilon = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h_v h_w}{h_u} \varepsilon \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h_u h_v}{h_w} \varepsilon \right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h_u h_w}{h_v} \varepsilon \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial u} \left( \frac{h_v h_w}{h_u} \varepsilon \right) & \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial v} \left( \frac{h_u h_w}{h_v} \varepsilon \right) & -\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial w} \left( \frac{h_u h_v}{h_w} \varepsilon \right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.56)$$

$$\Theta_\sigma = \begin{pmatrix} 0 & -\sigma \left( \frac{h_v h_w}{h_u} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sigma \left( \frac{h_u h_v}{h_w} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \left( \frac{h_u h_w}{h_v} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.57)$$

Уравнение (2.45) представляет собой систему уравнений Максвелла, представленную в декартовых координатах системы СИ. В системе СГС оно приобретает вид

$$\left\{ \xi \frac{\partial}{\partial x} + \xi \frac{\partial}{\partial x} + \xi \frac{\partial}{\partial x} + \xi M \frac{\partial}{\partial x} + \Theta \right\} \Phi = P J, \quad (2.58)$$



где

$$x_1=x, x_2=y, x_3=z, x_4=t. \quad (2.59)$$

При этом матрицы  $\Theta^\Gamma$ ,  $P^\Gamma$  сохраняют свою структуру, дополненную «естественными» коэффициентами системы СГС 4л.

Рассмотрим случай отсутствия зарядов и токов  $\rho=0$ ,  $j=0$ . Используя первую симметричную форму матричной записи системы уравнений Максвелла, уравнение (2.59) может быть преобразовано к виду :

$$\sum \left\{ R \frac{\partial}{\partial x} + \left( \frac{\partial R}{\partial x} \right) \right\} \xi \Phi = 0, \quad (2.60)$$

где

$$R_1 = R_2 = R_3 = \text{diag}(1, \mu, 1, 1, 1, 1, \varepsilon, 1), \quad R = \text{diag}(\varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \mu, \mu, \mu, \mu). \quad (2.61)$$

Явный вид матрицы-столбца  $\Phi$  (наличие двух нулевых элементов) позволяет записать уравнение (2.60) в несколько ином виде, отличающемся структурой материальных матриц  $R$ :

$$\sum_{i=1}^4 \left\{ \tilde{R}_i \frac{\partial}{\partial x_i} + \left( \frac{\partial \tilde{R}_i}{\partial x_i} \right) \right\} \xi^i \Phi = 0, \quad (2.62)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{R}_1 &= \text{diag}(\mu, \mu, 1, 1, 1, 1, \varepsilon, \varepsilon), \quad \tilde{R}_2 = \text{diag}(1, \mu, 1, \mu, \varepsilon, 1, \varepsilon, 1) \\ \tilde{R}_3 &= \text{diag}(1, \mu, \mu, 1, 1, \varepsilon, \varepsilon, 1), \quad \tilde{R}_4 = \text{diag}(\varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \mu, \mu, \mu, \mu). \end{aligned} \quad (2.63)$$

Представленные системы уравнений Максвелла (2.62) будем называть второй симметричной формой записи.

Отметим, что уравнения (2.60), (2.62) допускают эквивалентное представление

$$\sum_{i=1}^4 \xi^i \left\{ \bar{R}_i \frac{\partial}{\partial x_i} + \left( \frac{\partial \bar{R}_i}{\partial x_i} \right) \right\} \Phi = 0, \quad (2.64)$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_1 &= \text{diag}(1, \mu, 1, 1, 1, 1, \varepsilon, 1), \quad \bar{R}_2 = \text{diag}(1, 1, \mu, 1, 1, \varepsilon, 1, 1) \\ \bar{R}_3 &= \text{diag}(1, 1, 1, \mu, \varepsilon, 1, 1, 1), \quad \bar{R}_4 = \text{diag}(\varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \mu, \mu, \mu, \mu). \end{aligned} \quad (2.65)$$

В анизотропных средах связь между векторами  $E$  и  $D$ ,  $B$  и  $H$  устанавливается тензорами электрической и магнитной проницаемости

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{x_1 x_1} & \varepsilon_{x_1 x_2} & \varepsilon_{x_1 x_3} \\ \varepsilon_{x_2 x_1} & \varepsilon_{x_2 x_2} & \varepsilon_{x_2 x_3} \\ \varepsilon_{x_3 x_1} & \varepsilon_{x_3 x_2} & \varepsilon_{x_3 x_3} \end{pmatrix}, \quad \mu = \begin{pmatrix} \mu_{x_1 x_1} & \mu_{x_1 x_2} & \mu_{x_1 x_3} \\ \mu_{x_2 x_1} & \mu_{x_2 x_2} & \mu_{x_2 x_3} \\ \mu_{x_3 x_1} & \mu_{x_3 x_2} & \mu_{x_3 x_3} \end{pmatrix}, \quad (2.66)$$

и имеет вид:

$$\begin{aligned} D_{x_1} &= \varepsilon_{x_1 x_1} E_{x_1} + \varepsilon_{x_1 x_2} E_{x_2} + \varepsilon_{x_1 x_3} E_{x_3}, \\ D_{x_2} &= \varepsilon_{x_2 x_1} E_{x_1} + \varepsilon_{x_2 x_2} E_{x_2} + \varepsilon_{x_2 x_3} E_{x_3}, \\ D_{x_3} &= \varepsilon_{x_3 x_1} E_{x_1} + \varepsilon_{x_3 x_2} E_{x_2} + \varepsilon_{x_3 x_3} E_{x_3}; \end{aligned} \quad (2.67)$$

$$B_{x_1} = \mu_{x_1 x_1} H_{x_1} + \mu_{x_1 x_2} H_{x_2} + \mu_{x_1 x_3} H_{x_3},$$

$$\begin{aligned}
B_{x_2} &= \mu_{x_2 x_1} H_{x_1} + \mu_{x_2 x_2} H_{x_2} + \mu_{x_2 x_3} H_{x_3}, \\
B_{x_3} &= \mu_{x_3 x_1} H_{x_1} + \mu_{x_3 x_2} H_{x_2} + \mu_{x_3 x_3} H_{x_3}.
\end{aligned}
\quad (2.68)$$

Уравнение (2.64) можно представить в виде:

$$\sum_{i=1}^4 \xi^i \left\{ R_i^a \frac{\partial}{\partial x_i} + \left( \frac{\partial R_i^a}{\partial x_i} \right) \right\} \Phi = 0, \quad (2.69)$$

где

$$R_1^a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{x_1 x_1} & \mu_{x_1 x_2} & -\mu_{x_1 x_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{x_1 x_3} & \varepsilon_{x_1 x_2} & \varepsilon_{x_1 x_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.70)$$

$$R_2^a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{x_2 x_1} & \mu_{x_2 x_2} & -\mu_{x_2 x_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{x_2 x_3} & \varepsilon_{x_2 x_2} & \varepsilon_{x_2 x_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.71)$$

$$R_3^a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mu_{x_3 x_1} & -\mu_{x_3 x_2} & \mu_{x_3 x_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{x_3 x_3} & -\varepsilon_{x_3 x_2} & -\varepsilon_{x_3 x_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.72)$$

$$R_4^a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{x_1 x_1} & \varepsilon_{x_1 x_2} & -\varepsilon_{x_1 x_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{x_2 x_1} & \varepsilon_{x_2 x_2} & -\varepsilon_{x_2 x_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\varepsilon_{x_3 x_1} & -\varepsilon_{x_3 x_2} & \varepsilon_{x_3 x_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{x_3 x_3} & -\mu_{x_3 x_2} & -\mu_{x_3 x_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{x_2 x_3} & \mu_{x_2 x_2} & \mu_{x_2 x_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{x_1 x_3} & \mu_{x_1 x_2} & \mu_{x_1 x_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.73)$$

Рассмотрим следующую задачу. Имеется стационарный магнитопровод с магнитной проницаемостью  $\mu_2$ . В магнитопроводе сделан разрез границами  $f(x)$  и  $g(x)$ , соответственно (рисунок 2.1).

Среда в разрезе имеет магнитную проницаемость  $\mu_1$ .

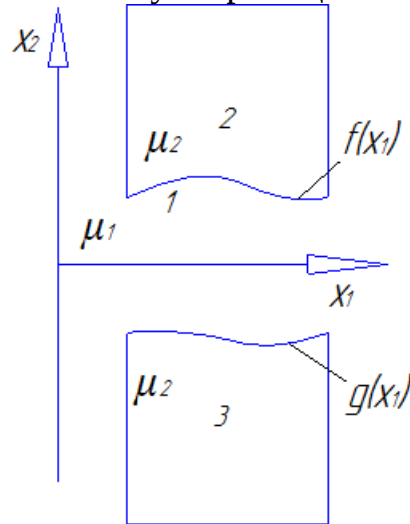


Рисунок 2.1 - Схема магнитопровода с разрезом сложного профиля

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  $\Psi$  не зависит от  $x_3$ .

$$\partial_1 \xi^1 \Phi_{12} + \partial_2 \xi^2 \Phi_{12} = 0. \quad (2.74)$$

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

$$\Phi_{12} = \Phi_1 \Phi_2, \quad (2.75)$$

для которых справедливы следующие соотношения

$$\Phi_1 = \Phi_1^k + \Phi_1^a, \quad [\Phi_1^k, \xi^2] = 0, \quad [\Phi_1^k, \xi^2]^+ = 0, \quad (2.76)$$

$$\Phi_2 = \Phi_2^k + \Phi_2^a, \quad [\Phi_2^k, \xi^1] = 0, \quad [\Phi_2^k, \xi^1]^+ = 0, \quad (2.77)$$

$$[\Phi_1, \Phi_2] = 0. \quad (2.78)$$

В базисе (2.39) для матриц  $\Phi$  получаем:

$$\begin{aligned} \Phi_1 = & f_0^1 \Gamma^0 - f_{27}^1 \Gamma^{27} - f_{30}^1 \Gamma^{30} + f_{32}^1 \Gamma^{32} + \\ & + f_{37}^1 \Gamma^{37} - f_{44}^1 \Gamma^{44} - f_{45}^1 \Gamma^{45} + f_{56}^1 \Gamma^{56}, \end{aligned} \quad (2.79)$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 = & f_0^2 \Gamma^0 + f_{27}^2 \Gamma^{27} + f_{30}^2 \Gamma^{30} - f_{32}^2 \Gamma^{32} - \\ & - f_{37}^2 \Gamma^{37} - f_{44}^2 \Gamma^{44} - f_{45}^2 \Gamma^{45} + f_{56}^2 \Gamma^{56}. \end{aligned} \quad (2.80)$$

С учетом (2.78, 2.79) уравнения Максвелла в матричной формулировке приобретает вид:

$$\partial_1 \xi^1 \Phi_1 = \Phi_1 K_{12} \partial_2 \xi^2 \Phi_2 = \Phi_2 K_{12} \quad (2.81)$$

Полагая электрическую составляющую поля постоянной, получаем частное решение уравнения:

$$\Phi = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ H_{0y} + \{ C_{11} \sin(\lambda x_1) + C_{12} \cos(\lambda x_1) \} \{ C_{21} e^{\lambda x_2} + C_{22} e^{-\lambda x_2} \} \\ H_{0x} + \{ -C_{12} \sin(\lambda x_1) + C_{11} \cos(\lambda x_1) \} \{ C_{21} e^{\lambda x_2} - C_{22} e^{-\lambda x_2} \} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.82)$$

Здесь  $\lambda$  представляет собой константу разделения.  
Для общего решения можно получить:

$$\Phi = \begin{pmatrix} 0 \\ E_{0x} \\ E_{0y} \\ -E_{0z} \\ -H_{0z} \\ H_{0y} + \int_{-\infty}^{\infty} \{ C'_{11}(\lambda) \sin(i\lambda x_1) + C'_{12}(\lambda) \cos(i\lambda x_1) \} \{ C'_{21}(\lambda) e^{i\lambda x_2} + C'_{22}(\lambda) e^{-i\lambda x_2} \} d\lambda + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} \{ C_{11}(\lambda) \sin(\lambda x_1) + C_{12}(\lambda) \cos(\lambda x_1) \} \{ C_{21}(\lambda) e^{\lambda x_2} + C_{22}(\lambda) e^{-\lambda x_2} \} d\lambda \\ H_{0x} + \{ -C'_{12}(\lambda) \sin(i\lambda x_1) + C'_{11}(\lambda) \cos(i\lambda x_1) \} \{ C'_{21}(\lambda) e^{i\lambda x_2} - C'_{22}(\lambda) e^{-i\lambda x_2} \} d\lambda + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} \{ -C_{12}(\lambda) \sin(\lambda x_1) + C_{11}(\lambda) \cos(\lambda x_1) \} \{ C_{21}(\lambda) e^{\lambda x_2} - C_{22}(\lambda) e^{-\lambda x_2} \} d\lambda \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.83)$$

В (2.83)  $\lambda$  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 границах 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  $i$ -той границе внутри ограниченной ими области можно описать следующим образом:

$$\begin{aligned} H_1^i &= H_n^i(x_1) \sin(\alpha) + H_t^i(x_1) \cos(\alpha) = \\ &= \rho_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}}, \end{aligned} \quad (2.84)$$

$$\begin{aligned} H_2^i &= H_n^i(x_1) \cos(\alpha) + H_t^i(x_1) \sin(\alpha) = \\ &= \rho_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}}. \end{aligned} \quad (2.85)$$

причем справедливы соотношения

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

$$G(x_1 + ix_2) = \frac{H_2(x_1, x_2) + iH_1(x_1, x_2)}{2} \quad (2.86)$$

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

$$F_i(-x_1 + if_i(x_1)) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \rho_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1 + f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1 + f_i'(x_1)^2}} - \\ - i\rho_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1 + f_i'(x_1)^2}} - iq_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1 + f_i'(x_1)^2}} \end{bmatrix},$$

$$G_i(x_1 + if_i(x_1)) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \rho_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1 + f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1 + f_i'(x_1)^2}} + \\ + i\rho_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1 + f_i'(x_1)^2}} + iq_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1 + f_i'(x_1)^2}} \end{bmatrix}.$$

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

$$\begin{aligned} \tilde{H}_1(x_1, x_2) &= \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \left\{ \tilde{C}_{\lambda 1} e^{\lambda(-x_1 + ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 4} e^{-i\lambda(-x_1 + ix_2)} - \right. \\ &\quad \left. - i\tilde{C}_{\lambda 2} e^{\lambda(x_1 + ix_2)} - i\tilde{C}_{\lambda 3} e^{-i\lambda(x_1 + ix_2)} \right\} = \\ &= i\tilde{F}(-x_1 + ix_2) - i\tilde{G}(x_1 + ix_2), \\ \tilde{H}_2(x_1, x_2) &= \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \left\{ \tilde{C}_{\lambda 1} e^{\lambda(-x_1 + ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 4} e^{-\lambda(-x_1 + ix_2)} + \right. \\ &\quad \left. + \tilde{C}_{\lambda 2} e^{\lambda(x_1 + ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 3} e^{-\lambda(x_1 + ix_2)} \right\} = \\ &= \tilde{F}(-x_1 + ix_2) - \tilde{G}(x_1 + ix_2), \end{aligned} \quad (2.87)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{F}(-x_1 + ix_2) &= \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \left\{ \tilde{C}_{\lambda 1} e^{\lambda(-x_1 + ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 4} e^{-\lambda(-x_1 + ix_2)} \right\}, \\ \tilde{G}(x_1 + ix_2) &= \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \left\{ \tilde{C}_{\lambda 2} e^{\lambda(x_1 + ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 3} e^{-\lambda(x_1 + ix_2)} \right\}. \end{aligned}$$

## 2.2 Формирование ферроабразивной щетки в рабочем зазоре

Процесс магнитно-абразивной обработки представляет собой ориентированное и избирательное абразивное микрорезание и микровыглаживание. Частицы ферроабразивного порошка контактируют преимущественно с вершинами гребешков, являющихся концентраторами магнитных силовых линий. Каждая частица, находясь в магнитном поле, располагается наибольшей осью по направлению к обрабатываемой поверхности. Движение ферроабразивных частиц в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке и интенсивность съема микронеровностей с обрабатываемой поверхности определяется характером действия на контактирующие частицы сил на различных стадиях процесса абразивного воздействия.

По мере износа режущей кромки ферроабразивной частицы путем выкрашивания абразивной составляющей, изменяется геометрическая

форма частицы, смещается центр ее тяжести и увеличивается коэффициент трения из-за того, что в контакт с обрабатываемой поверхностью вступает «ферромагнитная матрица» частицы. Это, в свою очередь, приводит к увеличению силы  $f_m$ , что вызывает смещение свободно ориентированных частиц и переориентацию их наибольшей оси в направлении магнитных силовых линий, то есть происходит явление регенерации «абразивной щетки» путем самоорганизации массы ферроабразивных частиц, вынужденных совершать периодическое вращение в рабочей зоне зазора и располагаться к обрабатываемой поверхности наиболее острой режущей кромкой [52-54]. В результате явлений самоорганизации массы частиц свободного незакрепленного абразива обработка поверхности детали производится постоянно обновляющимися острыми кромками, т.е. на протяжении всего цикла обработки имеет место процесс ориентированного абразивного резания. Процесс регенерации «абразивной щетки» происходит более интенсивно при больших значениях градиента магнитной индукции.

Магнитно-абразивная обработка относится к процессам, в основе которых лежат быстропротекающие физические и химические явления, носящие случайный характер, и предсказать их можно только с некоторой вероятностью.

Для экспериментального и теоретического исследования таких процессов целесообразно использовать статистический подход [55, 56].

Для определения доминирующего параметра при отсутствии симметричности и транзитивности целесообразно применить синергетическую концепцию, использующую понятие моды случайной непрерывной величины, т.е. такое значение параметра, при котором плотность его распределения имеет максимум [55]. При этом распределение случайных величин, на фоне которых проявляются моды, описываются законами:

- 1) равномерным  $f(x) = 1 / (x_1 - x_0)$ , при  $x_0 \leq x \leq x_1$ ;
- 2) экспоненциальным  $f(x) = (1/\lambda) \exp(-x/\lambda)$ , при  $x \geq 0$ ;
- 3) нормальным  $f(x) = (1 / (\sqrt{2\pi})) \exp(-(x - \mu)^2 / (2\sigma^2))$ , при  $-\infty < x < \infty$  и др.,

где:  $\mu$  – математическое ожидание;

$x_0$  и  $x_1$  – ограничения;

$\sigma^2$  – дисперсия случайных величин  $x$ .

Судить о степени соответствия статистических данных выбранному закону распределения, т.е. о характере проявления моды, позволяет отношение Романовского:

$$R = (\lambda_p^2 - k) / \sqrt{2k}, \quad (2.88)$$

где:  $\lambda_p^2$  – критерий Пирсона;

$k$  – число степеней свободы, т.е. количество групп в изучаемом ряду, рассчитанных (, и др.) и используемых при вычислении теоретического распределения статистических характеристик.

Статистический анализ доминирующего параметра производственной системы в рамках широкой номенклатуры применяемых технологий позволяет минимизировать число экспериментов при изучении процессов и отдельных явлений.

В самоорганизующихся системах можно управлять гибкостью и надежностью, изменяя число подсистем [56]. Каждая подсистема  $i$  имеет выходы:  $q_1$  – детерминированный строго определенный и  $q_2$  – флуктуирующий с рассеянными характеристиками. Полный выход подсистемы в первом приближении с учетом аддитивности материальных и информационных потоков:

$$q^{(i)} = q_1^{(i)} + q_2^{(i)} \quad (2.89)$$

Считая, что в условиях производства  $q^{(i)}$  – независимая случайная величина, полная величина выхода следующая:

$$Q = \sum_{i=1}^n q^{(i)} \quad (2.90)$$

Полный выход, согласно предельной центральной теореме, растет пропорционально числу подсистем  $n$ , в то время как величина рассеяния растет пропорционально квадратному корню  $\sqrt{n}$ . Эти оценки основаны на анализе линейной зависимости, на самом же деле обратная связь, присущая производственным системам, приводит к еще более значительному подавлению рассеяния характеристик.

## **2.3 Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей**

### **2.3.1 Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке сферических поверхностей**

Известно, что технология финишной обработки деталей сферической формы, в частности доводка, основана на контактном взаимодействии инструмента и детали путем их обоюдного изнашивания. Кинематика процесса заключается в одновременном вращении ведущего звена в виде детали и упруго прижимаемого к нему через шаровой шарнир ведомого звена или притира. При этом ось притира проходит через ось вращения детали и наклонена к оси образуемой сферы под определенным углом. Для данного процесса

характерна сложность взаимного влияния основных технологических факторов, которые поддаются только косвенному управлению.

Общим недостатком обработки деталей сферической формы, в частности, шариков является отсутствие гарантированного трехосного вращения деталей, что не позволяет получить высокий процент выхода годной продукции. Другие проблемы заключаются в непостоянстве скорости свободного вращения инструмента, высоком градиенте вектора скорости резания и неравномерности контактного давления между инструментом и деталью ввиду наличия так называемых петель и точек возврата траектории движения. Результатом этого воздействия служит отсутствие одинаковой толщины снимаемого припуска, что приводит к снижению качества и точности.

Изменение величины и направления магнитного потока в зоне обработки создает магнитное поле, изменяющее положение оси вращения шарика и сообщаящее ферроабразивному инструменту планетарное движение вокруг изделия. Это обеспечивает равномерность съема металла и точность геометрической формы обрабатываемой детали. Сложность расчета электромагнитного поля в любом электротехническом устройстве определяется формой поверхности, которая разделяет среды с различными физико-механическими характеристиками в области его существования. Сложность возрастает при необходимости учета нелинейности сред, зависящей от величин характеризующих электромагнитное поле типа магнитной проницаемости среды и напряженности поля. При МАО следует прибавить еще и перемещение сред, т.е. инструмента и шарика. Поэтому необходимым является представление расчетов исследований электромагнитного поля в аналитической форме. Известно, что существует определенная особенность расчета, связанная с физическим моделированием поля и заключающаяся в реализации условия допущений. Примером тому служит то, что током смещения внутри проводников можно пренебречь в отличие от тока проводимости. Целесообразность выбора системы координат, поскольку дифференциальные уравнения для векторных величин  $H$  и  $B$  зависят так же и от времени, определяется характером задачи. Это связано с минимизацией средств и затрат для решения крайне сложных краевых задач. Другой проблемой при выборе детерминанта служит выявление знака при рассмотрении приращения или уменьшения функции на элементарных площадках. Однако необходимость получения представления о протекании процесса МАО сферических поверхностей требует установления метода исследования и модели, в которой полностью или в основном явления имеют одинаковую с оригиналом физическую природу. Это существенно облегчает получение необходимых результатов ввиду выбора наиболее приемлемых



диапазонов изменения физических величин и геометрических размеров обрабатываемых деталей.

Образцом для физического моделирования является сфера, вращающаяся с частотой  $n$  и находящаяся в магнитном поле. Задача заключается в определении напряженности магнитного поля, считая известным поле на оси кругового тока, путем ее непосредственного интегрирования.

Напряженность магнитного поля на оси вращения в точке  $M$  (рисунок 2.2), обусловленная током  $dI$ , равняется:

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

Согласно Рисунок 2.2 следуют соотношения:

$$\sin \beta = \frac{r}{\rho}; \quad r^2 = a^2 - z^2; \quad \rho^2 = z^2 + a^2 - z_3 z.$$

Поэтому  $d\theta = -\frac{dz_3}{z}$  и  $z_3 dz = -\rho \cdot d\rho$ ,

$$d = \frac{-\rho^4 + 2\rho^2(z^2 + a^2) - (a^2 - z^2)}{\rho^2} dS.$$

Подставляя эти значения в выражения для  $dH$ , получаем:

$$d = -\frac{I}{16az^3} \cdot \frac{\rho^4 + 2\rho^2(z^2 + a^2) - (a^2 - z^2)}{\rho^2} dS.$$

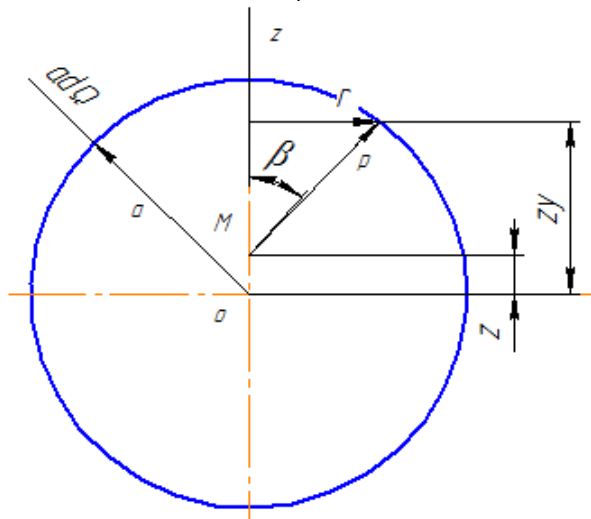


Рисунок 2.2 - Схема для определения напряженности магнитного поля при использовании МАО:  $z$  – расстояние от центра шара до точки определения напряженности МП,  $m$ ;  $a$  – радиус шара,  $m$ ;  $\beta$  – угол между осью  $Z$  в точке определения напряженности МП

Интегрируя это выражение по  $\rho$ , получаем:

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

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

$$H = \frac{Ia^2}{3z^3}.$$

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<sup>-1</sup>. Максимально теоретически возможным для МАО является размер шарика  $d = 15$  мм.

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

Одним из методов получения мелко модульных зубчатых колес является холодное накатывание, обеспечивающее точный профиль зуба.

Во время процесса прокатки обрабатываемое зубчатое колесо и инструмент – накатник, имеющий форму цилиндрического зубчатого колеса, находится в беззазорном зацеплении. В результате взаимного относительного скольжения профилей зубьев заготовки и инструмента на противоположных сторонах зуба колеса материал припуска течет в разных направлениях. На ведомой стороне профиля зуба колеса металл перемещается от головки и ножки зуба к делительной окружности. В результате этого на делительной окружности происходит наволакивание металла – образуется выступ. На противоположной стороне профиля зуба металл перемещается от делительной окружности к головке и ножке зуба, из-за чего в зоне делительной окружности появляется впадина. Вследствие течения металла в сторону головки зуба наружный диаметр обрабатываемого колеса увеличивается (образуется рогообразный нарост). Различный характер деформаций и течения металла на обеих сторонах зубьев создают трудности в получении симметричного профиля зуба колеса. Чтобы получить удовлетворительные результаты, вводят различную коррекцию на каждой стороне зуба накатника, однако полностью устранить рогообразный наплыв невозможно.

На практике оптимальным способом решения этой проблемы является шлифование по наружному диаметру зубчатого колеса после закалки. Вследствие шлифования образуется множество заусенцев и прижогов, что требует последующей финишной обработки. На

сегодняшний день для этой цели применяются: притирка, зубохонингование, электрохимическая обработка. Вместе с тем данные методы имеют ряд характерных недостатков. К ним относятся: высокая продолжительность процесса обработки, низкая стойкость инструмента, экологическая вредность производства, постоянный монтаж – демонтаж притирочной системы (привод, относительное расположение), частая притирочной массы, необходимость утилизации отработанного абразива, высокие квалификация рабочего и стоимость инструмента.

Съем металла при МАО осуществляется в результате силового воздействия порошка на поверхность детали и указанных относительных движений. Обрабатываемая деталь 1 помещается между полюсными наконечниками 2 электромагнитной системы при установленном зазоре  $\delta$ , в которой подается ФАП (Рисунок 2.3).

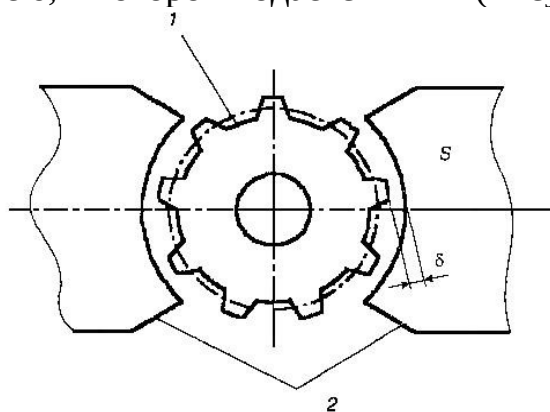


Рисунок 2.3 - Схема магнитно-абразивной обработки зубчатых колес.

Для прерывистой поверхности распределение магнитного потока во многом носит характер неопределенности. Это связано со стремлением магнитного потока осуществить свое прохождение по энергетически выгодному участку магнитной цепи. Проблема МАО зубчатых колес заключается в сложности обработки переменного по разности величин диаметра окружностей их выступов и впадин. Это связано с тем, что по мере удаления от проводника с током, вокруг которого согласно закону Ампера существует поле, последнее ослабевает. Падение напряженности поля, являющейся его силовой характеристикой, приводит соответственно к уменьшению давления ФАП на обрабатываемую поверхность, а в конечном итоге и снижению съема материала. В связи с изложенным выше возникает задача оптимального применения данного метода с целью полного использования технологических возможностей МАО. Как указывалось выше, именно наличие модуля  $m \leq 2,5$  мм практически ограничивает финишную обработку зубчатых колес методом зубохонингования, а по данным, 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. Кроме того, положительным фактором данного процесса служит наличие эвольвентного профиля контура зуба (его условно можно считать трапециидальным), что увеличивает эффективность доступа ФАП в зону обработки и повышает ее качество. Второе важное условие заключается в том, что острая кромка представляет собой концентратор магнитного потока и именно здесь будет наибольшая плотность этого потока.

Наиболее предпочтительным является математический путь решения задачи. Это дает общие формулы для расчета магнитного поля в зоне обработки и возможности получения картины этого поля, что приводит к оценке потенциала процесса МАО. Данное исследование производится в области между поверхностями полюса ЭМС и зубчатой поверхностью колеса плоскости  $Z$ . Ее можно представить в виде четырехугольника  $ABCD$  (Рисунок 2.4).

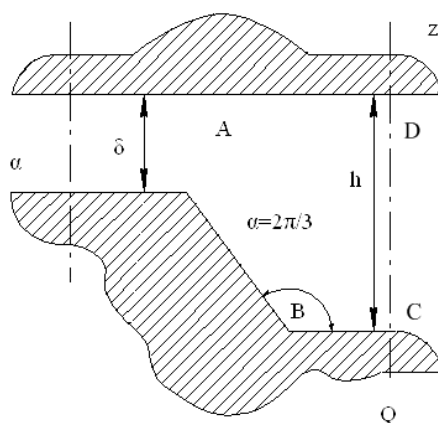


Рисунок 2.4 - Рабочая зона зубчатого контура колеса при МАО с условием  $\alpha=2\pi/3$

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

$$Q = C \int_{Q_0}^Q (Q - a)^{\alpha_1 - 1} (Q - b)^{\alpha_2 - 1} (Q - c)^{\alpha_3 - 1} (Q - d)^{\alpha_4 - 1} + C_1, \quad (2.91)$$

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  $\pi$ ).

Решение данного случая после ряда преобразований имеет вид:

$$\frac{P}{2\delta} = \frac{1}{\delta} \left\{ \begin{aligned} & \ln(1-\beta) - \alpha \ln(\alpha\beta - 1) + \\ & + \frac{1}{2} \left[ \alpha \ln(1 + \alpha\beta + \alpha^2\beta^2) - \right. \\ & \left. - \ln(1 + \beta + \beta^2) \right] + \frac{\sqrt{3}}{2} (1 - \alpha), \\ & + \sqrt{3} \cdot \left( \operatorname{arctg} \frac{2 + \alpha\beta}{\sqrt{3}\alpha\beta} - \operatorname{arctg} \frac{2 + \alpha\beta}{\sqrt{3}\beta} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.92)$$

где  $P$  – шаг зубчатого колеса, мм;  
 $\delta$  – зазор между полюсом ЭМС и диаметром вершин зубчатого колеса, мм;

$$\alpha = \frac{h}{\delta}, \quad h – \text{глубина паза, мм.}$$

Из выражения (2.92) следует, что минимальное значение относительной индукции:

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

$$\beta = \frac{1}{\alpha}. \quad (2.93)$$

При  $h = 0$  (гладкая цилиндрическая поверхность),  $\beta = 1$ , а если  $h \neq 0$ , то зависимость  $\beta_{\min} = f(\alpha)$  имеет вид гиперболы. Задаваясь значениями относительной индукции  $\beta$  и подставляя их в уравнение, выявляются соответствующие значения  $P/2\delta$  при разных  $\beta$ . Приводя данные показатели применительно к реальному зубчатому колесу (диаметры окружности вершин и впадин, модуль зацепления и т.д.) и магнитному полю (магнитная индукция), можно определить наиболее приемлемые условия обработки и установить возможности процесса МАО для получения необходимых его качеств и производительности. На рисунке

2.5 приведена зависимость  $\beta = f\left(\frac{P}{2\delta}\right)$  при значении  $\alpha = 120^\circ$  (трапециидальный зуб), что наиболее отвечает форме рабочего контура зубчатого колеса.

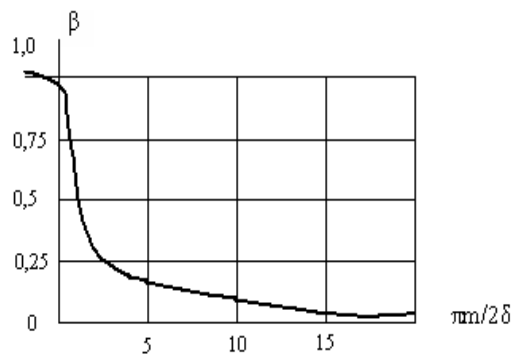


Рисунок 2.5 - Распределение относительной индукции  $\beta$  в пазу зубчатого колеса при  $\alpha=2\pi/3$ .

Проведенные исследования позволили определить, что максимально возможным значением  $\alpha$ , при котором осуществляется процесс МАО, является диапазон 4-6. Преобразовав,  $P/2\delta$  как  $\pi m/2\delta$  и подставляя данный диапазон, можно варьируя показателями  $m$  и  $\delta$ , произвести прогнозирование обработки мелкомодульных зубчатых колес методом МАО.

На основании вышеизложенного были проведены исследования, направленные на оценку технологических возможностей метода МАО при обработке мелкомодульных колес ( $m = 1,5$  мм). Шестерни имели косой зуб,  $\beta = 12^\circ$ , материал – сталь 40Х ГОСТ 4543-71, 40-45 НRC<sub>3</sub>, 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,  $K_3=1$ ; величина рабочего зазора,  $\delta=1$  мм.

Основная задача обработки методом МАО заключалась в скруглении фасок зубчатого контура колес и устранении заусенцев, образованных предшествующей операцией шлифования по наружному диаметру деталей.

### **2.3.3 Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке торцевых поверхностей для достижения высокого коэффициента светоотражения**

Необходимость такого исследования обусловлена тем, что в процессе МАО при переходе магнитного потока через границу раздела поверхностей, происходят скачкообразные изменения параметров процесса обработки: напряженности магнитного поля  $H$  и магнитной проницаемости  $\mu$ . При реализации МАО необходимо обеспечить требуемую ориентацию обрабатываемой поверхности относительно вектора  $H$ , который представляет силовую характеристику магнитного поля. Эта ориентация должна сохраниться при переходе через поверхность разрыва непрерывности среды. Следовательно, чем сложнее форма детали, подвергаемая МАО, тем больше вероятность разрыва этой непрерывности, что приводит к разности значений магнитной индукции. Кроме того, МАО осуществляется в условиях изменяющихся физические свойства среды, т.е.  $\mu$  (полюсный наконечник, обрабатываемый материал, ФАП, СОТС). Согласно положениям теории электромагнетизма во всех точках обрабатываемой поверхности должны быть одинаковые показатели напряженности магнитного поля  $H$ . При

выполнении данных условий и соблюдении симметричности деталей процесс МАО осуществляется при снижении затрат на НИОКР и использовании ранее созданного оборудования. Если учитывать векторный характер напряженности магнитного поля  $H$ , то этом случае возможно применение принципа суперпозиции, что значительно облегчает прогнозирование процесса.

Финишная обработка деталей оптического назначения заключается в необходимости достижения высокого показателя коэффициента светоотражательной способности и низкого показателя шероховатости поверхности. Для достижения этих показателей не допускается простое шаржирование обрабатываемой поверхности, а требуется увеличить радиусы вершин микронеровностей, что способствует отражению светового луча. Известно, что реальный свет не представляет собой идеальной монохроматической волны, в связи, с чем растет вероятность возникновения явления хроматической абберации. Это явление нежелательно, поскольку приводит к искажению или недостаточной отчетливости изображения. Существующие методы финишной обработки данных деталей имеют ряд «узких мест» как технологического плана, так и физической природы оптических явлений, что снижает эффективность их использования. Общей проблемой механической обработки, в том числе и финишной, поверхностей такого рода деталей служит то, что внешний вид полученной поверхности может обладать равными значениями по шероховатости, но различными – по коэффициенту светоотражательной способности. Это объясняется как характером отражения светового луча, так и структурой обрабатываемого материала. Одним из возможных путей исключения такой разницы может явиться изменение давления инструмента на деталь в ходе протекания процесса съема материала. В связи с вышеизложенным, возникает необходимость применения таких методов, которые обладают возможностью реализации этого положения и отличаются ее быстродействием. Использование процесса МАО характеризуется, кроме указанных ранее факторов, также и широким диапазоном значений этого давления. Процесс достижения требуемых показателей коэффициента светоотражательной способности и шероховатости поверхности можно осуществлять при помощи периодического контроля с использованием достаточно эффективных и недорогих его способов. Например, одним из таких способов служит помещение рядом с зоной обработки на пути движения светового потока листа папиросной бумаги, что позволяет на основе контраста выявить разность показателей этого коэффициента на различных участках общей площади полирования, если таковые образуются. В этом случае изменение подачи силы тока производится для изменения давления в ту или иную сторону, где осуществляется доводка поверхностного слоя.

Вместе с тем при обработке методом МАО деталей, которые обладают вращательной симметрией, применение принципа суперпозиции для расчета магнитных полей позволяет с высокой степенью точности произвести прогнозирование и определение магнитной индукции, представляющую собой силовую характеристику магнитного поля. Однако отступления от симметричной конфигурации изделия приводит к тому, что процесс МАО будет связан с трудностями установления коммутации магнитного потока. Эта коммутация характеризуется, во-первых, различной плотностью потока на различных участках полирования, во-вторых, возможностью роста его утечек. Данная ситуация предполагает снижение качества либо всей поверхности полирования, либо отдельных ее зон.

Следовательно, при необходимости обработки деталей машин, имеющих отступления от симметричности необходимо осуществить расчет магнитной индукции, и в случае ее установления произвести съем материала с учетом этих рекомендаций. В качестве примера такой обработки служит финишная обработка диска толщиной 0,4 мм и диаметром 100 мм. На одном из его участков отсутствует сектор, что искажает показатели магнитной индукции (рисунок 2.6)

Путем непосредственного расчета установлено, что искомая величина магнитной индукции равняется.

$$B = B_1 + B_2,$$

где  $B_1$  – магнитное поле от прямолинейного участка контура;  
 $B_2$  – от криволинейного.

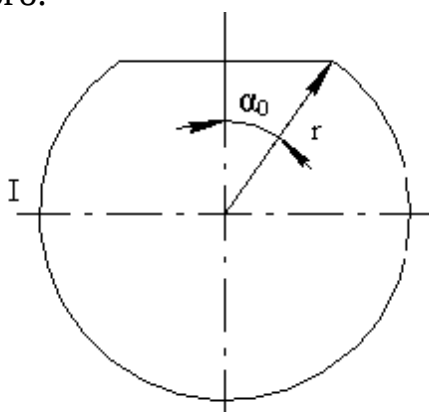


Рисунок 2.6 - Схема определения магнитной индукции

Согласно закону Био-Савара-Лапласа:

$$B_1 = 2 \int_0^{\alpha_0} \frac{\mu_0 I \sin \alpha_0}{4\pi \cos \alpha_0} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \operatorname{tg} \alpha_0,$$



$$B_1 = \int_0^{\alpha_0} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I(2\pi - 2\alpha_0)}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} (\pi - \alpha_0).$$

В результате имеем:

$$B = \frac{(\pi - \alpha_0 + \operatorname{tg} \alpha_0) \mu_0 I}{2\pi r}.$$

Во втором случае исследование процесса МАО направлено на определение магнитного поля сплошного тонкого диска.

Любое физическое тело, помещаемое в магнитное поле, можно представить окруженным круговым током, которое симметрично относительно этого витка [57]. В данном случае во всех точках плоскости витка, лежащих вне его, магнитный потенциал  $\varphi_M = 0$ , поскольку телесный угол  $\Omega$  тоже равен 0. Это связано с тем, что:

$$\varphi_M = \frac{\Omega}{4\pi} I,$$

где  $I$  – сила тока, А.

Любая точка в плоскости витка, лежащая внутри его, имеет  $\Omega = 2\pi$  и  $\varphi_M = I/2$ .

Поле может быть рассчитано только в точках, лежащих на оси витка. Телесный угол  $\Omega$ , под которым виток виден из точки  $a$ , связан с плоским углом  $\alpha$  соотношением  $\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha)$ .

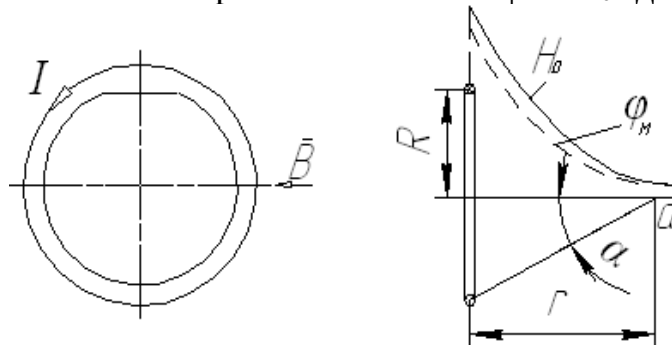
Используя уравнение (2.93), получаем выражение скалярного магнитного потенциала в точке  $a$ .

$$\varphi_M = \frac{I}{2}(1 - \cos \alpha) = \frac{I}{2} \left( 1 - \frac{r}{\sqrt{R^2 + r^2}} \right). \quad (2.94)$$

Напряженность поля на оси имеет только одну осевую составляющую:

$$H_o = -|\nabla \varphi_M| = -\frac{d\varphi_M}{dr} = \frac{I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

На рисунке 2.7 показаны кривые изменения  $\varphi_M$  и  $H_o$  вдоль оси.



## Рисунок 2.7 - Магнитное поле кругового тока

Однако при МАО плоских деталей крайне важен вопрос: какова величина напряженности магнитного поля в других точках, например, в точке, находящейся посередине радиуса витка  $R/2$ . Это связано с тем, что давление инструмента на обрабатываемую поверхность находится в прямой зависимости от величины напряженности магнитного поля. Разная величина напряженности в различных точках, т.е. разное давление инструмента, не обеспечивает равномерности съема материала и соответственно шероховатости поверхности, что особенно важно для оптических элементов. По этой причине возникает необходимость определения величины напряженности в других точках плоскости. Расчет напряженности поля в любой точке, например в точке  $a$ , лежащей в плоскости витка и внутри его, на расстоянии  $x$  от центра производится следующим образом (рисунок 2.8).

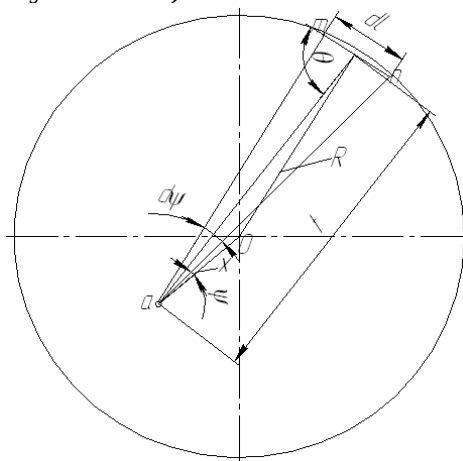


Рисунок 2.8 - Расчет магнитного поля вне центра плоскости кругового витка.

Поскольку плоскость витка эквипотенциальна, вектор напряженности поля в плоскости витка направлен повсюду по нормали к ней и таким образом имеет только осевую составляющую [58].

$$H_0 = \frac{1}{4\pi} \int \frac{Idl \sin \theta}{t^2}.$$

Интеграл берется по контуру тока  $I \cdot 2\pi R$ .

$$\frac{1}{2} dl \cdot \sin \theta = t \cdot \operatorname{tg} d\psi.$$

После преобразований получаем:

$$t \approx \sqrt{R^2 - (x \cdot \sin \psi)^2} + x \cdot \cos \psi.$$

Применяя  $x/R = k$ ,

$$H_0 = \frac{I}{4\pi R(1-k^2)} \left[ \int_0^{2\pi} \sqrt{1-(k \cdot \sin \psi)^2} d\psi - k \int_0^{2\pi} \cos \psi d\psi \right].$$

Второй интеграл равен 0. Значения  $\sin^2 \psi$  повторяются во всех квадрантах, поэтому:

$$H_0 = \frac{I}{nR(1-k^2)} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-(k \cdot \sin \psi)^2} d\psi.$$

Данный определенный интеграл является полным эллиптическим интегралом второго рода  $E(k)$ .

Поэтому при  $x = \frac{R}{2}$ , т. е.  $k = 0,5$ , этот интеграл  $E(k) = 1,467$  [58].

$$H_0 = \frac{I \cdot 1,467}{\pi R(1-0,5)} = 0,623 \frac{I}{R}.$$

Это значение почти на 25 % выше значения  $H_0$  в центре витка, равного  $\frac{I}{2R}$ .

Технологическое решение достижения требуемой шероховатости оптического элемента заключается в необходимости радиального перемещения периферии инструмента относительно центра детали, т.е. введение режима осцилляции с определенной амплитудой, которая реализована в конструктивной схеме оборудования.

### **2.3.4 Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке внутренних конических поверхностей для достижения высокого коэффициента светоотражения**

Финишная обработка внутренних конических поверхностей представляет собой в машиностроении определенную проблему. Существующие методы такой обработки связаны с высокой трудоемкостью, экономическими проблемами и сложностью инструмента. Одним из перспективных способов является MAO. Однако основной проблемой реализации этого способа служит аналитическое определение величины магнитного поля и его распределение в пространстве рабочей зоны. Поскольку все физические поля являются трехмерными, то точные аналитические решения этих полей связаны с большим объемом вычислений. Однако установление величины магнитной индукции при финишной обработке конических поверхностей позволит с достаточной точностью найти оптимальное

решение для получения требуемой производительности и качества процесса МАО.

Установлено, что во многих случаях, представляющих практический интерес, такого рода решение может быть найдено путем сведения задачи к двухмерной. В результате этого подхода упрощается поиск и определяется с незначительными погрешностями характеристики магнитного поля. Например, требуется обработать рефлектор карманного фонаря, представляющий собой полый усеченный конус, внутреннюю поверхность которого следует довести до высокой светоотражательной способности (рисунок 2.9).

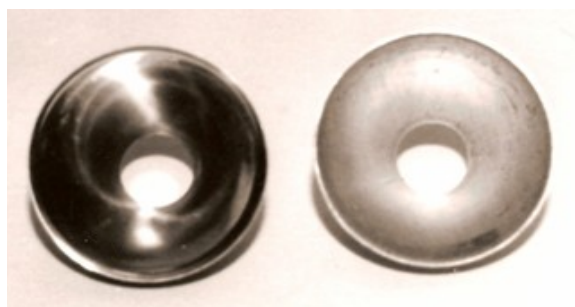


Рисунок 2.9 - Рефлектор до (справа) и после (слева) МАО

Главной задачей становится необходимость предварительного расчета и прогнозирования возможностей МАО конических внутренних поверхностей. В данном случае используется схема МАО с продольным расположением магнитного поля, поскольку конструктивное оформление оборудования, реализующего способ с поперечным МП имеет более высокую сложность.

На основании вышеизложенного предлагается следующий расчет, заключающийся в определении векторного потенциала магнитного поля, а посредством его – и магнитной индукции, являющейся одной из основных характеристик этого поля. Скалярная потенциальная функция  $\varphi(x, y, z)$  дает возможность наиболее простым путем вычислить любое поле с распределением заряда внутри его. Однако магнитное поле имеет существенно другой характер. Это связано с тем, что магнитный поток может иметь так называемую коммутацию и ее распределение в пространстве обусловлено целым рядом факторов, определить которое чрезвычайно сложно. В связи с изложенным величина работы по перемещению полюса по замкнутому контуру в области, где протекает ток, может иметь бесконечно большое число значений. Следовательно, понятие о скалярном потенциале теряет смысл.

Поэтому предложение немецкого ученого Ф. Неймана о введении векторного потенциала, во-первых, открывает параллель в отношениях между электростатическим и магнитным полями, во-вторых, его использование для расчета данных полей освобождает от конкретной

системы координат, резко снижая трудоемкость поиска и установления величин и зависимостей. Обычно определение и вычисление магнитного поля сводится к относительной ориентации выделенного элемента  $dl$  из общей цепи тока и радиус-вектора  $r$ , проведенного из этого элемента в точку поля  $B$ , где вышеуказанное определение происходит согласно закона Био-Савара-Лапласа

^

$$dB = \frac{I \cdot dl \cdot r}{\mu \cdot r^2}.$$

Однако рассмотрение вклада от небольшого участка контура не позволяет получить полноты картины магнитного поля, поэтому требуется произвести интегрирование по мере обхода всей петли с током. Кроме того, данный вклад физически неопределим. Это связано с тем, что отрезок петли с током в противоположность электрическому заряду не является объектом, который может быть исследован.

Таким образом, расчет осуществляется путем прибавления функции, которая бы с учетом вкладов от каждого элемента петли с током давала нуль при интегрировании по всему замкнутому пути. Особенности формы петли не будут сказываться на трудоемкости расчета, поскольку рефлектор является деталью типа тела вращения, что указывает на ее симметричность.

Возвращаясь к указанному выше постулату о петле с током, можно сказать о том, что поле непосредственно от петли с током будет иметь вид такой же, как и вблизи длинного прямого провода. Поэтому относительное значение удаленных частей петли невелико, а поле в целом обладает вращательной симметрией относительно одной из осей, а силовые линии тоже симметричны плоскости петли. Связь между магнитной индукцией  $B$  и векторным потенциалом  $A$  характеризуется тем, что  $B$  является ротором векторной функции  $A$ :

$$B = \text{rot}A.$$

Методика проведения расчета заключается в установлении векторного потенциала на меньшем диаметре конусной детали (рисунок 2.10). Аналогично он определяется на большем диаметре.

Составляющая векторного потенциала от элемента линейного тока будет направлена параллельно этому элементу. Объединяя попарно равноудаленные от точки  $M$  элементы длиной  $dl$ , имеющие координаты  $+\theta$  и  $-\theta$  видно, что суммарный векторный потенциал будет перпендикулярен плоскости  $r$   $OZ$  (рисунок 2.11). Следовательно, вектор  $A$  будет иметь только одну проекцию  $A_\theta$ , величина которой определится по формуле:

$$A = A_\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dl_\theta}{R} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^\pi \frac{a \cdot \cos \theta \cdot d\theta}{\sqrt{a^2 + r^2 + z^2 - 2a \cdot r \cdot \cos \theta}}. \quad (2.95)$$

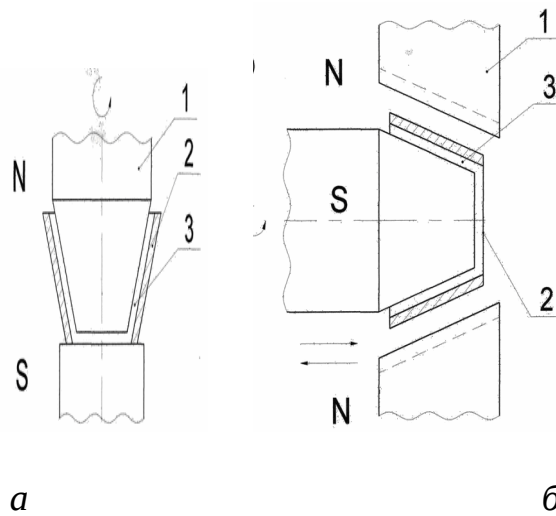


Рисунок 2.10 - Схемы МАО рефлектора с продольным (а) и поперечным (б) распределением магнитного поля

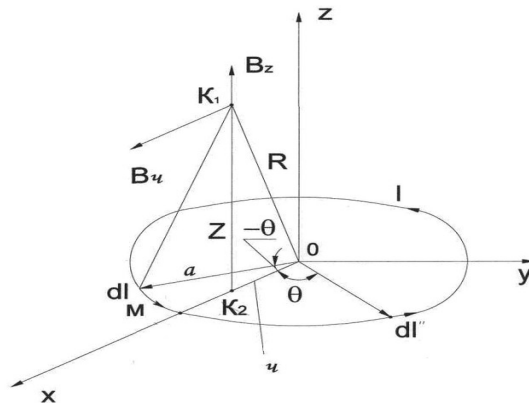


Рисунок 2.11 - Схема определения векторного потенциала для МАО рефлектора

Если разложить знаменатель подинтегрального выражения в ряд и учесть, что по условию:

$$a^2 < r^2 + z^2,$$

То формулу 2.95 можно представить как:

$$A = A_\theta = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{\cos \theta}{\sqrt{r^2 + z^2}} \left( 1 + \frac{a \cdot r \cdot \cos \theta}{r^2 + z^2} \right) d\theta = \frac{\mu_0 I a^2 z}{4(r^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I a^2 r}{4R^3}.$$

В цилиндрической системе координат:

$$B_r = - \frac{\partial A_\theta}{\partial z} = \frac{3a^2 \mu_0 \cdot I \cdot r \cdot z}{4R^5},$$

$$B_{\theta} = 0,$$

$$B_z = \frac{a^2 \cdot \mu_a \cdot I}{2R^3}.$$

Основное значение для МАО конусных внутренних поверхностей в продольном магнитном поле имеет составляющая  $B_r$ . Приведенные расчеты показывают, что существует определенная разница величин магнитной индукции на большем и меньшем диаметрах указанного выше рефлектора. Главная задача заключается в установлении численных значений этой разницы и на ее базе выявления возможности процесса МАО конических внутренних поверхностей. Таким образом, можно осуществить прогнозирование данного процесса, не прибегая к приведению и реализации сложных конструкторских и технологических работ. Например, если размеры рефлектора карманного фонаря составляет  $D \times d \times l = 37 \times 12 \times 16$  мм, то данная деталь обладает требуемой технологичностью для использования процесса МАО. В качестве оборудования применялся станок ЭУ-5 производства ФТИ НАН Беларуси, ФАП – ПФА Р6М5-1 ТУ 27-104-02-86, размер зерна,  $\Delta = 63/100$  мкм, СОТС СинМА-2 ТУ 38.5901176-91, 3% водный раствор. Параметры и режимы МАО: величина магнитной индукции,  $B = 1$  Тл; угловая скорость шпинделя,  $\omega = 90 \text{ с}^{-1}$ ; скорость заготовки,  $V = 0,5 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$ ; рабочий зазор,  $\delta = 1$  мм; время обработки,  $t = 120$  с. В результате приведенных исследований установлено, что разница величин магнитной индукции на большем и меньшем диаметрах рефлектора не превышает 15%. Это позволило получить на внутренней поверхности данной конической детали требуемый показатель светоотражательной способности, необходимый для нормального функционирования изделия. Изменение указанного выше критерия (15%) в большую сторону в ходе протекания процесса МАО приводит к неравномерности размерного и массового съема материала обрабатываемой детали, что является признаком брака.

Установлено, что при МАО внутренних конических поверхностей достигаются требуемые показатели качества и производительности процесса, если разница величин магнитной индукции на большем и меньшем диаметрах детали не превышает 15%.

### **2.3.5 Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке длинномерных изделий**

Основным критерием эффективности протекания процесса МАО является возможность достижения максимального значения магнитной индукции  $B$  при минимальных габаритах ЭМС, что приводит к росту

производительности и качества обработки. Необходимым элементом ЭМС служат полюсные наконечники, представляющие собой продолжение этой системы. Основная задача заключается в получении наибольших значений магнитной индукции без реализации достижения критической величины насыщения сердечника. При этом достижении прохождения магнитного потока по цепи ЭМС не осуществляется. А поскольку традиционные методы механической обработки деталей машин, в частности, длинномерных изделий не всегда позволяют получить требуемое качество поверхности, то возникает необходимость применения новых способов формообразования. Вместе с тем и эти способы должны в полной мере дать представление об особенностях процесса и его сущности для обеспечения выходных показателей производительности и качества выпускаемой продукции.

Как известно, ЭМС снабжаются сменными полюсными наконечниками. Поэтому всякий раз им требуется придать форму рабочей поверхности, обеспечивающую наиболее благоприятное распределение магнитного потока. Таким образом, цель заключается в создании наиболее оптимальной зоны обработки в зависимости от конфигурации изделия, что приводит к росту технико-экономических показателей процесса МАО и, соответственно, его конкурентоспособности. Изменение формы поверхности является важным элементом в уравнении связи граничных условий сопряжения нелинейных и анизотропных сред, какими служат наконечник, ФАП и обрабатываемая деталь. Производительное протекание процесса МАО определяется неизменностью этих граничных условий в области рабочей зоны. В противном случае происходит нарушение условия непрерывности, что приводит к резкому повышению потерь или утечке магнитного потока. Следовательно, исходя из постоянства свойств ФАП и детали, обеспечение роста производительности процесса МАО может быть осуществлено конструктивным изменением формы рабочей зоны, в частности, полюсных наконечников. Проектирование формы должно быть таким, чтобы их геометрия гарантировала ориентацию линий магнитной индукции, замыкающихся требуемым образом ( $\text{div } \mathbf{B}=0$ ). В данном случае требуется посредством изображения ЭМП получить наглядное представление о данном поле. Известно, что по выражению векторов поля, окружающего какое-либо тело, можно определить величину и направление силы, действующей на это тело [98]. Однако при расчете необходимо произвести допущения, упрощающие его, но позволяющие точно оценить влияние основных параметров на оптимизацию конструкции. Таким образом, путем аналитического расчета необходимо установить распределение магнитной индукции в рабочей зоне для того, чтобы подучить полное представление коммутации магнитного потока. Данная коммутация позволяет правильно оценить возможности процесса МАО.



Основная проблема поставленной задачи заключалась в установлении величины конусообразности данных наконечников по отношению к рабочей зоне на базе определения векторного потенциала ЭМП. Для определения этого потенциала в любой точке  $(x, y, z)$  необходимо, чтобы  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ , тогда

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r}.$$

Известно, что существует модельное условие для определения ЭМП, заключающееся в выполнении следующего правила: отрезок проводника с током должен быть значительно меньше расстояния от него до рассматриваемой точки, в которой устанавливается вектор индукции ЭМП. Поэтому в качестве базы взято именно это условие, поскольку во многом отвечает принципу построения полюсного наконечника, обладающего формой усеченного конуса, и площадь большего диаметра которого является рабочей зоной ЭМС.

Тогда векторный потенциал в указанной выше точке согласно закону Био-Савара-Лапласа (рисунок 2.12) равен:

$$A = \frac{\mu_0 IS \sin \theta}{r^2}, \quad (2.96)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн·м<sup>-1</sup>;  
 $I$  – сила тока, А.

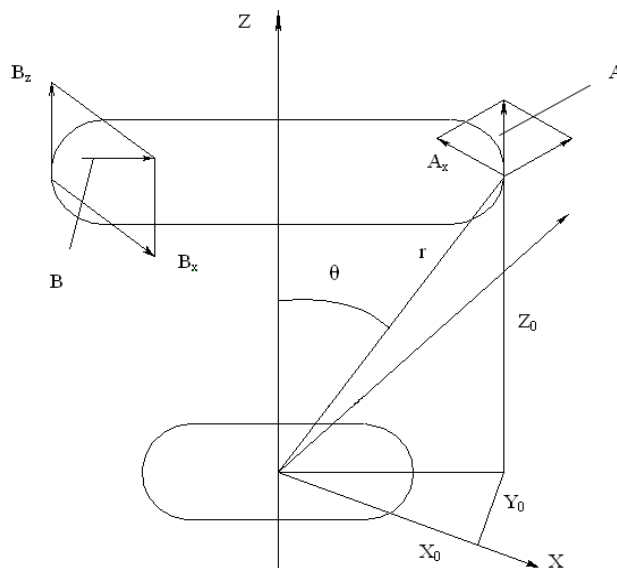


Рисунок 2.12 - Схема определения направления векторов магнитной индукции для МАО длинномерных изделий:  $A$  – векторный потенциал, Т·м;  $A_x, A_y$  – компоненты векторного потенциала;  $B$  – магнитная индукция, Т;  $B_z, B_x$  – компоненты вектора магнитной индукции;  $Z_0$  – расстояние между площадками первого и второго контуров магнитного поля по оси  $Z$ , м;  $r$  – расстояние между центром первого контура до периферии второго, м;  $X_0, Y_0$  – расстояние от центра первого контура

до периферии второго соответственно по осям  $x$  и  $y$ ,  $m$ ;  $\theta$  – угол между  $r$  и осью  $Z$ ;  $S$  – площадь первого контура,  $m^2$

В данном уравнении векторный потенциал контура с током любой формы на расстоянии  $r$  и нормаль к плоскости контура имеет модуль, представленный следующим образом:

$$A = \frac{\mu_0 IS \sqrt{x^2 + y^2}}{r^2}. \quad (2.97)$$

Можно получить бесконечно много поверхностей, ограниченных указанным контуром, с площадью  $S$ . Для физики процесса электромагнетизма абсолютно не важен выбор поверхности, поскольку  $\int B dS$  будет всегда равен одной и той же численной величине. Это связано с тем, что выражение  $\text{div} B = 0$ , а это, в свою очередь, предполагает и пространственное сохранение потока. В нашем конкретном случае речь идет только о такой ориентации поверхности контура. Самое главное в этом положении является то, что особенности формы контура, согласно теории электромагнетизма, практически не сказываются на форме, реализующей образование ЭМП на большем диаметре конуса полюсного наконечника.

Определившись со способом изготовления полюсного наконечника, требуется установить его геометрические параметры и произвести оценку, исходя из утверждения С. Тикадзуми. Оно заключается в том, что наилучшими показателями обладает конструкция полюсного наконечника, имеющая форму усеченного конуса с углом при вершине, равным  $60^\circ$ . Кроме того, выявление данного направления векторов магнитной индукции приводит к точности оценки воздействия ферроабразивной щетки на обрабатываемую поверхность изделия. Знание распределения плотности магнитного потока в рабочей зоне между полюсными наконечниками гарантирует применение к конкретной детали.

Так как вектор  $A$  совпадает с касательной к горизонтальной окружности вокруг оси  $z$ , то его компоненты согласно формуле 2.97 равны:

$$A_x = A \left( \frac{-z}{x^2 + y^2} \right) = - \frac{\mu_0 ISy}{r^3},$$

$$A_y = A \left( \frac{x}{x^2 + y^2} \right) = - \frac{\mu_0 ISx}{r^3},$$

$$A_z = 0. \quad (2.98)$$

Произведя вычисление  $B$  для точки в плоскости  $xz$  и определяя компоненты  $\text{rot} A$ , находим их при условии  $y = 0$ :

$$\begin{aligned}
B_x &= (\nabla \times A)_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} = \frac{\mu_0 3ISxz}{r^5}, \\
B_y &= (\nabla \times A)_y = \frac{\partial A_z}{\partial z} - \frac{\partial A_x}{\partial x} = \frac{\mu_0 3ISxz}{r^5}, \\
B_z &= (\nabla \times A)_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} = \frac{\mu_0 3IS(3z^2 - x^2)}{r^5}.
\end{aligned}
\tag{2.99}$$

В плоскости  $xz$   $y = 0$ .

Следовательно, компоненты поля в любой точке этой плоскости равны

$$\begin{aligned}
B_x &= \frac{\mu_0 IS \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{r^3}, \\
B_y &= 0, \\
B_z &= \frac{\mu_0 IS (3 \cos^2 \theta - 1)}{r^3}.
\end{aligned}
\tag{2.100}$$

Таким образом, производя оценку эффективности использования полюсных наконечников, необходимо отметить, что главным достоинством увеличивающегося по отношению к рабочей зоне конуса полюсного наконечника служит стремление магнитного потока как системы не изменить свое состояние и сохранить его по мере продвижения вдоль оси  $z$ . Однако увеличение размеров контура, образующего площадь большего диаметра конуса, приводит, если рассматривать движение магнитного потока из начала координат, к тому, что компоненты этого поля уменьшаются. Вместе с тем применение такой конструкции полюсных наконечников обеспечивает при MAO длинномерных изделий компактность рабочей зоны и возможность ее интенсификации. Следует обратить внимание на то, что компоненты векторов магнитной индукции направлены внутрь рабочей зоны. Это приводит к росту удержания ФАП в зоне обработки, повышению давления ферроабразивной щетки на поверхность детали и, соответственно, росту съема материала. Таким образом, основная задача состоит в необходимости оптимизации профиля полюсного наконечника. Осуществляя этот процесс, следует указать, что создание полюсного наконечника, имеющего форму, обратную рассматриваемой выше, т.е. сужение конуса к рабочей зоне, приводит к иному распределению векторов индукции МП. Это распределение не обладает требуемым направлением данных векторов и может быть использовано для других схем MAO. Также необходимо отметить, что конусообразность наконечников не обязательно должна иметь угол, равный  $60^\circ$ , как указывалось ранее.

Зависимость создания наконечника имеет более сложный характер, поскольку важным фактором, влияющим на эффективность обработки методом MAO, служит не только угол указанного выше конуса

наконечника, но и его геометрические размеры. На основании вышеизложенного, можно отметить, что применение формулы (2.95) позволяет установить значения магнитного поля  $B$  и обеспечить повышение производительности и качества выпускаемой продукции после МАО путем создания оптимальной формы полюсных наконечников.

На основании установленной зависимости между геометрическими параметрами рабочей зоны ЭМС выявлено распределение и направление векторов магнитной индукции, что обеспечивает правильное конструирование формы полюсных наконечников и эффективность процесса съема материала для получения требуемых выходных показателей. Проведенные исследования показали, что шероховатость поверхности прутков, подвергаемой магнитно-абразивной обработке, составила  $Ra_2 = 0,1 - 0,3$  мкм. Размерный съем обрабатываемой поверхности достигает 5-12 мкм. При получении данной величины размерного съема происходит образование собственного микрорельефа, отличающегося отсутствием глубоких и острых впадин и дефектов. Кроме того, после МАО на поверхности прутков резко уменьшилось содержание продуктов коррозии и термического разложения веществ, масляных пленок и механических частиц.

### **2.3.6 Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке биметаллических наружных конических поверхностей**

Повышение качества изделий машиностроения неразрывно связано с совершенствованием известных и созданием новых эффективных способов финишной обработки, обеспечивающих высокую производительность и формирующих оптимальные свойства поверхностей. Повышение эксплуатационных показателей качества изделий горнодобывающих отраслей не может быть достигнуто без использования процессов абразивной обработки, удельный вес которых при изготовлении деталей непрерывно возрастает.

Несмотря на наличие множества методов финишной обработки, нерешенным остается вопрос финишной обработки сложнопрофильных элементов изделий, изготовленных из материалов с различными физико-механическими свойствами. Одним из массовых видов таких изделий является инструмент типа поворотных резцов для проходческих и очистных комбайнов. Основной причиной выхода поворотных резцов из строя является износ их конической поверхности. При этом практика показывает, что на долговечность работы поворотных резцов существенное влияние оказывает микрорельеф и физико-механические свойства конической поверхности, поэтому вопрос повышения качества обработки этих поверхностей является актуальным.

Возрастающие требования к надежности поворотных резцов для проходческих и очистных комбайнов вызывают необходимость совершенствования технологического процесса его изготовления на базе применения новых отделочных методов обработки. Для обработки поворотных резцов конической формы, состоящих из материалов с различными физико-механическими свойствами, предпочтительно использовать незакрепленный абразив или абразивный инструмент на основе эластичной связки. К таким способам обработки относится шлифование алмазными лентами [22], в том числе прерывистое и реверсивное [23], позволяющее улучшить качество поверхностей деталей.

Существенное влияние на эффективность процесса резания резцом (разрушения породы) и возможную область применения инструмента оказывают диаметр вставки и угол при ее вершине (рисунок 2.13). Углы при вершине вставки находятся в пределах  $\beta=70^{\circ}\dots105^{\circ}$ . В настоящее время фирмы-изготовители поворотных резцов производят вставки с цилиндрическим корпусом диаметром 8...35мм. Следует отметить, что для разрушения более прочных пород применяют твердосплавные вставки большего диаметра и с большими углами при вершине.

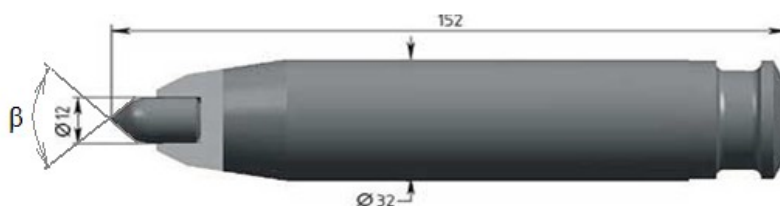


Рисунок 2.13 - Общий вид поворотного резца РКС – 1

Исследованиями, проведенными в работе [48], установлено, что форма полюсного наконечника, и, следовательно, рабочих зазоров, определяет суммарное количество участвующих в процессе резания зерен ФАП и условия их удержания внутри зазоров.

Плотность магнитного потока определяется величиной магнитной индукции  $B$ . Технологическая проблема МАО рабочей поверхности резца состоит в том, что на меньшем диаметре конического участка детали при применении схемы обработки для цилиндрических поверхностей деталей будет и меньшая величина плотности магнитного потока, которая представляет собой силовую характеристику процесса. Это связано с заполнением ФАП рабочего зазора между полюсным наконечником и деталью. Магнитная проницаемость ФАП, который состоит из магнитного и абразивного компонентов (доля абразивного компонента может достигать 80%, в зависимости от вида материала), составляет  $8 - 20 \text{ мкГ}\cdot\text{м}^{-1}$ , в отличие от пермаллоя, который обладает максимальной магнитной проницаемостью –  $1 \text{ Г}\cdot\text{м}^{-1}$ . Назначение полюсных наконечников заключается в создании эквидистантной по отношению к форме детали зоны обработки с рабочим зазором,

заполненным ФАП. Наконечники являются сменными, крепятся различными способами к магнитопроводу и ясно, что увеличение их количества как технологической оснастки ведёт к повышению себестоимости выпускаемой продукции.

Путем создания полюсного наконечника универсального типа, пригодного для обработки многих классов поверхностей, можно уменьшить себестоимость изготовления деталей. Кроме того всякий раз работа по созданию эквидистантного по отношению к форме обрабатываемой детали профиля полюсного наконечника носит оригинальный характер, потому что данный профиль должен максимально копировать указанную выше форму детали. Таким образом, возникает требующая системного подхода проблема, связанная с необходимостью учитывать, что давление любого инструмента (резца, шлифовального круга, хона) в реальном процессе производства деталей является величиной переменной и варьируется в определенных пределах при условии обеспечения требуемых выходных показателей по точности и качеству. Следовательно, если удаётся выявить эти пределы для МАО деталей с коническими поверхностями, то резко сократится номенклатура необходимой технологической оснастки, т.е. профилированных полюсных наконечников. Поэтому можно будет использовать полюсной 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. Последним звеном является определение отклонения давления ФАП, используемого в качестве инструмента, на обрабатываемую поверхность. Поскольку, как ранее было отмечено, между давлением как силовой характеристикой процесса и величиной магнитной индукции существует прямая связь, то требуется её определить и произвести аналитический расчет. При этом важным является правильный выбор методики расчета применительно к конкретной схеме МАО в зависимости от вида поверхности обрабатываемой детали.

В связи с этим задачей настоящего исследования является определение параметров полюсного наконечника, позволяющих сузить их номенклатуру и уменьшить затраты на реализацию процесса МАО. С целью обеспечения объективной информации каждый резец измеряли по трем участкам, а полученные результаты усредняли.

Рассмотрим распределение ЭМП на поверхности конической детали при различных показателях угла. Применяются допущения:

- 1) влияние ферромагнитного материала полюсного наконечника и реакции вихревых токов на его боковых поверхностях не учитываются;
- 2) магнитное насыщение ферромагнитного материала детали и ФАП не достигается.

Расчетная схема для определения ЭМП с учетом принятых допущений показана на рисунке 2.14.

Многоугольник (рисунок 2.14 а), в плоскости  $z$  отображается на верхнюю полуплоскость  $\xi$  (рисунок 2.14 б) при помощи следующего интеграла Кристоффеля – Шварца:

$$z = D_1 \int_0^{\xi} \xi^{\alpha_1-1} (1-\xi)^{\alpha_2-1} (1-k\xi)^{\alpha_3-1} d\xi + D_2, \quad (2.101)$$

где  $D_1, D_2, k$  – постоянные, подлежащие определению.

Анализ уравнения (2.101) показывает, что даже частные случаи с углами  $30^\circ, 45^\circ$  или  $60^\circ$ , считая от горизонтали, имеют сложные подинтегральные выражения. Поэтому для расчета воспользуемся степенными рядами [59,60].

Для этого множитель представим в виде биномиального ряда:

$$(1-k\xi)^{\alpha_3-1} = 1 - \frac{\alpha_3-1}{1!} k\xi + \frac{(\alpha_3-1)(\alpha_3-2)}{2!} k^2 \xi^2 - \dots = \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_m^{(3)} k^m \xi^m, \quad (2.102)$$

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

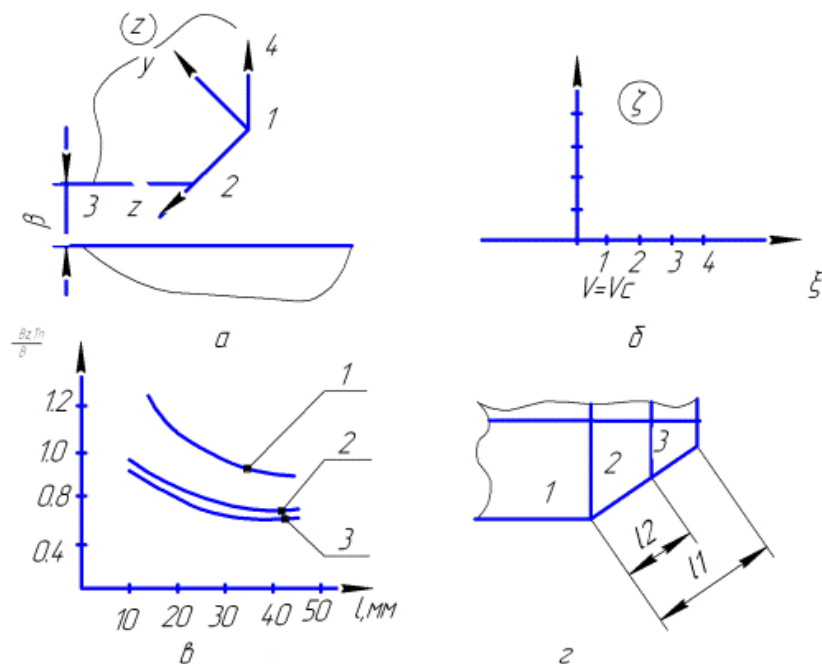


Рисунок 2.14 - Расчетная схема для определения ЭМП

Учитывая, что при  $\xi = 0$  координата  $z = 0$  и, следовательно,  $D_2 = 0$ , определим отношение длины параллельной цилиндрической поверхности детали  $l_1$  (отрезок 2-3, рисунок 2.14, а) зазору  $\delta$ . При  $l_1 \rightarrow \infty$  и  $l_3 \rightarrow 0$  получаем:

$$k^{\alpha_1 + \alpha_2 - 1} \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n k_n}{(1-k)^{1-\alpha_2}} = \frac{\pi l_1 \Gamma(l_1 + l_2)}{\delta \Gamma(l_1) \Gamma(l_2)}, \quad (2.103)$$

$$A_{n+1} = \frac{n + \alpha_1}{n + \alpha_1 + \alpha_2} A_n;$$

$$A_0 = 1;$$

где,  $\Gamma(\alpha_1)$ ,  $\Gamma(\alpha_2)$ ,  $\Gamma(\alpha_1 + \alpha_2)$  – гамма-функции и  $1 - \alpha_2 > 0$ .

Для определения постоянной  $k$  из уравнения (2.103) используем интерактивный метод Ньютона:

$$k_{n+1} = k_n - \frac{f(k_n)}{f'(k_n)}, \quad (2.104)$$

где:

$$f(k_n) = \frac{\pi l_1 \Gamma(l_1 + l_2)}{\delta \Gamma(l_1) \Gamma(l_2)} - k_n^{\alpha_1 + \alpha_2 - 1} \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n k_n}{(1-k)^{1-\alpha_2}},$$

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

$$k_0 = \left[ \frac{\pi l_1 \Gamma(l_1 + l_2)}{\delta \Gamma(l_1) \Gamma(l_2)} \right]^{\frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2 - 1}}$$

$$\text{и } k_1 = \frac{k_0}{1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} k_0}$$

– соответственно начальное

и первое приближения.

Точки конформно отображенной области  $z_1$ , однозначно соответствующие точкам полуплоскости  $\xi$ , определяются формулой:

$$l_x = \frac{l_1 \Gamma(l_1 + l_2)}{\delta \Gamma(l_1) \Gamma(l_2)} \frac{1}{\sum_{n=0}^{\infty} A_n k_n} \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_m^{(3)} k^m \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\xi^{m+n+\alpha}}{m+n+\alpha}, \quad (2.105)$$

$$\text{где } \alpha_{n+1}^{(2)} = \frac{n+1-\alpha_2}{n+1} \alpha_n^{(2)}; \alpha_0^{(2)} = 1.$$

Магнитная индукция на конической поверхности детали (отрезок 1–2, рисунок 2.14, а):

$$B = \frac{V_0}{\pi} \frac{1}{t} \frac{dt}{dz} = \frac{B_\delta}{(1-t)^{\alpha_1-1} (1-t+kt)^{\alpha_2-1} t^{\alpha_3}},$$

$$1 \leq t \leq \frac{1}{1 - \hat{e}\xi},$$

$$\text{где } t = \frac{1}{1 - k\xi}; \quad 1 \leq \xi \leq \infty; B_\delta - \text{индукция в рабочем зазоре.}$$



В частных случаях: равномерный скос на всю высоту сегмента (Рисунок 2.14, а):

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

Расчеты ЭМП для различных исполнений показывают, что форма детали при наличии конусообразности влияет на фактор распределения аксиальной составляющей магнитной индукции по разнице диаметральных размеров, а также связана с конфигурацией вышеуказанной конусообразности. 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 скошенной части поворотного резца. Установлено, что увеличение примерно в 1,5 раза длины скошенной части детали при угле конуса  $45^\circ$  приводит к уменьшению магнитной индукции в среднем на 20%. Уменьшение индукции на поверхности конусной части детали по сравнению с прямоугольной проявляется в особой множественной степени при увеличении рабочего зазора. Например, при угле конуса  $45^\circ$ , 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 (рисунок 2.14 в, г).

С уменьшением угла конуса характер изменения  $B$  на конусной части также зависит от величины рабочего зазора. Так при  $\delta=3\text{мм}$   $B$  начинает сильно уменьшаться для углов со значением менее  $70^\circ$ , а при  $\delta=5\text{мм}$  – уже для углов менее  $60^\circ$ .

Проведенные исследования показывают, что в таком случае обязательным условием должно быть профилирование полюсных наконечников относительно профиля конусной части резца при наличии одного и того же значения величины рабочего зазора.

### **2.3.7 Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке крупномодульных зубчатых колес**

Известно, что любая финишная абразивная обработка прерывистых поверхностей деталей машин (шлицевых, зубчатых профилей и т.п.) имеет более высокий уровень трудозатрат по сравнению с обработкой непрерывных поверхностей. Это обусловлено тем, что для абразивного инструмента с жестко связанным зерном обязательным условием является профилирование режущего контура адекватно обрабатываемой поверхности. В отличие от инструмента жестко связанным абразивным зерном при MAO ферроабразивная «щетка» обладает возможностью частичного огибания контура обрабатываемой поверхности. Для процесса MAO прерывистых поверхностей одной из главных задач является обеспечить необходимое распределение магнитного потока.

Для прерывистых поверхностей таким участком является ферромагнитный материал его зуба, а не воздушный промежуток межзубной впадины, поскольку их магнитная проницаемость различная. Однако главная задача состоит в необходимости обработки именно межзубной впадины. Следовательно, при МАО прерывистых поверхностей промежуток межзубной впадины должен быть заполнен частицами ФАП.

Проведенные исследования МАО зубчатых колес показали, что использование эквидистантного (по отношению к наружному диаметру) профиля полюсных наконечников обеспечивает удовлетворительную обработку зубчатых колес с модулем, не превышающим 1 мм. При МАО зубчатых колес с модулем более 1 мм эквидистантный профиль не обеспечивает непрерывность магнитного потока, в результате чего происходит разрыв ферроабразивной «щеткой» между поверхностью полюсного наконечника и межзубной впадиной и не обеспечивается требуемое качество обработки. В связи с изложенным для возможности МАО прерывистых поверхностей необходимо определить топографию ЭМП в рабочем зазоре. Топография дает представление о распределении магнитных силовых линий в зазоре со сложным профилем, концентрация этих линий указывает на степень возможного заполнения частицами ФАП межзубной впадины, обеспечивая тем самым давление ФАП на обрабатываемую поверхность. В настоящей работе приводится вариант построения и анализа топографии магнитного поля при МАО прерывистых поверхностей, заключающийся в разработке аналитической модели с учетом физических явлений, сопровождающих процесс МАО, и сопоставление этой модели с полученными экспериментальными данными.

При создании аналитической модели был использован метод комфортного преобразования на основе теоремы Кристоффеля – Шварца при следующих условиях: магнитная проницаемость зубьев значительно больше магнитной проницаемости воздушного промежутка впадины, определение топографии производилось только по двум зубьям, поскольку топографии ЭМП присуще свойство симметрии. Так как двухмерное пространство дает достаточно полное представление о топографии магнитного поля, то был осуществлен перевод оси  $z$  в бесконечность, что значительно уменьшает объем вычислений, а использование в теореме Кристоффеля – Шварца гиперболических функций  $sh x$  и  $ch x$  исключает показатель периодичности. Это обуславливает необходимость изменения в процессе МАО прерывистых поверхностей величины зазора между полюсным наконечником и обрабатываемой поверхностью зубчатого колеса и соответственно несколько вариантов решения задачи. По техническим соображениям можно рассматривать два варианта исполнения профиля полюсного наконечника. Сущность первого варианта состоит в создании

концентратора на полюсном наконечнике оппозитно межзубной впадине. Однако при таком варианте изменение любого геометрического параметра прерывистой поверхности требует создание нового полюсного наконечника, что значительно увеличивает их номенклатуру и экономически может быть неоправдано. Второй вариант связан с созданием серповидной формы рабочего зазора (рисунок 2.15), топография которого определяется согласно предлагаемой аналитической модели.

Рисунок 2.15 - Схема МАО с серповидной формой рабочего зазора:  
 1 обрабатываемая заготовка; 2 полюсный наконечник; 3 ФАП

При расчете топографии ЭМП используем функцию комплексного переменного во впадине прерывистой поверхности в виде комплексного потенциала  $W$  [60]:

$$W = V + jU, \quad (2.106)$$

где  $V = \text{const}$  – силовые линии;

$j$  – векторная величина;

$U$  – линии равного потенциала,  $U = \text{const}$  поскольку:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial y}.$$

Взаимосвязь комплексного потенциала с магнитным полем представляется зависимостью:

$$-j \frac{\partial W}{\partial z} = B_x + jB_y, \quad (2.107)$$

при этом:

$$B_x = - \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial y},$$

$$B_y = - \frac{\partial U}{\partial y} = - \frac{\partial V}{\partial x}. \quad (2.108)$$

Использование комплексного потенциала  $W$  для определения магнитной индукции  $B$  производится следующим образом: верхняя полуплоскость  $\eta = I_m(\xi) > 0$  отображается на реальную область в плоскости  $z$ , в которой находится ЭМП с заданным распределением магнитных потенциалов  $U$  (рисунок 2.16),

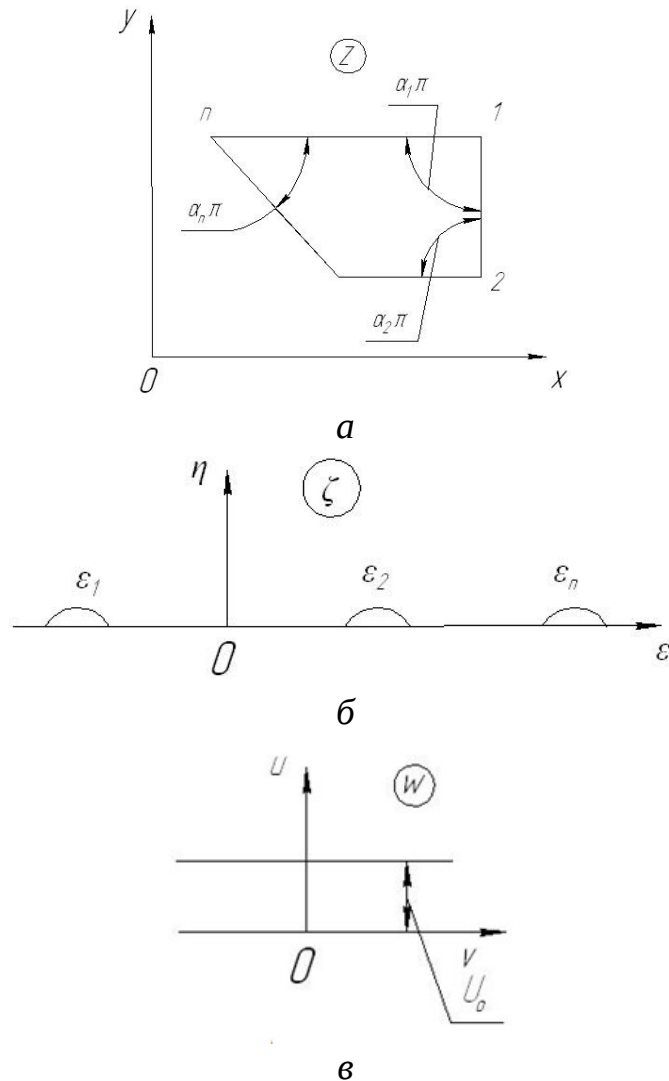


Рисунок 2.16 - Конформное отображение расчета магнитного поля с применением интеграла Кристоффеля – Шварца:

$a$  – плоскость реальной плоскости,  $b$  – плоскость комплексного переменного,  $в$  – плоскость комплексного потенциала

Используя формулу (2.105) и представив  $U = const$  и  $V = const$ , как линии равных значений (поле в рабочем зазоре между профилем полюсного наконечника и обрабатываемой поверхностью), отобразим  $W = V + jU$  на верхнюю полуплоскость  $\eta = I_m(\xi)$  таким образом, чтобы точки плоскости  $\xi$ , имеющие потенциалы  $U_1$ ,  $U_2$  и т.д. перешли в соответствующие кривые  $U = const$  в плоскости  $W$ . В результате такого преобразования получим зависимость  $W = f_1(\xi) = f_2(z)$ , связывающую комплексный потенциал с реальной конфигурацией области, в которой

находится магнитное поле. Для известной функции  $W = f_2(z)$  магнитная индукция  $B$  определяется из формулы (2.108):

$$B = \left| \frac{dW}{d\zeta} \cdot \frac{d\zeta}{dz} \right|. \quad (2.109)$$

Поэтому конформное преобразование можно производить на основе следующей теоремы Кристоффеля – Шварца: если  $z = f(\zeta)$  представляет собой отображение верхней полуплоскости  $\eta = I_m(\zeta) > 0$  на ограниченный многоугольник с углами  $\alpha_k \pi (0 < \alpha_k \leq 2, k = 1, 2, \dots, n)$  при вершинах, причем определенные точки  $\xi_k$  действительной оси на плоскости  $\zeta (-\infty < \xi_1 < \xi_2 < \dots < \xi_n < \infty)$  соответствуют вершинам многоугольника на плоскости  $z$ , то  $f(\zeta)$  имеет вид:

$$z = C_1 \int (\zeta - \xi_1)^{\alpha_1 - 1} \dots (\zeta - \xi_n)^{\alpha_n - 1} d\zeta + C_2, \quad (2.110)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные величины.

В случае если две смежные стороны многоугольника параллельны, точка их пересечения находится в бесконечности, а  $\alpha_k = 0$ . Формула  $z = f(\zeta)$  упрощается, если принять, что одна из точек на оси  $\xi$ , принадлежащей плоскости  $\zeta$  лежит в бесконечности. В этом случае из формулы (2.110) исключаются соответствующие множители типа  $(\zeta - \xi_n)^{\alpha_n - 1}$ , соответственно расчет упрощается при сохранении результата. Пусть часть поверхности имеет магнитный потенциал  $U_1$ , а остальные –  $U_2$ . При наличии разности потенциалов  $U_1 - U_2 = U_0$  внутри рабочего зазора магнитное поле будет равномерным. Отобразив плоскость комплексного потенциала  $W = V + jU$  на верхнюю плоскость  $\eta = I_m(\zeta) > 0$  таким образом, чтобы точки плоскости  $\zeta$ , имеющие потенциалы  $U_1, U_2$ , соответствовали прямым  $U_1$  и  $U_2$  плоскости  $W$ , получим искомую зависимость  $W = f_1(\zeta) = f_2(z)$ , для которой с помощью формул (2.107) и (2.108) находится искомая индукция.

Используя интеграл Кристоффеля-Шварца, отобразим многоугольник  $yQDRP$  плоскости  $z = x + jy$  на полуплоскость  $\zeta = \xi + j\eta$  (рисунок 2.17).

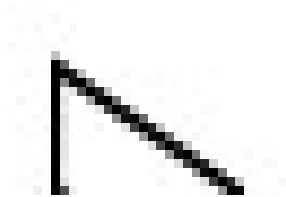


Рисунок 2.17 - Схема топографии ЭМП при величинах рабочего зазора  $\delta$  и  $\delta_1$

Тогда координата

$$z = C_1 \int \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \sqrt{\frac{\zeta - \alpha}{\zeta - 1}} d\zeta + C_2. \quad (2.111)$$

Произведем связь полуплоскости  $\zeta$  с полосой шириной  $\pi j$  в плоскости  $W = V + jU$ :

$$\zeta = ch^2 \frac{W}{2}. \quad (2.112)$$

Постоянные величины  $C_1$ ,  $C_2$  и  $\alpha$  определяются при граничных условиях  $\zeta = \alpha$ ;  $Z = \frac{b}{2t}$ ;  $\zeta = 1$ ;  $Z = \pi$ ;  $\zeta \rightarrow \infty$ ;  $\frac{dW}{dZ} = -j$ . Поставив значения  $C_1$ ,  $C_2$  и  $\alpha$  в (2.108) и произведя интегрирование, получим:

$$z = \frac{b}{2t} - \frac{j}{2\pi} \left[ \ln \frac{\sqrt{\zeta-1} + \sqrt{\zeta - \left(\frac{b}{t}\right)^2}}{\sqrt{\zeta-1} - \sqrt{\zeta - \left(\frac{b}{t}\right)^2}} - \frac{b}{t} \ln \frac{\sqrt{\zeta-1} - \sqrt{\frac{t^2}{b^2} \zeta - 1}}{\sqrt{\zeta-1} + \sqrt{\frac{t^2}{b^2} \zeta - 1}} \right], \quad (2.113)$$

где  $b$  – ширины впадин, мм;

$t$  – шаг впадин, мм.

Выделим из (2.113) мнимую часть, тогда при  $u=\delta$  получим

$$\frac{\delta}{t} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[ \frac{ch^2 \frac{V}{2} + sh \frac{V}{2} \sqrt{ch^2 \frac{V}{2} - \left(\frac{b}{t}\right)^2} + 1 + \left(\frac{b}{t}\right)^2}{2} \right] - \frac{b}{t} \ln \left[ \frac{1 + \left(\frac{b}{t}\right)^2}{2} - \frac{\left(\frac{b}{t}\right)^2}{ch^2 \frac{V}{2}} + \left(\frac{b}{t}\right) \frac{sh \frac{V}{2}}{ch^2 \frac{V}{2}} \sqrt{ch^2 \frac{V}{2} - \left(\frac{b}{t}\right)^2} + \left(1 - \frac{b}{t}\right) \ln \frac{2}{1 - \left(\frac{b}{t}\right)^2} \right] \right\}, \quad (2.114)$$

где  $V$  – действительная часть комплексного потенциала.

На эквивалентной поверхности  $AC$   $V=const$ , а на силовых линиях  $DC$  и  $OA$  согласно (2.113) имеем  $V_C=0$  и  $V_A=\pi$ . Тогда величину магнитной индукции в любой точке можно определить по формуле (2.111).

В точках  $C$  и  $A$  величина магнитной индукции определяется по формулам:

$$B_C = \frac{ch \frac{V}{2}}{\sqrt{ch^2 \frac{V}{2} - \left(\frac{b}{t}\right)^2}};$$

$$B_A = \frac{sh \frac{V}{2}}{\sqrt{sh^2 \frac{V}{2} + \left(\frac{b}{t}\right)^2}}. \quad (2.115)$$

Используя формулу (2.109), можно найти изменение магнитной индукции  $\beta$  в зазоре:

$$\beta = \frac{B_C - B_A}{B_{CP}} = \left(\frac{b}{t}\right)^2 chV \cdot \left[ \frac{\sqrt{ch^2 \frac{V}{2} - \left(\frac{b}{t}\right)^2} \cdot \sqrt{sh^2 \frac{V}{2} + \left(\frac{b}{t}\right)^2} \times}{\times \left( ch \frac{V}{2} \sqrt{sh^2 \frac{V}{2} + \left(\frac{b}{t}\right)^2} + sh \frac{V}{2} \sqrt{ch^2 \frac{V}{2} - \left(\frac{b}{t}\right)^2} \right)} \right]^{-1} \quad (2.116)$$

В формуле (2.115) можно найти изменение индукции  $\beta$  в зависимости от параметров  $b/t$  при учете того, что на любой эквипотенциальной поверхности:

$$B_{CP} = \frac{U_A - U_C}{\pi} = 1. \quad (2.117)$$

Поскольку отношение  $b/t$  в зубчатом контуре прерывистых поверхностей находится в пределах  $0,3 \leq b/t \leq 0,6$  и соответствующая действительная часть комплексного потенциала  $V \geq 6$ , то:

$$\beta = \frac{2\left(\frac{b}{t}\right)^2}{ch^2 \frac{V}{2}}, \quad (2.118)$$

$$\frac{\delta}{t} = \frac{1}{2\pi} \left\{ V + \left(1 - \frac{b}{t}\right) \ln \frac{1}{1 - \left(\frac{b}{t}\right)^2} - \frac{b}{t} \ln \left[ 1 + \left(\frac{b}{t}\right)^2 \right] \right\}. \quad (2.119)$$

Откуда:

$$\beta = \frac{8\left(\frac{b}{t}\right)^2}{1 - \left(\frac{b}{t}\right)^2} \left( \frac{1 - \frac{b}{t}}{1 + \frac{b}{t}} \right)^{\frac{b}{t}} e^{-2\pi \frac{\delta}{t}}.$$

При уменьшении зазора  $\delta$  в несколько раз (величина  $\delta_1$  на Рисунок 2.17) формула изменения магнитной индукции имеет вид:

$$\beta = \frac{B_A - B_O}{B_{CP}} = \frac{\pi \delta_1}{bV} th^2 \frac{V}{2} \left[ \frac{\sqrt{\left(\frac{2\delta_1}{b}\right)^2 + \frac{1}{ch^2 \frac{V}{2}} \cdot \left(\frac{2\delta_1}{b}\right)^2 + 1} \times}{\times \left( \sqrt{\left(\frac{2\delta_1}{b}\right)^2 + 1} + V \left(\frac{2\delta}{b}\right)^2 + \frac{1}{ch^2 \frac{V}{2}} \right)} \right]^{-1} \frac{t}{\delta_1}.$$

$$\frac{t}{\delta} = \frac{4}{\pi} \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{2} \ln \left[ \left( \frac{2\delta}{b} \right)^2 \operatorname{ch} V - 1 + \frac{4\delta}{b} \operatorname{cth} \frac{V}{2} \sqrt{\left( \frac{2\delta}{b} \right)^2 - \frac{1}{\operatorname{sh}^2 \frac{V}{2}}} \right] + \\ & + \frac{b}{2\delta} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{cth} \frac{V}{2}}{\sqrt{\left( \frac{2\delta}{b} \right)^2 - \frac{1}{\operatorname{sh}^2 \frac{V}{2}}}} - \frac{1}{2} \ln \left[ \left( \frac{2\delta}{b} \right)^2 + 1 \right] \end{aligned} \right\}.$$

Графическая зависимость величины относительного изменения магнитной индукции от соотношения величины рабочего зазора и шага элементов прерывистой поверхности изображена на рисунке 2.18.



Рисунок 2.18 - График зависимости относительного изменения  $\beta$  % магнитной индукции от соотношения шага элементов  $t$  прерывистой поверхности и величины рабочего зазора  $\delta$

Характер полученных зависимостей можно объяснить следующим образом: в случае уменьшения зазоров  $\delta$  максимальное значение магнитной индукции достигается при  $x \rightarrow \infty$ , т.е. при условии, что изменение магнитной индукции определяется величиной зазора и шириной впадин. Анализ приведенных зависимостей показывает, что уменьшение величины зазора приводит к увеличению магнитной индукции в межзубной впадине и соответственно удержанию ферроабразивных частиц во впадинах прерывистых поверхностей зубчатого колеса.

Для проверки приведенных теоретических обоснований были изготовлены полюсные наконечники ЭМС с профилем, обеспечивающим переменный рабочий зазор. Соотношение максимальной величины рабочего зазора к минимальной было принято 3:1. Была проведена обработка методом МАО зубчатых колес с модулем 3,5 мм, (наружный диаметр – 180 мм, ширина венца – 32 мм, материал – сталь 25ХГТ ГОСТ 4543-71, 62-64 HRC) на следующих режимах: величина магнитной индукции,  $B=1\text{Тл}$ ; скорость резания,  $V_p=1,5$  м/с; скорость осцилляции,  $V_o=0,15$  м/с; амплитуда осцилляции,  $A=1$  мм; зернистость ФАП,  $\Delta=100/160$  мкм. В результате МАО зубчатых колес в течение 180 с была обеспечена шероховатость поверхности бокового



профиля (на уровне делительной окружности) зубьев  $Ra_2 = 0,4 - 0,5$  мкм при исходной  $Ra_1 = 1,6 - 2,0$  мкм.

На основе математического моделирования топографии электромагнитного поля и проведенных экспериментальных исследований дано научное обоснование геометрической формы рабочей части полюсных наконечников при магнитно-абразивной обработке прерывистых поверхностей. Это позволяет производить МАО зубчатых колес с модулем до 3,5 мм и шлицевых валов.

### **2.3.8 Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке прерывистых поверхностей металлорежущего инструмента**

Метод МАО используется для эффективной обработки деталей с прерывистыми поверхностями из черных и цветных металлов, полимерных и композиционных материалов. Основными компонентами, характеризующими эффективность метода в данной области применения, служат: оборудование, конструкция которого наиболее полно отвечает выполнению условий законов электромагнетизма и принципов технологии его изготовления; правильное использование магнитного поля (МП); создание новых видов рабочей среды путем интенсификации их режущих и моющих свойств. Кроме того, важный аспект состоит в необходимости превентивного прогнозирования возможных решений данной научно-технической задачи.

Поскольку количество обрабатываемых изделий, имеющих прерывистые поверхности, постоянно увеличивается, прогнозирование возможности эффективного применения метода МАО, заключающееся в создании адекватного возникающим условиям алгоритма деятельности, направленного на получение требуемых нормативно-технической документацией параметров, является важной задачей на сегодняшний день. Вариабельность и динамизм указанной выше задачи связан с функциональным резервом метода, который на основе его комплексной оптимизации и часто при недостаточном объеме информации позволяет выявить построение всякий раз эффективного решения.

Существует несколько способов выравнивания эпюры съема материалов в ходе протекания процесса МАО. К ним относятся:

- изменение схемы обработки;
- назначение припусков на обработку, учитывающих неравномерность съема;
- использование реверсивного движения;
- съем припуска в пределах допуска на размер.

На начальном этапе весьма важной является оценка возможностей МАО этих пазов и впадин в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями. Необходимо отметить, что величина съема и качество обработанной поверхности в большой степени зависит от геометрических размеров пазов и впадин. Для прогнозирования показателей качества обработки с целью правильного выбора схемы требуется установить коэффициенты, характеризующие геометрические размеры пазов и впадин. В зависимости от этих коэффициентов и режимов обработки были получены экспериментальные данные для различных схем обработки пазов, определяющие их эпюры съема и качество поверхности после МАО.

На рисунке 2.19 представлены четыре схемы обработки поверхностей пазов и впадин, которые включают подавляющее большинство вариантов. Все остальные схемы относятся к частным случаям и приведенные результаты носят общий характер.

Рисунок 2.19 - Схемы МАО: *a* – одной цилиндрической детали, *б* – нескольких цилиндрических деталей с продольными пазами и винтовыми канавками; *в* – цилиндрических деталей с поперечными пазами; *г* – плоских деталей с пазами;  $V_d$  – скорость вращения детали;  $V_n$  – скорость поперечной подачи полюсных наконечников;  $V_p$  – скорость вращения ротора;  $V_{п.н.}$  – скорость вращения полюсного наконечника;  $V_{п.д.}$  – скорость поперечной подачи детали; *S*, *N* – магнитные полюса

На рисунке 2.20 изображены расчетные схемы для определения коэффициентов. В качестве геометрического коэффициента формы принимается отношение глубины (*h*) впадины к ее ширине (*L*):

$$K_1 = \frac{h}{L} = \frac{R - r}{L} = \frac{D - d}{2L}, \quad (2.120)$$

где  $K_1$  – геометрический коэффициент формы;

$h$  – глубина паза (впадины), мм;  
 $L$  – ширина паза (впадины), мм;  
 $R$  – радиус вершин паза (впадины), мм;  
 $r$  – радиус дна паза (впадины), мм;  
 $D$  – диаметр вершин паза (впадины), мм;  
 $d$  – диаметр дна паза (впадины), мм.

В качестве коэффициента перекрытия, характеризующего эпюру съема, принимаем отношение ширины обрабатываемого участка дна ( $l$ ) к ширине впадины ( $L$ ):

$$K_2 = \frac{l}{L}, \quad (2.121)$$

где  $K_2$  – коэффициент перекрытия;  
 $l$  – ширина обрабатываемого участка дна, мм.

Рассматривались три основных типа пазов на цилиндрических поверхностях:

- первый тип – цилиндрические поверхности с пазами или лысками вдоль образующей поверхности;
- второй тип – цилиндрические поверхности со спиралевидными канавками;
- третий тип – цилиндрические поверхности с концентрическими пазами.

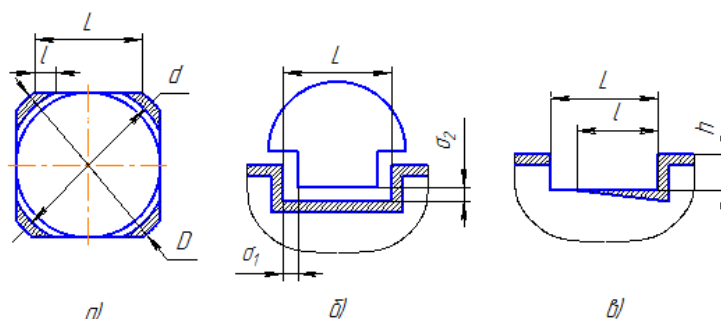


Рисунок 2.20 - Эпюры съема материала при МАО: а – лысок, б – спиралевидных и в – прямых пазов (впадин)

Обработка образцов производилась на установках СФТ 2.150.00.00.000 и М473. Скорость относительного перемещения обрабатываемой поверхности и инструмента варьировалась в пределах 0,7...2,5 м/с, магнитная индукция – 0,5...1,1 Тл. Исходная шероховатость поверхности образцов находилась в пределах  $Ra_1=2,5...3,5$  мкм. Обработка каждого образца производилась в течении одной минуты без изменения относительного движения инструмента и обрабатываемой поверхности, после чего осуществлялось измерение съема и шероховатости поверхности. Затем обработка продолжалась с изменением направления относительного перемещения.

Для обработки первого и второго типов валов по схемам *a* и *б* рисунка 2.20 введение полюсных наконечников в пазы невозможно, поэтому производилась объемная обработка с образованием теневых зон, частично обработанных поверхностей. В качестве образцов первого типа использовались валы с канавками и лысками, различных по глубине и ширине.

В качестве образцов второго типа использовались концевые фрезы с целью обработки стружечных канавок. При этом винтовые канавки фрезы, работая подобно шнеку, перемещают по ним ФАП к хвостовику, а магнитное поле непрерывно возвращает его в рабочую зону. Это обуславливает круговую траекторию движения частиц порошка. Данная ситуация способствует непрерывному обновлению их режущих кромок и допуску новых зерен в зону контакта с обрабатываемой поверхностью.

Третий тип поверхности наиболее удобно обработать по схемам, изображенным на рисунке 2.20 *a* и *б*, с введением в полость паза полюсного наконечника с определенными зазорами ( $\delta_1$  и  $\delta_2$ ). На рисунке 2.20 *б* приведена расчетная схема для определения коэффициентов при обработке концентрических пазов.

При обработке первого и второго типов валов опыт показал, что в процессе обработки без использования реверсивного движения в пазах образуется теневая поверхность, где интенсивность съема снижается или съем металла отсутствует как таковой. Максимальный съем происходит у края канавки или лыски и составляет 20–40 мкм, минимальный наблюдался на дне и постепенно затухал. Шероховатость поверхности у внешнего края канавки составляла  $Ra_2=0,02\dots0,04$  мкм, на обработанных участках дна –  $Ra_2=0,1\dots0,2$  мкм. Измерения на образцах второго типа показали, что наибольшая величина удаленного слоя, равная 15–20 мкм, наблюдается на задней поверхности непосредственно за ленточкой. Затем толщина снимаемого слоя постепенно уменьшается и во впадине имеет наименьшее значение, равное 1–2 мкм. На участках максимального съема шероховатость поверхности составляет  $Ra_2=0,03\dots0,04$  мкм, а на дне канавки  $Ra_2=0,12\dots0,16$  мкм. Планетарная схема обработки, (рисунок 2.20 *б*), показывает более равномерный съем металла, чем схема с оппозитно расположенными наконечниками, (рисунок 2.20 *a*), однако характер эпюры съема остается тот же. Подобные картины съема наблюдаются и для немагнитных материалов. Для изделий без резких перепадов глубины впадин и выступов существуют предельные величины коэффициентов, при которых можно обработать детали по рассмотренным схемам.

Для определения условий достижения качественных характеристик пазов при МАО концентрических канавок использовались следующие коэффициенты:

$$K_1 = \frac{D-d}{2L}; \quad K_2 = \frac{L-2\delta_1}{2\delta_1}; \quad K_3 = \frac{\delta_1}{\delta_2}, \quad (2.122)$$

где  $K_3$  – коэффициент, характеризующий размеры рабочей части полюсных наконечников;

$\delta_1$  – зазор между дном паза и полюсным наконечником, мм;

$\delta_2$  – зазор между боковой поверхностью паза и полюсным наконечником, мм.

Коэффициент  $K_1$  связан только с геометрическими размерами обрабатываемой поверхности и позволяет определить целесообразность проведения МАО. Коэффициент  $K_2$  связывает размеры обрабатываемой поверхности с требованиями процесса обработки и геометрии полюсных наконечников. При  $K_1 > 0,8$  использование МАО неэффективно, а при  $K_2 < 1$  и малой ширине паза  $L$  использование МАО становится невозможным для изделий из ферромагнитных материалов. Коэффициент  $K_3$  является расчетным и применяется для предварительного определения размеров рабочей части полюсных наконечников для выравнивания съема с боковых поверхностей и дна впадин. Величины рабочих зазоров ( $\delta_1$  и  $\delta_2$ ) рассчитываются исходя из требований, предъявляемых к обрабатываемой поверхности, магнитных свойств изделия и параметров обработки. Данный коэффициент, как правило, находится в пределах 0,25–2,5.

Лучшие результаты показывает схема, представленная на рисунке 2.20 б, где инструмент формируется на периферии полюсных наконечников, эпюра съема в этом случае меняется. При обработке широких пазов ( $L > 8$  мм,  $K_1 < 0,3$ ) съем материала на дне паза составляет 20–25 мкм, шероховатость  $Ra_2 = 0,1–0,25$  мкм. Однако, при обработке более узких пазов при этом же значении  $K_1$  картина съема резко меняется и более интенсивно обрабатываются края и боковые поверхности пазов. Съем на кромках пазов достигает 100–120 мкм и уменьшается ближе ко дну, а уже при  $K_1 = 0,5$  дно паза не обрабатывается. Аналогичная картина наблюдается при обработке по этой схеме и плоских поверхностей с пазами. Такая схема позволяет более качественно производить обработку стружечных канавок металлорежущего инструмента, однако, она уступает по производительности ранее рассмотренным схемам и не всегда удобна для обработки остальной части поверхности.

Использование схемы, приведенной на рисунке 2.20 г, для обработки плоских поверхностей с пазами глубиной до 3 мм более эффективно, чем использование предыдущей схемы. На рисунке 2.20 в представлена расчетная схема с эпюрой съема без применения реверсивного движения при обработке коротких поверхностей с пазами. В этом случае эпюра съема аналогичны получаемыми при обработке цилиндрических поверхностей по первым двум схемам. При  $K_2 < 0,5$  дно паза обрабатывается не полностью даже при использовании возвратно-поступательного и реверсивного движений. Таким образом, при

обработке плоских поверхностей с элементами впадин или пазов применение MAO эффективно к поверхностям с геометрическим коэффициентом  $K_1 < 0,19$ .

Таблица 2.1 - Зависимость обрабатываемой площади дна паза от его геометрических характеристик и режимов MAO

Параметры						
Коэффициент $K_1$	0,10	0,12	0,15	0,20		
Магнитная индукция $B, T$		0,6	0,7			0,9
Скорость $V, м/с$		1,5	1,2			2,5
Коэффициент $K_2$	0,65		0,55	0,7		0,45

В таблице 2.1 приведены данные, по которым можно судить о возможностях использования рассматриваемых схем, и основные режимы для MAO.

Применение данных схем возможно только при  $K_2 > 0,5$ . Таким образом, можно подобрать оптимальные режимы и при наличии реверсивного движения осуществить обработку всей поверхности.

Метод MAO может применяться как финишная операция обработки прерывистых поверхностей в том случае, когда не предъявляются дополнительные требования к геометрической точности пазов и их кромок. Приведенные данные позволяют без дополнительной экспериментальной проверки принять решение по вопросу схемы и определения целесообразности использования MAO деталей, на поверхности которых требуется полирование пазов и впадин. В таблице 2.1 приведены режимы MAO в зависимости от коэффициентов геометрической формы  $K_1$  и перекрытия  $K_2$ .

#### 2.4 Профилирование криволинейных поверхностей при магнитно-абразивной обработке

Пуансон (фр. poinçon) – основная деталь инструмента для пластического деформирования, используемого при маркировке, штамповке изделий в металлообработке. В зависимости от их типа и назначения они являются просечными, вырубными, прошивными и т.д. В процессе работы они подвергаются воздействию высоких напряжений и давлений и поэтому изготавливаются из высокопрочных сталей повышенной прокаливаемости или износостойчивых с повышенной прочностью.

В процессе пробивки отверстий на фаски пуансона действуют сила реакции материала и сила трения, что при скоростном многоцикловом нагружении изменяет геометрию фасок, осуществляет затупление

режущей кроки, приводит к снижению точности размеров отверстий. Варианты повышения стойкости пуансонов заключаются в создании сложной системы геометрии их рабочей части, а именно формы фасок и углов между ними или введении в комплекс оборудования штанцевых форм, биговальных линейек и другой технологической оснастки для обеспечения упругого прогиба с целью образования будущего отверстия. Однако подобная схема является недостаточно эффективной по причине большого количества в нее входящих компонентов и часто приводит к нарушению и сбоям технологического процесса.

Повышение стойкости пуансонов в основном зависит от качества их рабочих поверхностей и, например, установлено, что направление штрихов на этих поверхностях оставленных режущим инструментом при финишной обработке должно быть параллельно течению или движению материала штампуемой детали. Поперечные риски задерживают течение металла, увеличивается трение и появляется необходимость в дополнительном усилии для их преодоления. Также подобные риски приводят к образованию на вертикальных стенках вытягиваемой детали рисок, ухудшающих внешний вид детали. Следовательно, правильное и стабильное сопряжение трущихся поверхностей во многом зависит от шероховатости рабочих поверхностей пуансонов и согласно ГОСТ 16675-80 их режущие кромки должны быть острыми, завал кромок и выкрашивание не допускается, а шероховатость рабочих поверхностей составляет  $Ra < 0,4$  мкм при твердости 55...59 HRCэ.

Для финишной обработки пуансонов чаще всего используется полирование, однако этот способ характеризуется высокой долей ручного труда и вследствие этого резко отличными друг от друга результатами. Одним из видов такой обработки является магнитно-абразивная обработка. Основное достоинство МАО заключается в возможности нивелирования режущего контура инструмента относительно профиля обрабатываемой детали, однако эффективность абразивной способности ферроабразивной «щетки» проявляется на уровне длины цепочек частиц ферроабразивного порошка (ФАП) от 3 до 10 мм. Это требует в ряде случаев для интенсивной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей машин создания такого контура полюсных наконечников электромагнитной системы (ЭМС), который имеет эквидистантное по отношению к детали или приближенное к нему положение. Проблема распределения электромагнитного поля (ЭМП) в рабочем зазоре часто решается использованием метода сеток или интуитивным способом, требующим высокой квалификации специалистов. Однако грамотное конструктивное решение, полученное аналитическим или графическим способом, обеспечивает однородность ферроабразивной «щетки» и градиента магнитной индукции в зоне обработки, что гарантирует

отсутствие разницы давления ФАП на различных участках обрабатываемой детали. Поэтому с целью повышения производительности и качества обработки пуансонов для глубокой вытяжки металла следует обеспечить наибольшую конформность, т.е. полноту прилегания поверхности инструмента к поверхности детали в области их контакта и произвести переход от интуитивного понимания топографии ЭМП к ее объемному и однозначному восприятию, имеющему алгебраическое выражение. Основная задача заключается в задании вида обрабатываемой поверхности пуансонов, которые представляются как неявные функции  $F(x,y) = 0$ , явные функции  $y = f(x)$  или  $p = f(\phi)$ , в параметрическом виде  $x = x(t)$ ,  $y = y(t)$  или  $p = p(t)$ ,  $\phi = \phi(t)$  и таблицами значений. Для многих поверхностей получение непрерывных аналитических описаний по целому ряду причин в условиях производства является не всегда возможным решением и поэтому геометрическая информация сопряжена не с функциональным, а дискретным характером распределения совокупности точек, принадлежащих этой поверхности. Поэтому для правильного формообразования профиля полюсного наконечника и получения вследствие того необходимой производительности и качества обработки требуется обеспечить условие максимально полного контакта материальных носителей формы как пуансона, так и ферроабразивной «щетки», ориентированной соответствующим контуром полюсного наконечника.

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 ( $B = 0,7...0,8$  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  $\alpha$  относительно  $O_b$  (рисунок 2.21).

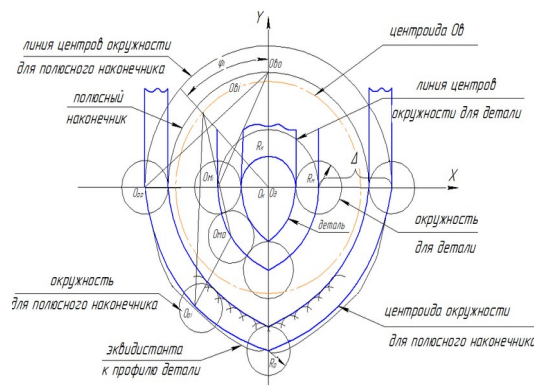


Рисунок 2.21 - Схема для определения профиля полюсного наконечника



Расчет профиля полюсного наконечника осуществляется адекватно способу задания профиля обрабатываемой поверхности детали и используя одну из систем уравнений (2.67), находится траектория центров инструмента  $O_u (x_u, y_u)$  и далее рассчитываются координаты относительного расположения центра вращения  $O_v (x_v, y_v)$  при заданном положении  $O_u$ .

Положение  $O_v$  определяется как точка пересечения окружности радиуса  $R_k$  с центром в  $O_0 (x_0, y_0)$  с окружностью радиуса  $b$  с центром в  $O_u (x_u, y_u)$ .

Находится траектория центров окружности для детали:

$$Y_u = y_o \pm \frac{R_u \cdot x'_o}{\sqrt{1 + (y'_o)^2}} \quad (2.123)$$

Рассчитываются, аналогично координаты линии центров окружности для полюсного наконечника  $O_n (x_n, y_n)$ :

$$x_n = x_u \pm V \cos y = x_u \left(1 \pm \frac{V}{\sqrt{x_u^2 + y_u^2}}\right), \quad (2.124)$$

$$y_n = y_u \pm V \sin y = y_u \left(1 \pm \frac{V}{\sqrt{x_u^2 + y_u^2}}\right),$$

Вычисляются координаты профиля полюсного наконечника:

$$X_k = x_n \pm \frac{R_n \cdot y'_n}{\sqrt{(x'_n)^2 + (y'_n)^2}}, \quad (2.125)$$

$$Y_k = y_n \pm \frac{R_n \cdot x'_n}{\sqrt{(x'_n)^2 + (y'_n)^2}},$$

где:

$$x'_n = x'_u \left(1 \pm \frac{V}{\sqrt{x_u^2 + y_u^2}}\right) \pm \frac{x_u (x_u \cdot x'_u + y_u \cdot y'_u) V}{(x_u^2 + y_u^2)^{3/2}}, \quad (2.126)$$

$$y'_n = y'_u \left(1 \pm \frac{V}{\sqrt{x_u^2 + y_u^2}}\right) \pm \frac{y_u (x_u \cdot x'_u + y_u \cdot y'_u) V}{(x_u^2 + y_u^2)^{3/2}},$$

и где, в свою очередь,

$$y'_u = y'_\partial \pm \frac{R_u \cdot y'_\partial \cdot y''_\partial}{[1 + (y'_\partial)^2]^{3/2}} \quad (2.127)$$

В зависимостях (2.71):

$$y''_\partial = \left[ \frac{\partial^2 F}{\partial X^2} \left( \frac{\partial F}{\partial Y} \right) - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial X \partial Y} \cdot \frac{\partial F}{\partial X} \cdot \frac{\partial F}{\partial Y} + \frac{\partial^2 F}{\partial Y^2} \left( \frac{\partial F}{\partial X} \right)^2 \right] / \left( \frac{\partial F}{\partial Y} \right)^3$$

При задании профиля детали в виде  $F(x_\partial, y_\partial) = 0$

при задании профиля детали в виде

Решая совместно уравнения:

$$x_b^2 + y_b^2 = R_k^2, \quad (2.128)$$

получаем:

$$x_b = \frac{B_1 - y_u y_b}{x_u} \quad (2.129)$$

где:

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

$$B_2 = R_k^2 x_u^2 - B_1^2 \quad (2.130)$$

$$B_3 = x_u^2 + y_u^2$$

$$y'_u = y'_\partial \pm \frac{R_u \left[ x''_\partial (y'_\partial)^2 - x'_\partial y'_\partial y''_\partial \right]}{[(x'_\partial)^2 + (y'_\partial)^2]^{3/2}}$$

В приведенных зависимостях значения  $x'_u$  и  $y'_u$  вычисляются согласно (2.127), а для вычисления  $x'_\partial$  и  $y'_\partial$  используются зависимости, приведенные ниже.

$$x'_\partial = \left( \frac{B_1 - y_u y_\partial}{x_u} \right)' = \frac{(B_1' - y'_u y_\partial - y_u y'_\partial) x_u - B_1 x'_u + y_u y_\partial x'_u}{x_u^2}$$

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

$$= \frac{1}{B_3^2} \left[ \left( B_1' y_u + B_1 y'_u + \frac{2B_1 B_1' y_u^2 + 2B_1^2 y_u y'_u + B_3' B_2 + B_3 B_3'}{2\sqrt{B_1^2 y_u^2 + B_2 B_3}} \right) \cdot B_3 - B_1 B_3' y_u \mp B_3' \sqrt{B_1^2 y_u^2 + B_2 B_3} \right], \quad (2.131)$$

где:

$$\begin{aligned}
 B_1' &= x_u x_u' + y_u y_u' \\
 B_2' &= 2R_k^2 x_u x_u' - 2B_1 B_1' \\
 B_3' &= 2B_1'
 \end{aligned}
 \quad (2.132)$$

Эквидистатный профиль полюсных наконечников определяется в конечном итоге как огибающая окружности радиуса  $R_s = R_u \dots R_n$ , центр которой  $(x_d, y_d)$  движется по профилю детали. Графическое построение профиля полюсного наконечника представлено на рисунке 2.21, в результате чего достигаемая шероховатость составила диапазон  $Ra\ 0,1 \dots 0,2$  мкм (рисунок 2.22). В результате произведенного расчета на основе задания обрабатываемой поверхности явных и неявных функций разработаны и созданы полюсные наконечники для ЭМС станка МАРС-15 для МАО пуансонов глубокой вытяжки, при использовании которых произведена обработка вышеуказанных пуансонов, (Рисунок 2.23).

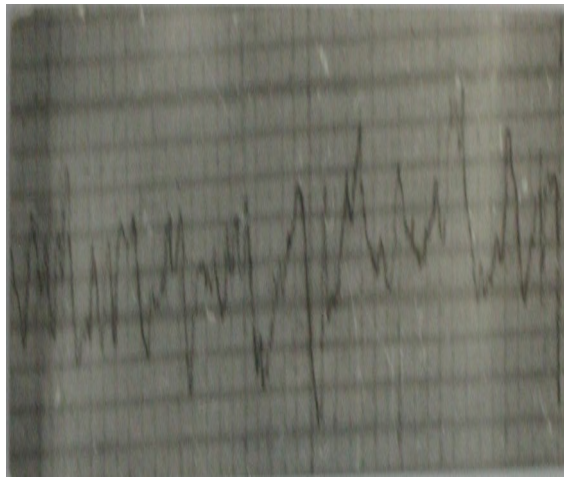


Рисунок 2.22 - Профилограмма шероховатости пуансонов глубокой вытяжки после МАО

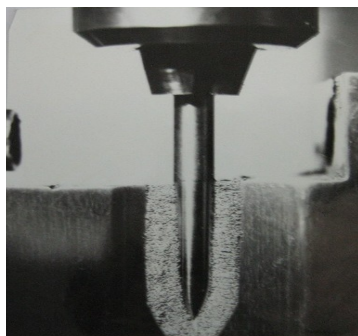


Рисунок 2.23 - Фотография пуансона в зоне обработки

Параметры и режимы МАО: величина магнитной индукции  $B = 0,65 \dots 0,85$  Тл; скорость резания,  $v_p = 1,5 \dots 2,5$  м/с; частота подачи ротора,  $n = 0,5$  об/мин; амплитуда осцилляции  $A = 1,5 \dots 2,5$  мм, величина

рабочего зазора  $\delta = 2,5$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора,  $K_z = 1$ , время обработки,  $t = 30 \dots 90$  с.

В качестве ФАП использовался Fe-TiC ТУ 88-147.002-75, смазочно-охлаждающие технологические средства СинМА – 1 ТУ 38.5901176 – 91,5 % водный раствор, шероховатость пуансонов до обработки составляла  $Ra$  1,2...1,6 мкм. Материал – Х12 ГОСТ 5950-2000 твердость 55...58 НРСэ. Массовый съем материала определяется взвешиванием пуансонов на весах аналитических ВЛА – 1 с точностью до 0,001 г. Изменение шероховатости поверхности пуансонов до и после обработки производилось на профилографе – профилометре мод. «252-Калибр».

На рисунке 2.24 представлены исследования величины съема материала пуансонов от времени обработки, а на рисунке 2.25 и на рисунке 2.26 соответственно величины шероховатости поверхности также от времени отработки и шероховатости поверхности от скорости пуансона.

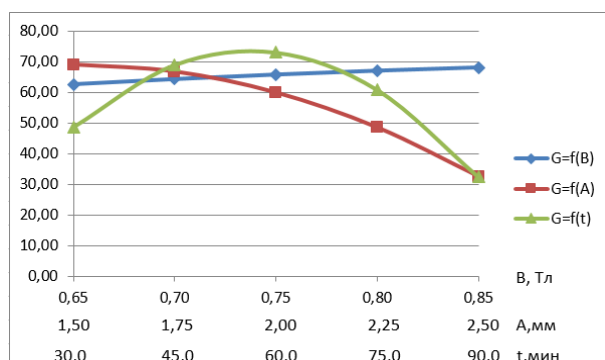


Рисунок 2.24 - Зависимость величины съема материала (G) пуансонов от времени обработки (t)

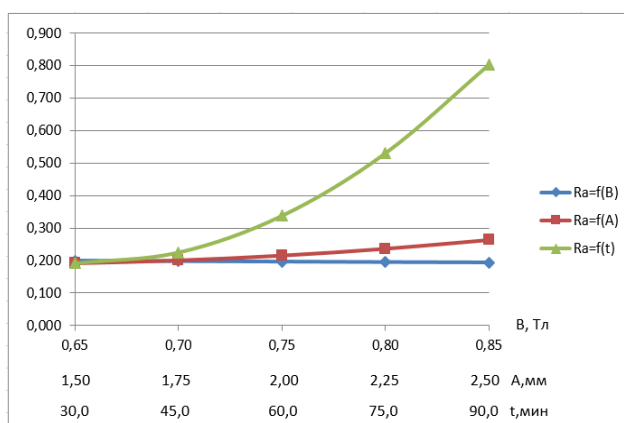


Рисунок 2.25 - Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности (Ra) от времени отработки

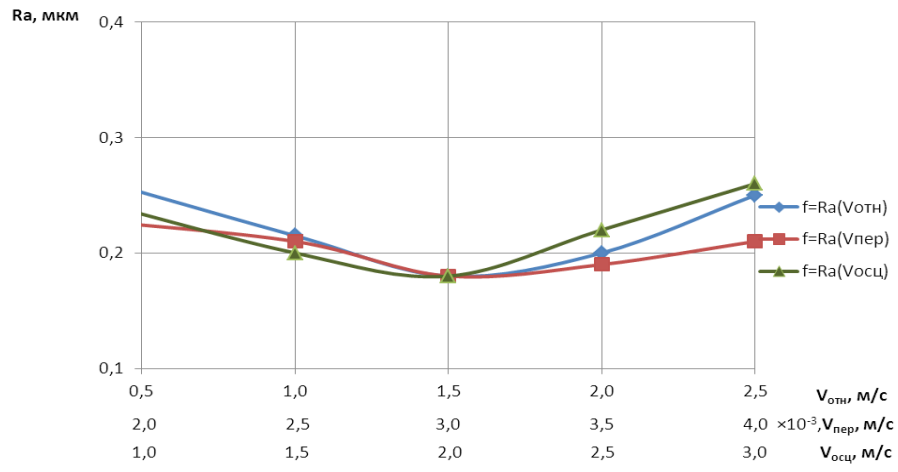


Рисунок 2.26 - Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности ( $Ra$ ) от относительной ( $V_{отн}$ ), переносной ( $V_{пер}$ ) и осциллирующей ( $V_{осц}$ ) скоростей пуансона

Анализ данных таблицы графиков, изображенных на рисунках 2.38...2.40 показывает, что применение следующего параметра и режима МАО:  $B = 0,7$  Тл; скорость резания,  $v_p = 1,5$  м/с; частота подачи ротора,  $n = 0,5$  об/мин; амплитуда осцилляции  $A = 2$  мм, величина рабочего зазора  $\delta = 2,5$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора,  $K_3 = 1$ , время обработки,  $t = 60$  с, обеспечивает получение наилучших показателей шероховатости и съема материала пуансона.

### **3. ФЕРРОАБРАЗИВНЫЕ ПОРОШКИ ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

Одной из наиболее важных характеристик ферроабразивных порошков является их режущая способность. В работах [61], а позже в [62] рассмотрена методика ее определения как совокупность показателей: удельного съема материала за единицу времени – характеристика абразивной способности, показателя степени сохранения абразивной способности во времени и достигаемой шероховатости поверхности. Такой подход дает достаточно полную характеристику ФАП и помогает при выборе порошка.

Выбор типа порошка для обработки конкретной поверхности сопряжен с определенными трудностями. Это связано с тем, что практически не проводились сравнительные исследования работоспособности разных порошков при обработке различных материалах, учитывающей также и схему обработки.

Для эффективной МАО сложнопрофильных изделий, состоящих из материалов с различными физико-механическими и магнитными свойствами, требуется ферроабразивный порошок, способный обработать все элементы поверхностей сложного профиля за один переход. В связи с этим необходимо при выборе ФАП обеспечить наличие компонентов, гарантирующих качественную обработку каждого элемента сложнопрофильной поверхности детали.

#### **3.1 Виды ферроабразивных порошков и способы их изготовления**

В современном машиностроении установилась тенденция использования малоотходных процессов формообразования деталей машин (точное литье, зубонакатывание, точная штамповка и т. п.). Одновременно растет доля отделочных операций (шлифование, полирование, доводка). Эффективность МАО зависит от формы частиц ФАП, их гранулометрического состава, химической активности к обрабатываемому материалу, микротвердости абразивной составляющей, а также от технологичности изготовления и стоимости ФАП. Выбор материала, обеспечивающего требования по магнитным свойствам, не представляет особых трудностей. Наиболее высокую индукцию насыщения имеет сплав Fe-Co (40 % Co), но в связи с его высокой стоимостью предпочтение отдается железу.

Первоначально в качестве ФАП были опробованы однородные материалы (ферриты, альсифер, альперм и т. д.). Однако появление порошков композиционного типа показало их преимущество над однородными по режущим и магнитным свойствам.

Способы изготовления определяет структуру, свойства и область применения ФАП. Согласно этому, существуют следующие группы ФАП: механические смеси, керметы, литые порошки и диспергирование струи.

Механические смеси порошки, состоящие 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).

Диспергирование струи расплава осуществляется газом высокого давления (азотом или воздухом) или скоростным потоком воды. Использование азота или другого инертного газа приводит к получению округлых частиц с неокисленной поверхностью, применение воздуха или воды – к образованию частиц неправильной формы с наличием оксидной пленки, являющейся абразивным компонентом ФАП. Недостатками данного способа являются широкий разброс частиц ФАП по зернистости и низкий выход рабочих фракций (рисунок 3.1, а).

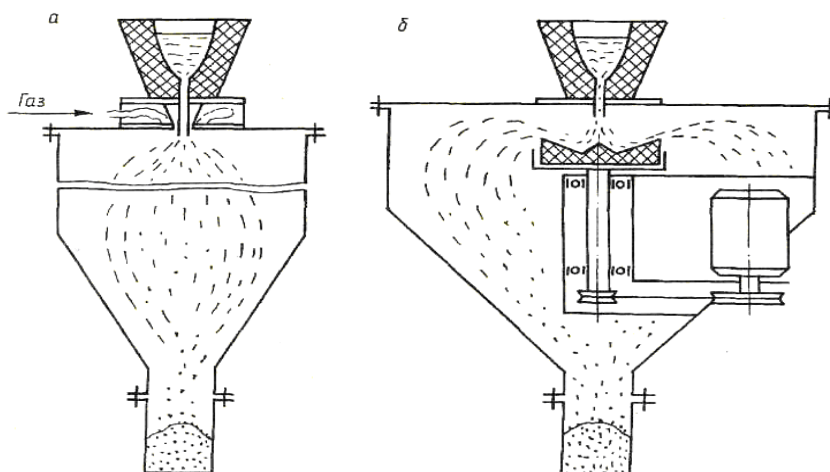


Рисунок 3.1 - Принципиальная схема установки для распыления расплава: а – магнитно-абразивных материалов газом; б – вращающимся диском

Наиболее перспективным методом изготовления литых порошков является диспергирование расплава вращающимся диском из огнеупорного материала (рисунок 3.1, б). Так можно получить однородную по крупности порошковую массу, форма частиц которой определяется конструкцией экранов установки распыления и расстоянием между экранами и распыляющим диском.

Если пользоваться классификацией по структуре ФАП 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 IIа, IIб), которые отличаются способом изготовления. Порошки типа IIа 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. 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, должна совмещать преимущества структур II и III типов и в то же время не иметь их недостатков.

Порошки III и IV типа получают прокаткой смеси железного порошка и абразива в валках, обкатыванием железного порошка в смеси железа и абразива или методами внутреннего азотирования или цементации порошков сплава железа из нитридо- и карбидо-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.

Классификация специальных порошков для МАО по способу получения позволяет выделить два класса: так называемые керметные и литые ФАП. К керметным порошкам относят гетерогенные композиции на ферромагнитной основе с одной или несколькими керамическими фазами и малой растворимостью фаз. По керметной технологии можно получить порошки со структурой II, III и IV типов. К преимуществам данных порошков можно отнести возможность применения сравнительно широкой гаммы абразивных материалов. К литым порошкам относят порошки, полученные распылением или грануляцией из расплава. Они имеют, преимущественно, структуру II типа (из приведенной выше классификации). К преимуществам литых порошков для МАО можно отнести простоту технологического процесса получения, возможность варьирования абразивной составляющей и сравнительно простого управления размером абразивных включений.

### **3.2 Структура ферроабразивных порошков**

По виду и характеру расположения абразивных компонентов в структуре отдельных порошковых частиц ФАП предложена классификация (рисунок 3.2). Общим недостатком ФАП со структурами I...IV типов является трение материала ферромагнитной матрицы о полируемую поверхность, что недопустимо при обработке химически активных материалов. Структура V типа характеризуется наличием сплошной плотной пленки абразивного компонента на

ферромагнитном зерне. Такой тип структуры можно получить, например, борированием железного порошка.

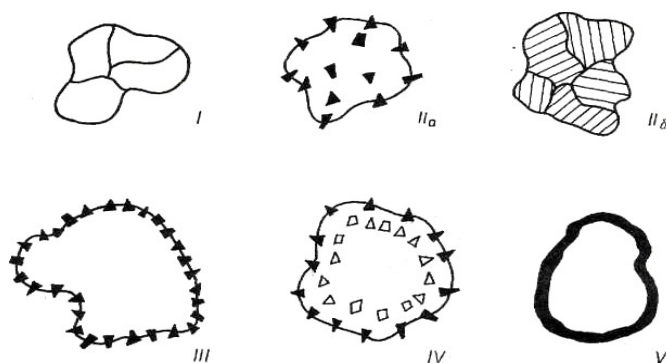


Рисунок 3.2 - Классификация структур ФАП

Одной из важнейших характеристик структуры ФАП является стойкость, которая зависит от магнитных и механических свойств и условий полирования. Следует отметить, что на стойкость ФАП влияет химическая активность абразивного компонента к обрабатываемому материалу. Реакционная способность к железу тугоплавких соединений по степени уменьшения может быть представлена следующим образом:



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.

Например, проведенный анализ показывает, что при совместном нагревания смесей Fe + C + Ti конечными продуктами химического взаимодействия являются карбиды титана и железа. Присутствие железа в процессе синтеза не препятствует образованию карбидов титана в температурном интервале 1400...1600 °C.

Образование карбидов титана характеризуется высоким содержанием связанного углерода, что резко снижает потемнение поверхностного слоя бронзы.

Повышение температуры приводит к уменьшению содержания карбидов титана в композиции по причине роста растворения и химического взаимодействия.

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 (рисунок 3.3).

В системе Fe + C + Ti на нетравленных шлифах видны (рисунок 3.3) 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 глобулей зависит от концентрации карбидной фазы в композиции. Увеличение концентрации карбида приводит к росту размера его зерна. Округление глобулей обусловлено ограниченностью растворения карбидов титана в железе и стремлению любой системы принять форму, связанную с минимумом энергозатрат.

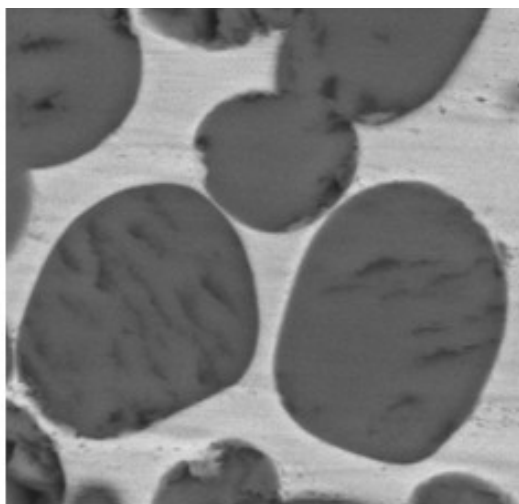


Рисунок 3.3 - Микроструктура порошка системы Fe + C + Ti (x200)

Магнитная проницаемость ферроабразивных порошков

Основными свойствами ФАП являются: магнитные и абразивные свойства, микротвердость, гранулометрический состав, размер и морфология частиц, химическая инертность, склонность к агломерации, технологичность изготовления и себестоимость.

Наиболее существенной характеристикой магнитных свойств является магнитная проницаемость.

Магнитная проницаемость, физическая величина, характеризующая изменение магнитной индукции  $B$  среды под воздействием магнитного поля напряженностью  $H$ .

В случае однородной изотропной среды магнитная проницаемость  $\mu$ :  $\mu = B/(\mu_0 H)$ , где  $\mu_0$  - магнитная постоянная.

В анизотропных кристаллах магнитная проницаемость - тензор.

Магнитная проницаемость ферромагнетиков сложным образом зависит от Н. Эти параметры определяются баллистическим способом на установке модели БУ-3А.

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 мас. % свойственна повышенная микротвердость – 3600...5800 МПа. Однако поскольку налажено производство железокремниевых сплавов с содержанием кремния 15...20 %, то существует возможность в проведении исследований по созданию порошка (Fe-Si)-TiC – двумя способами. Сущность первого заключается (Fe-Si (6,5 %), размер частиц 250/63 мкм) в смешивании его 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.

Таблица 3.1 - Абразивные и магнитные свойства различных материалов для МАО

Материал	Съем металла в результате МАО	Шероховатость поверхности после МАО, мкм	Магнитная проницаемость при 60.000 А/м, 10 <sup>-3</sup> Г/м
	10 <sup>-3</sup> г		
(10%)	71	0,40	4,4
(15%)	54	0,35	5,4
(первый способ изготовления)	328	0,071	9,21
(второй способ изготовления)	117	0,095	5,5

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 3.1. 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.

Кермет МАМ40 представляет собой частицы композиционного материала на основе железа (80 масс, %) и электрокорунда ЭБМ40 (20 масс, %). Материал получает смешиванием порошков железа и

электрокорунда в соответствующем массовом соотношении прессованием смеси в брикеты, спеканием брикетов с последующим их измельчением. Кермет МАМ40 обладает существенным недостатком – невысокой прочностью соединения ферромагнитной и абразивной составляющей в частицах порошка кермета. Это объясняется тем, что железо и окись алюминия практически не растворимы друг в друге и имеет место низкая смачиваемость частиц  $Al_2O_3$  железом. Поэтому наблюдается разделение частиц электрокорунда и частиц железа при измельчении спеков в процессе эксплуатации порошка.

Результаты испытаний абразивных и магнитных свойств материалов представлены в таблице 3.2.

Недостаточная прочность соединения ферромагнитной и абразивной составляющей зерен кермета, относительно невысокая микротвердость создают затруднения в улучшении его магнитных свойств. Этим продиктовано стремление получить магнитно-абразивные материалы, свободные от перечисленных недостатков и обладающие повышенной абразивной способностью.

Таблица 3.2 - Абразивные и магнитные свойства различных материалов для МАО

Обозначение Магнитно-абразивного материала. Структурная формула.		АМ40 $Fe-Al_2O_3$	Ж-15КТ Fe-TiC
Исходный материал ферромагнитной составляющей		ПЖВ2 ГОСТ 9849-86	
Абразивная составляющая материала		Шлиф порошок ЭБМ40 ГОСТ 9618-84	Порошок карбида титана ТУ 06173- 74
Количество абразивной составляющей, весов, %		20	15
Гранулометрический состав материалов, мкм		250/63	250/63
Абразивная способность (при МАП образцов из ШХ15, НРС 58-62	Съем метала в результате МАП $\Delta G \cdot 10^2 г$	173	257
	Шероховатость поверхности после МАП, $R_a$ , мкм	0.098	0,064
Магнитная проницаемость (при $H = 86200$ А./м) мкГ/м		6,6	7,3
Основные технологическ ие параметры технологическ ого процесса изготовления	Удельное давление прессования, МПа	150-250	150-250
	Температура спекания, °С	1200	1300
	Длительность	0,5	0,5

	операции спекания, час		
--	---------------------------	--	--

Перспективными материалами для МАП являются порошки, которые в качестве абразивной составляющей содержат частицы карбидов и боридов переходных металлов IV-VI групп. Были приготовлены порошки на основе железа и тугоплавких соединений TiC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>, ZrC, WC полученные смешиванием исходных компонентов в соответствующем весовом соотношении, прессованием брикетов под давлением 400-600 МПа, спеканием полученных брикетов при температурах 1100...1300 °С в течение 0,5...1 часа в среде водорода с последующим измельчением спеков в щековой и шаровой мельницах.

Из всех материалов, представленных в таблице 3.3, лучшие абразивные и магнитные свойства имеет порошок Fe-TiC.

Таблица 3.3 - Абразивные и магнитные свойства порошков композиционных материалов

Материал	Количество абразивной составляющей масс. %	Шероховатость поверхности образцов после MAO	Съем металла в результате MAO г	Магнитная проницаемость (H = 70000 А/м), мкГ/м
		Ra <sub>2</sub> , мкм		
Fe+TiC	10	0.09	149	6,31
	20	0.079	189	6,11
	30	0.087	160	5,79
Fe+WC	20	0.118	62	6,3
Fe+Zr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	10	0.078	96	6,43
	20	0.331	83	6,38
	30	0.238	87	6,23
Fe+Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	20	0.247	77	5,29
	30	0.141	92	5,23
Fe+W <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	10	0.412	33	6,19
	20	0.377	42	6,11
	30	0.461	68	6,04

Режущие свойства структурированного инструмента. Проведенный анализ показывает, что в настоящее время отсутствует универсальный метод обработки сложнопровильных поверхностей, позволяющий резко повысить производительность и качество процесса.

Одним из способов решения данной технологической задачи является MAO. Этот процесс включает ряд компонентов: станок, режущий инструмент, (СОТС), магнитное поле. В частности о режущем инструменте сложилось представление только как о порошкообразной ферроабразивной «щетке», создаваемой энергией магнитного поля, однако определение закономерностей формирования физико-механических свойств поверхности обрабатываемых деталей из ферро-, пара- и диамагнитных материалов и их геометрических характеристик при воздействии различных режущих сред позволило создать новые

классы инструментов. В работе представлена схема взаимодействия обрабатываемого изделия с механической щеткой в магнитном поле, где указывается, что волокна этой щетки контактируют только в точке или дуге небольшой протяженности. Это существенно повышает давление в рабочей зоне и приводит к росту съема материала. Кроме того, реализуется возможность обработки сложнопрофильных деталей путем применения одной технологической операции.

### 3.3 Магнитная проницаемость ферроабразивных порошков

Основными свойствами ФАП являются: магнитные и абразивные свойства, микротвердость, гранулометрический состав, размер и морфология частиц, химическая инертность, склонность к агломерации, технологичность изготовления и себестоимость.

Наиболее существенной характеристикой магнитных свойств является магнитная проницаемость [63].

Магнитная проницаемость, физическая величина, характеризующая изменение магнитной индукции  $B$  среды под воздействием магнитного поля напряженностью  $H$ .

В случае однородной изотропной среды магнитная проницаемость  $\mu:\mu = B/(\mu_0 H)$ , где  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

В анизотропных кристаллах магнитная проницаемость — тензор. Магнитная проницаемость ферромагнетиков сложным образом зависит от  $H$ . Эти параметры определяются баллистическим способом на установке модели БУ-3А.

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 мас. % свойственна повышенная микротвердость — 3600...5800 МПа. Однако поскольку налажено производство железокремниевых сплавов с содержанием кремния 15...20 %, то существует возможность в проведении исследований по созданию порошка (Fe-Si)-TiC — двумя способами.

Сущность первого заключается (Fe-Si (6,5 %), размер частиц 250/63 мкм) в смешивании его 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 3.4.

Таблица 3.4 - Абразивные и магнитные свойства различных материалов для МАО

Материал	Съем металла в результате МАО $10^{-3}г$	Шероховатость поверхности после МАО, мкм	Магнитная проницаемость при 60.000 А/м, $10^{-3} Г/м$
(10%)	71	0,40	4,4
(15%)	54	0,35	5,4
(первый способ изготовления)	328	0,071	9,21
(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.

Кермет МАМ 40 представляет собой частицы композиционного материала на основе железа (80 масс, %) и электрокорунда ЭБМ40 (20 масс, %). Материал получается смешиванием порошков железа и электрокорунда в соответствующем массовом соотношении прессованием смеси в брикеты, спеканием брикетов с последующим их измельчением. Кермет МАМ40 обладает существенным недостатком – невысокой прочностью соединения ферромагнитной и абразивной составляющей в частицах порошка кермета. Это объясняется тем, что железо и окись алюминия практически не растворимы друг в друге и имеет место низкая смачиваемость частиц  $Al_2O_3$  железом. Поэтому наблюдается разделение частиц электрокорунда и частиц железа при измельчении спеков в процессе эксплуатации порошка.

Результаты испытаний абразивных и магнитных свойств материалов представлены в таблице 3.5.

Недостаточная прочность соединения ферромагнитной и абразивной составляющей зерен кермета, относительно невысокая микротвердость создают затруднения в улучшении его магнитных свойств. Этим продиктовано стремление получить магнитно-абразивные материалы, свободные от перечисленных недостатков и обладающие повышенной абразивной способностью.

Перспективными материалами для МАП являются порошки, которые в качестве абразивной составляющей содержат частицы



карбидов и боридов переходных металлов IV-VI групп. Были приготовлены порошки на основе железа и тугоплавких соединений TiC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>, ZrC, WC полученные смешиванием исходных компонентов в соответствующем весовом соотношении, прессованием брикетов под давлением 400-600 МПа, спеканием полученных брикетов при температурах 1100...1300 °С в течение 0,5...1 часа в среде водорода с последующим измельчением спеков в щековой и шаровой мельницах.

Таблица 3.5 - Абразивные и магнитные свойства различных материалов для MAO

Обозначение магнитно-абразивного материала.		МAM40	Ж-15КТ
Структурная формула.		Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe-TiC
Исходный материал ферромагнитной составляющей		ПЖВ2 ГОСТ 9849-86	
Абразивная составляющая материала		Шлиф порошок ЭБМ40 ГОСТ 9618-84	Порошок карбида титана ТУ 06173-74
Количество абразивной составляющей, весов, %		20	15
Гранулометрический состав материалов, мкм		250/63	250/63
Абразивная способность (при МАП образцов из ШХ15, НРС 58-62)	Съем метала в результате МАП $\Delta G \cdot 10^2$ г	173	257
	Шероховатость поверхности после МАП, R <sub>a</sub> , мкм	0.098	0,064
Магнитная проницаемость (при H = 86200 А./м) мкГ/м		6,6	7,3
Основные технологические параметры технологического процесса изготовления	Удельное давление прессования, МПа	150-250	150-250
	Температура спекания, °С	1200	1300
	Длительность операции спекания, час	0,5	0,5

Из всех материалов, представленных в таблице 3.6, лучшие абразивные и магнитные свойства имеет порошок Fe-TiC .

Таблица 3.6 - Абразивные и магнитные свойства порошков композиционных материалов

Материал	Количество абразивной составляющей масс. %	Шероховатость поверхности образцов после MAO	Съем метала в результате MAO г	Магнитная проницаемость (H = 70000 А/м), мкГ/м
----------	--	--	--------------------------------	--

		Ra <sub>2</sub> , мкм		
Fe+TiC	10	0.09	149	6,31
	20	0.079	189	6,11
	30	0.087	160	5,79
Fe+WC	20	0.118	62	6,3
Fe+Zr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	10	0.078	96	6,43
	20	0.331	83	6,38
	30	0.238	87	6,23
Fe+Cч <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	20	0.247	77	5,29
	30	0.141	92	5,23
Fe+W <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	10	0.412	33	6,19
	20	0.377	42	6,11
	30	0.461	68	6,04

### 3.4 Режущие свойства структурированного инструмента

Проведенный анализ показывает, что в настоящее время отсутствует универсальный метод обработки сложнопрофильных поверхностей, позволяющий резко повысить производительность и качество процесса.

Одним из способов решения данной технологической задачи является MAO. Этот процесс включает ряд компонентов: станок, режущий инструмент, (СОТС), магнитное поле (рисунок 3.5). В частности о режущем инструменте сложилось представление только как о порошкообразной ферроабразивной «щетке», создаваемой энергией магнитного поля, однако определение закономерностей формирования физико-механических свойств поверхности обрабатываемых деталей из ферро-, пара- и диамагнитных материалов и их геометрических характеристик при воздействии различных режущих сред позволило создать новые классы инструментов. В работе [64] представлена схема взаимодействия обрабатываемого изделия с механической щеткой в магнитном поле, где указывается, что волокна этой щетки контактируют только в точке или дуге небольшой протяженности. Это существенно повышает давление в рабочей зоне и приводит к росту съема материала. Кроме того, реализуется возможность обработки сложнопрофильных деталей путем применения одной технологической операции.

#### 3.4.1 Магнитно-абразивная обработка с использованием механических щеток

Финишная обработка деталей, имеющая сложнопрофильную форму, представляет собой актуальную проблему в машиностроении. Существующие методы отделочной обработки данных поверхностей с применением жесткого абразивного инструмента требует наличия шлифовальных кругов с профилем, обладающим негативным

отображением обрабатываемой поверхности. Восстановление режущего контура изношенных кругов сопряжено с ростом трудоемкости и запыленностью помещений, приводящей к необходимости выполнения повышенных мероприятий по производственной санитарии и охране труда. Способы, основанные на применении свободного абразива типа доводки, отличаются неравномерностью съема материала. Использование ручного труда не отвечает условиям современного производства из-за своей высокой себестоимости, зависимости производительности процесса от субъективных качеств исполнителя и отсутствия стабильности результатов.

Основным недостатком эластичных кругов из войлока, фетра, текстильных материалов является невозможность использования СОТС. Это приводит к повышенному нагреву деталей и необходимости создания мер защиты по исключению образования профвредностей в данном производстве, а также у них слишком низкая стойкость. Абразивные ленты характеризуются наличием швов, которые нарушают их однородность и понижают прочность инструмента. Электрополированию присущ большой расход и необходимость оптимального по составу электролита. С вибрационной обработкой связана определенная необработанность в труднодоступных местах детали существенная разница значений физико-механических показателей поверхности.

Известен полюсный наконечник для электромагнитных систем (ЭМС), выполненный в виде собранных в пакеты ферромагнитных проволок, фиксируемых относительно друг друга для формирования рабочей зоны в соответствии с профилем обрабатываемой поверхности детали [65]. Однако концентрация ферроабразивного порошка (ФАП) осуществляется только на торце этого наконечника, что не позволяет производить обработку боковых стенок деталей и переходных радиусов за один цикл (рисунок 3.4). Другой попыткой решения данной проблемы обработки сложнопрофильных изделий является образование на рабочей поверхности полюсного наконечника различного рода рифлений. Однако по мере удаления рифлений от торца наконечника величина магнитной индукции падает. По этой причине в ходе протекания процесса МАО через некоторое время (10...15 с) концентрация ФАП на боковой поверхности резко уменьшается, а размерный и массовый съем материала – прекращается.

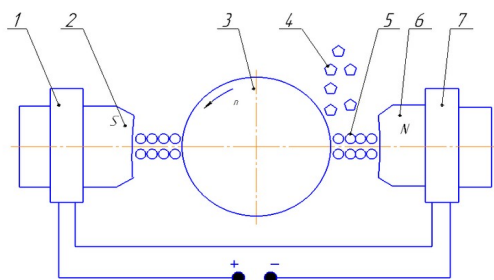


Рисунок 3.4 - Схема магнитно-абразивной обработки наружных поверхностей, где: 1 и 7 – магнитопроводы электромагнитной системы; 2 и 6 – полюса; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – подаваемый ферроабразивный порошок; 5 – цепочки ферроабразивного порошка

Реализация данного процесса осуществляется разработкой и созданием инструмента на основе механических щеток с использованием ФАП [137].

Испытания были проведены на установке ЭУ – 5. На рисунке 3.5 представлена схема обработки и общий вид полюсного наконечника, подготовленного для проведения рабочего процесса. Полюсный наконечник ЭМС состоит из шпинделя установки 1, соединенного с сердечником 2, на котором находится механическая щетка 3 с волокнами 4. В рабочий зазор между обрабатываемым изделием 5 и волокнами подается рабочая среда в виде ФАП 6 и СОТС.

Данные волокна были выполнены из проволоки диаметром 0,16; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 мм ГОСТ 3282-74 (временное сопротивление разрыву –  $\sigma_b = 300...350$  МПа). В качестве образцов использовались детали фасонного профиля (сталь 45 ГОСТ 1050-88) длиной 300 мм, исходная шероховатость поверхности  $Ra_1 = 1,2...1,4$  мкм. Режимы и параметры обработки: угловая скорость шпинделя  $V_{ш} = 50$  рад/с; магнитная индукция  $B = 1$  Т; скорость движения детали  $V_d = 0,6$  м/мин.; величина рабочего зазора  $\delta = 1$  мм; время обработки  $t = 60$  с. В качестве ФАП использовался Ж15КТ, СОТС – СинМА-1, 3 % водный раствор.

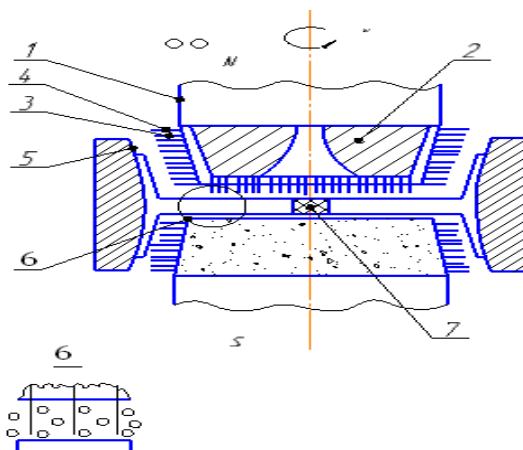


Рисунок 3.5 - Схема магнитно-абразивной обработки с применением механической щетки, где: 1 – шпиндель установки; 2 – сердечник электромагнитной системы; 3 – механическая щетка; 4 – волокна механической щетки; 5 – обрабатываемая деталь; 6 – частицы ферроабразивного порошка; 7 – прокладка

Измерение шероховатости осуществлялось в следующей последовательности: в результате подачи в рабочий зазор между обрабатываемым изделием и механической щеткой порции рабочей среды, она под воздействием магнитного поля концентрировалась на вершинах волокон 4 и между ними. Таким образом, происходит образование эластичного режущего инструмента. Шпиндель 1 установки ЭУ-5 вместе с полюсным наконечником, механической щеткой и рабочей средой приводится во вращение и осуществляется подача изделия 5. В результате этого наложения движений происходит одновременная обработка фасонной поверхности данного изделия соответствующими элементами полюсного наконечника.

Анализ полученных результатов, представленных в таблице, показывает, что существует разница в значениях достигаемых показателей шероховатости при обработке горизонтальной и вертикальной поверхности обусловлен продольным движением детали и вращением механической щетки. Данный комплекс движений приводит к созданию микрорельефа в виде сетки, представляющей собой след от резания ферро-абразивными частицами порошка.

В вертикальной плоскости контакт инструмента и детали происходит за счет продольного движения указанной выше детали и поступательного – механической щетки. В этом случае образование поверхностного слоя осуществляется по принципу работы попутного или встречного шлифования.

Таким образом, время обработки каждой точки горизонтальной поверхности является более продолжительным, чем при обработке вертикальной, что обеспечивает более интенсивный съем материала.

Следует отметить большую экологичность обработки с использованием механической щетки в сравнении с прототипом ввиду меньшего выброса элементов рабочей среды – ФАП и СОТС. Другой позитивной стороной данного процесса служит реализация декоративной обработки широкой номенклатуры изделий сложной формы, при том при наличии пазов и впадин глубиной до 3...4 мм, а также различных выступов такой же высоты.

Зависимость шероховатости поверхности от диаметра волокон механической щетки представлена на рисунке 3.6.

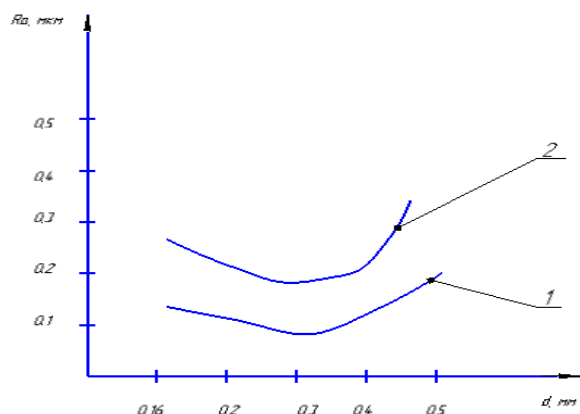


Рисунок 3.6 - Зависимость шероховатости поверхности от диаметра волокон механической щетки при расстоянии между волокнами 1,5 мкм: 1 – для горизонтальной плоскости детали; 2 – для вертикальной плоскости детали

Установлено, что оптимальным диаметром волокон механической щетки является диаметр, равный 0,3 мм. Увеличение диаметра волокон (0,4 и 0,5 мм) приводит соответственно к увеличению жесткости щетки. Уменьшение диаметра волокон (0,16 и 0,2 мм) увеличивает их податливость и понижает рабочее давление, что в свою очередь уменьшает сьем материала, табл. 3.7. Расстояние между волокнами, обеспечивающее лучшие показатели, составляет 0,5...2 мм.

Таблица 3.7 - Эффективность применения различных магнитно-абразивных устройств

Вид устройства	Диаметр волокна, мм	Расстояние между волокнами, мм	Показатель шероховатости на горизонтальной поверхности детали, Ra <sub>1</sub> , мкм	Показатель шероховатости на вертикальной поверхности детали, Ra <sub>2</sub> , мкм
Предлагаемый полюсный наконечник	0,16	0,3	0,16	0,29
		0,5	0,18	0,21
		1,5	0,12	0,28
		2	0,13	0,24
		2,5	0,16	0,33
	0,2	0,3	0,14	0,26
		0,5	0,16	0,2
		1,5	0,11	0,21
		2	0,11	0,24
		2,5	0,15	0,32
	0,3	0,3	0,12	0,25
		0,5	0,1	0,22
		1,5	0,1	0,2

		2	0,1	0,2
		2,5	0,1	0,3
	0,4	0,3	0,17	0,37
		0,5	0,15	0,27
		1,5	0,14	0,27
		2	0,16	0,27
		2,5	0,12	0,34
	0,5	0,3	0,17	0,4
		0,5	0,19	0,41
		1,5	0,2	0,37
		2	0,2	0,42
		2,5	0,22	0,4
Полусный наконечник по схеме, представленной в работе [65].			0,37	0,59

### 3.4.2 Магнитно-абразивная обработка длинномерных отверстий

Известно, что обработка внутренних поверхностей по сравнению с наружными связана с более высокой степенью трудозатрат. Одним из доказательств этого служит тот факт, что качества точности для охватываемых поверхностей (отверстий) достаточно часто рекомендуются на один ниже по сравнению с охватываемыми (валами). Это нашло свое отражение как в Международной системе стандартизации ISO, так и в соответствующих ГОСТах и других нормативных документах. К длинномерным отверстиям относятся такие, у которых отношение  $L/D > 5$ , где  $L$  – длина обрабатываемого отверстия, мм;  $D$  – диаметр, мм. Сложность обработки определяется: трудностью доставки смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) в рабочую зону; невозможностью контроля процесса резания; более низкой жесткостью абразивного инструмента; высоким тепловыделением, обусловленным замкнутостью зоны обработки и вследствие этого уменьшением скорости пространственного изменения градиента температуры.

Наиболее широко применяемыми в настоящее время методами финишной обработки такого рода отверстий являются доводка и хонингование. Однако, обладая рядом несомненных достоинств, эти методы имеют и определенные недостатки, что не позволяет говорить об их универсальности. Например, при доводке отверстий на вертикально-доводочных станках типа ОФ-26 отсутствуют автоматический разжим притира, а также компенсация его износа. Кроме того, и при нанесении

пасты, и в самом процессе доводки не обеспечивается ее равномерное распределение в верхней и нижней частях как обрабатываемого отверстия, так и инструмента. Особенно часто это отмечается при жидкой консистенции абразивной пасты, что влечет за собой разницу в съеме металла и снижение точности отверстия. Такие вопросы, как подача абразивной пасты в рабочую зону, активный контроль размера отверстия, также требуют дальнейшей доработки. Использование суспензий вместо паст приводит к снижению производительности процесса и необходимости создания сложных устройств, предотвращающих попадание суспензии в движущие части станка. Применение алмазных паст не освобождает метод от следующих недостатков: большой расход притирочных материалов (притир и паста); шаржирование обрабатываемых материалов абразивом; значительное загрязнение рабочего места.

Другой распространенной операции (хонингование) присущи хаотичное расположение абразивных зерен в связке инструмента, сложность изготовления комплекта брусков и необходимость их приработки в течение определенного времени. Использование брусков на эластичных связках и хонинговальных инструментов с упругим закреплением абразивных элементов на пластмассовых подвесках производства фирмы Brush Research Mfg Co приводит к снижению стойкости в сравнении с жесткими и появлению вибраций во время процесса резания. Традиционный подвод СОТС в рабочую зону требует их увеличенного расхода, а многие попытки решить эту проблему связаны с большими трудностями. Например, использование внутренних проточек в самом инструменте ведет к снижению подачи СОТС или полному ее прекращению ввиду их засорения инородными различными телами, уменьшению диаметра каналов по причине твердых отложений на внутренней стенке. Алмазное хонингование всех известных видов не обеспечивает регулярности микрорельефа и характеризуется небольшой (10...20 %) опорной поверхностью. Основной схемой обработки при этом методе является схема с жесткофиксированной деталью и свободным закреплением инструмента с плавающей хонинговальной головкой, что не может исключить влияния отклонения от соосности инструмента и отверстия на геометрические параметры хонингуемого отверстия.

Производя анализ метода магнито-абразивной обработки (МАО) с целью его использования в качестве альтернативного, следует, в первую очередь, исключить схему с электромагнитными индукторами (ЭМИ). Несмотря на их высокую эффективность, ограничивающими факторами являются сложность конструкции и габариты ЭМИ. Применение устройств, основанных на принципе бегущего магнитного поля, отличается сравнительно небольшим размерным съемом и его низкой интенсивностью.



В настоящее время освоено производство постоянных магнитов КС-25 ТУ 48-0521-270–83; остаточная индукция намагничивания  $B = 1,1 \dots 1,2$  Т, КСД-25 ТУ 48-0531-299–84,  $B = 0,9$  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.

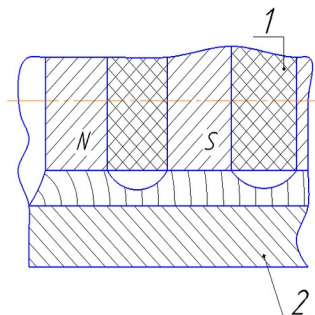


Рисунок 3.7 - Схема перпендикулярного расположения магнитов в индукторе на постоянных магнитах: 1 – индуктор на постоянных магнитах; 2 – обрабатываемая ферромагнитная деталь

Ввиду того, что известные конструкции индукторов на постоянных магнитах (ИПМ) пригодны для МАО отверстий небольшой длины ( $L/D < 5$ ) (рисунок 3.7) и расположение магнитов по длине является перпендикулярным относительно оси обрабатываемой детали, для обработки длинномерных отверстий они не обладают экономичностью; простотой и конструктивностью решения для всего блока режущего инструмента; достаточной производительностью.

Например, согласно наиболее целесообразной для магнита КС-25 ( $\text{SmCo}_5$ ), признана длина 5 мм. Тогда для обработки отверстия  $d = 18$  мм требуется ИПМ, объем постоянных магнитов, в котором примерно в 2 раза выше, чем для предлагаемой схемы с параллельным их расположением. Увеличение длины ИПМ с перпендикулярным расположением магнитов свыше 30 мм также приводит к резкому росту потоков рассеяния и падению магнитодвижущей силы индуктора и в результате происходит снижение интенсивности съема материала.

Таким образом, проведенный анализ схем и устройств для МАО длинномерных отверстий позволил наметить следующий механизм реализации:

- создание компактной магнитной системы с возможностью ее ввода в обрабатываемое отверстие;
- использование в качестве источника магнитного поля постоянных магнитов;
- наличие гибкого вала для сообщения вращения магнитному индуктору [66].

Исследования при использовании ИПМ с параллельным расположением магнитов на стали Х10Н19Т ГОСТ 5632-72 показали

снижение шероховатости с исходной  $R_{a_1} = 0,9...1,2$  до  $R_{a_2} = 0,1...0,2$  мкм. В качестве СОТС применялись СинМА-1 ТУ 38.5901176–91; ферроабразивный порошок ФАП на основе высокохромистого чугуна, (рисунок 3.8); зернистость  $\Delta = 100...160$  мкм; скорость вращения ИПМ  $V_{вр} = 0,5$  м/с; число двойных ходов  $n = 700... 800$  дв. х/мин.



Рисунок 3.8 - Форма частиц ФАП на основе высокохромистого чугуна, увеличение  $\times 80$

Необходимо отметить, что при использовании этого метода макрогеометрические характеристики (в частности, значения овальности) остаются на уровне предшествующей технологической операции. 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. Конструкция индуктора на постоянных магнитах с их параллельным расположением, представлена на рисунке 3.9.

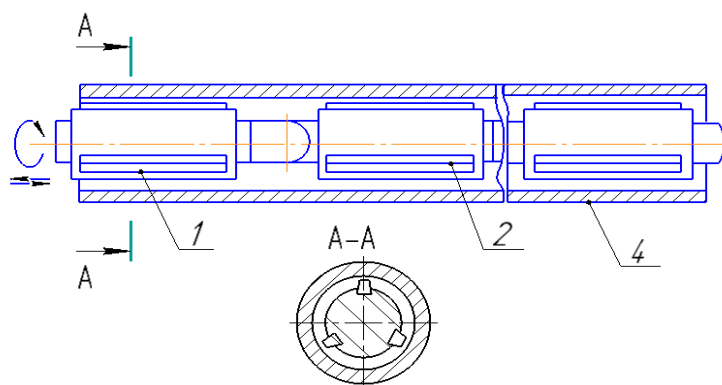


Рисунок 3.9 - Конструкция индуктора на постоянных магнитах с их параллельным расположением: 1 – каркас из немагнитного материала; 2 – постоянные магниты; 3 – ферроабразивный порошок; 4 – обрабатываемая деталь

На основании приведенных данных и полученных результатов разработана установка СФТ 2.143.00.00.000 для МАО каналов длинномерных отверстий, и ее краткая техническая характеристика представлена в таблице 3.8.

Таблица 3.8 - Основные технические данные моделей станков для обработки длинномерных отверстий различными финишными методами

Параметр	Доводка			Хонингование			МАО
	ОФ-16А	ОФ-10	ОФ-30	33815	3820Д	3821Д	СФТ 2.143.00.00 .000
Диаметр обрабатываемых отверстий, мм	0,5-15	До 12	До 30	До 20	50-200	25-500	15-18
Наибольшая длина обрабатываемых отверстий, мм	20	80	100	295	1050	600	3030
Шероховатость обработанной поверхности $R_a$ , 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
Габариты станка, мм:длина	11845	11100	11310	11120	21290	32325	8350
ширина	11220	6630	7770	11350	11820	11465	1710
высота	22228	22020	22400	22225	44935	77050	1250

### 3.4.3 Магнитно-абразивная обработка на основе ферроабразивных композиционных волокон

Одним из основных факторов, определяющим технико-экономические показатели процесса магнитно-абразивной обработки (МАО), является выбор режущего материала. Существующие технологии производства ферроабразивных порошков (ФАП), широко применяемых в настоящее время, отличаются сложностью изготовления и требуют создания специализированного оборудования. Также имеется ряд недостатков самих ФАП, что не позволяет говорить об универсальности какого-либо их вида. Это ограниченность выбора абразивного компонента, понижение магнитных свойств ФАП из-за абразивных включений в ферромагнитной матрице, непрочность соединения абразива и указанной выше матрицы. Кроме того, ФАП на основе тугоплавких соединений типа карбидов, которые отличаются наиболее высокими режущими свойствами, дают и повышенное загрязнение обработанной поверхности цветных металлов и сплавов, что связано с присутствием остаточного углерода. Насыщение массы ФАП продуктами диспергирования различных материалов практически исключает многократность его использования.

В работе [67] представлен полюсный наконечник для МАО, изготовленный в виде собранного пакета ферромагнитных проволок, отдельно фиксируемых для негативного отображения поверхности

изделий, подвергаемых обработке данным методом. Однако для производительного протекания процесса требуется осуществлять постоянную подачу отдельных порций ФАП в рабочую зону. Это приводит к его повышенному расходу в сравнении с традиционными схемами обработки.

Расширение технологических возможностей метода МАО было достигнуто созданием волокон из магнитного материала с нанесением на них слоя абразивного порошка[68].

Материал – проволока 45Н диаметром 0,12 мм ТУ 14.1.277-72 (предел прочности при растяжении  $\sigma_b = 610$  МПа, предел выносливости при изгибе  $\sigma_{-1} = 275$  МПа, при кручении  $\tau_{-1} = 165$  МПа). Для снижения собственной жесткости, волокнам, после нанесения методом гальваностегии абразивного порошка, требуется проходить термообработку с целью удаления наводороженности поверхностного слоя, который придает им повышенную хрупкость.

Однако эта жесткость остается все-таки достаточно большой, и часто наблюдается резание обрабатываемой поверхности изделий самой нитью волокна после потери им абразивонесущего рабочего компонента, если микротвердость изделия меньше микротвердости нити.

Поэтому на следующем этапе исследований применялись волокна на базе высокопрочных полимеров. Первоначально были изготовлены образцы, в объеме которых равномерно распределялись ферроабразивные частицы. Для этой цели использовался ФАП Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81 зернистостью 50 мкм, (рисунок 3.10). Проведенные испытания показали, что такое размещение частиц не обеспечивает требуемых магнитных характеристик.

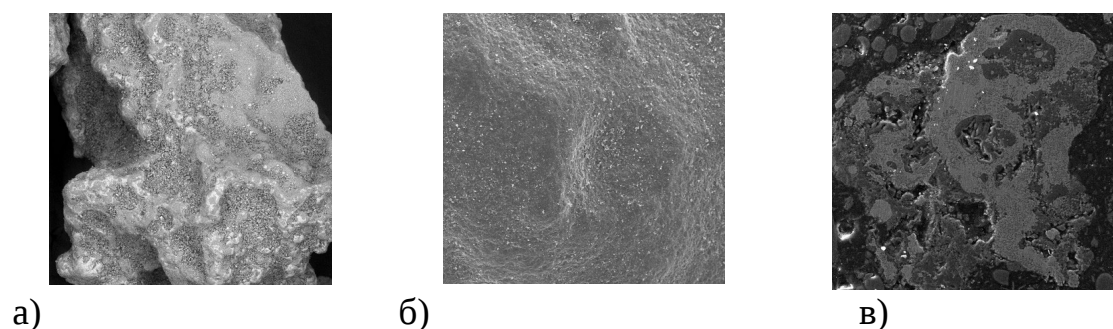


Рисунок 3.10 - Морфология: а – топография; б – структура; в - ФАП Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81

~~В связи с этим был осуществлен переход на композиционные ферроабразивные волокна, что позволило получить достаточную прочность при достижении необходимых магнитных и абразивных свойств. Предварительно проведенные исследования показали, что при~~

такой технологии изготовления волокон реализуются наиболее оптимальные условия размещения компонентов. Поскольку высокопрочная полимерная сердцевина обеспечивает требуемые механические показатели (разрушающее напряжение при растяжении и кратковременной статической нагрузке составляет  $\sigma_p = 90$  МПа), то на периферии волокна размещается гораздо большее количество режущих частиц, чем при их объемном расположении на указанных выше образцах. На рисунке показана схема строения такого композиционного волокна на полимерной основе. В качестве магнитной составляющей используется карбонильное железо (размер частиц 3-10 мкм), абразивной – порошки карбидов титана зернистостью 20-40 мкм.

Однако есть более перспективное направление, которое связано с тем, что режущим компонентом служит алмазный порошок, расположенный на поверхности волокна.

Ферромагнитный слой находится под порошком, что значительно повышает качество обработки и позволяет применять метод МАО, например, для полирования кремниевых пластин, когда прямой контакт железа и обрабатываемого материала недопустим. Поэтому требуется определить оптимальное соотношение магнитного и абразивного компонентов и обрабатываемость материалов данным видом инструмента [69].

В качестве образцов для испытаний использовались кольца игольчатых подшипников  $D \times d \times L = 36 \times 29 \times 32$  мм. Материал – ШХ15 ГОСТ 801-78, 58-61 HRC<sub>э</sub> шероховатость поверхности изделий до обработки составляла  $Ra_1 = 1,2 \dots 1,4$  мкм.

Смазочно-охлаждающие технологические средства – СинМА-1 ТУ 38-5901176-91. Выходные показатели процесса – достигаемая шероховатость поверхности изделий,  $Ra_2$ , мкм и величина удельного массового съема материала,  $\Delta G$ , мг·см<sup>-2</sup>·мин<sup>-1</sup>. Измерение шероховатости поверхности до и после обработки осуществлялось на профилографе-профилометре модели «252-Калибр», взвешивание образцов производилось на весах аналитических ВЛА-200 г с точностью до 0,001 г.

В качестве оборудования применялась установка СФТ 2.150.00.00.000. Режимы и параметры процесса обработки были следующими: скорость резания,  $V_p = 2,0$  м/с; скорость осцилляции,  $V_o = 0,14$  м/с; амплитуда осцилляции,  $A = 1,5$  мм; величина магнитной индукции,  $B = 1$  Т; время обработки,  $t = 60$  с.

На ферроабразивные композиционные волокна, (рисунок 3.11-3.12), был нанесен алмазнесущий режущий слой (порошок алмазный АМ 40/28).

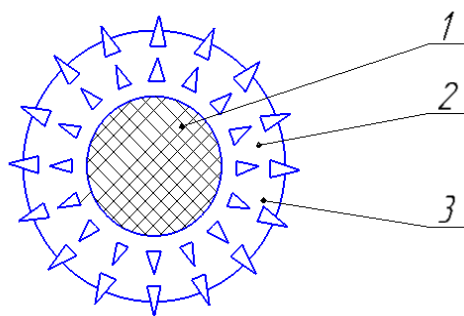


Рисунок 3.11 - Схема строения ферроабразивного композиционного волокна: 1 – высокопрочная нить; 2 – полимерная оболочка; 3 – ферроабразивные частицы

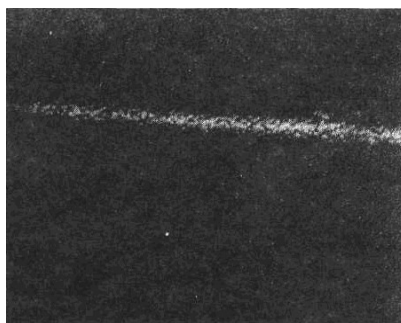


Рисунок 3.12 - Внешний вид ферроабразивного композиционного волокна, увеличение  $\times 90$

В качестве магнитной составляющей было использовано карбонильное железо (максимальная магнитная проницаемость,  $\mu = 20000 \dots 21500$  Гн/м, индукция насыщения  $B_s = 2,17$  Т, коэрцитивная сила  $H_c = 0,08$  А/м).

Принято три варианта соотношения магнитного и абразивного компонентов. Ранее было установлено, что процесс обработки, происходящий за пределами 45...70 % содержания карбонильного железа от общего количества алмазонасущего режущего слоя нецелесообразен. Это объясняется тем, что объем магнитной составляющей менее 45 % не обеспечивает достаточной намагниченности, создающей силу, необходимую для прижима волокон к обрабатываемой детали, а содержание более 70 % не позволяет получить требуемых качеств и производительности операции из-за снижения режущей способности.

Таким образом, при первом варианте изготовления ферроабразивных волокон использовалось 45 %, во втором – 60 %, и в третьем – 70 % магнитного компонента.

Для проведения сравнительных исследований применялось устройство, выполненное по схеме, представленной в работе [68].

Были проведены испытания ферроабразивных композиционных волокон, направленные на определение оптимального соотношения между указанными компонентами (таблица 3.9).

Таблица 3.9 - Качество и производительность обработки после использования различных видов ферроабразивных волокон

Вид обработки	Удельный массовый съем материала, $\Delta G$ , мг/см <sup>2</sup> ·мин	Достижимая шероховатость, $Ra_2$ , мкм
Ферроабразивные волокна на основе проволоки 45Н диаметром 0,12 мм ТУ 14.1.277-72	8,96	0,055
Ферроабразивные волокна на основе высокопрочной полимерной нити и алмазного порошка содержанием магнитного компонента		
45%	11,91	0,038
60%	13,77	0,024
70%	12,32	0,032

На рисунке 3.13 показана схема устройства для реализации данного способа обработки методом MAO. Пакеты гибких ферроабразивных композиционных волокон 1 намагничиваются магнитным полем, создаваемым электромагнитными катушками 2. Изделие 3, помещенное между пакетами, фиксируемые в полюсных наконечниках 4, приводится во вращение. Данные волокна образуют эластичную щетку, жесткость которой регулируется изменением величины магнитного поля при помощи магнитопровода 5. Для более равномерной обработки предусмотрен механизм привода осцилляции полюсных наконечников, который на данном рисунке не показан.

Также следует отметить, что отсутствует загрязнение рабочей зоны, характерное для процесса MAO с использованием ФАП на основе тугоплавких соединений типа карбидов, как указывалось ранее.

Осуществлена интенсификация режущего инструмента на основе ферроабразивных волокон путем применения в качестве абразива алмазного порошка, при этом оптимальное содержание карбонильного железа как магнитного компонента составляет 60 % от их общей массы. Наличие алмазного порошка позволило повысить культуру производства процесса и произвести более полное использование режущей способности данного вида инструмента.

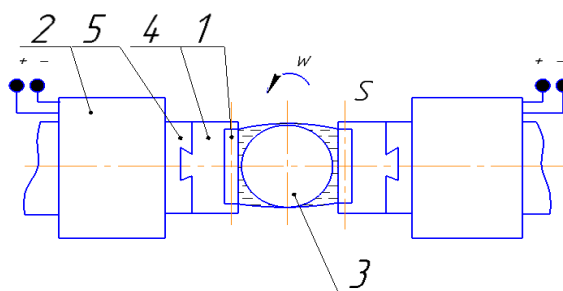


Рисунок 3.13 - Схема обработки методом MAO с использованием ферроабразивного композиционного волокна, где: 1 – пакеты ферроабразивных композиционных волокон; 2 – электромагнитные катушки; 3 – обрабатываемое изделие; 4 – полюсные наконечники; 5 – магнитопровод

### 3.4.4 Магнитно-абразивная обработка отверстий на основе гибких абразивных щеток

В настоящее время широко известен и находит свою область применения метод магнитно-абразивной обработки (MAO). Среди его основных достоинств можно выделить возможность управления жесткостью режущего инструмента во время протекания процесса. Однако во многом его потенциальные возможности остаются нереализуемыми по ряду объективных причин.

В таких странах, как Япония, Индия, Франция, Германия, Китай, США, ведутся интенсивные исследования, направленные на дальнейшее изучение и обобщение процесса MAO.

Внутренние поверхности среди всех классов занимают особое место, а отделочные операции по их обработке – одна из труднорешаемых проблем в машиностроении. Существует комплекс технических предложений, направленных на усовершенствование действующих методов и создание новых видов. Однако во многом их практическая реализация характеризуется либо ростом себестоимости процесса обработки, либо низкой эффективностью и узким диапазоном приложения.

Одним из первых технических решений, предложенных для обработки труб методом MAO, была обработка их внутренних поверхностей с использованием ферроабразивного порошка (ФАП), помещенного во вращающееся магнитное поле [70]. Для полирования отверстий немагнитных тонкостенных изделий разработаны устройства, в которых магнитное поле, образованное электромагнитами, удерживает порцию ФАП у поверхности обрабатываемой детали. Однако эти способы обладают слабой интенсивностью и, следовательно, низкой производительностью.



Дальнейшие исследования позволили интенсифицировать МАО отверстий путем применения электромагнитных систем (ЭМС) и индукторов на постоянных магнитах (ИПМ).

Как известно, МАО относится к типу отделочных операций, поскольку величины магнитной индукции при помощи ЭМС составляют 1...1,2 Т. Применение ИПМ на основе оксидно-бариевых магнитов 2БА характеризуется высоким разбросом значений магнитной индукции даже при изготовлении одной партии, а использование редкоземельных элементов Sm, Co, Nd – высокой себестоимостью. Кроме того, у всех постоянных магнитов невысокие значения ударной прочности и коррозионной стойкости.

Производство и реализация метода МАО осуществляются использованием режущего инструмента в виде ФАП. Обработка ферромагнитных сталей с твердостью 55...65 НРС<sub>Э</sub> для производимых в настоящее время ФАП не представляет особых сложностей. Однако при МАО хрупких, а также диа- и парамагнитных материалов приблизительно такой же твердости возникают определенные трудности. Ввиду этого оценка фактора магнитного поля при МАО требует проведения комплекса дополнительных исследований

Практически метод МАО таких материалов, как титановые сплавы, керамика и т.п., можно осуществить алмазосодержащим ФАП. Исследования [71], основанные на традиционной схеме приготовления, показали, что этот вид ФАП отличается низкой стойкостью из-за слабой закрепленности алмазного порошка в магнитной матрице, но характеризуется высокой производительностью в процессе своего воздействия на обрабатываемую поверхность детали по сравнению с такими ФАП, как Ж15КТ и ПолиМММ-Т.

Предлагаемый инструмент для МАО отверстий на основе гибких алмазных щеток состоит из пакета гибких волокон из магнитного материала с нанесенным на них слоем абразивного порошка из синтетических алмазов (рисунок 3.14).

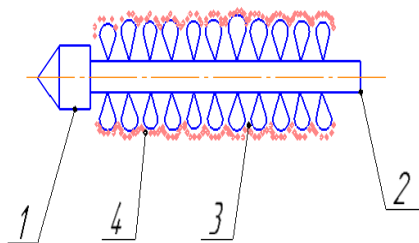


Рисунок 3.14 - Общий вид инструмента для магнитно-абразивных щеток: 1 – направляющий конус; 2 – ферромагнитная ось; 3 – ферромагнитные петли; 4 – абразивные частицы порошка

Данный пакет состоит из жесткозакрепленных с одной стороны гибких волокон диаметром 0,1...0,2 мм и зазором между ними 0,01...0,1 мм [72]. Выполнение гибких волокон из магнитного материала обеспечивает намагничивание их полем ЭМС и расположение вдоль магнитных силовых линий с натяжением под воздействием магнитной силы:

$$\vec{F} = -M\vec{v} \times \vec{B}, \quad (3.1)$$

где:  $M$  – намагниченность материала волокна;

$v$  – скорость перемещения пакета волокон в магнитном поле;

$B$  – магнитная индукция, создаваемая ЭМС.

Сборка пакета посредством жесткого закрепления пластинами с одной стороны и зазором 0,01...0,1 мм позволяет сформировать щетку, между волокнами которой просыпается снимаемая с обрабатываемой поверхности стружка. Ее размеры колеблются от 0,001 до 0,008 мм, что предотвращает пакет гибких волокон от засаливания. Изготовление волокон диаметром 0,1...0,2 мм обеспечивает эластичность щетки. Это подтверждается экспериментально, поскольку волокна диаметром менее 0,1 мм не обеспечивают прочности щетки, а диаметр более 0,2 мм приводит к отсутствию гибкости.

При изготовлении инструмента в качестве перфорированного основания используется гибкая ферромагнитная сетка, через которую прошивают ферромагнитные нити. Они с одной стороны образуют U-образные петли, а на сетку со стороны, противоположной петлям, наносят клеевую композицию, содержащую ферромагнитную составляющую, после чего вырезают рабочий элемент нужной формы и размера.

Пучки нитей образуются путем разрезки в местах перегиба петли. Закрепление абразивных частиц на поверхности нитей производится методом гальваностегии с последующей термообработкой. Клеевая композиция с ферромагнитным наполнением увеличивает прочность инструмента и снижает потери магнитного потока. Она содержит 30 % клея Б-2 и 70 % порошка пермаллоя карбонильного железа.

Использование метода гальваностегии с последующей термообработкой позволяет закрепить до 75 % от всего количества алмазного порошка в подложке на поверхности нитей. Размер закрепляемых зерен зависит от диаметра нитей. Применение ферромагнитного наполнителя приводит к росту магнитной проницаемости рабочего элемента. Термообработка обеспечивает нитям, несущим абразивным частицам порошка, необходимую гибкость.

Технология изготовления инструмента следующая: с помощью машины нитеводители которой упрочнены алмазным покрытием, прошивают сетку ГОСТ 2715 (диаметр проволоки от 0,03 до 1 мм,

размер ячейки в свету 0,04...3 мм) непрерывной гибкой нитью диаметром 0,12 мм так, чтобы с одной стороны были образованы U-образные петли высотой 10...30 мм. Если предполагается использовать пучки, то прошивка производится несколько раз или одновременно несколькими нитями. На сторону противоположную петлям, наносят указанную выше композицию. Затем для получения пучков осуществляется сушка на воздухе ( $T = 298...308$  К) и при необходимости разрезка петли в местах перегиба. Полученное таким образом гибкое волокно с «металлическим ворсом» раскраивается на рабочие элементы, которые подвергаются гальваностегии.

Состав электролита:  $\text{NiSO}_4 + 7\text{H}_2\text{O} - 200...300$  г в литре,  $\text{NiCl}_2 + 6\text{H}_2\text{O} - 40...45$  г в литре,  $\text{H}_3\text{BO}_3 - 30$  г в литре, pH электролита 4,2...4,7, температура  $T = 313...318$  К. Размер частиц алмазного порошка составляет 15...20 мкм а его концентрация в электролите – 20 % от всего объема. В качестве катода применяется рабочий элемент, при этом площадь анода должна быть в 3...4 раза больше площади катода. Осаждение и адгезия порошка к нитям на рабочем элементе происходят при плотности тока 1...1,5 А/дц<sup>2</sup>. Скорость протекания процесса 15 мкм/ч, продолжительность – 10...14 ч.

Инструмент работает следующим образом: на катушки ЭМС подается выпрямленный ток той величины, которая создает магнитное поле 0,4...0,8 Т у обрабатываемой поверхности, а инструмент приводят во вращение с одновременным продольно-возвратно-поступательным перемещением вдоль оси отверстий. При этом волокна располагаются по магнитным силовым линиям, образуя эластичную щетку, жесткость которой регулируется изменением величины магнитной индукции. Частицы абразивного порошка, нанесенного на волокна, прижимаются к обрабатываемой поверхности под воздействием магнитной силы, рассчитываемой по формуле (3.1), и осуществляется съем материала. В зону резания подаются смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС).

Были проведены сравнительные испытания предлагаемого устройства в качестве образцов использовали втулки  $D \times d \times l = 45 \times 39 \times 80$  мм в количестве 10 шт. Материал образцов – карбид кремния SiC. Исходная шероховатость  $Ra_1 = 30...40$  мкм. Величина магнитной индукции составила 0,6...0,8 Т, число оборотов инструмента  $n = 630$  об/мин, число двойных ходов возвратно-поступательного движения  $n_{дв} = 600$  дв.ход/мин, амплитуда осцилляции  $A = 1$  мм; время обработки  $t = 4$  мин; СОТС-СинМА-1 ТУ 38.5901176-91. В качестве базового ФАП применяется Ж15КТ ТУ 8.06.493-81, зернистость  $D = 200...315$  мкм.

При обработке образцов на известных устройствах для МАО базовым ФАП Ж15КТ съем материала был минимальным и улучшения качества поверхности осуществить не удалось. Использование гибких щеток позволило получить равномерную по всей поверхности

шероховатость  $Ra_2 = 15...10$  мкм, причем микродефектов не наблюдалось.

Таким образом, разработка и создание такого инструмента для МАО отверстий позволяют расширить технологические возможности метода. Диапазон отверстий, предлагаемых к обработке данным методом, составляет 10...40 мм. Некоторые технические характеристики представлены на рисунке 3.15 и в таблице 3.10.

Таблица 3.10 - Характеристика геометрических размеров инструмента на основе гибких абразивных щеток в зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия

Диаметр обрабатываемого отверстия, D	Диаметр инструмента, D*	d	A	a	L
17,5	17,6	8	11	0,3-0,7	15
20	20,1	8	12	0,3-0,7	20
23	23,1	8	14	0,3-0,7	25

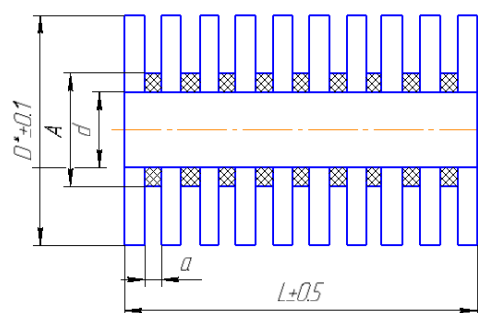


Рисунок 3.15 - Размерные характеристики инструмента для магнитно-абразивной обработки отверстия на основе гибких абразивных щеток

## **4. СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

### **4.1 Механизм действия смазочно-охлаждающих технологических средств на интенсивность съема металла**

Исследование влияния СОТС на процесс протекания МАО представляет интерес в силу реализации возможности управления данным процессом. Необходимость такого исследования обусловлена ростом требований к качеству обработанных изделий и достижением заданных характеристик микро- и макрогеометрии поверхностного слоя этих изделий. Установлено, что требуемые свойства финишной обработки обеспечиваются применением соответствующего вида СОТС. Однако, несмотря на большое количество разработанных составов СОТС, задача прогнозирования их использования для МАО во многом еще не решена. В основном такого рода рекомендации носят эмпирический характер, базирующийся на конкретных условиях механической обработки.

Поскольку вторым компонентом рабочей среды при МАО, помимо ФАП, служат СОТС на основе ПАВ [73, 74], то они представляют следующий этап исследований. Это объясняется тем, что наибольшей способностью к адсорбции при процессе МАО обладают именно ПАВ. Их характерной особенностью является несовпадение центров тяжести положительных и отрицательных зарядов в молекулах даже в изолированном состоянии [75]. Микроскопическая неоднородность физико-механических характеристик присуща любому твердому телу, в частности, и металлам, что вызвано анизотропией кристаллов [76]. Вследствие этого поверхностный слой металла обладает большой активностью. Полная энергия металлов состоит из внутренней и поверхностной. Последняя пропорциональна поверхности раздела фаз, поэтому особенно возрастает при диспергировании материалов. Существование и перемещение адсорбированного слоя определяется во многом температурной рабочей зоны. Молекулы ПАВ, адсорбированные на поверхности материалов, обладают также способностью перемещаться из области, где имеется их избыток, в места, где их недостаточно для полного покрытия поверхности.

Использование СОТС с отклонениями от указанных выше требований, связанных со спецификой производства, предполагает разработку специальных мероприятий по защите обслуживающего персонала и оборудования от вредных воздействий СОТС. Поэтому исследование проводилось только с СОТС, широко используемые на промышленных предприятиях и допущенные медицинскими организациями.

Современные представления о механизме действия СОТС, способствующих интенсификации процесса резания металлов, базируются на работах П.А.Ребиндера [77], объясняющего эффект адсорбционного понижения прочности металлов в присутствии 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 [77], 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. Наличие микротрещин в поверхностном слое приводит к снижению прочностных характеристик изделия, существенно отличающихся от теоретических значений. Положительная роль микротрещин заключается в том, что проникшая в них ПАВ способствует снижению усилия деформаций.

Известно, что эффект адсорбционного действия ПАВ существенно зависит от вида механической обработки и достигает наибольшего значения при минимальной глубине срезаемого слоя. Указанные эффекты весьма значительны при магнитно-абразивной обработке, обеспечивающей тонкое диспергирование металла и свободный доступ СОТС в зону микрорезания. 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. 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). Установление моющей способности определяется согласно [78] по ее максимуму связью между ее поверхностной активностью и поверхностной прочностью в виде средней коллоидности вещества ( $M_k\beta_k$ ):

$$M_1 \beta_1 < M_k \beta_k < M_2 \beta_2, \quad (4.1)$$

где  $M_k$  коллоидность вещества,  $\beta_k$  содержание коллоидно-дисперсной части.

В первом случае, при т.н. внешней адсорбции благодаря адсорбированному слою уменьшается поверхностная энергия твердых тел, что приводит к облегчению выхода дислокаций. Деформирование этих тел обеспечивается пластифицированием поверхности и снижением предела текучести  $\sigma_T$ , а также коэффициента упрочнения:

$$\lambda = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}, \quad (4.2)$$

где  $\sigma$  – напряжение;  $\varepsilon$  – деформация.

На рисунке 4.1 представлено адсорбционно-раскаливающее действие полярных молекул. Отличительной особенностью эффекта П.А. Ребиндера является его действие только при совместном участии среды и определенного напряженного состояния поверхностного слоя.

Наиболее сильно, указанный выше эффект, проявляется в условиях образования новых поверхностей, а также при наличии в твердом теле дефектов. Адсорбируемые ПАВ, стремясь покрыть всю поверхность тела, проникают в микроскопические трещины, мигрируя по их стенкам со скоростями, превышающими скорость всасывания жидкости в зазор. 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 у 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.

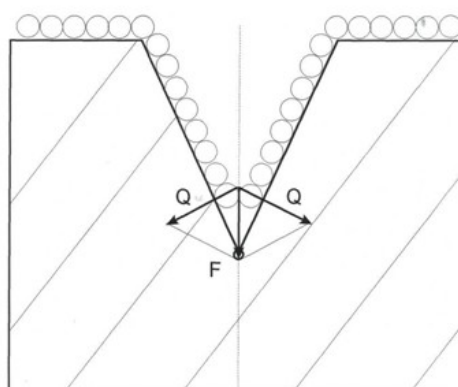


Рисунок 4.1 - Схема адсорбционно-раскаливающего действия полярных молекул

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

#### **4.2 Смазочно-охлаждающие технологические средства для магнитно-абразивной обработки углеродистых сталей**

Выпускаемые синтетические и 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 [79]. К достоинствам синтетических и полусинтетических СОТС относятся более высокие охлаждающая способность и пожаробезопасность; меньшая токсичность; низкая стоимость. Им присущи повышенная поражаемость микроорганизмами и необходимость утилизации отработанных водных растворов [80]. Однако указанные выше недостатки этих СОТС не уменьшают значимости данных продуктов для всего машиностроительного комплекса и требуют проведения дальнейших научно-исследовательских и практических работ.

ПАВ вещества с асимметричной молекулярной структурой, молекулы которых содержат одну или несколько гидрофильных групп и один или несколько гидрофобных радикалов [81]. Это облегчает процесс диспергирования (разрушения) различных гетерогенных систем и уменьшает износ режущего инструмента.

В настоящее время наиболее широко применяемыми СОТС для МАО, являются синтетические СинМА-1 и СинМА-2 ТУ 38-5901176 91. Поскольку рабочая температура в зоне обработки при МАО с соблюдением оптимальных параметров не превышает 50-70°C [74], 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 4.1 представлены физико-химические характеристики СОТС СинМА-1 и СинМА-2, СинХО-2М.

Таблица 4.1 - Физико-химические характеристики СОТС СинМА-1, СинМА-2 и СинХО-2М



Показатель	Марка СОТС		
	СинМА-1	СинМА-2	СинХО-2М
Плотность при 20°С, кг/м <sup>3</sup> , в пределах	900-1100	900-1100	1000-1100
Кинематическая вязкость при 50°С, мм <sup>2</sup> /с, не более	100	100	70
Концентрация водного раствора, %	2	2	2
Значение рН, в пределах	8,5-10	8,5-10	8,5-10

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 алюминиевый сплав Д16 ГОСТ 21488 76. Исходная шероховатость их поверхности составляла в среднем  $Ra_1 = 1,2$  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. Выходными параметрами процесса служили:

а) величина удельного массового съема  $\Delta G$ , мг/(см<sup>2</sup>·мин), показатель наиболее полно отражающий эффективность процесса диспергирования;

б) достигаемая шероховатость после обработки  $Ra_2$ . Образцы перед обработкой промывались в керосине и просушивались сжатым воздухом для уменьшения количества микропримесей на их поверхности. Результаты исследований представлены в таблице 4.2

Таблица 4.2 - Производительность и качество обработки материалов после использования видов СОТС

Вид СОТС	Обрабатываемый материал			
	ШХ15		Д16	
	$\Delta Q$ мг/см <sup>2</sup> ·мин	$Ra_2$ , мкм	$\Delta Q$ мг/см <sup>2</sup> ·мин	$Ra_2$ , 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

Образцы до и после обработки методом МАО с использованием СОТС СинХО-2М показаны на рисунке 4.2. Моющие свойства СинМА-1, СинМА-2 и СинХО-2М определялись визуально.

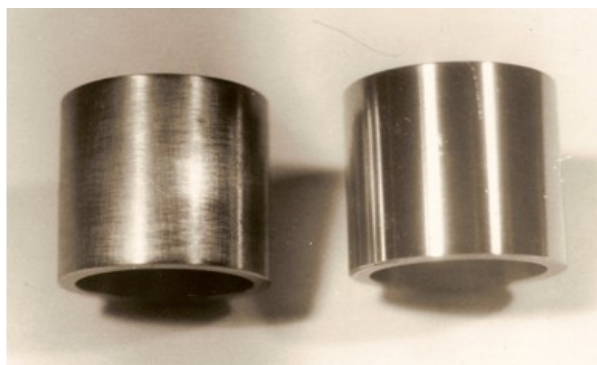


Рисунок 4.2 - Детали до (слева) и после (справа) обработки методом МАО с использованием СОТС СинХО-2М

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. Как было указано выше, диспергирование материала напрямую зависит от понижения поверхностного натяжения многокомпонентных систем типа СОТС, что отражено следующим уравнением [80]:

$$\sigma = \sigma_0 + (d\sigma / dt)t, \quad (4.3)$$

где,  $\sigma$  – показатель поверхностного натяжения при  $0^\circ\text{C}$ , мН/м<sup>2</sup>;

$t$  – температура рабочей зоны,  $^\circ\text{C}$ ;

$d\sigma/dt$  – температурный коэффициент поверхностного натяжения, мН/(м<sup>2</sup>·град).

Поскольку показатели температурного поля находятся в достаточно узком диапазоне, то обеспечение эффективности СинХО-2М определяется, во-первых, более высокими значениями полярности его вещества, чем Син-МА-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 ФАП 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 образующегося при данном методе шлама. Стоимость

СОТС СинХО-2М в отличие от СинМА-1 и СинМА-2 ниже, что позволяет рекомендовать их как эффективную замену.

#### **4.3 Смазочно-охлаждающие технологические средства для магнитно-абразивной обработки цветных материалов**

Одним из важных проявлений свойств СОТС служит их моющее действие. Ранее оценка этого действия производилась по отдельным физико-химическим характеристикам: поверхностной активности, пептизирующей способности, смачиваемости. Не останавливаясь на анализе механизма установления типа системы и ряда других показателей, следует указать, что только комплексный фактор выявляет эффективность использования СОТС как одного из важных компонентов рабочей технологической среды: ФАП + СОТС + ЭПМ. Необходимость установления этого фактора должно быть связано с наличием критерия, характеризующегося доступностью его определения в условиях производства. Ранее для МАО в качестве СОТС применялись эмульсии на основе эмульсов ЭТ, ЭГТ, Э-2. Однако наличие грубодисперсной ( $10^{-1} - 10^{-2}$  мм) фазы таких эмульсий приводило к прекращению фильтрации СОТС ферроабразивной «щеткой» [74]. Следующий этап исследования [64] показал, что наиболее приемлемой заменой такого рода СОТС являются ПАВ на базе гликолей. Однако необходимость обработки методом МАО 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°C) термостойкость, вследствие чего происходит падение эффективности моющего действия [82].

Трудность обработки цветных металлов связана с возникновением явления структурной приспособляемости [83]. Обеспечение роста необходимого показателя термостойкости СОТС для МАО ограничивается имеющимся набором компонентов. Это требует применения системного подхода при решении данной задачи и проведения работ, носящих в основном качественный характер.

В работе выявлено [82], что использование СОТС Аквапол-1 ТУ 38.1011061 86 обеспечивало интенсификацию процесса МАО 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 МАО. Другим граничным условием, определяющим эффективность применения СОТС, является система, созданная как эмульсия. Следовательно, движение от этой границы

должно быть направлено уже к уменьшению дисперсности этой системы. Основной вопрос заключается в том, посредством чего достигнуть поставленного результата. Проведенные исследования позволили установить, что в первом случае (Аквапол-1) решение обеспечивается путем конструирования системы, т.е., введение в общий состав нефтяного масла как компонента при сохранении всего комплекса технологии при сохранении состава компонентов. Требуемый результат достигается применением эжекционно-волновой технологии для получения эмульсии с дисперсностью  $10^{-3}$  или близкой к этому показателю. Сущность эжекционно-волновой технологии приготовления СОТС заключается в использовании колебаний волн давлением 0,02 – 0,1 МПа и частотой 1 – 2 кГц, и кавитации. Отличительной особенностью эжекционно-волновой технологии является то, что реализуется рационально организованная циркуляция компонентов смеси с отбором эмульсола из поверхностного слоя и активным смешиванием с водой. 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 % (таблица 4.3).

Таблица 4.3 - Производительность и качество обработки методом MAO при использовании различных составов СОТС

Вид материала	СинМА-1		СинМА-2		Э-2	
	$\Delta Q$ , мг/см <sup>2</sup> · мин	$Ra_2$ , мкм	$\Delta Q$ , мг/см <sup>2</sup> ·ми н	$Ra_2$ , мкм	$\Delta Q$ , мг/см <sup>2</sup> ·мин	$Ra_2$ , 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 МЗ	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 формулы Ньютона, удельный тепловой поток  $q$  от твердого тела с температурой  $t_\tau$  к жидкости определяется:

$$q = \alpha(t_\tau - t_{жс}), \quad (4.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;

$t_{жс}$  – температура жидкости.

Чем больше коэффициент теплоотдачи, тем лучше СОТС отводит тепло от режущего инструмента, стружки и детали. Теплоотвод при резании происходит вследствие конвекции, теплопроводности и химических реакций, происходящих с поглощением тепла, что сопровождается сложным тепло- и массообменом. Согласно [84], конвективный теплообмен между жидкостью и поверхностью твердого тела устанавливается по числу Нуссельта, которое представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи:

$$N_u = c \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{n.c.}}\right)^{0,25}, \quad (4.5)$$

где  $c$  – удельная массовая теплоемкость;  
 $Re$  – число Рейнольдса;  
 $Pr$  – число Прандтля;  
 $Pr_{n.c.}$  – число Прандтля в пограничном слое;  
 $m, n$  – показатели степени, характеризующие различные технологические среды.

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:

$$\mu = \nu \cdot \rho, \quad (4.6)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\text{сСт}$ ,  
 $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$

Установлено, что число Нуссельта уменьшается при увеличении этого показателя [84]. 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, исходя из данных таблицы 4.4 в результате сопоставления этих показателей, можно прогнозировать степень влияния СОТС на интенсивность обработки методом МАО (в данном случае моющего действия) цветных материалов.

Таблица 4.4 - Физико-химические показатели СОТС

Показатель	Вид СОТС	
	СинМА-1	Аквапол-1
Плотность при 20°C, в пределах, кг·м <sup>-3</sup>	900	1000 – 1200
Кинематическая вязкость при 50°C, не более с С т	100	30

Однако «узким местом» данной технологии является обработка цветных металлов типа бронзы, латуни, меди и т.п. Это объясняется, во-первых, тем, что существенно меняется характер силового взаимодействия режущих элементов ФАП с поверхностью материала, во-вторых, возможностью прекращения процесса диспергирования из-за возникновения явлений структурной приспособляемости. Кроме того, при использовании ФАП на основе карбидов, обладающих высокими режущими свойствами (например, *Fe-TiC* ТУ 88 УССР 147.002 75, содержащего 85% порошка железа и 15% порошка карбидов титана, происходит потемнение обработанной поверхности изделий. Это вызвано внедрением в нее продуктов распада ФАП. Причиной является наличие в порошке остаточного углерода, устранить который ввиду особенностей технологии его изготовления не представляется возможным. В итоге ухудшается товарный вид конечной продукции.

Использование же ФАП ПФА Р6М5-1 ТУ 27-104-02 86, производство которого базируется на основе отходов быстрорежущей стали и имеющего высокие полирующие свойства, вследствие чего придается требуемый блеск поверхностному слою изделия, ограничено. Это обусловлено тем, что если глубина дефектного слоя материала превышает 15-20 мкм, эффективность применения этого вида ФАП падает из-за невозможности устранить дефекты поверхности (рисунок 4.3).

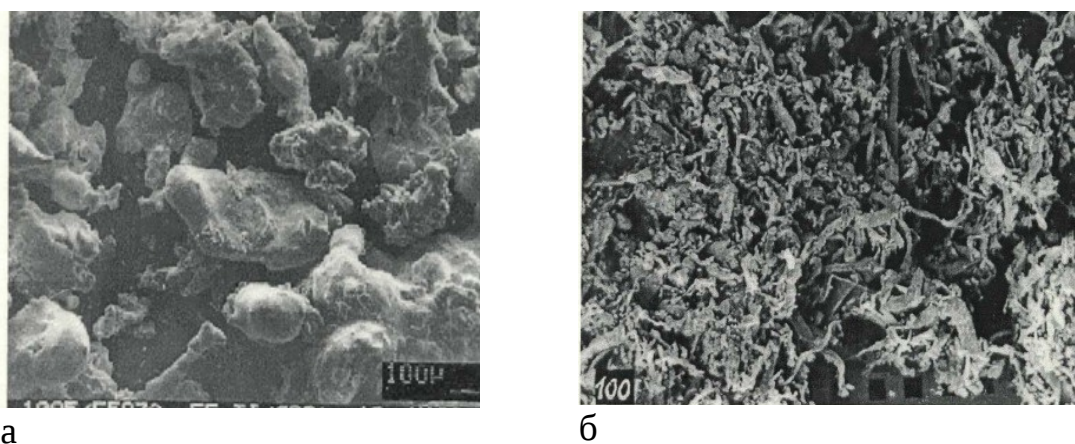


Рисунок 4.3 - Форма частиц ФАП  
 а *Fe-TiC*, ×100; б ПФА Р6М5-1 (увеличение ×100)

Одной из предпринимаемых попыток избавиться от такого недостатка обработки являлось механическое смешивание двух видов ФАП – ПФА Р6М5-1 и Fe - TiC в различных пропорциях. Но увеличение доли ПФА Р6М5-1 в общем количестве ФАП не обеспечивало полного устранения дефектов поверхности, образованных предшествующей технологической операцией, если их глубина превышала 25...30 мкм, а соответственно увеличение доли Fe - TiC хотя частично и приводило к снижению потемнения поверхностного слоя, но никоим образом к его исчезновению.

Наиболее очевидной причиной насыщения остаточным углеродом поверхностного слоя обрабатываемых изделий является снижение моющих свойств традиционно применяемых при МАО СОТС СинМА-1 и СинМА-2 ТУ 38.5901176 91. Известно, что любая технологическая система может функционировать только при подводе к ней энергии, которая полностью или частично преобразуется в тепловую. Установлено [85], что жидкости с молекулами большой длины, содержащие растворы ПАВ, образуют над монослоем полярных молекул граничный слой, в котором молекулы правильно ориентированы (рисунок 4.4). 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<sup>0</sup>С), а квазикристаллическая структура граничных фаз распадается.

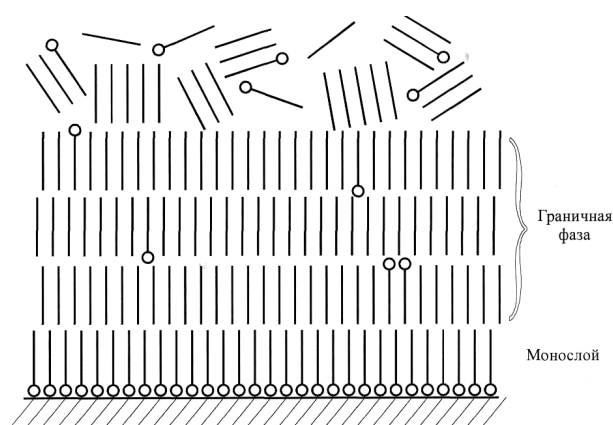


Рисунок 4.4 - Схема адсорбированного монослоя полярных и ориентации неполярных молекул

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<sup>0</sup>С) в зоне резания даже на 10-20<sup>0</sup>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.

В результате проведенных исследований установлено, что полноценной заменой СинМА-1 и СинМА-2 при обработке цветных металлов могут служить СОТС Аквапол-1 ТУ 38.1011061 86, разработанные УкрНИИ НП «МАСМА», г. Киев, Украина. Величина размерного съема материала при использовании рабочей среды – ФАП – Fe-TiC и СОТС Аквапол-1 превышает 50 мкм, что гарантирует устранение дефектов поверхностного слоя, созданных на предшествующей технологической операции, а ее светоотражательная способность, т.е. блеск, обеспечивается высокими моющими свойствами указанных выше СОТС.

Количественно и качественно состав СОТС Аквапол-1 представляет собой смесь триэтаноламиновых мыл, сульфонатов натрия, неионогенных ПАВ, ингибиторов коррозии, как черных, так и цветных металлов, воды, веществ связки и небольшого количества нефтяного масла определенного соотношения между компонентами. Его некоторые физико-химические характеристики представлены в таблице 4.5.

Технология изготовления заключается в компаундировании исходного сырья при 50-70<sup>0</sup>С.

Таблица 4.5 - Физико-химические характеристики СОТС

Показатели	Вид СОТС		
	СинМА-1	СинМА-2	Аквапол-1
Масса удельная при 20 <sup>0</sup> С, кг/м <sup>3</sup> , в пределах	900	900	1000-1200
Вязкость кинематическая при 50 <sup>0</sup> С, сСт, не более	100	100	30
Склонность к пенообразованию, см <sup>3</sup> , не более	500	500	600
Устойчивость пены, см <sup>3</sup> , не более	100	100	300
РН 3% раствора, в пределах	8,5-10	8,5-10	7,5-9

Исследование процесса МАО с использованием СОТС Аквапол-1 было проведено на установке СФТ 2.150.00.00.000. Параметры и



режимы МАО приняты следующими: магнитная индукция,  $B=0,9...1,1$  Тл; скорость резания,  $V_p=1...1,5$  м/с; скорость осцилляции,  $V_o=0,15...0,2$  м/с; амплитуда осцилляции,  $A=1...2$  мм; время обработки,  $t=60$  с. Подача СОТС в рабочую зону осуществлялось свободно падающей струей, расход 250 мл/мин.

В качестве образцов использовались: пруток  $d=45$  мм, материал – бронза БрАЖ9-4 ГОСТ 18175-78, латунь Л63 ГОСТ 15527-70, медь МЗ ГОСТ 859-78. ФАП –  $Fe-TiC$  и ПФА Р6М5-1; зернистость порошка  $\Delta$  – 160/200 мкм; величина рабочего зазора,  $\delta=1$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора,  $k_3=1$ . Потемнение обработанной поверхности изделий оценивалось визуально сравнением с эталоном. Шероховатость образцов до обработки составляла  $Ra_1=1,2-1,65$  мкм. Результаты проведенных исследований представлены в таблице 4.6. Оценка качества поверхности деталей осуществлялась по показателям достигаемой шероховатости  $Ra_2$ , мкм, а производительности – по удельному массовому съему в единицу времени,  $G$ , мг/см<sup>2</sup>·мин.

Таблица 4.6 - Сравнительные исследования производительности и шероховатости поверхности при использовании различных видов рабочей среды

Вид рабочей среды	Обрабатываемый материал					
	Бронза БрАЖ9-4		Латунь Л63		Медь МЗ	
	$Ra_2$ , мкм	$G$ , мг/см <sup>3</sup> ·мин	$Ra_2$ , мкм	$G$ , мг/см <sup>3</sup> ·мин	$Ra_2$ , мкм	$G$ , мг/см <sup>3</sup> ·мин
СинМА-1+ПФА Р6М5-1	0,1	2,5	0,15	2,2	0,1	2,28
СинМА-2+ПФА Р6М5-1	0,1	3,12	0,1	2,14	0,08	2,63
Аквапол-1+ПФА Р6М5-1	0,2	2,67	0,2	2,34	0,15	2,55
СинМА-1+Fe-TiC	0,1	3,5	0,1	4,02	0,15	4,25
СинМА-2+Fe-TiC	0,08	3,95	0,1	4,65	0,1	3,36
Аквапол-1+Fe-TiC	0,08	4,7	0,1	4,12	0,1	4,51

Установлено, что использование СОТС Аквапол-1 позволяет добиться требуемого блеска поверхности изделий при наличии в рабочей зоне ФАП –  $Fe-TiC$  и получить необходимую шероховатость с устранением поверхностных дефектов. Это объясняется оптимальным сочетанием исходных компонентов СОТС Аквапол-1 как количественно, так и качественно, что существенно повышает их моющие свойства в сравнении с СинМА-1 и СинМА-2.

#### 4.4 Влияние составов смазочно-охлаждающих технологических средств на интенсивность съема металла

Повышение пластичности металлов характеризуется взаимодействием ювенильных поверхностей с продуктами механической деструкции полимерных цепей. Согласно [86], максимальное значение вышеуказанной способности СОТС достигаются при определенном процентном содержании полимеров в их составе. Увеличение его содержания приводит к росту вязкости и возможности гелеобразования, что снижает высокоэффективную обработку методом МАО, из-за падения коллекторских свойств «щеткой». Уменьшение содержания полимеров связывается с изменением степени давления и фильтрации, и соответственно не обеспечивает производительность и качества обработки. Воздействие тепловой деструкции полимерной цепочки приводит к интенсивному разрушению макромолекул полимера и образованию свободных макрорадикалов, которые взаимодействуют, как указывалось ранее, с поверхностью металла. Это уменьшает его поверхностную энергию и создает необходимые условия для перемещения и зарождения дислокаций. Быстрое насыщение структуры металла дислокациями делает неустойчивым поверхностный слой и увеличивает скорость диспергирования материала.

Установлено, что на интенсивность процесса резания при МАО оказывают силы трения, возникающие между поверхностью стружки и абразивного зерна [87]. 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 не произойдет не минуя предыдущую [88]. Это зависит от отношения  $a/r$  (где  $a$  – толщина среза приходящегося на единичное зерно,  $r$  – радиус закругления вершины зерна), характеризующего процесс стружкообразования. Схема взаимодействия единичного зерна, имеющего радиус закругления вершины  $r$ , представлена на рисунке 4.5.

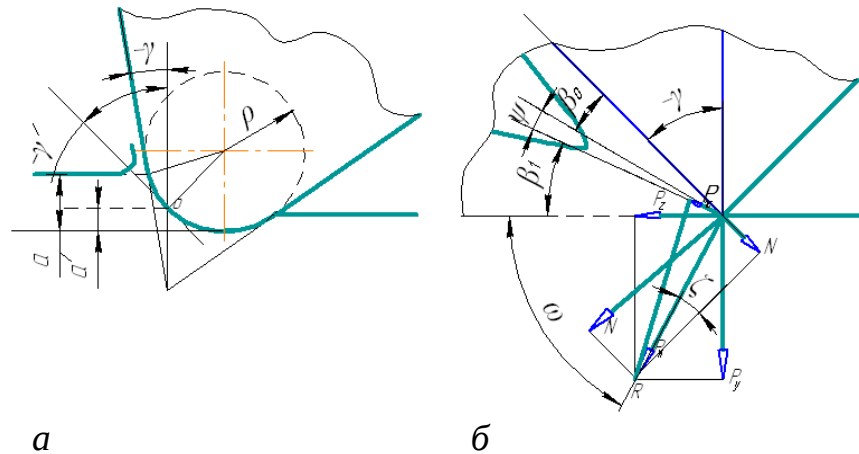


Рисунок 4.5 - Схема снятия стружки абразивным зерном: а – схема контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью; б – схема сил, действующих на передней поверхности инструмента

При МАО величина переднего угла  $\gamma$  имеет переменное значение и зависит от координаты  $a'$  рассматриваемой точки на передней поверхности зерна [65]:

$$\frac{a'}{\rho} = (1 + \sin \gamma') \quad (4.7)$$

При некотором значении  $a' > a$  происходит отделение стружки. Определим критическое значение переднего угла  $\gamma$  соответствующее этому состоянию. Согласно рисунку 4.5, для образования стружки необходимо, чтобы сила сдвига  $P_\tau$  была положительной и должно выполняться условие:

$$\beta_1 + \omega < \frac{\pi}{2} \quad (4.8)$$

Поскольку  $\omega = \xi - \gamma$  и  $\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\eta - \sin \gamma}$  [88] ( $\eta$  – коэффициент усадки стружки), то неравенство (4.9) примет вид:

$$\frac{\cos \gamma}{\eta - \sin \gamma} < \operatorname{tg} \left[ \frac{\pi}{2} - (\xi - \gamma) \right] \quad (4.9)$$

Производя ряд преобразований, получаем при учете

$$\operatorname{tg}(\xi - \gamma) < \frac{\eta - \sin \gamma}{\cos \gamma} \quad (4.10)$$

Поскольку  $(\xi - \gamma) \in \left( -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right)$ , то неравенство (4.6) можно представить:

$$\frac{\operatorname{tg}\xi - \operatorname{tg}\gamma}{1 + \operatorname{tg}\xi \operatorname{tg}\gamma} < \frac{\eta - \sin \gamma}{\cos \gamma} \quad (4.11)$$

Подставив значение  $\operatorname{tg}\xi = \mu$ , где  $\mu$  - коэффициент трения при резании, получаем:

$$\frac{1}{\mu} \cos \gamma + \sin \gamma - \frac{1}{\eta} > 0 \quad (4.12)$$

Выразив  $\cos \gamma$  через  $\sin \gamma$ , получаем квадратичное уравнение следующего вида:

$$\eta^2 (1 + \mu^2) \sin^2 \gamma - 2\mu^2 \eta \sin \gamma + (\mu^2 - \eta^2) > 0, \quad (4.13)$$

корень которого лежащий в диапазоне  $-1 \leq \sin \gamma \leq 1$ , находим по формуле:

$$\sin \gamma > \frac{1}{1 + \mu^2} \left( \frac{\mu^2}{\eta} - \sqrt{1 + \mu^2 - \frac{\mu^2}{\eta^2}} \right). \quad (4.14)$$

С учетом (4.2) выражение, характеризующее начало стружкообразование примет вид:

$$\frac{a}{\rho} > 1 + \frac{1}{1 + \mu^2} \left( \frac{\mu^2}{\eta} - \sqrt{1 + \mu^2 - \frac{\mu^2}{\eta^2}} \right) \quad (4.15)$$

Зависимость деформации сдвига  $a/\rho$  как представлено выражением (4.10) в значительной степени связана с коэффициентом трения  $\mu$ . В свою очередь данный коэффициент, поскольку относительный сдвиг происходит в масляном слое, во многом связан с вязкостью этой среды [89]. 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 использование средств механического воздействия, на обрабатываемый материал заготовки для ее формообразования, и немеханического (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 МАО необходимо учитывать ее влияние на коэффициент трения. Показатели среды, в которой происходит процесс резания, существенно влияют на его критические параметры.

#### 4.5 Методы оценки качества смазочно-охлаждающих технологических средств

Получение показателей физико-химической оценки качества данных СОТС произведен согласно ОСТ 380-1327-83, взятие проб осуществлялось в соответствии с ГОСТ 2517-85. Используемые методы оценки и нормативно-техническая документация представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Методы оценки СОТС и нормативно-техническая документация

Показатель качества	ГОСТ, ТУ
1	2
Внешний вид	6243-75
Запах	ТУ на продукт
Вязкость кинематическая при 50 С, сСт	33-82
Стабильность при хранении	6243-75
Плотность при 20 С, кг/м <sup>3</sup>	3900-85
Стабильность при низких температурах	6243-75
Стабильность раствора (2 % на воде жесткостью 4,6 мг экв/литр)	6243-75
Корродирующее действие на металлы, г/л	6243-75
Сталь ГОСТ 1050-78	
Чугун ГОСТ 1412-85	
Число кислотное мг КОН на 1 г	11352-76
Общая щелочность мг КОН на 1 г	11362-76
Склонность к пенообразованию при 24 С, см <sup>3</sup>	ТУ на продукт
Устойчивость пены, см <sup>3</sup>	ТУ на продукт
Значение рН	6243-75

Требования безопасности и характеристика токсико-гигиенических и пожароопасных свойств СОТС определялись соответственно ГОСТ 12.1.005-88 и 12.1.044-84.

## 5. САМООРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Магнитно-абразивная обработка является сложным процессом взаимодействия ферроабразивной частицы с обрабатываемым материалом, в основе которого лежат различные физические и химические явления. Условия и характер такого взаимодействия зависят от многих факторов, через которые проявляются свойства технологической системы. Эти факторы подвержены систематическим и случайным изменениям, которые в итоге определяют нестационарность процесса резания и как следствие нестабильность его выходных характеристик: производительности, шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя обработанных поверхностей и др. К числу систематических факторов, возмущающих процесс резания, можно отнести закономерное изменение профиля режущего контура, геометрии ферроабразивной частицы, скорости резания, амплитуды колебаний, которые вызваны конструктивными особенностями электромагнитной системы и обрабатываемой заготовки. Среди случайных (вероятностных) факторов, влияющих на нестабильность механической обработки, следует выделить: изменение геометрии ферроабразивной частицы в процессе обработки [90], нестабильность структуры и физико-механических свойств заготовок [91], нестабильность исходной шероховатости, изнашивание ферроабразивной частицы и изменение ее магнитных свойств.

Рассеяние физико-механических свойств металла имеет место как у заготовок одной партии, а также в разных местах одной и той же заготовки. Это связано с тем, что на структуру и физико-механические свойства металла, из которого получена заготовка, существенное влияние оказывают технологии, используемые на этапах выплавки, обработки давлением и термической обработки. Способ и условия выплавки оказывают влияние на фактическое содержание вводимых легирующих элементов и количество неметаллических включений. Условия кристаллизации влияют на величину дендритов и направление их роста, а также на степень дендритной ликвации, что проявляется в неоднородности физико-механических свойств заготовки по длине. Одной из причин колебаний физико-механических свойств материала являются также колебания химического состава и морфологический характер дисперсных включений. При горячей обработке давлением в заготовках происходит неравномерная деформация по объему, вызывающая разнотерность и повышенную плотность дислокаций в отдельных местах. Это приводит к флуктуации свойств металла

(сплава) по прочности и по пластичности в различных местах одной и той же заготовки.

## **5.1 Синергизм свойств металлических поверхностей в процессе их изготовления**

### **5.1.1 Факторы нестабильности магнитно-абразивной обработки**

Магнитно-абразивная обработка является сложным процессом взаимодействия ферроабразивной частицы с обрабатываемым материалом, в основе которого лежат различные физические и химические явления. Условия и характер такого взаимодействия зависят от многих факторов, через которые проявляются свойства технологической системы. Эти факторы подвержены систематическим и случайным изменениям, которые в итоге определяют нестационарность процесса резания и как следствие нестабильность его выходных характеристик: производительности, шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя обработанных поверхностей и др. К числу систематических факторов, возмущающих процесс резания, можно отнести закономерное изменение профиля режущего контура, геометрии ферроабразивной частицы, скорости резания, амплитуды колебаний, которые вызваны конструктивными особенностями электромагнитной системы и обрабатываемой заготовки. Среди случайных (вероятностных) факторов, влияющих на нестабильность механической обработки, следует выделить: изменение геометрии ферроабразивной частицы в процессе обработки [92], нестабильность структуры и физико-механических свойств заготовок [93], нестабильность исходной шероховатости, изнашивание ферроабразивной частицы и изменение ее магнитных свойств.

### **5.1.2 Неоднородность пластической деформации при резании**

Для конструкционных сталей и сплавов условия структурной однородности и стабильности дефектов, как правило, не выполняются. Это обстоятельство оказывает существенное влияние на процесс размножения и движения дислокаций и, как следствие, проявляется в неоднородном характере пластической деформации, а также в наличии взаимосвязи процессов деформирования на различных уровнях [94].

Процесс резания всегда сопровождается пластической деформацией, приводящей к возникновению внутренних напряжений и температур. Нестабильность этих параметров связывают с неоднородным

характером пластического течения металлов и сплавов, который проявляется на атомном уровне и является следствием размножения и направленного движения дислокаций в полосах скольжения, а также размножения и развития полос скольжения в зоне пластической деформации [95]. Пластически деформируемую зону можно представить как систему полос скольжения. Плотность, длина, ширина и ориентация полос скольжения свидетельствуют о кристаллографической ориентации плоскостей скольжения в обрабатываемом материале, а также о характере протекания и степени пластической деформации.

Неоднородность протекания пластической деформации при резании связана в первую очередь с размножением и развитием полос скольжения. Полоса скольжения представляет собой локальную область материала с повышенной плотностью дислокаций, которая граничит с областями, испытывающими только упругую деформацию.

Чередование пластически деформированных и упруго деформированных областей приводит к неоднородному напряженному состоянию обрабатываемого материала [95]. Размножение полос скольжения, как правило, начинается от источников дислокаций, расположенных в поверхностном слое на поверхностях раздела.

При движении в полосах скольжения дислокации встречают препятствия (барьеры), преодолевая которые, обеспечивают дальнейшее развитие пластической деформации.

В процессе магнитно-абразивной обработки режущие кромки ферромагнитной частицы взаимодействуют с материалом обрабатываемой заготовки. Взаимодействие происходит при высоких давлениях и скоростях скольжения, что вызывает неоднородность распределения температурных полей. Материал режущей части инструмента при этом находится в сложном напряженном состоянии (на него действуют напряжения изгиба, сжатия и растяжения).

Разрушение абразивной составляющей ферромагнитных частиц может привести к непосредственному контакту их ферромагнитной составляющей с обрабатываемой поверхностью, что вызывает интенсификацию структурно-фазовых превращений и создает предпосылки для адгезийного взаимодействия материалов трущихся поверхностей заготовки и ферромагнитных зерен.

Взаимодействие режущих кромок ферромагнитных частиц с материалом обрабатываемой заготовки уже случайно из-за рассеяния физико-механических свойств контактируемых участков и неоднородного распределения микронеровностей на них. Кроме того, процесс резания сопровождается рядом физических явлений (адгезия, диффузия и др.), которые также имеют вероятностную природу. Это приводит к случайным вариациям изнашивания и сложным статистическим закономерностям их изменения во времени от входных параметров процесса магнитно-абразивной обработки.



### 5.1.3 Формирование абразивной щетки из массы ферроабразивных частиц в результате их самоорганизации

Процесс магнитно-абразивной обработки представляет собой ориентированное и избирательное абразивное микрорезание и микровыглаживание. Частицы ферроабразивного порошка контактируют преимущественно с вершинами гребешков, являющихся концентраторами магнитных силовых линий. Каждая частица, находясь в магнитном поле, располагается наибольшей осью по направлению к обрабатываемой поверхности. Движение ферроабразивных частиц в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке и интенсивность съема микронеровностей с обрабатываемой поверхности определяется характером действия на контактирующие частицы сил на различных стадиях процесса абразивного воздействия.

По мере износа режущей кромки ферроабразивной частицы путем выкрашивания абразивной составляющей, изменяется геометрическая форма частицы, смещается центр ее тяжести и увеличивается коэффициент трения из-за того, что в контакт с обрабатываемой поверхностью вступает «ферромагнитная матрица» частицы. Это, в свою очередь, приводит к увеличению силы  $f_m$ , что вызывает смещение свободно ориентированных частиц и переориентацию их наибольшей оси в направлении магнитных силовых линий, то есть происходит явление регенерации «абразивной щетки» путем самоорганизации массы ферроабразивных частиц, вынужденных совершать периодическое вращение в рабочей зоне зазора и располагаться к обрабатываемой поверхности наиболее острой режущей кромкой [96]. В результате явлений самоорганизации массы частиц свободного незакрепленного абразива обработка поверхности детали производится постоянно обновляющимися острыми кромками, т.е. на протяжении всего цикла обработки имеет место процесс ориентированного абразивного резания. Процесс регенерации «абразивной щетки» происходит более интенсивно при больших значениях градиента магнитной индукции.

Магнитно-абразивная обработка относится к процессам, в основе которых лежат быстротекающие физические и химические явления, носящие случайный характер, и предсказать их можно только с некоторой вероятностью.

Для экспериментального и теоретического исследования таких процессов целесообразно использовать статистический подход [97, 98].

Для определения доминирующего параметра при отсутствии симметричности и транзитивности целесообразно применить синергетическую концепцию, использующую понятие моды случайной

непрерывной величины, т.е. такое значение параметра, при котором плотность его распределения имеет максимум [97]. При этом распределение случайных величин, на фоне которых проявляются моды, описываются законами:

- 1) равномерным  $f(x) = 1 / (x_1 - x_0)$ , при  $x_0 \leq x \leq x_1$ ;
  - 2) экспоненциальным  $f(x) = (1/\lambda) \exp(-x/\lambda)$ , при  $x \geq 0$ ,  $\lambda > 0$ ;
  - 3) нормальным  $f(x) = (1 / (\sqrt{2\pi})) \exp(-(x - \mu)^2 / (2\sigma^2))$ , при  $-\infty < x < \infty$ ,  $\mu$  и  $\sigma^2 > 0$ ,
- где:  $\mu$  – математическое ожидание;  
 $x_0$  и  $x_1$  – ограничения;  
 $\sigma^2$  – дисперсия случайных величин  $x$ .

Судить о степени соответствия статистических данных выбранному закону распределения, т.е. о характере проявления моды, позволяет отношение Романовского:

$$R = (\lambda_p^2 - k) / \sqrt{2k} \quad (5.1)$$

где:  $\lambda_p^2$  – критерий Пирсона;  
 $k$  – число степеней свободы, т.е. количество групп в изучаемом ряду, рассчитанных ( $\lambda$ ,  $\mu$  и др.) и используемых при вычислении теоретического распределения статистических характеристик.

Статистический анализ доминирующего параметра производственной системы в рамках широкой номенклатуры применяемых технологий позволяет минимизировать число экспериментов при изучении процессов и отдельных явлений.

В самоорганизующихся системах можно управлять гибкостью и надежностью, изменяя число подсистем [99]. Каждая подсистема  $i$  имеет выходы:  $q_1$  – детерминированный строго определенный и  $q_2$  – флуктуирующий с рассеянными характеристиками.

Полный выход подсистемы в первом приближении с учетом аддитивности материальных и информационных потоков:

$$q^{(i)} = q_1^{(i)} + q_2^{(i)} \quad (5.2)$$

Считая, что в условиях производства  $q^{(i)}$  – независимая случайная величина, полная величина выхода следующая:

$$Q = \sum_{i=1}^n q^{(i)} \quad (5.3)$$

Полный выход, согласно предельной центральной теореме, растет пропорционально числу подсистем  $n$ , в то время как величина рассеяния растет пропорционально квадратному корню  $\sqrt{n}$ . Эти оценки основаны

на анализе линейной зависимости, на самом же деле обратная связь, присущая производственным системам, приводит к еще более значительному подавлению рассеяния характеристик.

#### 5.1.4 Критерии процессов формирования поверхностей при магнитно-абразивной обработке

При синтезе интенсивных методов обработки необходимо учитывать стабильность формирования параметров качества обработки и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического процесса путем применения обратных связей [100]. Поскольку условия, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений и стабилизацию формирования параметров качества интенсивной обработки, являются следствием избыточности рассматриваемой технологической системы по структурному составу, то целесообразно в качестве целевой функции вместо конкретных значений совокупности критериев выбора использовать критерии самоорганизации процессов.

В общем виде системная модель технологии [101] представляется сочетанием трех входных потоков: вещества, энергии, информации. Способ обработки 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 или нанесения 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.

Воздействие на заготовку осуществляется с целью перехода ее из одного состояния в другое, соответствующее новому качеству. Это воздействие осуществляется в несколько этапов. На первом этапе подводимая энергия преобразуется в рабочую  $\mathcal{E}_{\text{раб}}$  с помощью технологического оборудования. На втором этапе рабочая энергия превращается в энергию воздействия  $\mathcal{E}_{\text{возд}}$  на обрабатываемый объект. На третьем этапе подводимая энергия приводит к образованию физико-химических механизмов  $M_{\text{ф.х}}$  воздействия на заготовку, являющихся главным элементом формирования параметров процесса обработки (производительность, энергозатраты, качество поверхности и т. п.). Таким образом, процесс обработки (ПО) представляется в виде цепочки преобразования энергии:

$$\text{ПО} = \{ \mathcal{E}_{\text{раб}} \ \mathcal{E}_{\text{возд}} \ M_{\text{ф.х}} \}. \quad (5.4)$$

При формировании поверхности финишными методами обработки рассматривают геометрические и физико-механические свойства,

включающие шероховатость, волнистость, твердость, износостойкость, прочность.

При изучении физических и термомеханических явлений, происходящих в нестационарных технологических процессах интенсивной обработки, целесообразно использовать критерии Пекле  $Pe$  и Рейнольдса  $Re$  [56]. Для описания процессов тепломассопереноса при использовании концентрированных потоков энергии применяются критерии, характеризующие поверхностные и пространственные движения потоков вещества и энергии.

Процессы формирования поверхности при магнитно-абразивной обработке можно характеризовать последовательностью преобразований  $Pe^* Re^*$ , в которой критерий Пекле  $Pe^*$  характеризует отношение количества теплоты, отводимого конвекцией и путем теплопроводности, и определяет, является ли данный источник теплоты быстро движущимся, а критерий Рейнольдса ( $Re^*$ ) характеризует переход ламинарного движения порошковой среды в турбулентное и представляется произведением  $Pe Pr$ , в котором критерий Прандтля  $Pr$  характеризует способность теплоты распространяться в данной среде.

Таким образом, процессы формирования поверхностного слоя в технологической системе магнитно-абразивной обработки можно описать модифицированными критериями Рейнольдса  $Re^*$ , Пекле  $Pe^*$  и Прандтля  $Pr^*$ :

$$Re^* = \frac{Pe^*}{Pr^*} = \frac{v_s t}{\omega^* Pr^*} = \frac{v_s t}{\nu^*} = \frac{v_s t}{(\sigma_p / \sigma_M)(v/S)} = \left( \frac{\sigma_M}{\sigma_p} \right) \cdot \left( \frac{v_s S t}{v} \right), \quad (5.5)$$

в которых  $\vec{v}_s = \vec{v} + \vec{S}$  - результирующая скорость движений формирования поверхности, главного  $\vec{v}$  и подачи  $\vec{S}$ ;  $t$  - толщина наносимого и деформируемого слоя с учетом изменения его плотности;  $\mu^*$  и  $\nu^*$  - обобщенная проводимость и вязкость технологической среды,  $p$  - трансляционная составляющая напряженного состояния технологической среды и сформированного покрытия в направлении силы деформирования  $P$ ;  $M$  - ротационная составляющая напряженного состояния в направлении вращения на плоскости, образованной  $P$  и  $S$ .

Соотношение составляющих напряженного состояния среды  $(\sigma_M / \sigma_P)$  на микроуровне и скоростей дополнительного и главного движения элементов технологической системы  $(S/v)$  на макроуровне описывает вязкость технологической среды  $(1/\nu^*)$ , называемую ротационной.

$$\mu^* = \frac{1}{\nu^*} = \left( \frac{\sigma_M}{\sigma_P} \right) \left( \frac{S}{v} \right). \quad (5.6)$$

При интенсификации технологических воздействий ротационная вязкость  $\mu^* = -\tau^* / \text{rot} \vec{v}^*$  характеризует переход объемной вязкости среды  $\xi^* = -\sigma^* / \text{div} \vec{v}$  в динамическую  $\eta = -\tau_g / \text{grad} \vec{v}$ , используя добавочные касательные  $\tau_g^*$  и нормальные  $\sigma^*$  напряжения при сжатии и растяжении среды наряду с нормальным напряжением давления  $p_g$  и динамическим касательным напряжением  $\tau_g = -\eta \sigma_g$ , а  $\mu^*$  описывает турбулентные составляющие вращения в потоке среды, движущемся со скоростью  $v$ .

При образовании термодинамически неустойчивых структур целесообразно с использованием критерия Рейнольдса  $Re^*$  определять волнистость и шероховатость формирующегося рельефа поверхности  $Ra$ . Поэтому толщина формируемого слоя  $t$ , пропорциональная увеличению или снижению его массы  $Q$ , с учетом сплошности или пористости покрытия, в результате которых изменяется относительная твердость  $H_\epsilon = \Delta H / H$ , описывается выражением  $Q / (1 - H_\epsilon)$ .

Соотношение параметров напряженного состояния  $\sigma_p / \sigma_m$  в (5.5) и (5.6), пропорциональных факторам, определяющим перемещение и вращение частиц порошка, можно представить отношением  $B/\tau$  для магнитодинамических воздействий.

В случае, когда необходимо не только сформировать поверхность, но и упрочнить ее в технологической системе создается положительная обратная связь. Избыточные степени свободы инструмента и технологической среды, подавляя рассеяние потоков энергии и вещества в формоизменяемом припуске, создают упрочняющие структуры в поверхностном слое и повышают производительность обработки.

В том случае, когда сначала требуется упрочнить, а в завершение сформировать рельеф поверхности, в технологической системе при электрофизических воздействиях организуется отрицательная обратная связь. Дополнительные воздействия источниками энергии и веществами, формируя упрочняющие структуры в поверхностном слое, не допускают развития неустойчивости процесса при образовании рельефа поверхности и при стабилизации не позволяют поднять производительность обработки.

Организация обратных связей в технологическом комплексе электрофизической обработки через избыточные степени свободы инструментов, частиц материала порошка и удаляемого слоя, а также посредством дополнительных воздействий потоками поля и источниками энергии, позволяет управлять устойчивостью процессов формирования поверхностного слоя путем их самоорганизации.

Статистический анализ параметров качества методов электрофизической обработки позволяет выделить наиболее значимые технологические факторы и выявить их взаимосвязи. Формирование технологических регламентов изучаемых методов обработки только из

узких диапазонов режимов, ограниченных условиями самоорганизации совместных электрофизических воздействий, создает условия для стабилизации параметров качества поверхностного слоя.

Обеспечение условий самоорганизации процессов формирования поверхностного слоя согласно критериям Пекле  $Pe$  и Рейнольдса  $Re$  и организация обратных связей в открытых технологических системах при совместных воздействиях позволяют посредством стабилизации электрофизических и термомеханических процессов управлять эффективностью и качеством обработки.

Моделирование термомеханических и электрофизических процессов на основе синергетического подхода позволяет учитывать стабильность формирования параметров качества и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологических процессов. Поскольку условия, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений и стабилизацию формирования параметров качества интенсивной обработки, являются следствием избыточности рассматриваемой технологической системы по структурному составу, то целесообразно в качестве целевой функции вместо конкретных значений совокупности критериев выбора использовать критерии самоорганизации процессов.

### **5.1.5 Самоорганизация процессов образования и регенерации абразивной щетки**

В частице ферроабразивного порошка, находящейся в магнитном поле зазора, происходит ориентация молекулярных токов, направление которых таково, что созданные ими магнитные поля совпадают с направлением внешнего магнитного поля и усиливают его. В толще частицы молекулярные токи направлены в противоположные стороны и создаваемые ими магнитные поля взаимно компенсируются. Поэтому учитывать будем только магнитные поля, возникающие от молекулярных токов, текущих по поверхности частицы.

Рассмотрим действие в направлении нормали к обрабатываемой поверхности сил магнитного поля на ферроабразивную частицу, находящуюся в рабочем зазоре при обработке наружных цилиндрических поверхностей. Магнитное поле в рабочем зазоре неоднородно [102-110], вектор его индукции  $\vec{B}$  можно разложить на две составляющие  $\vec{B}'$  и  $\vec{B}''$  (рисунок 4.1, а). Мысленно рассечем частицу плоскостями, перпендикулярными наибольшей оси, на множество элементарных участков и рассмотрим один из них. Поскольку по его периферии течет молекулярный ток, то поведение элементарного участка в магнитном поле зазора можно уподобить поведению контура проводника с током в неоднородном магнитном поле.

Под действием индукции  $\vec{B}$  возникают радиальные силы, действующие по периферии участка в плоскости, перпендикулярной направлению магнитных силовых линий. Эти силы взаимно уравниваются. Составляющая индукции  $\vec{B}'$  вызывает возникновение силы, направленной вдоль вектора  $\vec{B}$ . На элементарную длину  $dl$  периметра рассматриваемого участка действует сила

$$df = J_m B' dl, \quad (5.7)$$

где  $J_m$  - молекулярный ток по периметру участка, возникший вследствие намагничивания частицы.

Учитывая, что  $B' = B \sin \alpha$  (рисунок 5.1 а), и интегрируя (5.7), определим силу  $f$ , действующую на весь периметр участка  $L$

$$f = J_m B \sin \alpha \int_0^L dl \approx J_m B L \frac{\Delta r}{\Delta x}$$

Радиальная сила, действующая на частицу ферромагнитного порошка, находящуюся в неоднородном магнитном поле:

$$f_p = \sum f = P_m \frac{\Delta B}{\Delta x}, \quad (5.8)$$

где:  $P_m$  – магнитный момент частицы ферромагнитного порошка.

Определим величину градиента напряженности магнитного поля, приняв за  $x$  наибольший размер частицы порошка - (рисунок 5.1 б).

Тогда  $\Delta B = \frac{\Phi}{S_1} - \frac{\Phi}{S_2}$ , где  $\Phi$  – магнитный поток;  $S_1$  и  $S_2$  - площади сечений.

Так как  $S_1 = R_d \beta b$  и  $S_2 = (R_d + \Delta) \beta b$ , то  $\Delta B = \frac{\Phi \Delta}{\beta b R_d (R_d + \Delta)}$ , где  $R_d$  – радиус обрабатываемой поверхности;  $b$  – размер частицы в направлении оси детали (малая ось эллипсоида);  $\beta$  – угол между радиусами деталей, касательными к наибольшему сечению частицы в плоскости, перпендикулярной оси детали.

Тогда:

$$\frac{\Delta B}{\Delta x} = \frac{\Phi}{\beta b R_d (R_d + \Delta)}. \quad (5.9)$$

Магнитный момент частицы порошка в форме эллипсоида вращения:

$$P_m = \frac{4}{3} K H_1 \Delta^2 b, \quad (5.10)$$

где:  $K$  – магнитная восприимчивость материала ферропорошка;  
 $H_1$  – напряженность магнитного поля на нижней границе частицы;  
– размер большой оси эллипсоида, направленной вдоль магнитного поля.

Подставив (5.9) и (5.10) в выражение (5.8) и учитывая, что  $\Phi = B_1 S_1 = \mu H_1 R_D b \beta$ , для единичной частицы получим:

$$f_p = \frac{4}{3} \frac{\mu \Delta^2 b K H_1^2}{R_D + \Delta}, \text{ где } \mu - \text{ магнитная проницаемость материала порошка.}$$

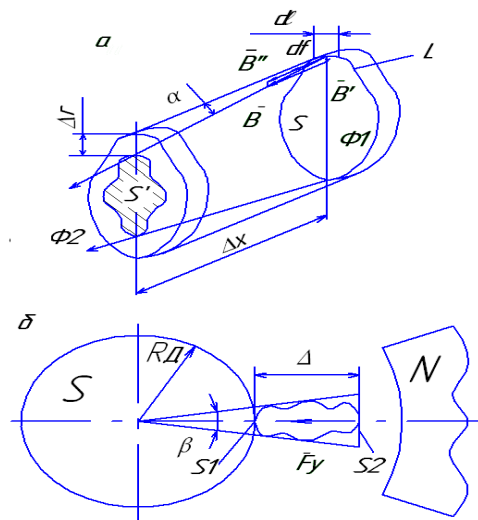


Рисунок 5.1 - Схема расчета сил, действующих на частицу ферроабразивного порошка нормально к поверхности детали: а – для элементарного участка; б – и на частицу в целом

Так как образовавшаяся вдоль магнитных силовых линий поля цепочка состоит из нескольких частиц, то на граничащую с обрабатываемой поверхностью частицу будет действовать суммарная сила со стороны всех более удаленных от оси детали частиц:

$$f_{\text{ц}} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\mu \Delta_i^2 b_i K H_i^2}{R_i + \Delta_i}, \quad (5.11)$$

где:  $n$  - число частиц в цепочке;  $R_i$  - расстояние от начала  $i$ -й частицы до оси упрочняемой поверхности;  $H_i$  - напряженность магнитного поля на границе  $i$ -й частицы;  $\Delta_i, b_i$  - размеры большой и малой осей эллипсоида, описывающего  $i$ -ю частицу.

Таким образом, ферроабразивные частицы под действием силы  $f_{\text{ц}}$  прижимаются к обрабатываемой поверхности, создавая нормальную составляющую усилия резания.



При относительном перемещении ферроабразивных частиц и обрабатываемой поверхности возникает тангенциальная или главная составляющая усилия резания:

$$f_T = f_{N \text{ щ}} k_{\text{тр}}, \quad (5.12)$$

где:  $k_{\text{тр}}$  – коэффициент трения.

Процесс магнитно-абразивной обработки представляет собой ориентированное и избирательное абразивное микрорезание и микровыглаживание. Частицы ферроабразивного порошка контактируют преимущественно с вершинами гребешков, являющихся концентраторами магнитных силовых линий. Каждая частица, находясь в магнитном поле, располагается наибольшей осью по направлению к обрабатываемой поверхности. По мере износа режущей кромки ферроабразивной частицы путем выкрашивания абразивной составляющей изменяется геометрическая форма частицы, смещается центр ее тяжести и увеличивается коэффициент трения из-за того, что в контакт с обрабатываемой поверхностью вступает «ферромагнитная матрица» частицы. Это, в свою очередь, приводит к увеличению силы  $f_m$ , что вызывает смещение свободно ориентированных частиц и переориентацию их наибольшей оси в направлении магнитных силовых линий, то есть происходит явление самоорганизации «абразивной щетки» из массы ферроабразивных частиц, вынужденных совершать периодическое верчение в рабочей зоне зазора и располагаться к обрабатываемой поверхности наиболее острой режущей кромкой.

В результате явлений самоорганизации массы частиц свободного незакрепленного абразива обработка поверхности детали производится постоянно обновляющимися острыми кромками, т.е. на протяжении всего цикла обработки имеет место процесс ориентированного абразивного резания.

### **5.1.6 Моделирование и оптимизация параметров магнитно-абразивной обработки с учетом самоорганизации процесса**

Из теории резания известно, что при абразивной обработке поверхностей жестко закрепленными абразивными частицами только 8...10 % частиц участвуют в процессе резания, 10...12 % царапают и пропахивают обрабатываемый материал, а остальные 78...82 % упругопластически деформируют поверхность. Поэтому стремятся обеспечить восстановление режущих свойств абразивных инструментов выкрашиванием и выпадением из связки абразивных частиц, что позволит давящим и царапающим частицам постепенно подключаться к

процессу стружкообразования. Использование явлений самозатачивания абразивных инструментов позволяет резко сократить число их правок.

В процессах абразивной обработки в зоне резания возникает температура, значительно превышающая наблюдаемую при резании лезвийными инструментами, когда основной поток тепла уносится со стружкой. В зависимости от режимов абразивной обработки поверхностный слой заготовки поглощает от 50 до 80 % общего количества выделяемого тепла. Поскольку температура повышается в области контакта абразивной частицы с обрабатываемым материалом, то необходимо либо отводить тепло из зоны резания, либо снижать температурные градиенты в точках их возникновения, используя смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС).

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.

Магнитно-абразивная обработка поверхности образцов диаметром 40 мм из стали 45 проводилась на станке модели СФТ 2.150.00.00.000. Перед магнитно-абразивной обработкой образцы шлифовались до  $Ra$  0,63...1,25 мкм. Обработка производилась ферроабразивным порошком Ж15КТ зернистостью 100/160. В качестве СОЖ применялся 5 % раствор эмульсола Э2 в воде.

Физико-механические параметры поверхностного слоя оценивались знаком и величиной напряжений I-го ( $\sigma_I$ ) и II-го ( $\sigma_{II}$ ) рода; дисперсностью блоков когерентного рассеяния ( $D$ ). Напряжения  $\sigma_I$  определялись по методике Давиденкова Н.Н., 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. При вычислении величин напряжений учитывались уточнения, внесенные в методику М.А. Бабичевым и Л.А. Гликманом. Остаточные напряжения исследовались на глубине 5 мкм. Величины микронапряжений и блоков мозаики определялись методами рентгеноструктурного анализа по известным методикам, основанным на аппроксимации линий эталонного и исследуемого образца.

В качестве эталонов использовались исходный образец и армко-железо. Рентгеноструктурные исследования осуществлялись на дифрактометре ДРОН-3.0 путем регистрации рентгеновских интерференционных максимумов ионизационным методом. Съемка велась в монохроматизированных  $CuK_\alpha$  и  $CoK_\alpha$  излучениях. Напряжения оценивались по задней линии  $\alpha$ -фазы, аппроксимируя ее по функции  $y = (1 + 8x^2)^{-2}$

$y=(1+8x^2)^{-2}$ , а блочность структуры - по передней линии с аппроксимацией по функции  $y=(1+6x^2)^{-1}$ .

Производительность обработки  $Q$ , равная уменьшению массы  $m$  образца, приходящейся на единицу площади в течение периода времени  $\tau$ , измерялась на аналитических весах АДВ-200М. Постоянными факторами в экспериментах при магнитно-абразивной обработке были приняты скорость осцилляции образца  $V_0 = 0,2$  м/с, расходы порошка  $q_n = 0,3$  г/(с·мм<sup>2</sup>) и СОЖ  $q_{ж} = 0,04$  дм<sup>3</sup>/с.

Статистическую модель магнитно-абразивной обработки получали центральным композиционным ротатабельным униформ планированием (ЦКРУП) экспериментов при  $k = 5$ . Параметрами оптимизации были приняты:  $Y_1 - Q$ ;  $Y_2 - Ra$ , а независимыми переменными - факторы  $X_1 - V$ ,  $X_2 - \tau$ ,  $X_3 - A$  (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 5.1.

Таблица 5.1 - Условия экспериментов по матрице ЦКРУП второго порядка для  $k = 5$

Уровни факторов $X_i$	Значения факторов				
	$V$ , м/с	$\tau$ , с	$A$ , мм	$B$ , Тл	$\delta$ , 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

Результаты экспериментов. Модель, определяющая характер зависимости производительности ( $Q$ , г/дм<sup>2</sup>) и шероховатости ( $Ra$ , мкм) поверхности от технологических факторов, получена при статистической обработке результатов опытов:

$$\begin{aligned}
 Q = Y_1 = & 0,745 + 0,052X_1 + 0,130X_2 - 0,001 \cdot X_3 + 0,125X_4 - \\
 & 0,101X_5 - 0,002X_1X_2 + 0,008X_1X_3 + 0,014X_1X_4 + 0,038X_1X_5 + \\
 & 0,016X_2X_3 + 0,005X_2X_4 - 0,013X_2X_5 + 0,001 \cdot X_3X_4 + \\
 & 0,030X_3X_5 + 0,046X_4X_5 - 0,026X_1^2 - 0,060X_2^2 - 0,012X_3^2 - \\
 & 0,002X_4^2 + 0,008X_5^2
 \end{aligned}
 \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned}
Ra=Y_2= & 0,080 - 0,011X_1 - 0,031X_2 + 0,006X_3 - 0,006X_4 + \\
& 0,022X_5 - 0,001*X_1X_2 - 0,003X_1X_3 + 0,006X_1X_4 - 0,004X_1X_5 - \\
& 0,007X_2X_3 - 0,017X_2X_4 - 0,005X_2X_5 + 0,002X_3X_5 + \\
& 0,009X_4X_5 + 0,005X_1^2 + 0,020X_2^2 + 0,003X_3^2 + 0,001X_4^2 + 0,009X_5^2
\end{aligned} \quad (5.14)$$

Выявлено, что коэффициенты регрессий, кроме отмеченных (\*), значимы с 90 %-ной доверительной вероятностью, параметр Q адекватен при 5 %, а Ra - при 10 %-ном уровне значимости.

Графические отображения моделей (5.13) и (5.14) представлены на рисунках 5.2 и 5.3 одномерными сечениями функций отклика  $Y_1$  и  $Y_2$ . Анализ полученной модели позволил выявить степень влияния технологических факторов на параметры оптимизации (таблица 5.2).

Из анализа данных (рисунок 5.2, 5.3 и таблица 5.2) 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:

$$\begin{aligned}
Q: & \quad \tau = B \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow A; \\
Ra: & \quad \tau \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow B = A; \\
\hline
& \quad \tau \rightarrow \delta \rightarrow B \rightarrow V \rightarrow A
\end{aligned} \quad (5.15)$$

Таблица 5.2 - 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
$\tau$	$X_2$	31,79	40,79
A	$X_3$	0,25	7,89
B	$X_4$	30,56	7,90
$\delta$	$X_5$	24,69	28,95

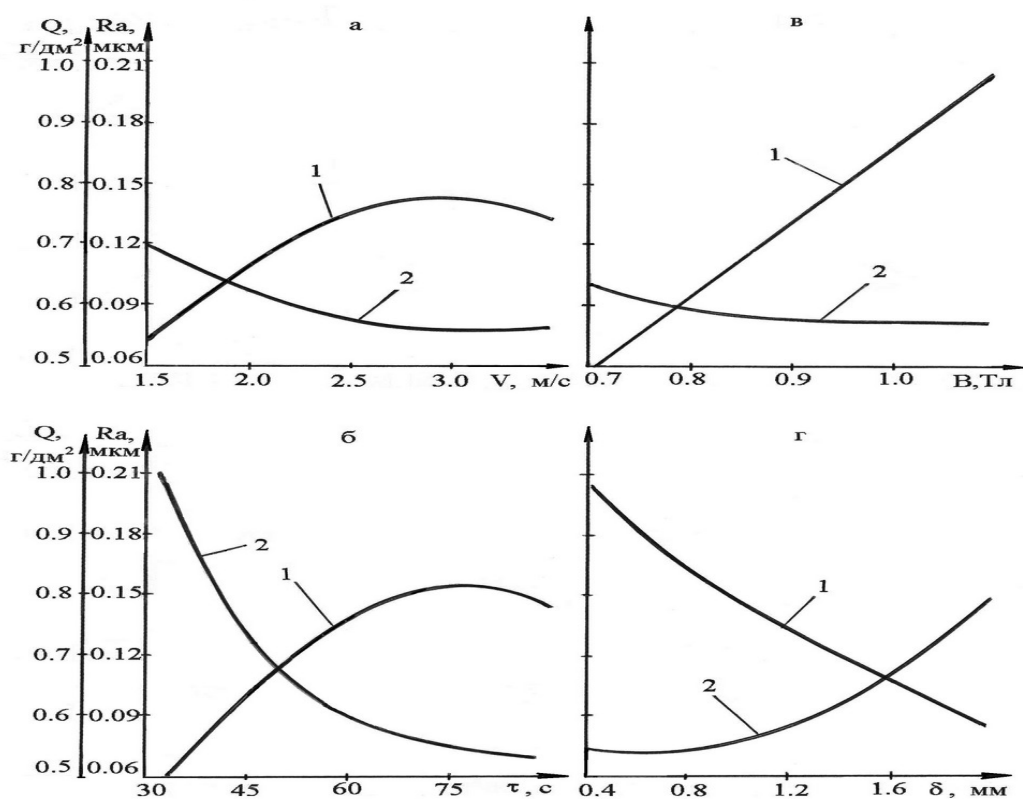


Рисунок 5.2 - Зависимости от скорости главного движения  $V$  (а), длительности полирования  $\tau$  (б), магнитной индукции  $B$  (в), рабочего зазора  $\delta$  (г) показателей производительности ( $Q$ ) и шероховатости поверхности ( $R_a$ ) после магнитно-абразивной обработки: 1 –  $Q$ ; 2 –  $R_a$

Ряды (5.15) 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 сьем металла.

Наиболее значимыми технологическими факторами, влияющими на производительность и геометрические параметры качества магнитно-абразивной обработки, согласно (5.15), являются  $\tau$ ,  $B$  и  $\delta$ . Так как из комплексного показателя  $\delta/\Delta$  параметры качества больше определяет размер частицы  $\Delta$ , чем величина рабочего зазора  $\delta$ , то для построения статистической модели физико-механических характеристик поверхности изделия в качестве технологического фактора выбирали  $\Delta$ . Постоянными принимали средние значения  $V = 2,5$  м/с и  $A = 1,5$  мм.

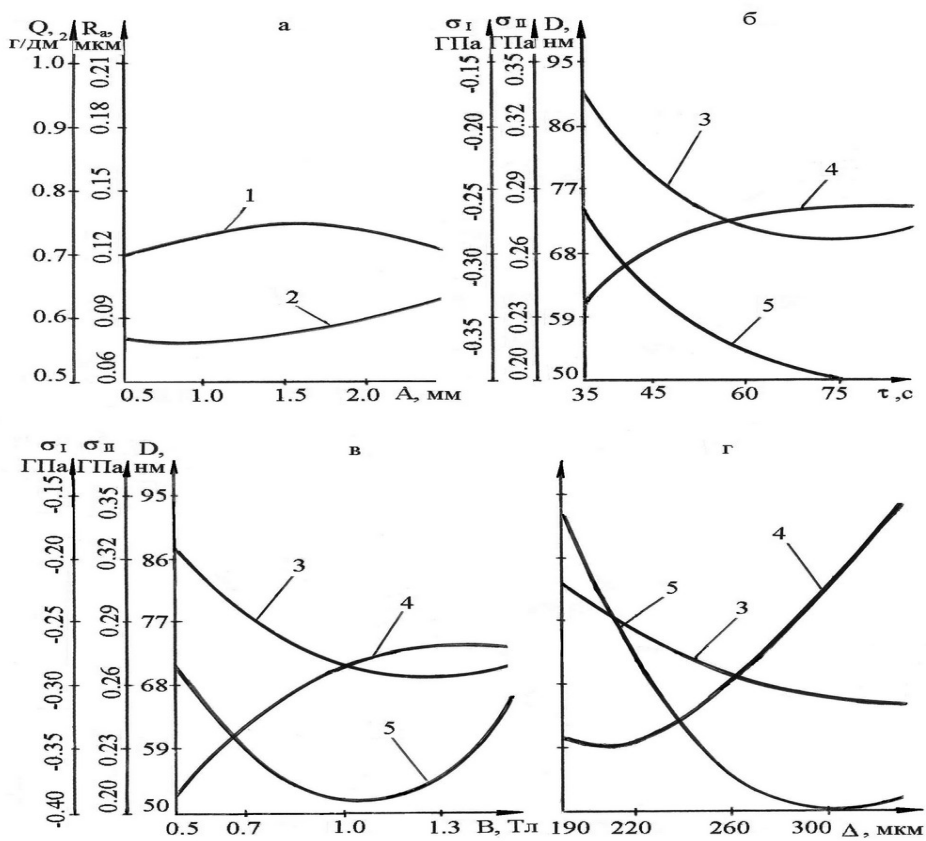


Рисунок 5.3 - Зависимости от амплитуды осцилляции  $A$  (а), длительности обработки  $\tau$  (б), магнитной индукции  $B$  (в), размера зерен  $\Delta$  (г) показателей производительности и качества магнитно-абразивной обработки: 1 –  $Q$ ; 2 –  $R_a$ ; 3 –  $\sigma_I$ ; 4 –  $\sigma_{II}$ ; 5 –  $D$

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  $X_1 - \tau$ ,  $X_2 - B$ ,  $X_3 - \Delta$ . Условия экспериментов приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Условия экспериментов по матрице ЦКРУП второго порядка для  $k = 3$

Уровни факторов $X_i$	Значения факторов		
	$\tau$ , с	B, Тл	$\Delta$ , 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

Модель, характеризующая величины напряжений I и II рода  $\sigma_I$  и  $\sigma_{II}$ , а также дисперсности блоков когерентного рассеяния  $D$ , определена при статистической обработке экспериментальных данных:

$$\sigma_I = Y_1 = -0,282 - 0,029X_1 - 0,023X_2 - 0,028X_3 + 0,003 * X_1X_2 + 0,002 * X_1X_3 + 0,007X_2X_3 + 0,024X_1^2 + 0,018X_2^2 + 0,004X_3^2 ; \quad (5.16)$$

$$\sigma_{II} = Y_2 = 0,273 + 0,013X_1 + 0,021X_2 + 0,032X_3 - 0,003X_1X_2 - 0,002 * X_1X_3 - 0,003X_2X_3 - 0,007X_1^2 - 0,009X_2^2 + 0,007X_3^2 ; \quad (5.17)$$

$$D = Y_3 = 52,16 - 7,25X_1 - 1,01X_2 - 12,25X_3 - 0,25 * X_1X_2 + 5,01X_1X_3 + 5,01X_2X_3 + 3,38X_1^2 + 6,50X_2^2 + 7,13X_3^2 ; \quad (5.18)$$

Коэффициенты полученных регрессий, кроме отмеченных (\*), значимы с 90 %-ной доверительной вероятностью, а параметры  $\sigma_I$ ,  $\sigma_{II}$  и  $D$  модели адекватны при 10 %-ном уровне значимости.

Графические отображения модели (5.16)...(5.18) представлены (Рисунок 5.3, б...г) 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. 5.4).

Таблица 5.4 - Влияние технологических факторов на физико-механические свойства поверхности после магнитно-абразивной обработки

	Степень влияния факторов на параметры, %
--	--

Факторы		$\sigma_1$	$\sigma_{II}$	D
$X_i$		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
$\tau$	$X_1$	36,25	19,70	35,35
B	$X_2$	28,75	31,82	4,92
$\Delta$	$X_3$	35,00	48,48	59,73

Анализ данных (рисунок 5.3, б...г и таблица 5.4) показывает, что по степени влияния на отдельные параметры и их совокупность в порядке убывания значимости основные технологические факторы можно расставить в ряды:

$$\sigma_1: \tau \rightarrow \Delta \rightarrow B;$$

$$\sigma_{II}: \Delta \rightarrow B \rightarrow \tau;$$

$$D: \Delta \rightarrow \tau \rightarrow B;$$

$$\Delta \rightarrow \tau \rightarrow B$$

(5.19)

Порядок значимости основных технологических факторов (5.19) показывает, что на характеристики тонкой кристаллической структуры ( $\sigma_{II}$  и D), в значительной мере обеспечивающие прочность покрытия, наибольшее влияние оказывает зернистость порошка ( $\Delta$ ), характеризующая контактные процессы магнитно-абразивной обработки. Макронапряжения первого рода ( $\sigma_1$ ), обеспечивающие предел выносливости и зависящие от соотношения силовых и температурных воздействий, определяются в первую очередь длительностью процесса ( $\tau$ ) 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  $\tau$  оказывает наибольшее влияние на результат магнитно-абразивной обработки (рисунок 5.2, 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 (рисунок 5.3, б). При  $\tau = 60$  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  $60 \text{ с} < \tau < 70 \text{ с}$ .

Магнитная индукция ( $B$ ), являясь силовой характеристикой поля, определяет электромагнитные явления в рабочей зоне и силы абразивного резания [111-118]. С повышением  $B$  увеличивается устойчивость цепочек порошка в зазоре и возрастают силы резания, поэтому интенсифицируется съём материала покрытия, а шероховатость поверхности снижается не существенно (рисунок 5.2, в). Обусловлено это тем, что зерна, прижимаемые к обрабатываемой поверхности, имеют возможность проскальзывать и вращаться под действием моментов резания и сил трения. Поэтому предпочтительной является  $B > 0,9 \text{ Тл}$ , а при ее значении  $1,1 \text{ Тл}$  увеличиваются макронапряжения до максимальных значений (рисунок 5.3, в). Последствие того, что из цепочек зерен создается более жесткая и менее проницаемая для СОЖ масса, 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 макронапряжениям растут микронапряжения и измельчается блочная структура (рисунок 5.3, 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  $0,9 \text{ Тл} < B < 1,1 \text{ Тл}$ .

Величина рабочего зазора ( $\delta$ ) определяет длину цепочки, а зернистость порошка ( $\Delta$ ) – количество ферромагнитных зерен в ней, влияя тем самым на плотность порошковой массы. При увеличении  $\Delta$  и уменьшении  $\delta$  возрастает жесткость цепочек и увеличивается сила резания. Рост рабочего зазора приводит к увеличению расхода порошка и снижению производительности процесса (рисунок 5.2, г). Экспериментально установлено, что наиболее эффективен рабочий зазор  $0,6 \text{ мм} < \delta < 1,0 \text{ мм}$ . С повышением зернистости  $\Delta$  порошка сжимающие напряжения возрастают, увеличиваются микронапряжения и уменьшается дисперсность блоков мозаики (рисунок 5.3, г). 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 зерна, 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 зернам порошка осевых перемещений. В результате совокупности

таких движений, зерна порошка активно используют свою поверхность, что приводит к снижению шероховатости ( $Ra$ ) и повышению производительности ( $Q$ ) обработки (рисунок 5.2, а и 5.3, 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 (таблица 5.5) 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  $Ra = 0,1 \text{ мкм}$  на технологических режимах  $V = 3 \text{ м/с}$ ;  $\tau = 65 \text{ с}$ ;  $A = 1,5 \text{ мм}$ ;  $B = 1,1 \text{ Тл}$ ;  $\delta = 0,8 \text{ мм}$ .

Таблица 5.5 - 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

Оптимальные значения физико-механических характеристик (таблица 5.6) 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 %.

Таблица 5.6 - Физико-механические параметры качества и обеспечивающие их факторы процесса магнитно-абразивной обработки

Параметры $Y_i$		Значения параметров	Значения факторов		
			$\tau, \text{с}$	$B, \text{Тл}$	$\Delta, \text{мкм}$
$\sigma_I, \text{ГПа}$	$Y_1$	0,30	56	0,9	300
$\sigma_{II}, \text{ГПа}$	$Y_2$	0,35	62	1,2	330
$D, \text{нм}$	$Y_3$	45,0	60	1,2	300

### 5.1.7 Управление процессами обработки в электромагнитном поле с использованием явлений их самоорганизации

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. Неоднородность структурного и деформированного состояния на макроуровне предопределяет особенности структурного строения материалов на микроуровне и, как следствие, их свойства [54].

Теоретические основы позволяют создавать методологию управления эксплуатационными характеристиками деталей. Они включают в себя совокупность взаимосвязанных аналитических моделей и критериев оптимизации технологических воздействий, построенных на основе методов аналитической механики, термодинамики различных тел и сред с применением теории упругости и пластичности.

Энергетическое воздействие на поверхностный слой осуществляет переход его из одного состояния в другое, соответствующее новому качеству [54]. Управляя преобразованием подводимой энергии в рабочую  $\mathcal{E}_{\text{раб}}$  с помощью технологического оборудования, мы адекватно воздействуем на формирование параметров производительности и качества обрабатываемых поверхностей.

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.

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:

$$V_{st\rho} \left( \frac{S}{V} \right) \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_f} \right)$$

Результирующая скорость движений ( $V_s$ ) складывалась из скоростей главного движения ( $V$ ), подачи ( $S$ ) и осцилляции с амплитудой ( $A$ ). Толщина изучаемого слоя ( $t_\rho$ ) определялась величиной ( $\delta$ ) рабочего зазора или относительной величиной  $\delta/\Delta$ , учитывалось и упрочнение  $Q/(1 - \Delta H^*/H^*)$ . Показатель упрочнения  $H^*$  может описываться твердостью  $HRC$ , микронапряжениями  $\sigma_\Pi$  или другими характеристиками. Соотношение параметров напряжений  $\sigma_m/\sigma_f$  определялось магнитодинамическими  $B/$  воздействиями и кинематическими характеристиками  $V/S$ .

Устойчивость процессов магнитно-абразивной обработки. Рассмотрим устойчивость технологической системы при магнитно-абразивной обработке.

Исследуем процесс магнитно-абразивной обработки в зависимости от основных технологических факторов:  $V$ ,  $\tau$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $\delta$ , 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 (рисунок 5.2, а..г и 5.3, а) показывают, что скорость ( $V$ ) и время ( $\tau$ ) обработки влияют на производительность ( $Q$ ) и шероховатость поверхности ( $R_a$ ) аналогично подаче ( $S$ ) и индукции ( $B$ ). При этом как  $Q$ , так и  $R_a$  характеризуются, главным образом, временем обработки ( $\tau$ ), которое вместе с магнитной индукцией ( $B$ ) определяет количество абразивных зерен, участвующих в формировании поверхности. Следовательно, соотношение, описывающее вязкость технологической среды магнитодинамическими и кинематическими характеристиками  $(B/\tau)(V/S)$ , стремится к постоянству и повышает устойчивость магнитно-абразивной обработки. В результате, образующиеся цепочки абразивных частиц длиной  $\delta$ , обеспечивают наилучшую шероховатость поверхности, которая определяется параметрами:

$$R^* \sim \frac{Q}{(B/\tau)(V/S)} \quad (5.20)$$

Анализ результатов экспериментов (рисунок 5.2, а..г и 5.3, а) и проведенной расстановки по степени влияния технологических факторов:  $V$ ,  $\tau$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $\delta$  на оптимизируемые параметры позволяют представить для анализа обобщенную схему процесса формирования поверхности при магнитно-абразивной обработке в виде (амплитуда  $A$  осцилляции уподобляется подаче  $S$ ):

$$\begin{array}{l} Q : \tau \rightarrow B \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow S; \\ R^* : \tau \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow S \rightarrow B. \end{array} \quad (5.21)$$

Неустойчивости типа опережающих трещин или наростов при формировании рельефа поверхности ( $R^*$ ) устраняются в процессе магнитно-абразивной обработки путем управления производительностью обработки. Самоорганизация процессов микрорезания и трения в магнитном поле обеспечивает максимальную производительность, при которой шероховатость поверхности минимальна.

Так, при образовании  $R^*$  (5.20) влияние магнитной индукции  $B$  мало по сравнению с другими факторами. Производительность обработки ( $Q$ ) (5.21) определяется как  $B$ , так и  $\tau$  путем длительной фиксации незакрепленных зерен порошка. Фиксация осуществляет обратную связь

$R^*$  с  $Q$  и посредством регулирования  $B$  в течение всего периода  $\tau$  повышает устойчивость формирования поверхности при магнитно-абразивной обработке.

Исследуем упрочнение поверхностного слоя при магнитно-абразивной обработке в зависимости от основных технологических факторов:  $\tau$ ,  $B$ ,  $\Delta$  и с учетом факторов, обеспечивающих рациональный рельеф поверхности -  $V$ ,  $S$ , заменив  $\Delta$  на  $\delta$ . Такой выбор обосновывается тем, что факторы эти входят в критерии сомоорганизации, и основные из них определяют физико-механические параметры качества: макро- и микронапряжения  $\sigma_I$  и  $\sigma_{II}$ , дисперсность блоков мозаики  $D$ .

Результаты экспериментов (рисунок 5.2, б...г) показывают, что магнитная индукция ( $B$ ) и длительность полирования ( $\tau$ ) аналогично влияют на напряжения  $\sigma_I$  и  $\sigma_{II}$ . Следовательно, с учетом кинематических факторов  $V$  и  $S$  соотношение, описывающее вязкость порошковой среды  $(B/\tau)(V/S)$ , 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:

$$R^* \sim \frac{Q(1 - \Delta H^*/H^*)}{(B/\tau)(V/S)} \quad (5.22)$$

Исследования экспериментальных данных (рисунок 5.3, б...г) и проведенной расстановки по степени влияния основных факторов  $\tau$ ,  $B$ ,  $\Delta$  на физико-механические параметры качества обработки позволяют анализировать обобщенную схему процесса упрочнения поверхности при магнитно-абразивной обработке.

$$\begin{array}{l} Q: \tau \rightarrow B \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow S; \\ R^*: \tau \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow S \rightarrow B; \\ H^*: \delta \rightarrow \tau \rightarrow B \rightarrow V \rightarrow S. \end{array} \quad (5.23)$$

Формирующиеся при магнитно-абразивной обработке термодинамические неустойчивости, изменяющие структуру поверхностного слоя и снижающие его прочность ( $H^*$ ), можно устранить посредством регулирования производительности обработки ( $Q$ ). Самоорганизация процессов микрорезания и трения в электромагнитном поле обеспечивает увеличение производительности ( $Q$ ) и упрочнения ( $H^*$ ) поверхностного слоя.

Так, при формировании рельефа  $R^*$  (5.23) 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  $Q$  (5.23) описывается главным образом  $\tau, B$ , а также  $V, S$ , обеспечивающими движения ферроабразивных частиц порошка и самой заготовки, которые осуществляют обратную связь  $H^*$  с  $R^*$  через  $Q$  (5.23). Это позволяет посредством регулирования  $B, V, S$  в течение периода  $\tau$  повышать устойчивость процесса упрочнения при магнитно-абразивной обработке.

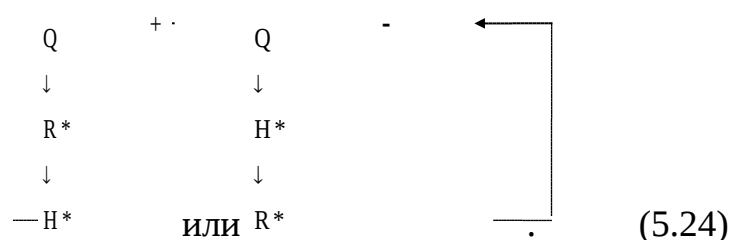
Таким образом, как дополнительная подвижность инструментов и частиц технологической среды, так и магнитные воздействия позволяют управлять кооперативными термомеханическими процессами формирования свойств поверхности.

При удалении поверхностного слоя с использованием магнитно-абразивной обработки образование термодинамически неустойчивых структур определяется параметрами магнитного поля в рабочей зоне.

Напряженное состояние  $\sigma_f$  и  $\sigma_m$  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  $f_u$  увеличивается твердость 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 ( $Ra$ ). Совместные согласованные воздействия на материал нагрева и дополнительных перемещений повышают через обратную связь устойчивость технологической системы. В результате формируется поверхностный слой максимальной твердости и минимальной шероховатости при скоростях дополнительных перемещений, обеспечивающих оптимальную производительность процессам MAO.

В результате проведенных исследований установлены обратные связи в технологической системе: положительная при формировании поверхности или отрицательная при упрочнении поверхностного слоя:



При использовании положительной обратной связи (5.24) 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 (5.24) дополнительные воздействия потоками энергии, формируя упрочняющие структуры, не допускают развития неустойчивостей процесса образования рельефа поверхности и повышают качество обработки при снижении ее производительности.

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 [54].

Управлять процессами упрочнения поверхностных слоев при магнитно-абразивной обработке позволяют тепловое воздействие и дополнительные степени свободы ферроабразивных частиц порошка путем изменения потоков магнитной энергии (рисунок 5.1), 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 (ЭДС). Возникающие микротоки интенсифицируют съем металла и улучшают физико-механические свойства обработанной поверхности. 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

$k_n$  и трения скольжения  $k_t$  путем организации обратных связей для управления производительностью и качеством обработки.

Метод управления устойчивостью нестационарных технологических систем, базирующийся на поддержании диапазона режимов обработки, обеспечивающих диссипацию потоков энергии в процессах самоорганизации поверхностных явлений, является одним из эффективных путей стабилизации параметров качества обрабатываемой поверхности (рисунок 5.4).

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.

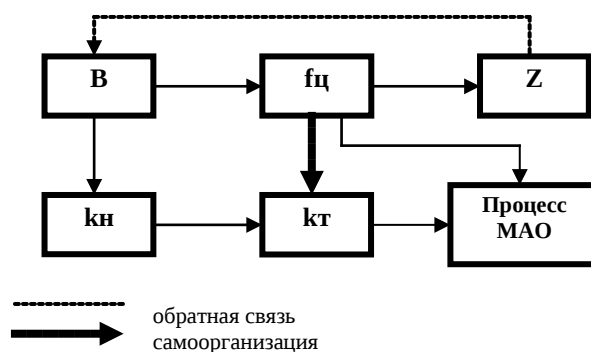


Рисунок 5.4 - Функциональная схема управления устойчивостью процессов MAO:  $f_{ц}$  – усилие прижима ферроабразивного порошка к поверхности заготовки;  $k_n$  – коэффициент распределения энергии;  $k_t$  – коэффициент трения скольжения;

## 5.2 Активация технологических сред и оптимизация их составов

Происходящие процессы в зоне обработки при MAO непосредственно обусловлены свойством рабочей технологической среды. Понятие “рабочая технологическая среда” (РТС), включающая в себя компоненты: СОТС + ФАП + внешнее магнитное поле, СОТС + гибкие ферроабразивные волокна + внешнее магнитное поле, СОТС + механические «щетки» в магнитном поле в присутствии ФАП, магнитнореологические суспензии и жидкости. Комплексное



определение РТС позволяет подобрать материалы ФАП, СОТС и топографию магнитного поля таким образом, которое удовлетворяет высокому уровню как эксплуатационных характеристик, так и обеспечению минимальной себестоимости МАО.

### **5.2.1 Повышение эффективности смазочно-охлаждающих технологических средств для магнитно-абразивной обработки**

Совершенствование составов и технологии приготовления СОТС является одним из основных направлений современной технологии машиностроительного производства. На изготовление СОТС затрачивают значительное количество дефицитного сырья и материалов. Без изменения технологии приготовления и составов СОТС нельзя обеспечить переход машиностроения на безотходное и малоотходное производство. Рациональный подбор и создание высокоэффективных СОТС возможны только при глубоком изучении природы и механизма их действия. Решение этих вопросов поможет превратить поиск новых СОТС из чисто эмпирической в теоретически и практически обоснованную отрасль техники.

Опыт передовых машиностроительных предприятий показывает, что рациональное применение СОТС позволяет в 1,2...4 раза повысить стойкость инструмента, на 20...60 % форсировать режимы резания, на 10...50 % повысить производительность труда, уменьшить энергозатраты при механической обработке [119]. Применение новых эффективных СОТС позволяет резко улучшить качество обработки и санитарно-гигиенические условия труда рабочих, а также в полной мере использовать широкие возможности современного автоматизированного производства, особенно при обработке жаропрочных, жаростойких, коррозионностойких и других труднообрабатываемых сталей и сплавов.

Среди технологических факторов, влияющих на формирование шероховатости и физико-механических свойств металлических поверхностей при финишной абразивной обработке, особое место отводится использованию соответствующего вида СОТС. Однако, несмотря на большое количество разработанных составов СОТС, задача прогнозирования их использования для финишной абразивной обработки во многом еще не решена. В основном такого рода рекомендации носят эмпирический характер, базирующийся на конкретных условиях механической обработки [120,121].

Применяют следующие основные способы подачи СОТС в зону резания:

- свободно падающей струей;
- высоконапорной струей;
- струей воздушно-жидкостной смеси (в распыленном состоянии);

– через каналы в теле режущего инструмента.

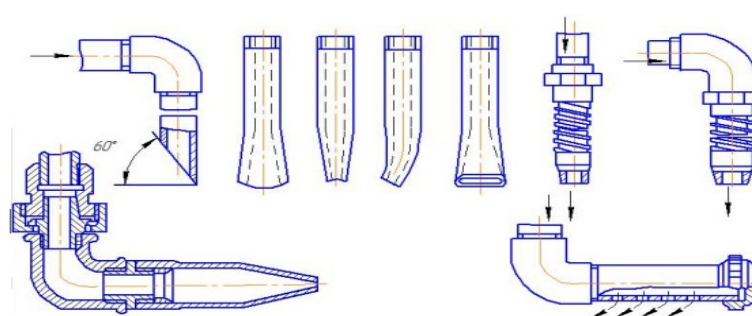


Рисунок 5.11 - Сопла насадки для подачи СОТС поливом и напорной струей

Подача СОТС чаще всего осуществляется свободнопадающей струей (поливом). Свободно падающая струя истекает из сопел различных конструкций (рисунок 5.11) под давлением 0,03...0,1 МПа, т.е. под действием силы тяжести, и обильно поливает зону резания.

Широко практикуется подача СОТС напорной струей под давлением 0,1...2,5 МПа. Напорную струю можно подавать как в зону обработки, так и по каналам в теле инструмента. При подаче в зону обработки скорость напорной струи достигает 40...60 м/с. В целях уменьшения разбрызгивания рекомендуется разветвлять поток СОТС часть потока направлять в виде тонкой напорной струи, а часть – свободным поливом.

Недостатки подачи СОТС высоконапорной струей следующие:

- трудность обеспечения в производственных условиях нужного направления струи СОТС на режущую кромку инструмента;
- необходимость тщательной очистки или диспергирования СОТС, чтобы исключить засорение сопла;
- необходимость оснащения станка специальной насосной станцией;
- сильное разбрызгивание жидкости.

Подача СОТС в распыленном состоянии осуществляется путем смешивания СОТС и воздуха и в виде аэрозоли направляют в зону резания. Эффективность действия СОТС при такой подаче можно объяснить повышением физической и химической активности СОТС, по сравнению с охлаждением нераспыленной струей. К преимуществам этой подачи СОТС следует отнести чрезвычайно малые расходы жидкости: 400...500 г/ч водной СОТС, 0,5...3 г/ч распыленные СОТС.

### **5.2.2 Методика исследования структурных характеристик смазочно-охлаждающих технологических средств на основе использования компьютерной микроскопии**

Компьютерная микроскопия представляет собой новое направление в информационно-измерительной технике, интенсивно развивающееся с конца 90-х годов XX века. Ее появление связано с широким распространением информационных технологий, в результате чего потребовалась разработка усовершенствованных подходов к организации микроскопических исследований, что в первую очередь обусловлено необходимостью осуществления компьютерной обработки информации, получаемой с помощью микроскопа.

Компьютерные микроскопы обладают широким спектром функциональных возможностей. Они позволяют получать, обрабатывать и хранить информацию о разнообразных видах изучаемых объектов, а также обеспечивают наглядное представление этой информации. С их помощью можно получать (снимать) изображения как статичных, так динамичных объектов (соответственно не изменяющих или изменяющих во времени свое положение и/или состояние).

Устойчивость электролитов-суспензий исследовалась с помощью компьютерного микроскопа, изготовленного ЧНПУП «Спектраавтомат комплекс» на базе микроскопа Микмед-6, предназначенного для исследования объектов в проходящем свете (рисунок 5.12).

Микроскоп был дооснащен цифровой видеокамерой типа DCM 320, работающей совместно с персональным компьютером. Кроме того, он был дооснащен спектральным осветителем высокого контраста типа ОС-16 ЦОМ с устройством управления режимами осветителя. Осветитель позволяет подсвечивать объекты в видимом спектре, обеспечивая высокую равномерность (6 %) поля подсветки. Конструкция осветителя (освещение микрообъекта) исключает посторонние засветки (блики), что значительно улучшает качество воспроизводимого изображения.

Компьютерный микроскоп имеет высокую разрешающую способность и контрастную чувствительность, а именно: позволяет наблюдать слабоконтрастные микрообъекты на дисплее с увеличением до 3000 раз (разрешение не хуже 300 нм) и с контрастом воспроизводимого изображения не менее 80:1.

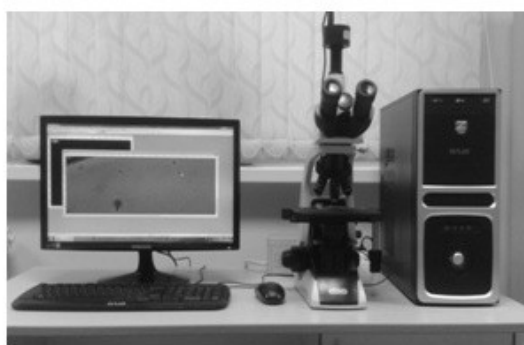


Рисунок 5.12 - Компьютерный микроскоп на базе микроскопа Микмед-6

Компьютерный микроскоп применялся для количественного анализа дисперсной фазы эмульсий. Измерения структурных параметров эмульсий осуществлялись на копиях микроизображений, предварительно сохраненных в базе данных компьютерного микроскопа. Для определения размеров отдельных структурных элементов (частиц) или расстояний между ними на микроизображения наносятся измерительные линии, которые, соответственно, пересекают эти элементы в выбранных направлениях или соединяют их между собой. При этом автоматически фиксируются значения измеряемых размеров или расстояний. Для измерения площади отдельных структурных элементов (частиц) на микроизображения наносятся измерительные контуры этих элементов. При этом также автоматически фиксируются значения измеряемых площадей. На рисунке 5.13 в качестве примера показано микроизображение (дисперсная фаза эмульсии) с нанесенными измерительными линиями и контуром.

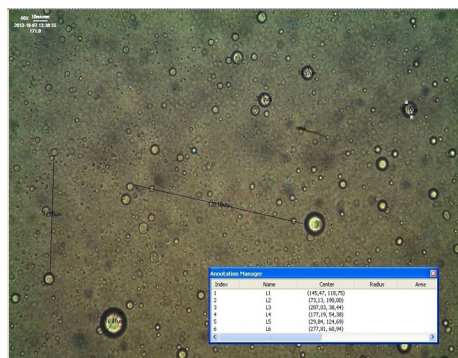


Рисунок 5.13 - Микроизображение дисперсной фазы эмульсии с нанесенными измерительными линиями и измерительным контуром

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.

При проведении экспериментов по диспергированию СОТс использовали следующие типы УЗ установок:

- ультразвуковой диспергатор низкочастотный УДНЧ (производство БГУИР, Беларусь);
- ультразвуковой диспергатор высокочастотный УДВЧ (производство БГУИР, Беларусь);

– аппарат для ультразвуковой обработки жидких сред под избыточным давлением УЗД-0,4-20 (производство ЧУП «КОНТЕХ-05», Беларусь).

### 5.2.3 Исследование процессов ультразвукового диспергирования смазочно-охлаждающих технологических средств

УЗ обработке подвергались СОТС. В разных опытах использовались три разновидности СОТС, объемами 50 (УДНЧ), 100 (УДВЧ) и 300 мл (УЗД).

УЗ обработку вели с помощью установки УДНЧ и УДВЧ, работающими в непрерывном режиме излучения. Удельная мощность излучателя, отнесенная к единице площади излучающей поверхности, составляла 22,5 Вт/см<sup>2</sup> и 40 Вт/см<sup>2</sup>. Длительность УЗ обработки  $t$  в разных опытах варьировали. В случае с диспергированием на УДНЧ длительность составляла 2, 5, 10, 15 мин. Для УДВЧ длительность варьировалась 5, 10 и 15 мин. В первоначальном состоянии эмульсия перемешивалась на орбитальном шейкере ИКА KS 260 (диаметр орбиты вращения 10 мм, частота вращения 300 об/мин, длительность перемешивания 1 мин).

Также УЗ обработка проводилась с помощью установки УЗДН-0,4...20. Избыточное давление в жидкости в процессе УЗ обработки составляло 5 бар. Объем обрабатываемой эмульсии СОТС составлял 300 мл. Обработку осуществляли последовательно в несколько этапов с разными периодами 5 и 10 мин соответственно.

После каждого этапа обработки брали пробы эмульсии (0,01 мл) и исследовали их с помощью компьютерного микроскопа. Наблюдение вели в рамках трех наиболее характерных полей зрения микроскопа. Эксперимент проводили с определенными заданными параметрами: частота 20000 Гц, напряжение 400...600 В, сила тока – 150...550 мА, мощность – 90 % от заданной.

Главной целью экспериментов было выявить принципиальные возможности повышения степени дисперсности эмульсий за счет диспергирования в условиях ультразвукового воздействия

В ходе опытов исследовали влияние  $t$  на изменение  $T$  и среднего размера  $R_{cp}$  масляных «шариков» (глобул). Поведение масляных «шариков» наблюдали в капле эмульсии объемом 0,01 мл с помощью КМ в трёх характерных полях зрения микроскопа, в целом отражавших основное состояние эмульсий в капле.

На рисунках 5.14...5.16 показаны графики зависимости  $T(t)$  для различных видов эмульсий.

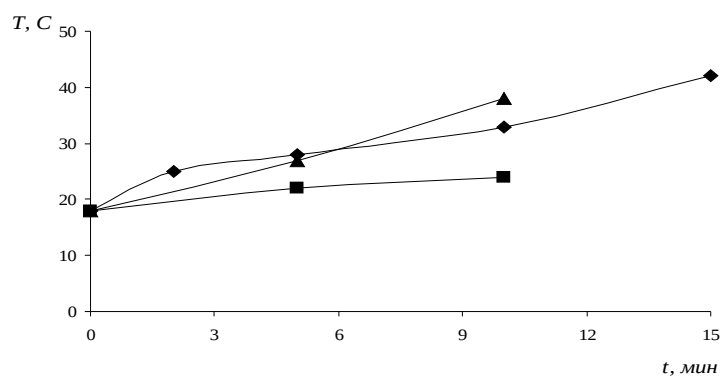


Рисунок 5.14 - Зависимости  $T(t)$  для СОТС №1 УЗ обработка: ▲ – УЗ обработка УДНЧ; ◆ – УЗ обработка УДВЧ; ■ – УЗ обработка УЗД

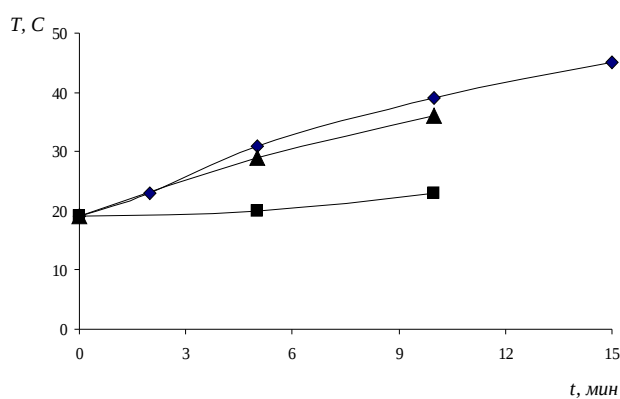


Рисунок 5.15 - Зависимости  $T(t)$  для СОТС №2 УЗ обработка: ▲ – УЗ обработка УДНЧ; ◆ – УЗ обработка УДВЧ; ■ – УЗ обработка УЗД

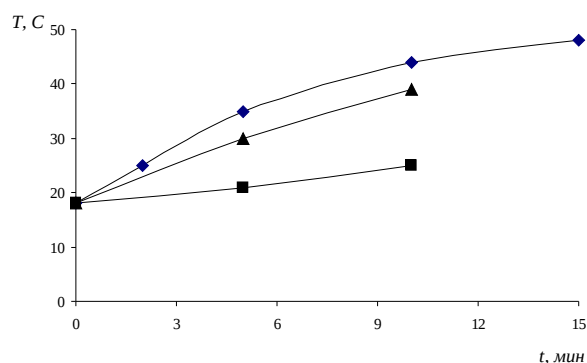


Рисунок 5.16 - Зависимости  $T(t)$  для СОТС №3 УЗ обработка: ▲ – УЗ обработка УДНЧ; ◆ – УЗ обработка УДВЧ; ■ – УЗ обработка УЗД

На рисунке 5.17 показан график зависимостей  $R_{cp}(t)$  для СОТС №1.

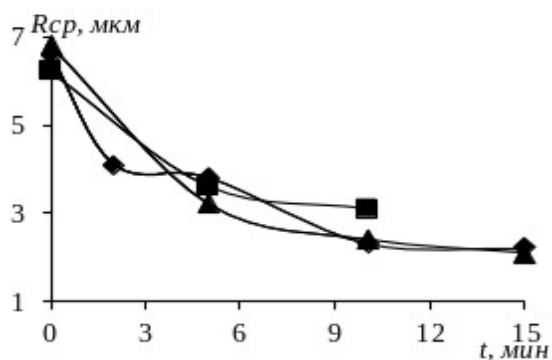


Рисунок 5.17 - Зависимости  $R_{cp}(t)$  для СОТС №1 при УЗ обработки:  
▲ – УЗ обработка УДНЧ; ◆ – УЗ обработка УДВЧ; ■ – УЗ обработка УЗД

На рисунке 5.18 показаны графики зависимостей  $R_{cp}(t)$  для СОТС №2.

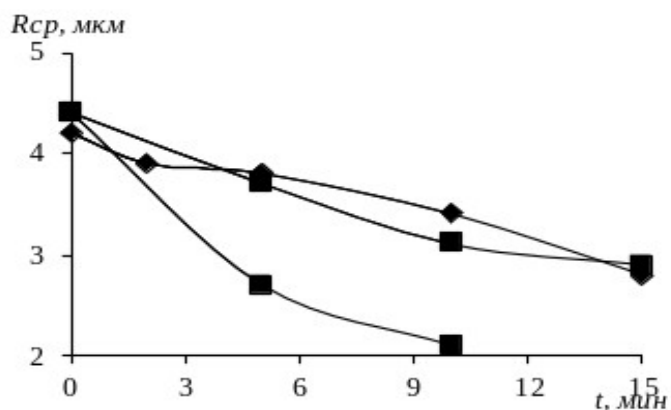


Рисунок 5.18 - Зависимости  $R_{cp}(t)$  для СОТС №2 при УЗ обработки:  
▲ – УЗ обработка УДНЧ; ◆ – УЗ обработка УДВЧ; ■ – УЗ обработка УЗД

На рисунке 5.19 показаны графики зависимостей  $R_{cp}(t)$  для СОТС №3.

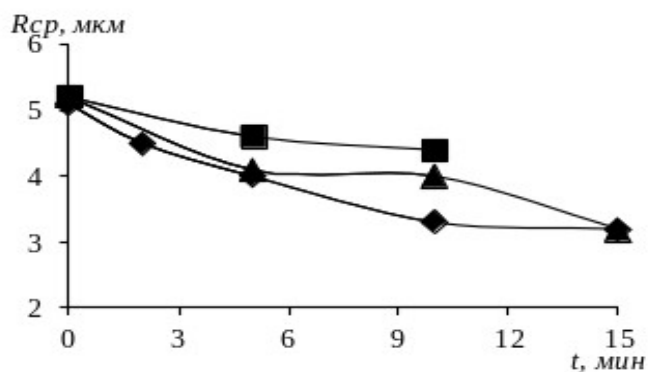


Рисунок 5.19 - Зависимости  $R_{cp}(t)$  для СОТС №3 при УЗ обработки: ▲ – УЗ обработка УДНЧ; ◆ – УЗ обработка УДВЧ; ■ – УЗ обработка УЗД

На рисунке 5.20 показаны графики зависимостей  $R_{cp}(t)$  при УЗ обработки УЗНЧ.

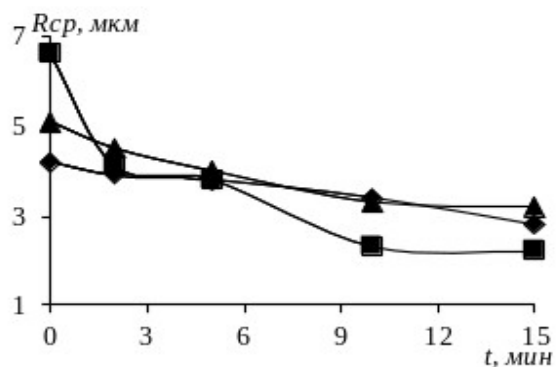


Рисунок 5.20 - Зависимости  $R_{cp}(t)$  при УЗ обработки УЗНЧ: ▲ – СОТС №1; ◆ – СОТС №2; ■ – СОТС №3

На рисунке 5.21 показаны графики зависимостей  $R_{cp}(t)$  при УЗ обработки УЗВЧ.

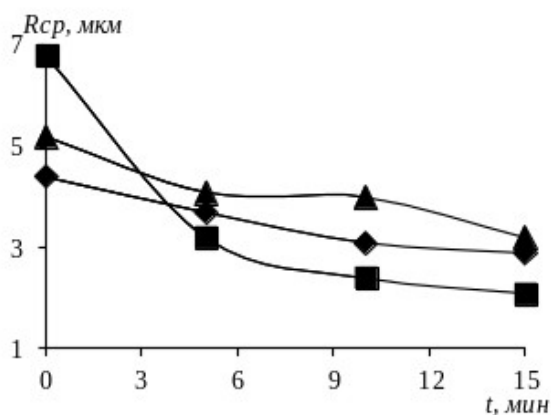




Рисунок 5.21 - Зависимости  $R_{cp}(t)$  при УЗ обработки УЗВЧ: ▲ – СОТС №1; ◆ – СОТС №2; ■ – СОТС №3

На рисунке 5.22 показаны графики зависимостей  $R_{cp}(t)$  при УЗ обработки УЗД.

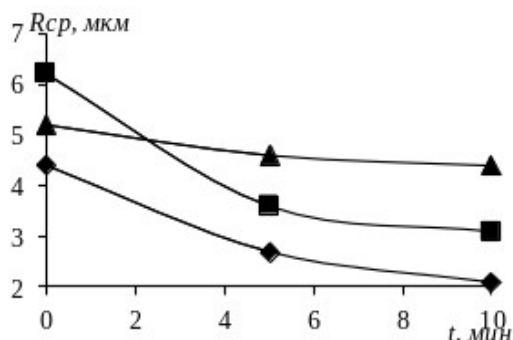


Рисунок 5.22 - Зависимости  $R_{cp}(t)$  при УЗ обработки УЗД: ▲ – СОТС №1; ◆ – СОТС №2; ■ – СОТС №3

Наиболее эффективное воздействие УЗ при применении УЗНЧ на «измельчение» глобул характерно для СОТС №1, при применении УЗВЧ – СОТС №1, при применении УЗД - СОТС №2. Результаты экспериментов  $R_{cp}(t)$  приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 - Результаты экспериментов  $R_{cp}(t)$  по УЗ обработке

Размеры глобул в эмульсии, мкм	Время УЗ обработки, мин											
	УЗ обработка УЗНЧ					УЗ обработка УЗВЧ				УЗ обработка УЗД		
	0	2	5	10	15	0	10	15	0	5	10	
СОТС №1	6,6	4,1	3,8	2,3	2,2	6,8	3,2	2,4	2,1	6,2	3,6	3,1
СОТС №2	4,2	3,9	3,8	3,4	2,8	4,4	3,7	3,1	2,9	4,4	2,7	2,1
СОТС №3	5,1	4,5	4,0	3,3	3,2	5,2	4,1	4,0	3,2	5,2	4,6	4,4

При обработке УЗНЧ размеры глобул уменьшились:

- для СОТС №1 – в 3 раза;
- для СОТС №2 – 1,5 раза;
- для СОТС №3 - 1,6 раза.

При обработке УЗВЧ размеры глобул уменьшились:

- для СОТС №1 – в 3,2 раза;
- для СОТС №2 – 1,5 раза;
- для СОТС №3 - 1,6 раза.

При обработке УЗД размеры глобул уменьшились:

- для СОТС №1 – в 2 раза;

- для СОТС №2 – 2,2 раза;
- для СОТС №3 - 1,2 раза.

Анализ результатов исследований показывает, что, как правило, с увеличением длительности УЗ обработки средний размер  $R_{cp}$  масляных «шариков» (глобул) уменьшается, причем также сначала сравнительно быстро, а затем все более медленно. Это свидетельствует о неравномерном развитии процесса УЗ диспергирования частиц, интенсивность которого со временем падает, что объясняется повышением стойкости частиц к кавитационному разрушению по мере уменьшения их размеров.

На рисунках 5.23...5.26 приведены фотографии изменения состояния эмульсии в зависимости от длительности УЗ обработки.

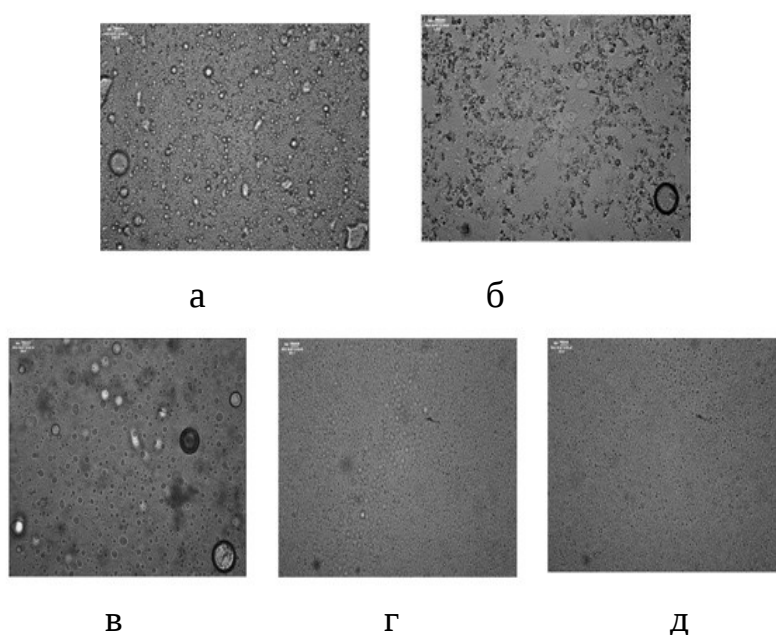


Рисунок 5.23 - Изменение состояния эмульсии в зависимости от длительности УЗ обработки: 0 – (без обработки) – (а); 2 – (б); 6 – (в) и 10 – (г); 15 мин – (д) (на примере СОТС №1 при обработке УЗНЧ)

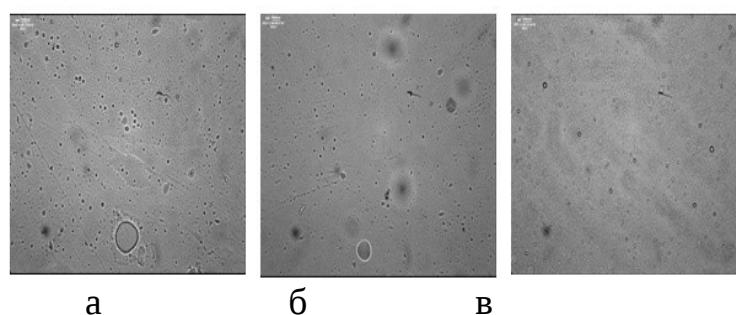


Рисунок 5.24 - Изменение состояния эмульсии в зависимости от длительности УЗ обработки: 0 (без обработки) – (а); 5 – (б); 10 мин – (в) (на примере СОТС №2 при обработке УЗВЧ)

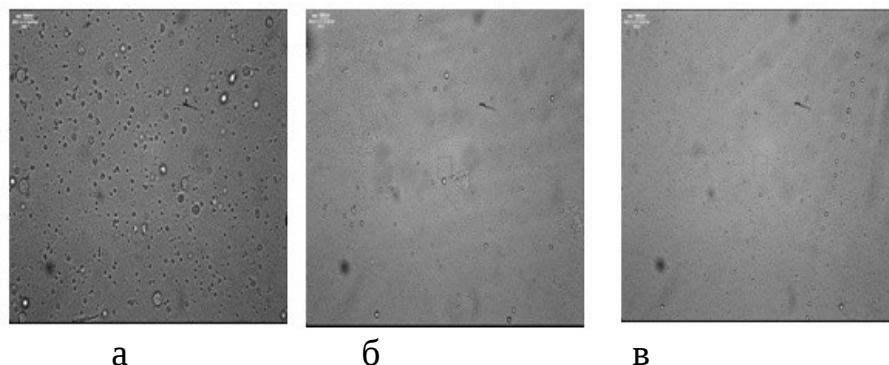


Рисунок 5.25- Изменение состояния эмульсии в зависимости от длительности УЗ обработки: 0 (без обработки) – (а); 5 – (б); 10 мин – (в) (на примере СОТС №3 при обработке УЗД)

## 6. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОСЛЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

МАО сочетает в себе одновременно действие постоянного магнитного поля и процессы, которые протекают при взаимодействии обрабатываемой поверхности с порошковым магнитно-абразивным инструментом, – микрорезание, микроудары абразивных частиц, пластическая деформация в поверхностной зоне. Совокупность влияний различных факторов создает предпосылки для изменения физико-механических свойств поверхностных слоев материала.

### 6.1 Качество обработанных поверхностей после магнитно-абразивной обработки

Лабораторные исследования выполняли на установке, оборудованной на базе вертикально-фрезерного станка с креплением резцедержателей на корпусе ротационной фрезы (угол атаки резцов  $45^\circ$ ) при резании калийной породы. Время работы резцов составило при резании калийной породы 80...100 мин. В процессе исследования определили потерю массы резца в зависимости от объема разрушения породы.

При исследовании влияния магнитной индукции  $B$ , значение которой изменялось в пределах 0,8...1,2 Тл, остальные параметры принимали постоянными, равными:  $V_{рез} = 1,8$  м/с,  $\delta = 1,0$  мм,  $A = 2$  мм,  $A_{вс} = 0,5$  мм, порошок  $Fe-TiC$  зернистостью 315/250 мкм. Обработку проводили на установке СФТ 2.150.

При исследовании влияния на износостойкость скорости резания  $V_{рез}$ , значение которой меняли в пределах 1,2...2,4 м/с, магнитная индукция в зазоре составляла 1 Тл. Все остальные параметры были прежними.

Выявлено оптимальное значение  $V_{рез} = 1,8$  м/с. Обработка на этой скорости позволила снизить износ обработанного МАО изделия более чем в 2 раза по сравнению с необработанным – 8,3 г.

Согласно данным исследований, микроструктурным, рентгено-фазовым, дюрOMETрическим методами установлено, что магнитно-абразивная обработка не изменяет фазового состава поверхностных слоев твердых сплавов, но изменяет их количественное соотношение. Так, содержание  $Co$  в поверхностном слое сплавов после МАО немного увеличивается в сравнении со средним (указанный в марке сплава), потом падает ниже среднего и поднимается к нормальному по мере отдалений от поверхности (таблица 6.1) [22].

Профессором Майборода В. С. установлено, что под действием ударных нагрузок и в результате пластической деформации в поверхностной зоне всех исследуемых сплавов почти до глубины 15 мкм наблюдалось интенсивное измельчение зерна. Особенно сильно измельчается фаза  $WC$ , что связано с ее достаточно высокой хрупкостью (таблица 6.2).

Таблица 6.1 - Содержание кобальта в упрочненном слое

Марка сплава	Содержание $Co$ , мас. %			
	На поверхности	150 мкм от поверхности	400 мкм от поверхности	Сердцевина
ВК8	9,8	7,1	8,3	8
ВК10	12,2	8,7	9,5	9

Таблица 6.2 - Размер зерен карбидных фаз после МАО

Марка сплава	Средний размер зерна, мкм	
	На глубине до 15 мкм	На глубине 1000...1100 мкм
	$WC$	$WC$
ВК8	2,5...3	5...1

Очевидно, дислокации, которые возникают в момент микроударов и пластической деформации и накапливаются во всех составляющих сплавов, в наиболее твердых и хрупких фазах – карбидах, вызывают измельчение зерен карбидной фазы, особенно  $WC$ , что в какой-то мере способствует релаксации напряжений в них, снижая при этом твердость поверхностных слоев по сравнению со слоями, которые расположены под ними. Такому снижению твердости поверхности способствует также увеличение содержания кобальта в этой зоне.

Размер зерен карбида  $WC$  остается достаточно крупным (2,5...3 мкм) в поверхностной зоне и увеличивается до 5...6 мкм к середине образцов. Рост количества дислокаций в таких зернах приводит к повышению их твердости в пределах 33,0...36,0 ГПа. Движение дислокаций в таких фазах очень затруднено из-за малых размеров зерен, сложного состава карбида, дефектности кристаллической решетки самой фазы внедрения. При условиях приложения нагрузки к частицам такой фазы (например,

при измерении твердости алмазным индентором) зерно разрушается, однако трещина дальше границы зерна не распространяется. Часто при анализе состояния поверхности деталей их качество оценивается лишь шероховатостью, и ее параметры принимают за характеристику работоспособности и прочности изделия. Безусловно, резцы РКС-1 подвергаются абразивному изнашиванию и требуют низкой шероховатости рабочих поверхностей. В процессе взаимодействия с породой при больших величинах микронеровностей возникают высокие температуры и, как следствие, ухудшение характеристик поверхностного слоя и более интенсивный износ. Рядом исследований установлено, что улучшение микрогеометрии поверхности деталей способствует повышению их прочности, но не является определяющим фактором, характеризующим работоспособность [122-124]. 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. [125, 126].

Выполненные ранее исследования влияния МАО на упрочнение поверхностных слоев [127-138] носят противоречивый характер. Поэтому была поставлена задача исследования влияния технологических факторов рассматриваемого метода обработки на изменение поверхностной микротвердости деталей из стали 30ХГСА и твердого сплава ВК8.

Исследования проводились на резцах РКС-1, изготовленных ЛМЗ «Универсал» (г. Солигорск). Заготовка корпуса резца получена токарной обработкой. Общий вид резца приведен на рисунке 6.1.

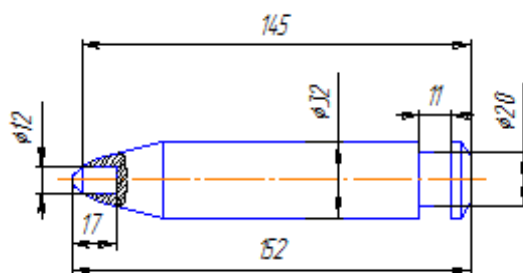


Рисунок 6.1- Общий вид резца РКС-1

Магнитно-абразивную обработку проводили на установке СФТ 2.150, оснащенной специальной наладкой и оппозитными полюсными наконечниками, показанными на рисунке 4.17. Режимы обработки:  $V = 1$  Тл,  $V_{рез} = 1,8$  м/с, рабочий зазор  $\delta = 1$  мм, амплитуда осцилляции  $A = 2$  мм,  $A_{вс} = 0,5$  мм, время магнитно-абразивной обработки составило  $t = 180$  с; ФАП  $TiC-Fe$  зернистостью 250/315 мкм.

В качестве технологической жидкости использовали водный раствор с 3...4%-м содержанием триэтаноламина или Аквапола 12. Качество

поверхностного слоя после МАО оценивали по параметру шероховатости  $R_a$ , микротвердость – по параметру  $HV$ . Микротвердость оценивали на микротвердомере *DURAMIN 5* при нагрузке на пирамиду 50 г для стали 30ХГСА и 200 г для твердосплавной вставки. Сечения измерений микротвердости проходили перпендикулярно оси симметрии резца. Шаг измерения составлял 0,05 мм (рисунок 6.2).

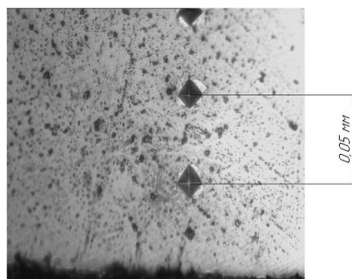


Рисунок 6.2 - Шаг измерения микротвердости микротвердомером *DURAMIN 5*

Влияние МАО на микротвердость исследовали на образцах – шлифах, вырезанных из резцов РКС-1 (рисунок 6.3, 6.4).



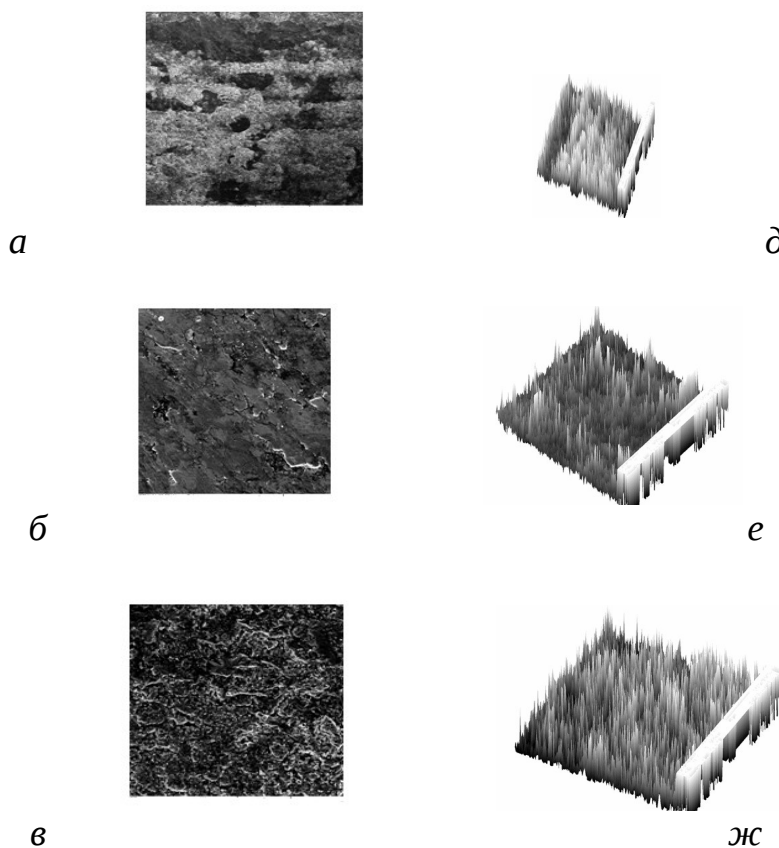
Рисунок 6.3 - Фотография образца-шлифа для измерения микротвердости и металлографических исследований



Рисунок 6.4 - Сечения измерения микротвердости

Разработана методика подготовки образцов для проведения дюрOMETрических исследований. Методика предусматривала применение методов, обеспечивающих минимальное воздействие на материал детали в процессе подготовки образцов. На эрозионной

установке на образцах предварительно прорезались продольные пазы, длиной 35...40 мм и шириной 0,3 мм (диаметр проволоки 0,29 мм). После магнитно-абразивной обработки образцы разрезались и шлифовались по плоскости разреза на мягких режимах. Вторая группа образцов подготавливалась по той же технологии, но без магнитно-абразивной обработки. Исследование морфологии поверхности резца РКС-1 проводилось с использованием микроскопа *VEGA II TESCAN*. На рисунках 6.5, 6.6 представлены морфология и топография конической части резца (сталь 30ХГСА) в состоянии поставки и после МАО. На исследуемых образцах, не подвергнутых МАО, коническая поверхность державки сформирована токарной обработкой. На ней отчетливо различимы шаги и следы токарной обработки. Поверхности имеют выраженную текстурированность вдоль вектора скорости резания при точении (рисунок 6.5, а). Во впадине следа токарной обработки четко различимы дефекты (трещины) (рисунок 6.5, б). На вершинах следа токарной обработки поверхность сильно деформирована, текстура имеет осколочно-вытянутый характер (рисунок 6.5, г). Указанные дефекты поверхности резца служат концентраторами и очагами последующих разрушений при работе по породе.



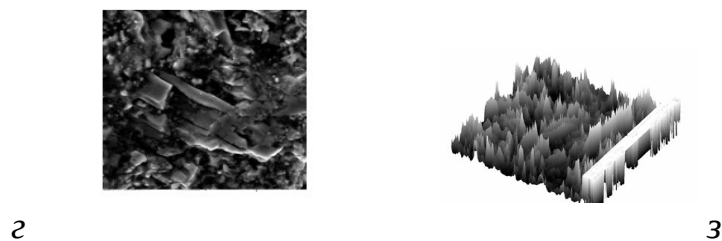


Рисунок 6.5 - Поверхность резца РКС-1 на стали 30ХГСА без MAO: *а...г* – морфология; *д...з* – топография; *б* – впадина следа от токарной обработки; *в, г* – вершина следа от токарной обработки

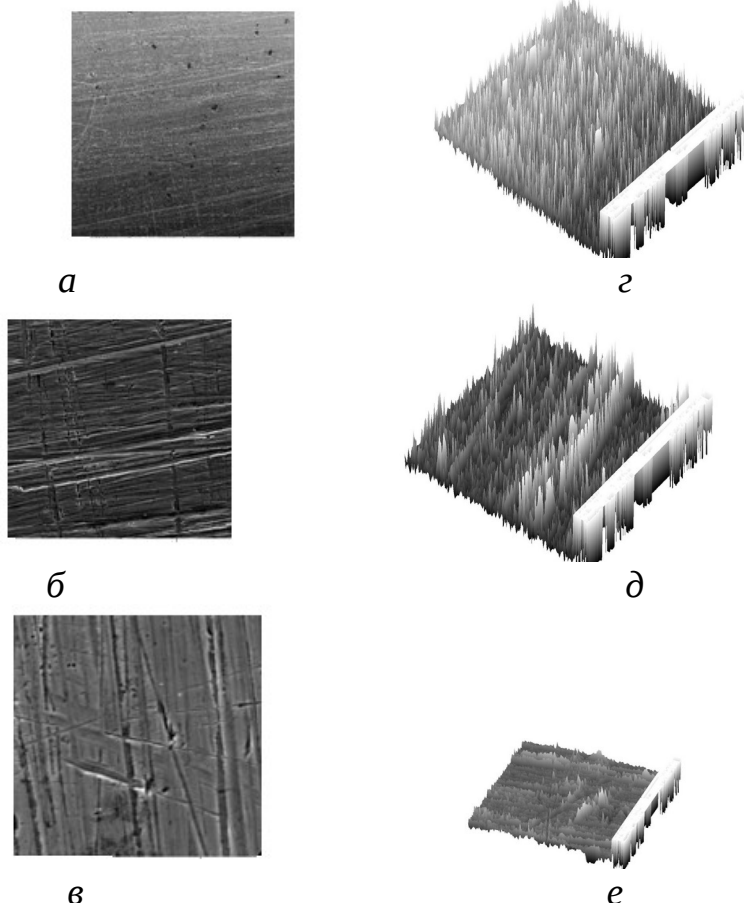


Рисунок 6.6 - Поверхность на стали 30ХГСА после MAO на режимах  $V = 1,8$  м/с,  $B = 1$  Тл,  $t = 150$  с: *а...в* – морфология; *г...е* – топография

На образцах после MAO, отчетливо видны следы обработки, имеющие довольно равномерное расположение как вдоль вектора скорости резания, так и по направлению осцилляции (рисунок 6.6 *а, б, в*). Топография поверхности со следами микрорезания зернами ФАП стали 30ХГСА довольно сглаженная, без видимых нарушений поверхности и подтверждает, что основная масса материала уносится при MAO в виде стружки и навалы составляют до 20...30 % (рисунок 6.6 *б, в*).



Исследование микрошлифов на подготовленных описанным выше способом образцах показало, что после МАО наблюдается заметное изменение в поверхностном слое как твердого сплава ВК8, так и стали 30ХГСА. Внешний вид поверхностей твердого сплава ВК8 представлен на рисунке 6.7. Изменения по глубине поверхностного слоя иллюстрируют фото на рисунке 6.8.

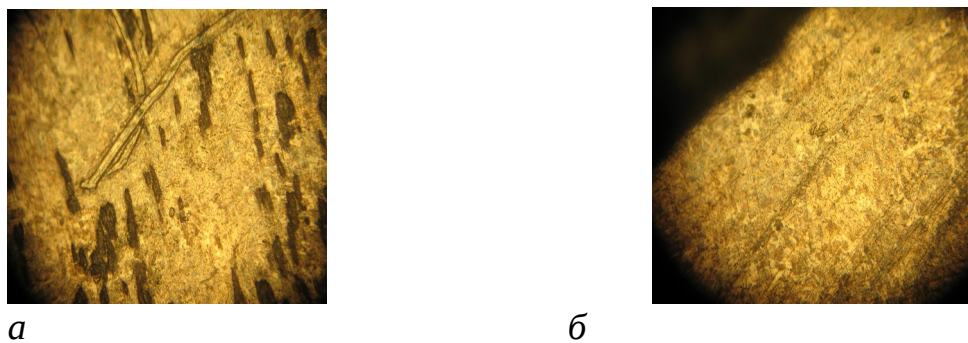


Рисунок 6.7 - Вид поверхности твердого сплава ВК8 (увеличение×50): а – до МАО; б – после МАО

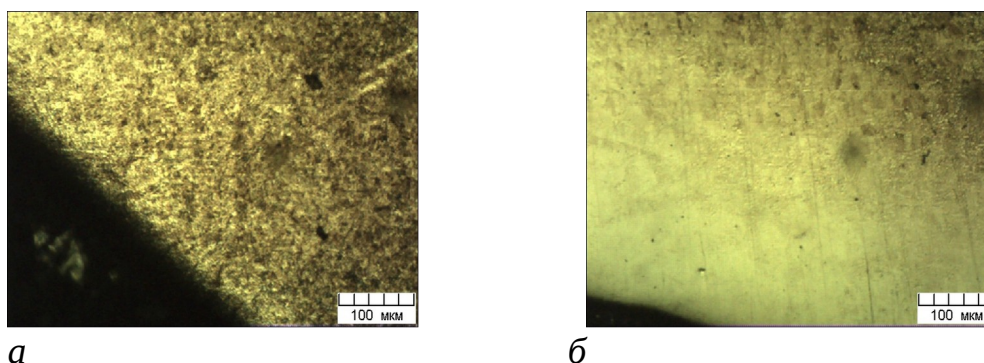
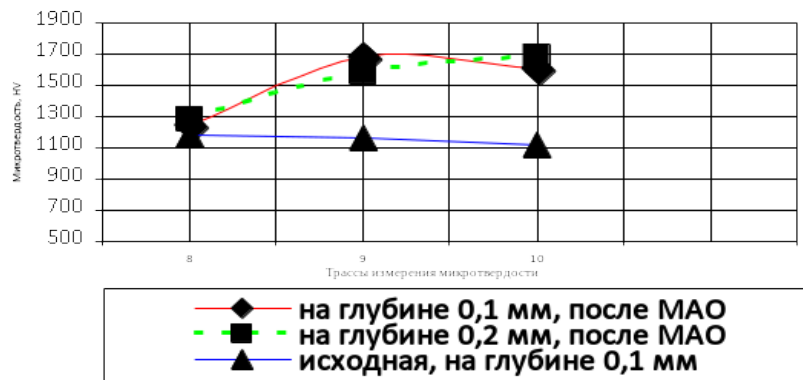
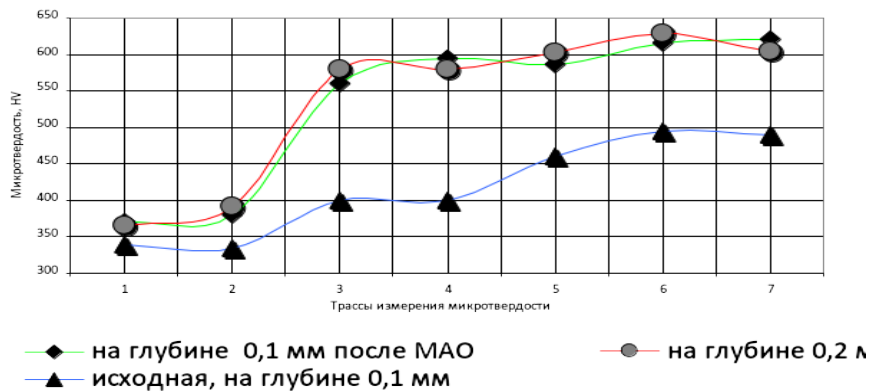


Рисунок 6.8 - Состояние поверхности конструкционной стали 30ХГСА (увеличение×50): а – до МАО; б – после МАО

Установленные изменения в состоянии поверхностного слоя элементов резца РКС-1 после МАО обуславливают и изменение его физико-механических свойств, в том числе и микротвердости. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя исходного образца и обработанного МАО показано на рисунке 6.9 а, б.



а



б

Рисунок 6.9 - Изменение микротвердости (HV) резца РКС:  
а – зубка из твердого сплава ВК8; б – 30ХГСА

Данными исследований установлено, что на глубине 0,1...0,2 мм происходит значительное увеличение микротвердости, по сравнению с исходным значением. При магнитно-абразивной обработке микротвердость поверхности стали 30ХГСА повышается до 20 %, микротвердость твердого сплава ВК8 увеличивается до 30 %. Данное явление может быть объяснено тем, что МАО сопровождается сложными явлениями, которые включают в себя микрорезание, микроудары, пластическую деформацию. Особенно важную роль в процессе изменения свойств обрабатываемых поверхностей играют микроудары и пластическая деформация.

## 6.2 Влияние реверсивного вращения зубчатого колеса в процессе магнитно-абразивной обработки на качество обрабатываемых поверхностей зубьев

Экспериментально было установлено, что поверхность венца зубчатого колеса в процессе обработки покрывается щеткой из ФАП (рисунок 6.10), что нехарактерно для деталей цилиндрической формы.

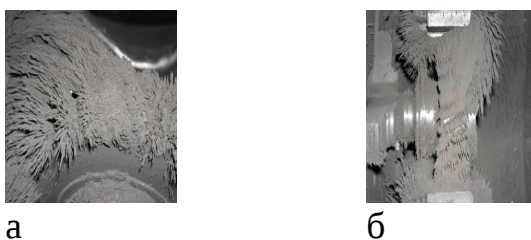


Рисунок 6.10 - Покрытие сложнопрофильной поверхности детали щеткой из ФАП: а – фронтальный вид; б – общий вид

Объясняется это тем, что кромки прерывистой поверхности являются концентраторами магнитного поля, они наиболее подвержены «аккумуляции» магнитного поля [60].

В начале обработки щетка из ФАП имеет небольшой объем, но в процессе обработки деталь намагничивается, и объем щетки увеличивается. После снятия магнитного поля объем щетки определенное время сохраняется за счет остаточной намагниченности детали, что способствует продолжению процесса обработки, но через некоторое время объем щетки уменьшается и процесс затухает.

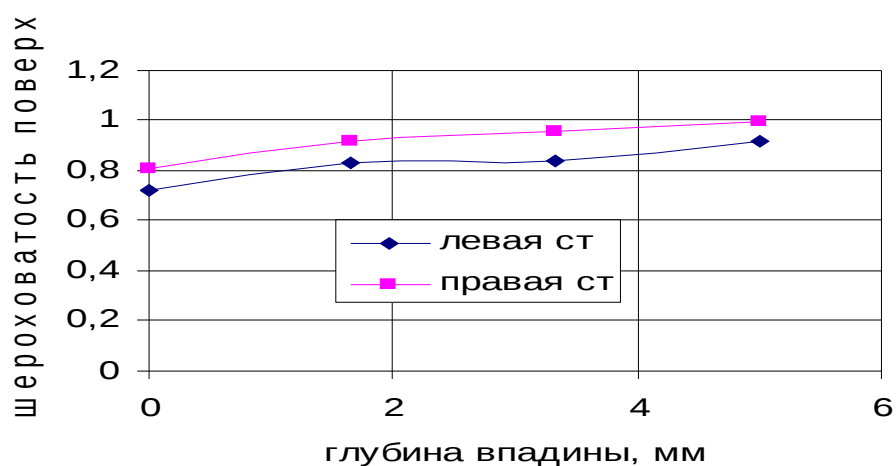
Следует отметить, что объем щетки прямопропорционально зависит от степени наполнения ФАП рабочей зоны установки. При достаточном количестве порошка в зоне нет необходимости в постоянном питании процесса порошком из бункера-дозатора, т.к. движение порошка при МАО обретает замкнутый характер за счет вращения детали и разнополярности наконечников. Для реверсивного вращения обрабатываемой детали были изготовлены наконечники с двумя клинообразующими частями (рисунок 6.11).

Рисунок 6.11 - Форма наконечников для реверсивной МАО

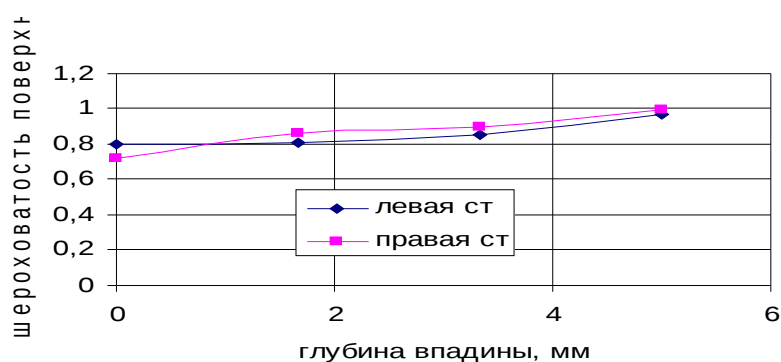
Для определения времени реверсивного движения был проведен следующий эксперимент. Обработывалась партия шестерен 260-1005030 ( $m = 2,5$  мм), сталь 18 ХГТ, HRC 62...64 в количестве 9 шт. Режимы обработки: вращение детали –  $n = 12,5$  мин<sup>-1</sup>; амплитуда осцилляции –  $A = 2$  мм; скорость осцилляции –  $V_{ос} = 0,1$  м/с; зазор зоны обработки –  $\delta = 1$  мм; объем подаваемого порошка –  $V_{пор} = 3,32 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/с; магнитная индукция –  $B = 1$  Т.; – 2 мин. Вращение – против часовой стрелки.

Обработанные шестерни были разделены на 3 партии, каждая из которых обрабатывалась по часовой стрелки на 10 с больше предыдущей. Шероховатость рабочей поверхности после MAO измеряли вдоль рабочих поверхностей в четырех точках.

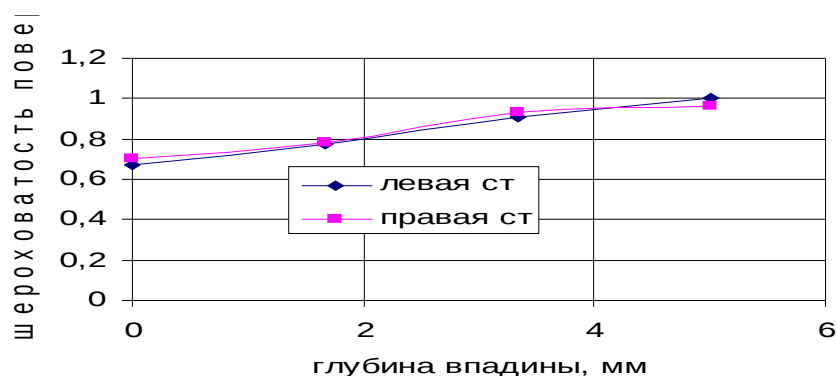
На основании опыта были построены зависимости изменения шероховатости по эвольвенте после MAO (рисунок 6.12).



а



б



В

Рисунок 6.12 - Зависимости изменения шероховатости по эвольвенте после МАО: а – время обработки 120 с против часовой стрелки, 10 с по часовой; б – время обработки 120 с против часовой стрелки, 20 с по часовой; в – время обработки 120 с против часовой стрелки, 30 с по часовой

Анализируя рисунок 6.12, можно сделать вывод, что в процессе МАО наконечниками (рисунок 6.11) с целью равномерной обработки рабочих поверхностей зубьев необходимо выполнять реверс вращения детали – 2 мин против часовой стрелки и 30 с по часовой.

### 6.3 Формирование шероховатости рабочих поверхностей при магнитно-абразивной обработке уплотненным во впадине ферроабразивным порошком

При обработке деталей уплотненным абразивом удаляется тонкий поверхностный слой металла, определяемый величиной исходной шероховатости. Снятие металла происходит главным образом за счет микроскобления и субмикроскобления. До полного устранения исходных неровностей профиля поверхности результирующая шероховатость определяется как остаточная исходная шероховатость плюс, наложенная за счет микроскобления.

После устранения исходных неровностей шероховатость поверхности обработанной детали зависит только от параметров микроскобления и субмикроскобления.

Рассматриваемый способ обработки можно считать процессом, аналогичным хонингованию в режиме самозатачивания, которое в данном способе производится естественным путем в результате частичного выкрашивания и разрушения абразивных зерен от трения их контактирующих поверхностей друг с другом и с металлом обрабатываемой поверхности. Кроме того, в магнитном поле происходит ориентация их наибольших осей вдоль силовых линий поля радиально обрабатываемой поверхности зуба.

Вследствие многовершинного характера контактирования каждой единичной абразивной частиц порошка с поверхностью из-за высокой плотности абразивных зерен, приходящихся на единицу площади обрабатываемой поверхности, рассматриваемый процесс имеет высокую плотность контактирования с обрабатываемой поверхностью. В связи с этим его можно сравнить с процессом хонингования тонкими и мелкозернистыми абразивными брусками, в которых роль абразивных зерен выполняют микронеровности профиля контактирующих вершин. Поэтому можно считать, что шероховатость рабочей поверхности зубчатого колеса формируется в результате массового суммарного воздействия микронеровностей зерен ФАП на микронеровности обрабатываемой поверхности зуба. Зубчатые венцы с  $m = 3,5$  мм обрабатывались после операций зубофрезерования и химико-термической обработки (цементации). В процессе MAO образовывался радиус кривизны линии притупления продольной кромки зуба, обработка рабочей поверхности зубьев от кромки, также была равной 1...2 мм (рисунок 6.13, а, б), что для данного модуля зуба неэффективно.



а



б

Рисунок 6.13 - MAO зубчатого венца с  $m = 3,5$  мм:  
а – фронтальный вид; б – вид сверху (общий вид)

Результаты предварительных экспериментов подтвердили неэффективность MAO эквидистантными полюсными наконечниками зубчатых колес со средним и крупным модулем.

Проводили обработку шестерни 260-1005030 ( $m = 2,5$  мм), сталь 18 ХГТ, HRC 62...64. Режимы обработки: вращение детали –  $n = 12,5$  мин<sup>-1</sup>; амплитуда осцилляции –  $A = 2$  мм; скорость осцилляции –  $V_{ос} = 0,1$  м/с; зазор зоны обработки –  $\delta = 1$  мм; объем подаваемого порошка –  $V_{пор} = 3,32 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/с; магнитная индукция –  $B = 1$  Т.;  $t = 2$  мин.

Шероховатость рабочей поверхности после MAO, как показало измерение зуба вдоль рабочих поверхностей в четырех точках с двух сторон, не равномерна. От вершины к ножке зуба шероховатость увеличивается (рисунок 6.14).

Рисунок 6.14 - Шероховатость рабочей поверхности зуба ( $m = 2,5$  мм) после МАО

Объясняется это тем, что уплотненная среда ФАП позволяет проникать магнитному полю во впадину (рисунок 6.15). Поле фиксирует частицы порошка, вдоль силовых линий, создавая тем самым, упрочнение образовавшегося хона, копирующего поверхность зубчатого колеса. По мере заглубления во впадину величина поля уменьшается, соответственно уменьшаются и силы прижатия порошка, упрочняющие хон, что способствует затуханию процесса микрорезания.

Рисунок 6.15 - Распределение силового воздействия поля в среде уплотненного ФАП

На основании полученных данных построены зависимости шероховатости по глубине впадины (рисунок 6.16) после обработки, из которых видно, что на разных сторонах зуба значения шероховатости отличаются. Среднее значение шероховатости левой стороны меньше чем правой. Обусловлено это тем, что в процессе обработки осуществлялось движение зубчатого колеса против часовой стрелки, что способствовало более сильному прижатию ФАП к обрабатываемой левой стороне зуба.

Рисунок 6.16 - Изменение шероховатости по эвольвенте после МАО

На основании вышесказанного, следует отметить целесообразность реверсивного движения детали во время обработки, по несколько раз меняя направление движения.

#### **6.4 Формирование остаточных напряжений при магнитно-абразивной обработке деталей машин**

При абразивной обработке металлов по причине возникновения упругих и пластических деформаций повышается температура и снижается плотность этих материалов. Это приводит, из-за увеличения удельного объема поверхностных слоев примерно на 0,3...0,8 %, к образованию остаточных напряжений [140]. Поверхностный слой металла, подвергающийся воздействию режущего инструмента, претерпевает ряд изменений, связанных с термодинамическим фактором процесса съема материала. Таким образом, схема формирования остаточных напряжений связывается, во-первых, с возникновением различных видов упругопластических деформаций, во-вторых, локальными температурными показателями.

Установлено, что остаточные напряжения сжатия служат резервом повышения прочности деталей машин, в то время как напряжения растяжения вызывают ее понижение и приводят к росту разрушения поверхностного слоя [8]. Механизм формирования остаточных напряжений сложен и зависит от соотношения силовых и температурных факторов. Известно, что наиболее заметное влияние остаточные напряжения оказывают на сопротивление деталей усталости. Циклическое нагружение материала связано с пластической деформацией отдельных зон поверхностного слоя, что приводит к высокому уровню искажения кристаллической решетки. В случае если величина напряжений превышает предел выносливости, то наступает разрыв межатомных связей по плоскостям скольжения. При этом



наблюдаются нарушения сплошности материала как микроскопического, так и субмикроскопического уровня, что приводит к образованию усталостных трещин и росту возможности разрушения детали. Также установлено [141], что сжимающие напряжения в поверхностном слое повышают надежность соединений с натягом. Поэтому определение остаточных напряжений 1-го рода после механической обработки деталей машин представляет большой практический интерес и является актуальным.

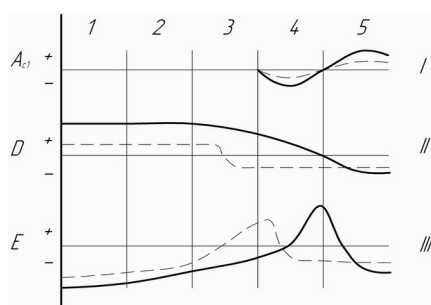
Данные остаточные напряжения уравниваются в объеме всей детали или ее значительной части, вследствие чего по этому объему имеет место распределение напряжений разного знака. Согласно [142], особенностью пластического деформирования микрообъемов материала, расположенных рядом с пятнами контакта, является то, что эти микрообъемы формируются в условиях сдвига под давлением. При этом величина внешнего давления, по данным Ф.П. Боудена, приблизительно равна микротвердости контактирующих металлов, что для стали составляет 1...10 ГПа. Установлено, что каждая абразивная частица как при шлифовании, так и при магнитно-абразивной обработке, внедренная в поверхность обрабатываемого материала, при своем движении создает в нем две зоны напряжений, различных по знаку. Перед фронтом частиц образуется зона сжимающих напряжений, что обусловлено пластической деформацией металла. За абразивной частицей в результате силы трения создаются растягивающие напряжения. Оценивая характер движения режущей частицы при шлифовании и МАО, а также уровень развиваемых давлений в зоне обработки, можно сделать следующие заключения: за период контактирования с обрабатываемым материалом жестко закрепленная в шлифовальном круге абразивная частица вынуждена пройти больший путь резания, чем подвижно координированная при МАО. Это приводит при шлифовании без учета температурных воздействий к росту растягивающих напряжений, в то время как при МАО движение абразивной частицы носит прерывистый характер, что обеспечивает импульсное образование зон деформированного металла. Данный характер движения служит одной из основных причин создания сжимающих напряжений после МАО.

Процесс возникновения остаточных напряжений в закаленных сталях, с учетом температурного воздействия при шлифовании представлен следующим образом [16]. Температура нагрева в поверхностном слое изменяется в соответствии с кривой ABCDE (рисунок 6.17, а), причем в точке А на поверхности детали температура максимальна, в точке Е – минимальна. Максимальная температура при определенных условиях обработки методом шлифования может приблизиться к температуре плавления материала. В процессе шлифования слой 1, нагретый до температуры от точки А<sub>с3</sub> до  $t_{max}$ , при

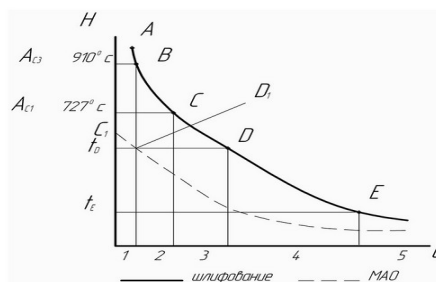
последующем быстром охлаждении закалится вторично. Слой 2, нагретый до температуры от точки  $A_{C1}$  до точки  $A_{C3}$ , при охлаждении получит неполную закалку.

Слой 3, нагретый до температуры ниже точки  $A_{C1}$ , получит отпуск, и мартенсит претерпевает превращение. Непосредственно при шлифовании в слоях 1...3 внутренних напряжений не будет, так как нагретый металл является пластичным. На данном этапе нагретый слой 4 стремится увеличить свой объем, но так как он упруго связан со слоем 5, это происходит не в полном объеме, а лишь частично по причине температурного коэффициента объемного расширения. В результате слой 4 испытывает внутренние сжимающие напряжения, а слой 5 растягивающие (кривая 1 на Рисунок 6.17, б).

При охлаждении шлифованной поверхности до температуры ниже точки  $A_{C1}$  пластичность металла в слоях 1...3 резко снижается, и изменение объемов этих слоев не будет сопровождаться возникновением значительных внутренних напряжений. При весьма быстром охлаждении слоев 1...3 до температуры  $t_c$  (близкой к  $20^0$ ) в этих слоях возникнут дополнительные внутренние напряжения (кривая 1, рисунок 6.17, б). Если в слоях 1 и 2 имеется структура остаточного аустенита, а слои 3 и 4, имеющие относительно большую толщину, приобретут структуру мартенсита и троостита, то преобладающими окажутся остаточные напряжения растяжения (кривая II, рисунок 6.17, б). Если же в слоях 1 и 2 преобладает структура вторичной закалки, а толщина отпущенного слоя незначительна, то в детали преобладают напряжения сжатия (кривая III, рисунок 6.17, б).



а



б

Рисунок 6.17 - Диаграммы: а – схема возникновения внутренних остаточных напряжений; б – изменение температуры в процессе шлифования и MAO

Высокие мгновенные температуры, развивающиеся при шлифовании, не только существенно влияют на формирование остаточных напряжений, но могут привести к появлению прижогов и микротрещин. На рисунке 6.18 показан прижог при шлифовании как местное изменение структуры поверхностного слоя обрабатываемой детали, возникающее в результате интенсивного выделения теплоты на локальных участках ее поверхностного слоя. Это приводит к снижению

твердости и износостойкости, что является одним из наиболее серьезных дефектов, имеющих место при обработке данным методом закаленных сталей.

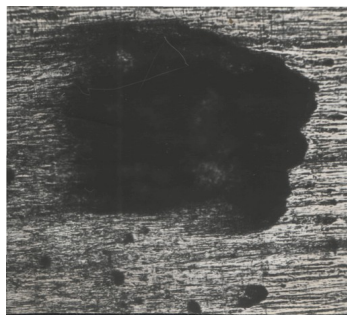


Рисунок 6.18 - Дефект поверхности стали после обработки шлифованием

Процесс возникновения остаточных напряжений МАО при учете температурного воздействия выглядит следующим образом. Температура нагрева  $C_1 D_1 E_1$ , в точке  $C_1$  – максимум, в точке  $E_1$  – минимум. В ходе протекания операции МАО в слое 1 увеличивается вязкость материала, поскольку он приобретает структуру троостита отпуска. В слоях 1...3 напряжение не возникает, поскольку материал является пластичным. При МАО, если поверхностный слой нагревается до температуры 250...300 °С, происходит несколько процессов, связанных с термическим характером его протекания: продолжается перераспределение углерода в мартенсите, начинается распад остаточного аустенита, увеличивается размер  $\epsilon$ -карбида и происходит превращение  $\epsilon$ -карбида в цементит. Диффузия углерода из кристаллов мартенсита и рост зародышей карбида приводит к росту напряжений 1-го рода на границе раздела фаз из-за повышения различий периодов кристаллических решеток карбида и тетрагонального мартенсита.

Для определения использовался рентгеновский метод измерения, который отличается от механических прежде всего тем, что относится к числу неразрушающих. Оценка напряжений производилась путем съемки рентгенограммы испытуемого образца и рентгенограммы образца, свободного от напряжений (эталон). Определение величин напряжений 1-го рода осуществлялось по формуле (6.1):

$$\sigma = \frac{E}{\mu} \operatorname{ctg} \theta \frac{\Delta L}{2M} \cdot \frac{1}{57,3}, \quad (6.1)$$

где  $E$  – модуль упругости материала, 2,1...2,2  $10^5$  МПа;

$\mu$  – коэффициент Пуассона, 0,25...0,3;

$\theta$  – угол отражения рентгеновского луча;

$M$  – масштаб записи;

$\Delta L$  – смещение максимума интенсивности.

Образцами служили кольца подшипников № 840306 36 x 30 x 32 мм, сталь ШХ-15 ГОСТ 801-78, 56...60 HRC<sub>э</sub> после шлифования, оборудование-станок СФТ 2.150.00.00.000. Параметры и режимы обработки методом МАО: величина магнитной индукции  $B = 1$  Тл; скорость резания  $V_p = 1...1,5$  м/с; скорость осцилляции  $V_o = 0,1...0,2$  м/с; амплитуда осцилляции  $A = 1...2$  мм; размерность ферроабразивного порошка (ФАП)  $\Delta = 100/160$  мкм; ФАП-Ж15КТ ТУ 6-03-09-483-81, смазочно-охлаждающие технологические средства – СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5 % -ный водный раствор, капельная подача, удельный расход 100...150 мл/мин; величина рабочего зазора  $\delta = 1$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора  $K_z = 1$ . В качестве метода изучения строения сплавов использовался рентгеноструктурный анализ.

Исходная структура колец подшипников, изготовленных из стали ШХ-15, прошедших термообработку: закалка + низкий отпуск, представляет собой легированный мартенсит,  $\epsilon$ -карбиды и аустенит остаточный. Показатели твердости и износостойкости при данном составе стали являются максимальными, согласно положений теории [141].

Поскольку область усталости представляется четырьмя периодами, то увеличение срока службы детали до образования магистральных трещин, приводящих к разрушению, можно осуществить путем увеличения 1-го инкубационного периода за счет препятствия созданию влияния растягивающих остаточных напряжений. Следует указать, что усталостная прочность – комплексное понятие, которое охватывает различные аспекты сопротивления детали, поэтому необходимо дифференцировать требования к структуре материала и качеству поверхностного слоя, согласно условиям эксплуатации. Усталостная прочность значительно резче, чем другие механические свойства металлов, реагирует на изменение определенных условий функционирования детали в механизме. При прочих равных условиях данная прочность в большей степени зависит от структуры поверхностного слоя металла, который создается технологией механической обработки. Это объясняется, особенно при наличии масштабного фактора детали, неоднородностью структуры технологического производства и отклоняется от законов подобия по напряженно-деформированному состоянию ввиду статического распределения большого числа дефектов. Следовательно, состояние поверхностного слоя определяет образование субмикротрещин, которые при дальнейшем развитии приводят к необратимым структурным изменениям и, соответственно, к изменению физико-механических показателей. Принципы регулирования процессом сопротивления усталости заключаются в применении таких методов механической обработки, которые приводят к изменению зеренной структуры и уменьшению источников и скоплений дислокаций. Эффективными в

этом плане методами являются те, которые при своем использовании обеспечивают комплексное воздействие на поверхностный слой с целью достижения указанных выше явлений. Эволюция структуры данного слоя при применении метода MAO характеризуется получением необходимого диапазона величины остаточных напряжений, их знаком, в сравнении со шлифованием, что гарантирует повышение сопротивления усталости таких ответственных деталей, как кольца подшипников, которые служат опорами качения в различных узлах и механизмах. Например, показатели шероховатости и опорной длины профиля после шлифования и MAO составили соответственно:  $Ra_2 = 0,6...0,8$  мкм,  $t_p = 20$  % и  $Ra_2 = 0,08...0,1$  мкм,  $t_p = 50$  % соответственно. Следовательно, получение данной структуры поверхности с образованием мартенситного слоя и ее качественных показателей при использовании процесса MAO, обеспечивает благоприятный режим функционирования подшипникового узла в условиях граничного трения и большую устойчивость в таком сложном термодинамическом состоянии.

Результаты проведенных исследований показывают, что как при динамическом, так и термическом воздействии различных методов обработки (шлифование и MAO) уровень и знак остаточных напряжений поверхностного слоя при использовании метода MAO носит характер более высокого уровня образования сжимающих остаточных напряжений, табл. 6.3. Получение такого рода напряжений обеспечивает рост эксплуатационных показателей в виде надежности и долговечности.

Таблица 6.3 - Влияние метода финишной обработки на величину напряжений I-го рода

Метод обработки	Величина напряжений I-го рода, $\sigma_1$ , МПа
1. Термообработка (закалка + низкий отпуск)	330 – 370
2. Шлифование	600 – 650
3. Магнитно-абразивная обработка	810 – 840

### 6.5 Технологическое обеспечение коррозионной стойкости внутренних колец подшипников

В результате коррозионных разрушений выходит из строя большое количество металлических конструкций, народное хозяйство несет значительные убытки, связанные с ремонтом и заменой дорогостоящего оборудования, вызывая прямые расходы. Коррозионные процессы являются причиной не только прямых, но и косвенных расходов, которые могут значительно превышать уровень прямых. Это убытки из-

за простоев технологических линий и снижения производительности оборудования при остановках отдельных агрегатов вследствие коррозии, убытки от снижения сортности производимой продукции, например, в пищевой или химической промышленности, при загрязнении ее продуктами коррозии технологического оборудования. Особую статью в этой группе расходов составляют потери в народном хозяйстве, возникающие при разливе на больших пространствах техногенных сред при коррозионных авариях оборудования, что является одной из причин постепенного загрязнения атмосферы и водоемов [144-149].

Одним из важных источников загрязнения окружающей среды является коррозионное разрушение трубопроводов, транспортирующих различные коррозионно-активные вещества, например, газы, нефть, или продукты их химической переработки. Протяженность трубопроводов, используемых для транспортных целей, непрерывно возрастает, что связано с бесспорным их преимуществом перед всеми существующими способами транспортировки нефтепродуктов. В то же время увеличение протяженности трубопроводов приводит к повышению возможности их разрушения в результате коррозии, а значит, и к возрастанию загрязнения окружающей среды вследствие разлива транспортируемых веществ. Коррозия трубопроводов, по которым транспортируются газы или нефтепродукты бывает причиной крупных катастроф и порождает чрезвычайные ситуации. Особенно остро стоят проблемы коррозии и защиты металлов от нее в различных отраслях добывающей и химической промышленности. В связи с этим защита от коррозии в этих отраслях имеет особенно актуальное значение, так как потери от нее оказываются весьма значительными. По усредненным оценкам, прямые потери от коррозии составляют в среднем около 4-5% национального дохода промышленно развитых стран. Косвенные потери учесть довольно трудно. Однако, во многих случаях обращалось внимание на то, что стоимость продукта, недополученного или испорченного вследствие коррозии, или ущерб, нанесенный утечкой ценных веществ или загрязнениями окружающего пространства, могут, по некоторым зарубежным данным, в 4 раза превышать затраты на ремонт и восстановление оборудования, разрушающегося при коррозии. Это позволило подсчитать, что коррозия отнимает у промышленно развитых стран мира в среднем около десятой доли их национального дохода. Для таких крупных стран, как Россия и США, десятая часть национального дохода составляет очень крупные суммы и в пределах этих сумм даже частичная экономия может представлять большую ценность.

При электрохимической коррозии возникает электрическая цепь. При этом могут быть случаи коррозии как одного металла, так и металлов в контакте. Для возникновения электрохимической коррозии нужно наличие кислорода и воды.

Рассмотрим случай, когда контакта металлов нет, причем металл (железо) находится в воздухе.

Некоторые участки поверхности железа служат анодом, на котором происходит его окисление ( $E^\circ$  – стандартный электродный потенциал):  $\text{Fe (тв.)} = \text{Fe}^{2+} \text{ (водн.)} + 2e$ ,  $E^\circ_{\text{окисл}} = 0,44 \text{ В}$ .

Образующиеся при этом электроны перемещаются по металлу к другим участкам поверхности, которые играют роль катода. На них происходит восстановление кислорода (рисунок 6.19):

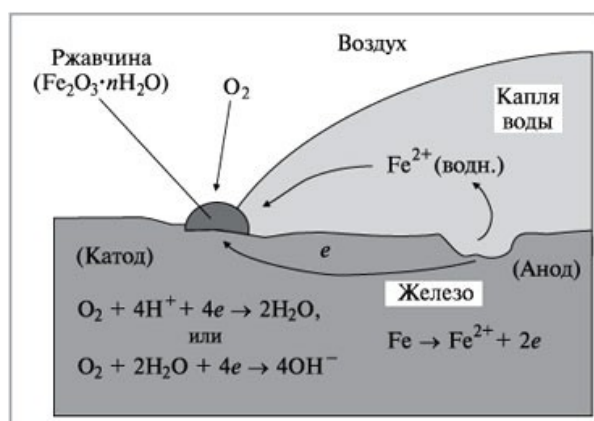
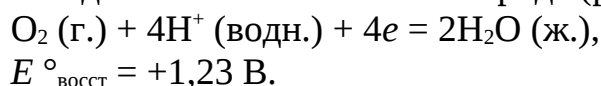
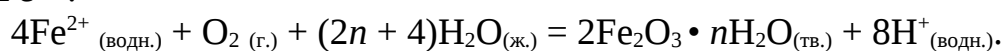


Рисунок 6.19 - Схема электрохимической коррозии железа без контакта с другими металлами

В восстановлении кислорода участвуют ионы  $\text{H}^+$ . Если концентрация  $\text{H}^+$  понижается (при повышении  $\text{pH}$ ), восстановление  $\text{O}_2$  затрудняется. Замечено, что железо, находящееся в контакте с раствором,  $\text{pH}$  которого выше 9–10, не корродирует.

В процессе коррозии образующиеся на аноде ионы  $\text{Fe}^{2+}$  окисляются до  $\text{Fe}^{3+}$ :



Поскольку роль катода обычно играет та часть поверхности, которая лучше всего обеспечена притоком кислорода, ржавчина чаще всего появляется именно на этих участках.

Наличие анодного и катодного участков на поверхности железа приводит к созданию на ней двух неодинаковых химических окружений. Они могут возникнуть вследствие присутствия примесей или дефектов в кристаллической решетке, обусловленных напряжением внутри металла. В местах, где есть примеси или дефекты, микроскопическое окружение конкретного атома железа может вызвать некоторое увеличение или уменьшение его степени окисления по сравнению с «нормальными» атомами в кристаллической решетке. Поэтому такие места способны играть роль анодов или катодов. Сверхчистое железо, в котором

количество подобных дефектов сведено к минимуму, намного меньше корродирует по сравнению с обычным железом.

Коррозионная стойкость рабочих поверхностей деталей во многом определяется состоянием поверхностного слоя. Основные свойства поверхности формируются в процессе ее изготовления и, особенно, на отделочных операциях. Создание новых отделочных методов обработки и совершенствование известных сопряжено с необходимостью использования прогрессивных режущих инструментов. Наиболее эффективными способами для финишной обработки фасонных поверхностей деталей являются методы, основанные на использовании эластичной связки или незакрепленного абразива. Одним из перспективных способов обеспечения высокого качества рабочей поверхности является технология магнитно-абразивной обработки. Этот способ прост в осуществлении, экологически чист, обеспечивает высокое качество обработанных поверхностей деталей и существенное повышение их сопротивляемости износу, коррозии и механическим нагрузкам, обладает высокой производительностью и успешно заменяет процессы химической и электрохимической обработки. Для возможности реализации магнитно-абразивной обработки были проведены экспериментальные исследования по определению технологических режимов обработки поверхности внутреннего кольца подшипника. Материал внутреннего кольца подшипника 108 ГОСТ8338-75.

В качестве оборудования для МАО использовался станок СФТ 2.150.00.00.000. ФАП – на основе боридов железа (рисунок 6.20), зернистость ФАП,  $\Delta=100/160$  мкм, СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5% 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 кольца подшипника  $Ra_1=0,8-1$  мкм. Выходными показателями служит величина удельного массового съема материала,  $Q$  мг и достигаемая шероховатость поверхности,  $Ra_2$ , мкм. Изменение массового съема производили на весах аналитических ВЛА 200г с точностью до  $10^{-6}$ кг, шероховатость – на профилограф-профилометре 252 – Калибр.



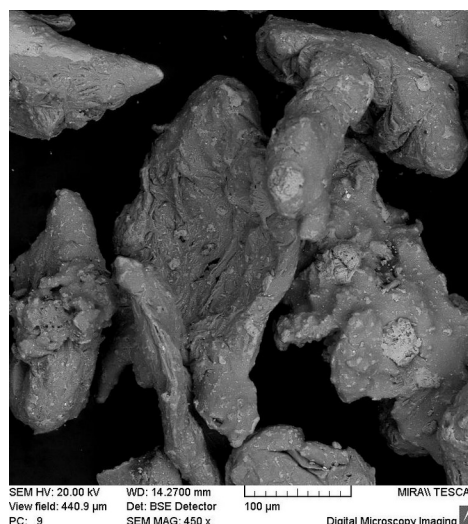


Рисунок 6.20 - Морфология ферроабразивного порошка на основе боридов железа

Методика проведения эксперимента включает ускоренные испытания при периодическом или полном погружении в раствор, путем нанесения на поверхность испытываемых покрытий специальных паст или при воздействии солевого раствора в специальных коррозионных камерах (емкостях).

При использовании этого метода оценки на образец коррозионных испытаний накладывают прозрачную сетку, разделенную на квадраты (1x1мм). Поэтому величинам  $n$  и  $N$  соответствует число квадратов  $n$  сетки, в которые попадают очаги коррозии до основы, из общего числа квадратов сетки  $N$ .

В ходе исследований установлены особенности влияния защитных слоев, полученных термической обработкой, суперфинишированием и магнитно-абразивной обработкой, на коррозионные свойства исследуемого внутреннего кольца подшипника.

Для этого проводились коррозионные испытания в 20% водном растворе NaCl при температуре 20°C. Методика определения коррозионной стойкости заключалась в оценке площади поверхности, занятой продуктами коррозии.

Испытаниям был подвергнут образец после токарной обработки, термической обработки, суперфинишированием и MAO. На рисунке 6.21а, представлен образец после MAO до проведения испытаний на коррозионную стойкость. На рисунок 6.21б-в показана кинетика развития коррозии на образце, обработанном методом MAO, которая наблюдалась в течение 288 часов, также выделены основные очаги коррозии.

В таблице 6.4 представлены данные измерения покрытия коррозией образцов.

Таблица 6.4 - Данные измерения покрытия коррозией образцов

Время проведения эксперимента, час.	Площадь покрытия образца коррозией, %			
	после токарной обработки	после термической обработки	после суперфиниширования	после МАО
20	12	9	6	5
60	27	21	15	11
120	52	39	24	17
192	62	55	35	24
288	73	61	48	32

На основании полученных данных измерений площади, занятой продуктами коррозии, были построены зависимости интенсивности развития коррозии исследуемого образца от времени нахождения в экспериментальном растворе (рисунок 6.22).



Рисунок 6.21 - Экспериментальные фотографии образца внутреннего кольца подшипника, обработанного методом МАО: а – до начала эксперимента, б – через 120 часов, в – через 192 часов, г – через 288 часов

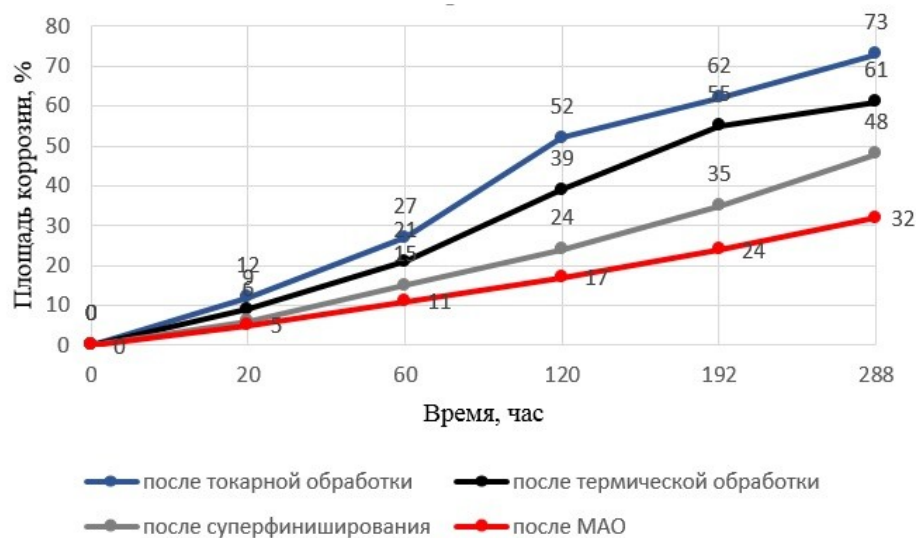


Рисунок 6.22 - График коррозии образцов в зависимости от времени проведения эксперимента

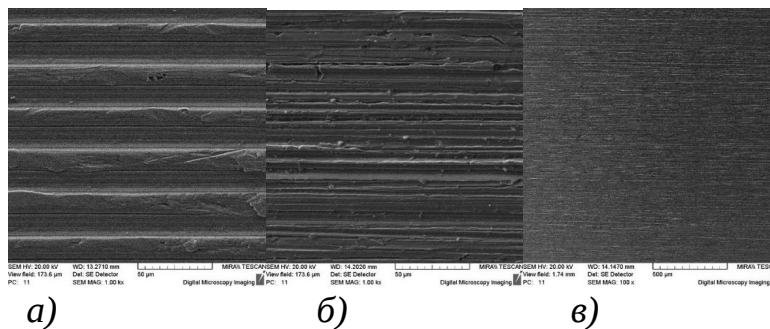
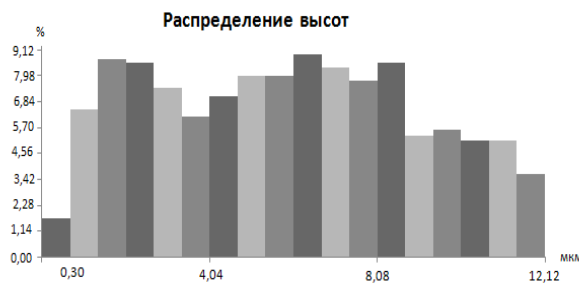


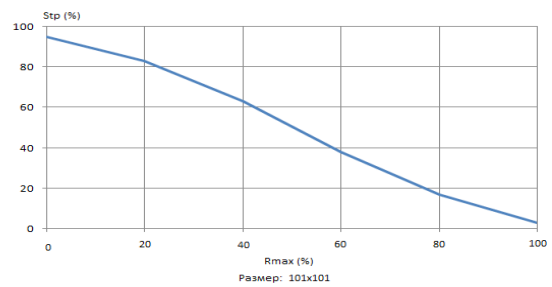
Рисунок 6.23 - Топографии поверхностей исследуемых образцов а – после токарной обработки, б – после суперфиниширования, в – после магнитно-абразивной обработки

Поверхность после токарной обработки (рисунок 6.23, а) имеет регулярную структуру, определяемую режимами обработки, геометрией режущей кромки инструмента и т.д. Поверхность является комбинацией шероховатости, генерируемой подачей инструмента и случайной составляющей микро-шероховатости, генерируемой процессом стружкоудаления. Структура шероховатости определяется микрогеометрией режущей кромки резца, постоянно изменяющейся в процессе резания. Частота, с которой происходит это изменение, частично определяется неомогенностью обрабатываемого материала.

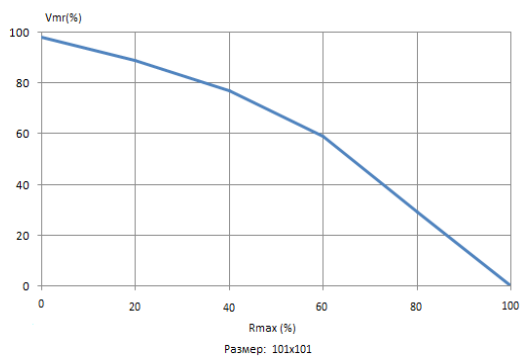
Гистограмма (рисунок 6.24, а) показывает распределение высот, близкое к гауссовскому, что подтверждается также значениями асимметрии. Такие значения характерны для кругового точения. Значение параметра  $R_a$  при круговом точении может варьироваться весьма существенно, поскольку оно зависит от формы режущей кромки резца, глубины резания и отношению подачи к частоте вращения заготовки.



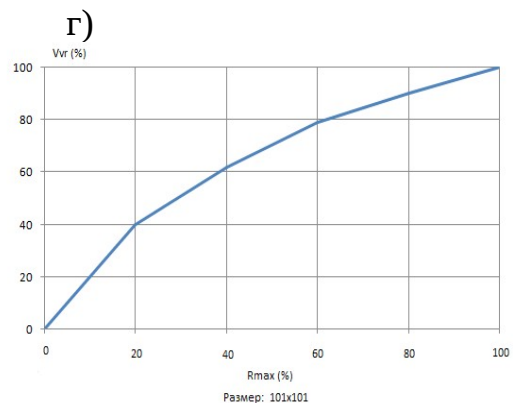
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6.24 - Топографические характеристики поверхности после токарной обработки: а – гистограмма распределения высот, б – опорная кривая поверхности, в – материальный объем, г – маслосъемкость

Как видно из графиков материального объема и маслосъемкости (рисунок 6.24, в-г), в процессе трения данного типа поверхности происходит достаточно быстрое удаление приблизительно 50% от общей высоты шероховатости, после чего наступает некоторая стабилизация.

Впадины, возникающие в образце, достаточно узкие и строго ориентированы поперек направлению движения инструмента [150].

Физическая сущность процесса суперфиниширования заключается в царапании обрабатываемой поверхности одновременно большим количеством мельчайших абразивных зерен. Структура поверхности после суперфиниширования (рисунок 6.23, б) представляет собой множество неглубоких параллельно расположенных царапин. Основными видами взаимодействия зерен с металлом являются микрорезание со снятием тончайших (0,1 – 0,5 мкм) стружек и трение с пластическим оттеснением металла. При контакте рабочей поверхности бруска с обрабатываемой поверхностью происходит царапание металла одновременно большим числом абразивных частиц это определяет анизотропность получаемой поверхности (рисунок 6.25). Размер таких

частиц при суперфинишировании составляет 5 – 20 мкм, а среднее их число на поверхности бруска 400 – 5000 зерен на 1 мм<sup>3</sup>.

Особенностью суперфиниширования является наличие на поверхности четко выраженных глубоких впадин. Данные впадины создаются острыми зернами, копирующими свой профиль на поверхность. График опорной кривой показывает хорошую несущую способность данной поверхности (рисунок 6.25, б).

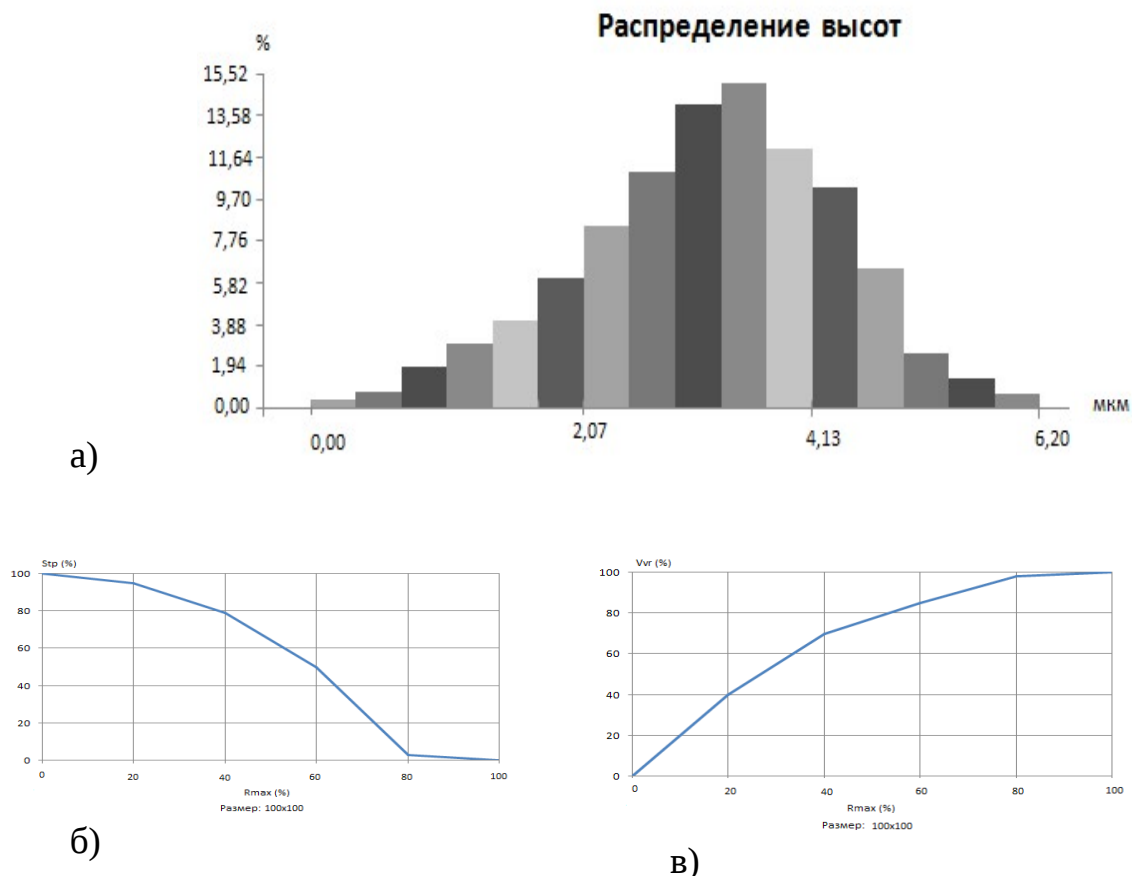
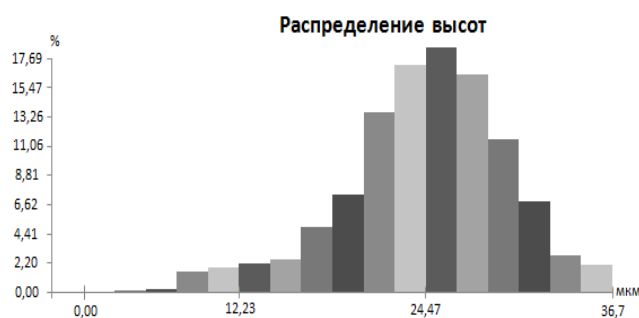


Рисунок 6.25 - Топографические характеристики поверхности после суперфиниширования: а – гистограмма распределения высот, б - опорная кривая поверхности, в – материальный объем, г – маслосъемкость

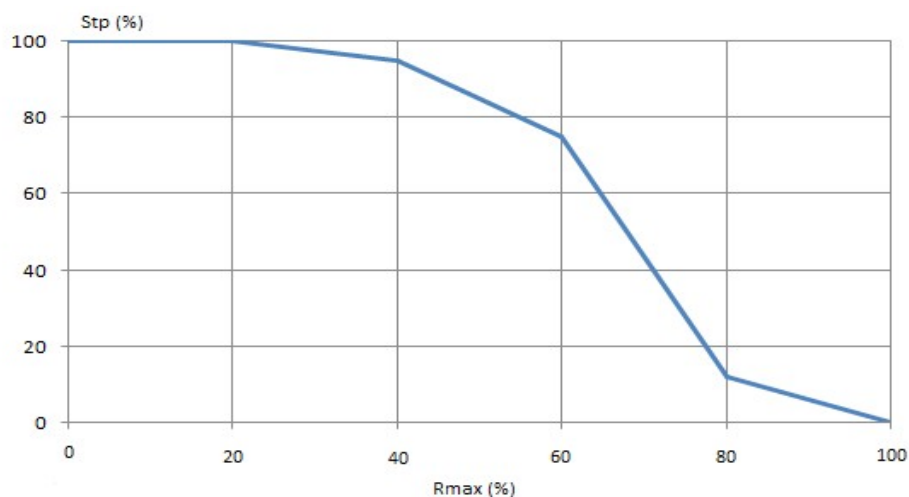
При суперфинишировании брусок прирабатывается к заготовке и соприкасается с ней по значительной части рабочей поверхности. При поверхностном контакте инструмент охватывает и срезает выступающие участки макро- и микронеровностей поверхности. Такой контакт пары брусок – заготовка способствует повышению производительности и точности обработки. Следствием такого комплексного взаимодействия является близкая к гауссовской структура поверхности с редкими впадинами, оставляемыми единичными несточенными абразивными зернами.[150]

В процессе магнитно-абразивной обработки поверхность (рисунок 6.23, в) формируется частицами ферро-абразивного порошка приблизительно равного размера, контактирующими с ней в различных местах и под произвольными углами. С высокой достоверностью можно считать, что кинетическая энергия единичных взаимодействий одинакова. Количество единичных взаимодействий, приходящихся на местный участок поверхности, определяет глубину образующейся на нем впадины. В результате, структура поверхности после МАО имеет случайный характер не только по площади, но и по амплитуде.

Гистограмма распределения высот (рисунок 6.26, а) показывает гауссовскую природу поверхности. Опорная кривая поверхности (рисунок 6.26, б) имеет плавный переход от зоны незначительного контакта в зону развитого контакта, что является полезным ее свойством с точки зрения трибологии [151]. Произвольные координаты и размер данных микровпадин свидетельствует о случайной структуре поверхности по всей ее высоте. Как следствие, значения параметров шероховатости, рассчитанных вдоль и поперек направления обработки, оказываются приблизительно равными. После МАО на поверхности остаются единичные микровпадины. Данные микровпадины имеют случайные координаты по горизонтали и размеры, однако их форма приблизительно одинакова. Это показывает одновременно множественный характер взаимодействий и случайное их распределение. Данный вид обработки обладает определенным трибологическим потенциалом и наиболее перспективен в качестве метода финишной обработки. Уменьшение шероховатости поверхности существенно улучшает антикоррозионную стойкость деталей и позволяет повысить срок эксплуатации.

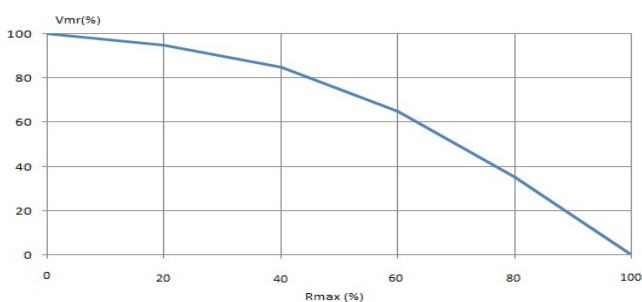


а)



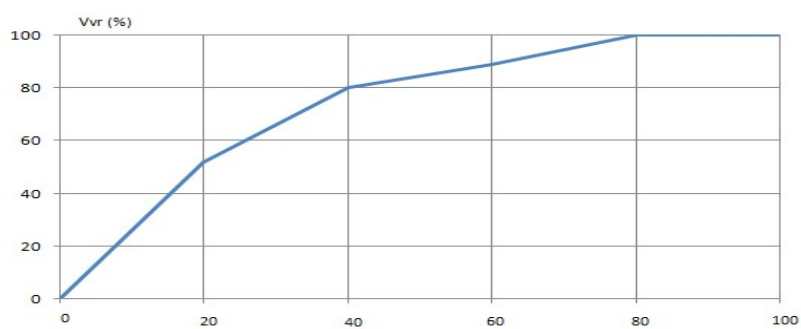
Размер: 81x82

б)



Размер: 81x82

в)



Размер: 81x82

г)

Рисунок 6.26 - Топографические характеристики поверхности после магнитно-абразивной обработки: а – гистограмма распределения высот, б – опорная кривая поверхности, в – материальный объем, г – маслосъемкость

Это особенно важно в данном случае, так как для поверхности закаточного ролика не могут быть использованы защитные покрытия для обеспечения наилучшей коррозионной стойкости.

## 6.6 Эксплуатационные свойства поверхностного слоя

Практика показывает, что одинаковые по точности и шероховатости поверхности могут иметь различные показатели надежности и долговечности. Это вызвано тем, что шероховатость сама по себе еще полностью не характеризует физическое состояние поверхностного слоя материала. Исследованиями доказано, что эксплуатационные свойства поверхностного слоя в значительной степени определяют их надежность и долговечность. Поэтому в качестве критерия были выбраны адекватные режимы для головок делителя теста ШЗ-ХДУ-3З, которые работают при биохимической коррозии в условиях интенсивного изнашивания.

В системе *ISO* коррозия металлов определена как физико-химическое взаимодействие между металлом и средой, в результате которого изменяются свойства металлов, и происходит ухудшение функциональных характеристик металла, среды или включающей их технической системы. Процесс коррозии представляет как коррозионную систему, состоящую из металла и коррозионной среды. В результате коррозии образуются новые вещества, включающие окислы и соли корродирующего металла, которые являются продуктами коррозии. Поэтому важнейшим понятием служит коррозионная стойкость, характеризующая способность металла сопротивляться коррозионному воздействию среды. Коррозионное разрушение в значительной степени определяется условиями работы материалов, поэтому наиболее точную оценку поведения материалов в данных условиях дают испытания, моделирующие эксплуатационные. В связи с этим требования к методам проводимых коррозионных испытаний соответствовали ГОСТ 9.905–82.

Таблица 6.5 -Оценка коррозионной стойкости деталей после различных финишных методов

Скорость коррозии при воздействии рабочей средой, г/м <sup>2</sup> час			
<i>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i> , концентрация %		<i>NaCl</i> , концентрация %	
75	90	3	10
2,59/2,01	1,47/0,91	0,11/0,07	0,15/0,1

*Примечание.* Верхний показатель – шлифование, нижний – МАО.

Образцами служили цилиндрические заготовки после шлифования и МАО, размеры которых составляли  $D \times L = 15 \times 40$  мм. Материал – бронза БрАЖ9-4 ГОСТ 18175–72. Рабочей средой являлись в первом случае 75 % и 90 % раствор *H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>*, во втором – 3 % и 9 % раствор *NaCl*. Результаты проведения испытаний представлены в таблице 6.5.

Многообразие условий работы деталей машин обусловлено различным видом взаимодействия поверхностей и, следовательно,



различными видами изнашивания. Установлено, что кинетика процесса изнашивания во времени характеризуется тремя периодами: приработка; установившееся изнашивание; аварийное изнашивание. Также износостойкость деталей машин в период установившегося изнашивания и время наступления аварийного износа в сильной степени зависит от характеристик поверхностного слоя, образовавшегося в период приработки. Поэтому процесс формирования микрорельефа и структуры этого слоя и его зависимость от вида обработки определяет уровень прочности и несущей способности узлов трения. Для оценки влияния условий обработки на износостойкость деталей в период приработки были проведены сравнительные исследования методами шлифования и MAO.

В результате обработки данными методами получают отличные друг от друга степень неоднородности структуры и физико-механические характеристики качества поверхности. Испытания проводили на машине трения 2070-СМТ1 в условиях трения качения.

Параметры и режимы шлифования: 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 1100, MAO: 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, ФАП-ФАПД-ФТИ-25 паспорт-сертификат БАТУ от 15.12.1998 г.; Т – при шлифовании 3 %-й раствор Укринол-1 при MAO – 2 -й раствор СинМА-1, Материал контртела – сталь 45 ГОСТ 1050–88. Образцы изнашивали в условиях сухого трения.

Форму и значимость связи между различными факторами, имеющими стохастическую природу, можно оценить на основе множественного регрессионно-корреляционного анализа. В качестве независимых переменных был выбран параметр  $R_a$ . Средние характеристики качества поверхности для пяти образцов и результаты испытаний на износ приведены в таблице 6.6.

Таблица 6.6 - Результаты испытаний на износостойкость после различных финитных методов

Шлифование		MAO	
$R_a$ , мкм	$I$ , мг	$R_a$ , мкм	$I$ , мг
0,89	218	0,09	107
0,74	194	0,08	97
0,90	177	0,11	109
0,79	190	0,10	115
0,83	183	0,09	104

В результате обработки экспериментальных данных получена следующая адекватная зависимость износа от характеристик поверхности для процесса MAO:

$$I = 17,89 R_a^{0,261}$$

Множественный коэффициент корреляции  $E = 0,9$ , коэффициент множественной детерминации  $R = 0,81$ . Как видно, наибольшее влияние на износ оказывает  $R_a$ , мкм

Установлено, что сформированный МАО технологический рельеф поверхности по геометрическим и физико-механическим характеристикам обладает улучшенными показателями, наиболее приближающимися к эксплуатационным. Шероховатость поверхности составляет  $K_d = 0,8 \dots 0,1$  мкм, что на 40...50 % ниже, чем после шлифования.

Процесс МАО оказывает положительное влияние на структуру поверхности обрабатываемой поверхности. Остаточные напряжения 1-го рода возрастают в среднем в 1,4, а 2-го рода – в 1,2 раза. Содержание остаточного аустенита снижается в 1,3 раза по сравнению со шлифованием.

При МАО образуется микрорельеф, способствующий при контакте трущихся пар созданию слоя, механические характеристики которого позволяют повысить его износо- и коррозионную стойкость в среднем в 1,8 и 1,5 раза соответственно. Это крайне важно для деталей оборудования пищевой промышленности, работающих в условиях биохимической коррозии.

Использование нового ФАП ФАПД-ФТИ-25 позволяет повысить производительность и качество процесса МАО в сравнении с традиционно применяемым Ж15КТ в среднем на 40 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Широко применяемая в машиностроении финишная обработка фасонных поверхностей и криволинейных участков гибкими абразивными инструментами обеспечивает копирование профиля обрабатываемой поверхности за счет податливости связки. Это позволяет выравнивать глубины резания отдельными абразивными зернами. Методы, основанные на использовании свободного абразива, допускают более равномерное распределение режущих кромок относительно обрабатываемых поверхностей, а также их переориентацию и перемещение в процессе обработки. Финишная обработка поверхностей закрепленным и свободным абразивом наиболее приемлема для обработки поверхностей простой геометрической формы. При использовании этих методов для обработки поверхностей сложной геометрической формы возникают проблемы неравномерного съема металла на сопрягаемых (труднодоступных) участках профиля. Потому обработка гибкими абразивными инструментами и свободным абразивом не может гарантировать качество поверхностей сложного профиля, как по геометрической форме, так и по шероховатости поверхности.

Методы финишной обработки сложнопрофильных поверхностей подвижно-скоординированными абразивными частицами основаны на создании режущего контура инструмента путем самоустанавливания абразивных частиц по контуру обрабатываемой поверхности, копируя ее геометрию. Роль связующего элемента выполняет энергия магнитного поля, создающая упругие силы воздействия на абразивные частицы порошка. Способность магнитного поля изменять давление абразивных частиц на обрабатываемую поверхность позволяет объединять в одном рабочем цикле чистовую и финишную обработку.

Важным компонентом рабочей технологической среды при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей являются смазочно-охлаждающие технологические среды, активирующие процесс съема металла. Установлено, что наибольшей способностью к адсорбции при магнитно-абразивной обработке обладают поверхностно активные вещества.

Таким образом показано, что значение физико-механических параметров и геометрических характеристик поверхностного слоя детали после магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей, определяется совместным действием абразивного резания, пластического выглаживания микронеровностей, химических реакций активных веществ и электромагнитных явлений в зоне обработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Калашников С. Н. Прогрессивные методы зубообработки цилиндрических зубчатых колес: учебное пособие для слушателей заочных курсов повышения квалификации ИТР по прогрессивной технологии и автоматизации управления процессами мех. обработки / С. Н. Калашников. – Москва: Машиностроение, 1982. – 44 с.

2 Обработка износостойких покрытий: / Ж. А. Мрочек и др. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.

3 Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учебное пособие / В. Е. Антонюк и др.]; под ред. В. Е. Антонюка. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 766 с.

4 Исследование влияния технологии окончательной обработки зубчатых колес на их работоспособность: информационные материалы / НИИМАШ ; сост. О. В. Берестнев, А. С. Соболев. – Москва, 1971. – 210 с.

5 Киселев С. П. Полирование металлов / С. П. Киселев. – Ленинград: Машиностроение, 1967. – 118 с.

6 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. – 148 с.

7 Редько С. Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов / С. Г. Редько. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1962. – 231 с.

8 Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учебное пособие / В.Е. Антюк и др. под общей ред. В.Е. Антонюка. – Мн: УП «Технопринт», 2003. – 766 с.

9 Сухоруков Ю. Н. Инструменты для обработки зубчатых колес методом свободного обката / Ю. Н. Сухоруков, Р. И. Евстигнеев. – Москва: Техника, 1983. – 120 с.

10 Антонюк В. Е. Направления и пути совершенствования конструкций, производства и процессов обработки зубчатых колес / В. Е. Антонюк, Ю. Г. Болотов, А. Б. Горштейн; под. ред. М. А. Архипова. – Минск : БелНИИТИ, 1987. – 35 с.

11 Резников А. Н. Краткий справочник по алмазной обработке изделий и инструментов / А. Н. Резников. – Куйбышев : Куйбышевское книжное издательство, 1967. – 202 с.

12 Сакулевич Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 326 с.

13 А. с. 55507 СССР : МПК В 24b 37/00. Способ внутреннего шлифования / Н. И. Каргалов; № 123546/25-8; заявл. 1.04.38 ; опубл. 2.10.39. – Бюл. № 8.

14 Сергеев Л. Е. Формирование характеристик поверхностного слоя деталей при магнитно-абразивной обработке отверстий / Л. Е. Сергеев, Н. Я. Скворчевский. – Минск, 1993. – 10 с. – Деп. в ВНИИТИ 14.07.93, № 1993.

15 Барон Ю. М. Технология абразивной обработки в магнитном поле / Ю. М. Барон. – Ленинград: Машиностроение, 1975. – 127 с.

16 Сакулевич Ф. Ю. Магнитно-абразивная обработка точных деталей / Ф. Ю. Сакулевич, Л. К. Минин, Л. А. Олендер. – Минск: Вышэйшая школа, 1977. – 287 с.

17 Ваксер Д. Б. Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании / Д. Б. Ваксер. – Москва : Машиностроение, 1964. – 123 с.

18 Прохоров И. В. Магнитореологические суспензии на основе аморфных магнитных порошков / И. В. Прохоров и др. // Магнитные материалы и их применение: тез. докл. междунар. науч. конф., Минск, 30 сент. – 2 окт. 1998 г. / ФТИ НАН Беларуси. – Минск, 1998. – С. 157-162

19 Богомоллов Н. И. О работе трения в абразивных процессах / Н. И. Богомоллов // Труды ВНИИМАШ. – Ленинград: Машиностроение. – 1965. – № 1. – С. 112–117.

20 Жданович В. И. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей : автореф. дис. канд. техн. наук / В. И. Жданович ; Физико-технический ин-т АН БССР. – Минск, 1974. – 23 с.

21 Коцура Ю. С. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки колец прядильных и крутильных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. С. Коцура ; Москов. технол. ин-т. – Москва, 1976. – 20 с.

22 Бабич В. Е. Технология финишной магнитно-абразивной обработки сборного породоразрушающего инструмента : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / В. Е. Бабич; ГНУ «Физико-технический институт» НАН Беларуси. – Минск, 2007. – 20 с.

23 Ящерицын П. И. Технологические возможности процессов финишной обработки эластичным абразивным инструментом / П. И. Ящерицын, Д. Ф. Устинович, П. В. Моисеенко // Технологии физтех: сб. ст. / ФТИ НАН Беларуси; под ред. акад. НАН Беларуси С. А. Астапчика. – Минск: Изд-во ФТИ НАН Беларуси, 1999. – С. 284–287.

24 Ящерицына П. И. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын и др. – Минск: Физико-технический ин-т, 1997. – 416 с.

25 Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Ленинград: Машиностроение, 1986. – 172 с.

26 Коновалов Е. Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е. Г. Коновалов, Г. С. Шулев. – Минск: Наука и техника, 1967. – 125 с.

27 Скворчевский Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 215 с.

28 Майборода В. С. Основи створення і використання порошкового магнітноабразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. С. Майборода; Київський політехнічний інститут. – Київ, 2001. – 36 с.

29 Хомич Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий. – Минск: БНТУ, 2006. – 200 с.

30 Кожуро Л. М. Разработка и исследование магнитно-абразивного полирования фасонных поверхностей тел вращения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л. М. Кожуро; Физико-технический ин-т АН БССР. – Минск, 1974. – 21 с.

31 Mori, T., “Clarification of Magnetic Abrasive Finishing Mechanism” / T. Mori, K. Hirota, Y. Kawashima // Journal of Materials Possessing Technology. 2003. - P. 143–144.

32 Кобчиков, В. С. Технология магнитно-абразивного полирования изделий из твердых сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. С. Кобчиков; Ленингр. политех. ин-т. – Ленинград, 1983. – 16 с.

33 Панченко В. М. Исследование технологических возможностей магнитно-абразивной обработки для повышения эксплуатационных свойств деталей машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. М. Панченко; Физико-технический ин-т АН БССР. – Брянск, 1976. – 24 с.

34 Сакулевич Ф. Ю. Объемная магнитно-абразивная обработка / Ф. Ю. Сакулевич, Л. М. Кожуро. – Минск: Наука и техника, 1978. – 168 с.

35 Волский Н. И. Обрабатываемость материалов шлифованием / Н. И. Волский. – Москва: Машгиз, 1950. – 248 с.

36 Ящерицын П. И. Шлифование металлов / П. И. Ящерицын, Е. А. Жолнерович. – Минск: Беларусь, 1970. – 483 с.

37 Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак. – Москва: Машиностроение, 1974. – 278 с.

38 Разработка технологического процесса магнитно-абразивной обработки пуансонов применительно к деталям отрасли: отчет о НИР / Академия Наук БССР ; Физико-технический институт; рук. Ф. Ю. Сакулевич. – Минск, 1974. – 93 с.

39 Исследование общих вопросов теории и технологии процесса магнитно-абразивной обработки: отчет о НИР / Академия Наук БССР ; Физико-технический институт ; рук. Ф. Ю. Сакулевич. – Минск, 1975. – 566 с.

40 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.

41 Матюха П. Г. Современные тенденции магнитно-абразивной обработки / П. Г. Матюха, А. В. Бурдин. – Научные труды Донецкого национального технического университета. – Сер.: Машиностроение. Вып. 6. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – С. 166–173.

42 Коновалов Е. Г. Основы электроферромагнитной обработки / Е. Г. Коновалов, Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1974. – 272 с.

43 Кадхум А. Х. Повышение эффективности магнитно-абразивной обработки оптимизации геометрических параметров рабочей зоны : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Али Хуссейн Кадхум ; Белорусская государственная политехническая академия. – Минск, 1993. – 18 с.

44 Dr. Sebestyen I. Magnetic Field and Force Calculation for MAM Device : COMPUMAG 12<sup>th</sup> Conference on Computation of Electromagnetic Field / Dr. I. Sebestyen, dr. J. Kodacsy. 1999. – October 25–28, Sapporo (J).

45 Ларионов С. Г. Отделочно-упрочняющая обработка режущего инструмента уплотненным потоком абразива в магнитном поле : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. Г. Ларионов ; Ленинградский государственный технический университет. – Ленинград, 1991. – 18 с.

46 Childs T.H.C. // Industrial Diamond Review. – Vol. 54, № 562. – P. 120–123.

47 А. с. 19414 СССР : МПК В 24 в 57/00. Устройство для магнитно-абразивной обработки зубчатых колес: Б. Г. Македонский, А. Д. Кочемцов, И. М. Думанов, П. Н. Глабов. – № 22630/08 ; заявлено 05.02.73 ; опубл. 25.06.75 // Открытия. Изобретения. – 1975. – № 34.

48 Иконников А. М. Совершенствование технологии магнитно-абразивной обработки фасонных поверхностей : автореф. дис. .... канд. техн. наук : 05.03.01 / А. М. Иконников ; Алтайский политехнический институт им. Ползунова. – Барнаул, 2004. – 18 с.

49 Ефремов В. Д. Технологическое обеспечение качества рабочих кромок инструмента и деталей / В. Д. Ефремов, П. И. Ящерицын. – Минск : БАТУ, 1997. – 251 с.

50 Андрушкевич И. Е. Методы разделения переменных в волновых уравнениях / И.Е. Андрушкевич. – Новополоцк: ПГУ, 2010г. – 239 с.

51 Акулович Л.М. Моделирование магнитостатических полей при магнитно-абразивной обработке деталей / И.Е. Андрушкевич, Л.Е. Сергеев. - Докл. II Международной конференции «Математическое моделирование и фундаментальные уравнения. - Минск, 2009. - С. 31-33.

52. 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.

53. 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.33-37.

54 Хейфец М.Л. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей / Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.

55 Гордиенко А.И. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / А.И. Гордиенко, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов и др.– Мн.: ФТИ НАНБ; Новополоцк: ПГУ, 2000. – 172 с.

56 Хейфец М.Л. О самоорганизации процессов формирования свойств поверхностного слоя при комбинированных методах обработки металлов / М.Л. Хейфец // Доклады АН Беларуси. - 1995. - Т.39. - № 2. - С. 109-113.

57 Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электротехники М.: АCADEMIA, 2004. - 560с.

58. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля./ В.А. Говорков - Москва: Энергия. - 1968. -198с.

59 Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. - М: Наука, 1976. - 326с.

60 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.

61 Самсонов Г. В. Смачивание тугоплавких карбидов жидкими металлами / Г. В. Самсонов, Г. К. Козина, А. Д. Панасюк // Порошковая металлургия. – 1968. – № 11. – С. 42–48.

62 Самсонов Г. В. Контактные взаимодействия тугоплавких соединений с жидкими металлами. Исследование процесса смачивания металлоподобных боридов жидкими непереходными металлами / Г. В. Самсонов, А. Д. Панасюк, М. С. Боровикова // Порошковая металлургия. – 1973. – №5. – С. 61–67.

63 Оликер В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий /В.Е. Оликер. - М.: Металлургия, 1990. - 176 с.



64 Скворчевский Н.Я. Научные основы повышения эффективности магнитно-абразивной обработки созданием сверхсильных магнитных полей и технологических сред: автореферат дис. ... д-ра техн. наук / Н.Я. Скворчевский. - Минск. - БГПА, 1994. - 36с.

65 А.с. 356705 СССР, МКИ НО1F 41. Полусный наконечник для электромагнита /02 Б.А.Иоффе, А.А.Шевченко Институт физики АН Латвийской ССР, № 1289062/25-8; заявл. 25.11.1968; опубл. 30.11.1972; Бюл. №32

66 Сергеев Л.Е. Магнитно-абразивная обработка деталей машин: учебное пособие / Л.Е. Сергеев, А.М. Миронов. – Минск: ГУ «Учебно-методический центр Минсельхозпрода», 2004. – 68 с.

67 А.с. 356705 СССР, МКИ В 24 В 31/10. Полусные наконечники электромагнита / Б. П. Борисов, В. П. Рябчун и В. Л. Шеголев № 428929; заявл. 16 05.77 опубл. 25.10.78, Бюл. № 39 (45)

68 Пат. РБ № 5617; МКИ В24В31/10 Устройство для абразивной обработки в магнитном поле / П.И. Ящерицын, Ракомсин А.П., Сергеев Л.Е. и др., ОАО МАЗ, № 3395278; заявл. 11.02.1982; опубл. 07.12.1985. Бюл. № 45

69 Ящерицын П.И. Расширение технологических возможностей магнитно-абразивной обработки на основе нового режущего материала / П.И. Ящерицын, Л.Е. Сергеев, А.П. Ракомсин и др. // Перспективные материалы. - № 2. - 2000. - С. 72-75.

70 Тодоров Н.Х. Система за автоматизирано проектиране на процеси за МАО // Тодоров Н.Х., Пиперкова Р.Д. Докл. III Междунар. н.-т.сем. по технологиям финишной обработки «АМО'87» (г. Варна, окт. 1987 г.). – Варна, 1987. – С. 82-86.

71 Ящерицын, П.И Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын и др. – Минск: Наука и техника, 1988. – 272 с.

72 Ящерицын П.И. Разработка и создание инструмента для магнитно-абразивной обработки отверстий на основе гибких абразивных щеток / П.И. Ящерицын, Л.Е. Сергеев, М.И. Сидоренко // Весці НАН Беларусі, серыя фіз.-тэхн. навук, № 3. - 1997. С. 42-45.

73 Ящерицын П.И. Теория резания / Фельдштейн Е.Э. - Минск: Новое знание, 2005. - 511с.

74 Сакулевич Ф.Ю. Роль смазывающее-охлаждающих жидкостей при магнитно-абразивной обработке / Ф.Ю. Сакулевич, Н.Я. Скворчевский. - Минск: 1981. - 215с.

75 Гроховский Г.Я. Полимеры в технологии обработки металлов. - Киев: Наукова думка, 1975. - 224 с.

76 Трение, износ и смазка (трибология и триботехники) / под. ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2003. - 575 с.

77 Бердичевский Е. Г. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов: справочник. - М., 1984. - 188с.

78 Поверхностно-активные вещества: справочник / под ред. А. А. Абрамзона и Г. М. Гаевого. - Л., 1979. - 125с.

79 Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: справочное издание / под ред. В. М. Школьников. - М.: Высшая школа, 1989. - 264с

80 Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества: Справочник / под ред. А. А. Абрамзона и Е. Д. Щукина. - Ленинград, 1984.

81 Ящерицын П.И. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива П.И. Ящерицын, А.Н. Мартынов, А.Д. Гридин. – М.: Наука и техника, 1978. – 244 с.

82 Ящерицын П.И. Магнитно-абразивная обработка цветных материалов с использованием СОТС «Аквапол-1» //Весці НАН Беларусі, сер.фіз. – тэхн.навук. - 2000. - №4. - С.62-65.

83 Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении: учеб. пособие для вузов / Б.И. Костецкий. - Киев: Техника, 1976.

84 Ахматов С.А. Молекулярная физика граничного трения: учеб. пособие для вузов / С.А. Ахматов. - М., 1963.

85 Тухтаркина О.Р. Структурная организация адсорбционных слоев анион-активных ПАВ в присутствии п-мерных простых эфиров / О.Р. Тухтаркина, И.Ю. Аверко-Антонович, Е.М. Готлиб, Э.Р. Ишалин, А.Р. Гатауллина, Л.И. Фомина // Структура и динамика молекулярных систем: Сб. статей VIII всероссийской конференции. - Яльчик: Йошкар-Ола-Уфа-Казань-Москва, 2001. - С. 105-106.

86 Бершадский Н.Я. Структурная термодинамика трибосистем / Н.Я. Бершадский. – Киев: «Знание», 1990. – 254 с.

87 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.

88 Никифоров И.П. // Инструмент и технологии. 2003. - №2. - С.8-13.

89 Гаркунов Д.Н. Триботехника: учеб. пособие для вузов / Д.Н. Гаркунов. - М., 1989.

90 Акулович Л.М. Управления процессами формирования поверхностей при магнитно-абразивной обработке / Л.М. Акулович, И.Ю. Колик // Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК: сборник докладов Международной научно-практической конференции, г. Минск, 15-18 апреля 2009г. В 2ч. Ч.1 / редкол. Шило И.Н. [ и др.]. – Минск: БГАТУ, – 2009. – С. 422-426.

91 Акулович Л.М. О самоорганизации процесса МАО цветных сплавов / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, Е.В. Сенчуров и др., // Доклад 4 МНТК «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». - Минск: ГНУ ФТИ НАН Беларуси, 2009. - С.24-28.

- 92 Панин В.Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. – Новосибирск:Наука, 1985. – 217 с
- 93 Розенберг А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А.М. Розенберг, Ю.А. Розенберг. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.
- 94 Солоненко В.Г. Резание металлов и режущие инструменты: учеб. пособие для вузов / В.Г. Солоненко, А.А Рыжкин. - М.: Высшая школа, 2007. – 414 с.
- 95 Ящерицын П. И. Шлифование металлов: учеб. пособие для вузов / П. И. Ящерицын, Е. А. Жолнерович. – Минск : Беларусь, 1970. – 483 с.
- 96 Yamaguchi H. “Uniform Internal Finishing of SUS304 Stainless Steel Bent Tube Using a Magnetic Abrasive Finishing Process” / H. Yamaguchi, M. Sekine // ASME journal of manufacturing science and engineering, Vol. 127, pp. 605-611, 2005.
- 97 Пригожин И. Современная термодинамика: учеб. пособие для вузов / И. Пригожин, Д. Кондипуди. – М.: Мир, 2002. – 460 с.
- 98 Гершман И.С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И.С. Гершман // Трение и износ. – 1995. – Т. 16, № 1. – С. 61-70.
- 99 Бершадский Н.Я. Структурная термодинамика трибосистем: учеб. пособие для вузов: учеб. пособие для вузов / Н.Я. Бершадский. – Киев: «Знание», 1990. – 254 с.
- 100 Singh L. Performance of Abrasives used in Magnetically Assisted Finishing: a state of the art review / L. Singh, S. Khangura, and P .Mishra // Int. J. of Abrasive Technology. - 2010. - V. 3, №3. - P. 215-227.
- 101 Bando S.A Study on Precision Internal Finishing for Alumina Ceramic Tube / S. Bando, A. Tsukada and Y. Kondo // Journal of Japan Soc. Abrasive Technology. - 2001. - V. 45, №1. - P. 46-59.
- 102 Yamaguchi H. Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing proces / H.T. Yamaguchi, A.E. Shinmura // Precision Eng. - 2004. - V. 28, P. 135-142.
- 103 Ящерицын П.И. Прогнозирование обработки мелко модульных зубчатых колес методом МАО / П.И. Ящерицын, А.П. Ракомсин, Л.Е. Сергеев и др., // Доклад в сборнике трудов 1 МНТК «Современные методы проектирования машин: расчет, конструирование и технология изготовления», выпуск 1. Т1, г. Минск, УП «Технопринт», 2002. с. 18-22.
- 104 Raghuram M.S. Modeling of Polishing Mechanism in Magnetic Abrasive Polishing. M. . S. Raghuram, Suhas S. Joshi. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Goa, India. - 2008. - P. 344-352.
- 105 Акулович Л.М. Магнитно-абразивная обработка прерывистых поверхностей / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, Е.В. Сенчуров // Вестник

Полоцкого государственного университета. Серия В. - 2009. - №2. - С.72-75.

106 Singh P. Internal finishing of cylindrical pipes using sintered magnetic abrasives. P Singh, P. S. Samra, L. Singh // International Journal of Engineering Science and Technology. - 2011. - V. 3, №7. - P. 5747-5753.

107 Иконников А.М., Расчёт параметров процесса магнитно-абразивной обработки поверхностей сложного профиля. "Обработка металлов"/ А.М. Иконников, В.А. Федоров // ОАО НТП и ЭИ "ОРГСТАНКИНПРОМ". - Новосибирск, 2003. - №4. - С. 10-11.

108 Yin S. Study of Magnetic Field-Assisted Machining Process for Ferromagnetic Metallic material / S. Yin // J. of Japan Soc.Abrasive Technology. 2002. - V. 46, № 3. - P. 141-145.

109 Kodacsy J. Apparatus for cleaning debarring and polishing parts in magnetic field/J. Kodacsy//Proc. of 7-th international conference on debarring and surface finishing. Berkeley USA. - 2004. - V. 12, №4. - P. 375-378.

110 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 // International Journal of Mechanical, Automobile & Production Engineering. - 2012. - V. 2, №7 - P. 249-262.

111 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.

112 Saito T. "Development of Gas-Atomized Magnetic Tools" / T. Saito, K. Koike, H. Yamato // Key Eng. Mater. - 2005. - V. 54, P. 287-290.

113 Майборода В.С. Кінематика процесу магнітно-абразивної обробки твердосплавних багатограничних непереточуваних пластин в умовах кільцевої робочої зони / В.С. Майборода, Т.М. Капуцак // Вісник ЖДТУ – 2004. – №4(31). Т. 1. – С. 57-65.

114 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 // International Journal of Advance Manufacturing Technology. - 2007. - V. 34, P. 122–130.

115 Hou Z B. Magnetic field assisted finishing of ceramics / Z B Hou; R Komanduri.- Journal of Tribology. - Transactions of the ASME. - 1998. - V. 120, №4. - P. 645-651.

116 Скворчевский Н.Я. Отделочная обработка холоднокатанных зубчатых колес методом МАО / Н.Я. Скворчевский, Л.Е. Сергеев, Б.М. Марголин и др. // Весці НАН Беларусі, серыя фіз.-тэхн. навук, 1995. - №3, С. 30-32.

117 Kawakubo H. Study on Partical-Brush in Magnetic Field Assisted Machining – Finishing Characteristics of Grooves // H. Kawakubo, etc. Proc.

International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21 Century-LEM21. - Niigata, Japan. - 2003. - V. 3-6, P. 385-390.

118 Полищук В.С. Магнитно-абразивная обработка – высокоэффективный метод в машиностроении // Физика и техника высоких давлений. – 2003. - Т. 13, №1. - С. 127-138.

119 Ящерицын П. И. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей / П.И. Ящерицын, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов и др. - Новополоцк: ПГУ, 1997. - 136 с.

120 Ящерицын П.И. Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении / П.И. Ящерицын – Минск: Наука и техника, 1974. - 606 с.

121 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.

122 Лошак М.Г. Упрочнение твердых сплавов./ М.Г. Лошак, Л.И. Александрова – Киев: Наукова думка, 1975. – 147 с.

123 Акулович Л.М. Самоорганизация процессов упрочняющей обработки: / Л.М. Акулович, В.С. Ивашко, М.Л. Хейфец. – Минск: Народная книга, 2008. – 236 с.

124 Барон Ю.М. Характеристика поверхностного слоя закаленных инструментальных сталей, подвергнутых магнитно-абразивной обработке / Ю.М. Барон. – Л., 1983. – 12с. – Деп. в НИИмаше, №93.

125 Wang Y. "Study on Inner Surface Finishing of Tubing by Magnetic Abrasive Finishing" / Y. Wang, D. Hu // Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, pp. 43–49, 2005.

126 Kim J.D. "Polishing of ultra-clean inner surfaces using magnetic force" / J.D. Kim // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2003. - V. 21. - P. 91–97,

127 Шулев Г.С. Физико-технические основы обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками. Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г.С. Шулев. - Минск: Физико-технический ин-т АН БССР, 1965. – 22 с.

128 Минин Л.К. Магнитно-абразивное полирование наружных поверхностей вращения высокоточных деталей Автореф. Дисс. канд.техн.наук / Л.К. Минин. - Минск: Физико-технический ин-т АН БССР, 1975. - 24с.

129 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.

130 Жданович В.И. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.И. Жданович. - Минск: Физико-технический ин-т АН БССР, 1974. – 23с.

131 Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей: дис. ... канд. техн. наук: / В.С. Майборода. – Киев: Киев. политех. ин-т, 1988. – 170 с.

132 Барон Ю.М. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса абразивной обработки деталей машин в магнитном поле: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю.М. Барон. - Ленинград: Ленингр. политех. ин-т, 1969 - 18 с.

133 Благодарная О.В., Технологическое обеспечение качества рабочих поверхностей швейных игл магнитно-абразивным полированием: дис. ... канд. техн. наук / О.В. Благодарная. - Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2012. – 182 с.

134 Kodacsy J., Magneto-abrasives Polieren und Entgraten Witerenwikelte Feinbearbeitung // Tech. Rdsch. - 1990. V. 82, №37. - P. 76-79.

135 Yamaguchi H., Shimura, T., Takenada, M. Development of a new precision internal machining processing on alternating magnetic field // Prec eng. - 2003. - №27. - P. 51-58.

136 Zhen Bing H., Komanduri, R. Magnetic Field assisted Finishing of Ceramics –Part 3. On the Thermal aspects of Magnetic abrasive Finishing (MAF) of Ceramics Rollers 2 Journal of Tribology. - 1998. – V.120. - P. 660-667.

137 Wantuch E. Zutze, H. Magnetic-abrasive Bearbeitung // New Fertigungs technologies. - 2002. - №5. - P. 232-237

138 Хомич Н.С. Высококачественное полирование крупногабаритных валов // Советский экспорт. -1983. - №5. - С. 5.

139 Майборода В.С. Дослідження впливу в'язкості змащувально-охолоджуючого технологічного середовища на властивості магнітно-абразивного інструменту / В.С.Майборода, О.А.Ивановский // Вестник национального технического университета Украины. Серия "Машиностроение". – 2004. - Вып.45. - С. 99-102.

140 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.

141 Рудзит Я. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства поверхностей / Я.А. Рудзит. – Рига: РПИ, 1984. – 101 с.

142 Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский и др. под общ. ред. Ю.А. Скакова. - М.: Металлургия, 1982.- 632 с.

143 Ящерицын П.И. Чистовая обработка деталей в машиностроении: учеб. пособие для вузов / П.И. Ящерицын, А.Н. Мартынов. – Минск: Высшая школа, 1983. -220 с.

144 Михайловский Ю. Н. Атмосферная коррозия металлов и методы их защиты / Ю. Н. Михайловский – М.: Металлургия, 1989. –102 с.

- 145 Герасименко А. А. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: справочник: в 2 т. / под ред. А.А. Герасименко. – М.:Машиностроение, 1987. – Т. 1. – 688 с.
- 146 ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. – М.: Издательство стандартов, 1999. – 17 с.
- 147 Коррозия металлов. Термины: ГОСТ 5272-68. – Введ. 01.01.1969. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 23 с.
- 148 Кофанов В. М. Коррозия и защита металлов / Н. К. Кофанов. – Алчевск: Донбасс. горно-металлург. институт, 2003. – 181 с.
- 149 Княжева В.М. Новые достижения в области теории и практики противокоррозионной защиты материалов / В. М. Княжева – М., 1981. – с. 49-71.
- 150 Порошин В.В. Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей: монография / В.В. Порошин. – М.: Машиностроение, 2007. – 196 с.

Акулович Леонид Михайлович  
Сергеев Леонид Ефимович  
Романюк Николай Николаевич  
Меңдалиева Сауле Ильинична

**ФИНИШНАЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ  
ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

Сдано в набор 10.02.2024  
Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Объем 15,25 усл. п. л.

Подписано к печати 19.04.2023  
Заказ № 2342  
Тираж 20 экз.

---

Типография НАО "Казахский агротехнический исследовательский университет" имени С. Сейфуллина, 2023  
010011, г. Астана, пр. Женис 62 а, тел 39-39-17



