

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**УПРОЧНЯЮЩАЯ  
И ФИНИШНАЯ АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ДЕТАЛЕЙ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

Под редакцией Л. М. Акуловича

Минск  
БГАТУ  
2022

**Авторы:**

доктор технических наук, профессор *Л. М. Акулович* (введение и заключение, структура, общее редактирование, главы 1, 3, 4);  
кандидат технических наук, доцент *А. В. Миранович* (главы 2, 4);  
кандидат технических наук, доцент *Л. Е. Сергеев* (главы 2, 3);  
кандидат технических наук *О. Н. Ворошуха* (глава 4)

**Упрочняющая** и финишная абразивная обработка в магнитном поле деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович [и др.] ; под редакцией Л. М. Акуловича. – Минск : БГАТУ, 2022. – 360 с. : ил. – ISBN 978-985-25-0190-3.

Приведены результаты научных исследований процессов восстановления изношенных поверхностей деталей магнитно-электрическим упрочнением и повышения их физико-механических свойств при упрочняющей магнитно-абразивной обработке. Описан механизм формирования износостойких покрытий из ферромагнитных порошков под действием электрических разрядов в магнитном поле и др.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских институтов, машиностроительных и ремонтных предприятий, а также будет полезна аспирантам, магистрантам и студентам технических специальностей учреждений высшего образования.

Табл. 42. Ил. 158. Библиогр.: 141 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (протокол № 1 от 11 января 2022 г.)

**Рецензенты:**

доктор технических наук, профессор, начальник отделения технологий машиностроения и металлургии Объединенного института машиностроения НАН Беларуси *В. И. Жорник*;

доктор технических наук, профессор, заведующий отраслевой научно-исследовательской лабораторией плазменных и лазерных технологий филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт» *О. Г. Девойно*

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ . . . . .	7
ВВЕДЕНИЕ . . . . .	8
1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕССАХ УПРОЧНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН . . . . .	13
1.1. Магнитные свойства металлов . . . . .	14
1.2. Намагничивание ферромагнетиков . . . . .	19
1.3. Методы упрочнения поверхностей деталей машин в магнитном поле . . . . .	23
1.4. Ориентация ферромагнитных частиц в магнитном поле в процессах упрочнения поверхностей деталей машин . . . . .	36
2. МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ С НАНЕСЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ . . . . .	45
2.1. Механизм нанесения покрытий при магнитно-электрическом упрочнении . . . . .	45
2.1.1. Стадии процесса формирования точечного вкрапления . . . . .	45
2.1.2. Механизм действия сил при электрическом разряде . . . . .	48
2.1.3. Тепловые процессы в рабочей зоне при воздействии электромагнитного поля . . . . .	52
2.1.4. Модели тепловых процессов в поверхностном слое упрочняемой детали . . . . .	55
2.2. Исследование стабильности процесса магнитно-электрического упрочнения . . . . .	59
2.2.1. Влияние вида источника технологического тока на стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения . . . . .	59
2.2.2. Влияние параметров магнитного поля на стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения . . . . .	67
2.3. Проектирование магнитопроводов на основе постоянных магнитов . . . . .	88
2.3.1. Методика расчета параметров магнитной системы . . . . .	89
2.3.2. Определение конструктивных параметров магнитной системы на основе постоянных магнитов . . . . .	95
2.3.3. Синтез магнитопроводов различной конфигурации с использованием постоянных магнитов . . . . .	97

2.4. Исследование технологических параметров магнитно-электрического упрочнения . . . . .	104
2.4.1. Моделирование процесса магнитно-электрического упрочнения . . . . .	104
2.4.2. Влияние технологических факторов на параметры оптимизации . . . . .	108
2.4.3. Оптимизация технологических режимов магнитно-электрического упрочнения . . . . .	116
2.5. Исследование физико-механических свойств поверхностного слоя после магнитно-электрического упрочнения . . . . .	121
2.5.1. Материалы для нанесения покрытий . . . . .	121
2.5.2. Микроструктура поверхностных слоев . . . . .	123
2.5.3. Микротвердость поверхностного слоя . . . . .	126
2.5.4. Пористость, сплошность и разнотолщинность покрытий . . . . .	128
2.5.5. Износостойкость упрочненных поверхностей . . . . .	135
<b>3. ФИНИШНАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН . . . . .</b>	<b>145</b>
3.1. Ферроабразивные порошки . . . . .	147
3.1.1. Материалы ферроабразивных порошков . . . . .	147
3.1.2. Магнитная проницаемость и насыпная плотность ферроабразивных порошков . . . . .	155
3.2. Магнитно-абразивный инструмент . . . . .	159
3.2.1. Формирование ферроабразивного инструмента . . . . .	159
3.2.2. Механизм стружкообразования при магнитно-абразивной обработке . . . . .	174
3.2.3. Способы магнитно-абразивной обработки . . . . .	183
3.3. Магнитно-абразивная обработка типовых поверхностей . . . . .	193
3.3.1. Обработка поверхностей простейших форм . . . . .	193
3.3.2. Обработка фасонных поверхностей . . . . .	203
3.4. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей тел вращения . . . . .	214
3.4.1. Расчет топографии магнитного поля для магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей . . . . .	214
3.4.2. Компьютерное моделирование топографии магнитного поля при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей тел вращения . . . . .	222
3.4.3. Компьютерное моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке деталей сферической формы . . . . .	223

3.4.4. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке мелкозубчатых колес . . . . .	226
3.4.5. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке наружных конических поверхностей . . . . .	227
3.4.6. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке внутренних конических поверхностей . . . . .	230
3.5. Экспериментальные исследования магнитно-абразивной обработки . . . . .	232
3.5.1. Топография магнитного поля при МАО беговых дорожек внутренних колец подшипников качения . . . . .	232
3.5.2. Факторный анализ процесса магнитно-абразивной обработки по производительности и качеству поверхности . . . . .	236
3.5.3. Исследование технологических режимов магнитно-абразивной обработки . . . . .	240
3.5.4. Влияние смазочно-охлаждающих технологических средств на сьем металла при магнитно-абразивной обработке . . . . .	246
<b>4. КОМБИНИРОВАННЫЕ И СОВМЕЩЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В МАГНИТНОМ ПОЛЕ . . . . .</b>	<b>270</b>
4.1. Упрочняющая финишная магнитно-абразивная обработка поверхностей деталей машин . . . . .	270
4.1.1. Формирование в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке абразивной «щетки» и ее режущая способность. . . . .	270
4.1.2. Методы повышения производительности магнитно-абразивной обработки и качества обработанных поверхностей . . . . .	275
4.1.3. Методы исследования топографии магнитного поля . . . . .	288
4.2. Механизм ориентации ферроабразивных зерен в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке . . . . .	290
4.2.1. Обобщенная модель формы ферроабразивного зерна . . . . .	290
4.2.2. Теоретическое исследование ориентации единичного ферроабразивного зерна в процессе резания . . . . .	294
4.2.3. Экспериментальные исследования влияния угла наклона оси ферроабразивных зерен на производительность и шероховатость поверхности . . . . .	301
4.2.4. Методы изменения направления магнитных силовых линий для реализации управляемого ориентированного резания . . . . .	303
4.3. Метод регенерации абразивной «щетки» в процессе магнитно-абразивной обработки . . . . .	311
4.3.1. Разработка схемы магнитной системы для регенерации абразивной «щетки» . . . . .	313

4.3.2. Влияние параметров импульсного магнитного поля на производительность обработки и шероховатость поверхности . . . . .	322
4.3.3. Определение рациональных технологических режимов магнитно-абразивной обработки с регенерацией абразивной «щетки» . . . . .	325
4.3.4. Экспериментальное исследование влияния импульсного магнитного поля на производительность обработки при суперпозиции основного и дополнительного магнитных полей . . . . .	332
4.4. Синтез комбинированных способов упрочнения поверхностей деталей в магнитном поле . . . . .	335
4.4.1. Методика синтеза комбинированных способов упрочняющей обработки поверхностей деталей машин в магнитном поле . . .	335
4.4.2. Совмещенные способы упрочняющей обработки в магнитном поле поверхностей вращения . . . . .	337
4.4.3. Экспериментальные исследования влияния совмещенной магнитно-абразивной обработки и магнитно-импульсного упрочнения на производительность и качество поверхности . . .	342
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	346
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ . . . . .	348

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЭМП	–	электромагнитное поле;
ЭМС	–	электромагнитная система;
МЭУ	–	магнитно-электрическое упрочнение;
ИТТ	–	источник технологического тока;
МАО	–	магнитно-абразивная обработка;
МП	–	магнитное поле;
ИМП	–	импульсное магнитное поле;
ДМС	–	дополнительная магнитная система;
МС	–	магнитная система;
РЗ	–	рабочий зазор;
ППД	–	поверхностное пластическое деформирование;
ЭМ	–	электрический магнит;
ПМ	–	постоянный магнит;
ПН	–	полюсный наконечник;
СОТС	–	смазочно-охлаждающее технологическое средство;
ФМП	–	ферромагнитный порошок;
ФАП	–	ферроабразивный порошок;
ФАЗ	–	ферроабразивное зерно;
ЦКОП	–	центральный композиционный ортогональный план;
ЦКРУП	–	центральный композиционный ротатбельный униформ-план;
<i>B</i>	–	величина магнитной индукции, Тл;
ТО	–	технологический объект;
$\mu_a$	–	магнитная проницаемость материала, Гн/м;
<i>Ra</i>	–	параметр шероховатости поверхности, мкм;
$\tau$	–	время обработки, с;
<i>v</i>	–	скорость главного движения, м/с;
$\delta$	–	величина рабочего зазора, мм;
$\mu$	–	коэффициент трения

## ВВЕДЕНИЕ

Многие из узлов и механизмов сельскохозяйственной техники работают в условиях воздействия агрессивных сред, без смазки или в контакте с материалами, содержащими абразивные частицы. Поэтому потеря работоспособности сельскохозяйственной техники происходит преимущественно (около 80 %) по причине изнашивания рабочих поверхностей деталей или вызвано несколькими причинами, где изнашивание играет доминирующую роль [1–4]. При этом около 50 % вышедших из строя деталей имеют износ поверхностей, не превышающий 0,1 мм. Экономическая целесообразность восстановления изношенных рабочих поверхностей таких деталей обусловлена их повторным использованием, в результате которого экономия может достигать 30 %÷35 % от общей стоимости ремонта [5, 6]. Ресурс восстановленных деталей с использованием упрочняющих технологий увеличивается в 1,2÷2,5 раза. Зарубежный опыт упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственной и автотракторной техники также обосновывает экономическую целесообразность вторичного использования запасных частей [5]. Так, например, на заводе фирмы London Transport Chiswick восстанавливают изношенные детали двигателей, коробок передач, задних мостов грузовых автомобилей и автобусов. Наиболее востребованными на вторичном рынке использования запасных частей являются крупные узлы (двигатели, турбины, гидропневоагрегаты) и их детали (коленчатые валы, валы карданных передач, коробок передач и др.) [5, 6]. Актуальным является как упрочнение новых, так и восстановление изношенных цилиндрических поверхностей деталей автомобилей, тракторов, плоских поверхностей деталей почвообрабатывающих агрегатов (диски сошников сеялок СЗП, СПУ и др.).

Машиностроение располагает широким разнообразием методов упрочнения поверхностей деталей. Вместе с тем, накопленный опыт показывает, что не существует универсальных методов упрочнения поверхностей, обеспечивающих требуемые физико-механические свойства материалов для различных эксплуатационных условий. Из-за многообразия условий работы машин ни один из известных способов упрочнения поверхностей деталей не может претендовать на



универсальность. Один и тот же способ упрочнения в одних условиях эксплуатации может дать положительный эффект, а в других – отрицательный. Каждый способ имеет свою конкретную область рационального применения. В этом плане большинство существующих способов упрочнения металлических поверхностей исчерпали свои возможности.

Основным методом восстановления изношенных поверхностей деталей является нанесение покрытий. Варьирование сочетанием различных материалов покрытий и технологий их нанесения позволяет обеспечить соответствие физико-механических свойств поверхностных слоев деталей эксплуатационным требованиям. Современные технологии восстановления и упрочнения металлов основаны на использовании концентрированных в пространстве и во времени потоков энергии лучевых и электрофизических полей. Кратковременный нагрев локальных участков поверхностных слоев исключает коробление деталей, вызванное температурными деформациями. Наиболее перспективными являются технологии восстановления и упрочнения, основанные на использовании энергии света (лазерное упрочнение) и магнитного поля (магнитно-электрическое упрочнение), которые являются естественным неисчерпаемым источником. Эти технологии развиваются быстрыми темпами в силу универсальности используемых энергоносителей, простоты управления, наличия задела по еще не реализованным возможностям. В настоящее время в машиностроении во все больших масштабах применяют высокоэнергетические и комбинированные методы обработки материалов. Для расширения технологических возможностей методов восстановления и упрочнения разрабатывают технологии, основанные на совмещении различных способов при формировании физико-механических свойств поверхностей деталей. Критерием оценки эффективности таких технологий является их универсальность по созданию на рабочих поверхностях деталей функциональных покрытий, удовлетворяющих по основным физико-механическим свойствам эксплуатационным требованиям с сохранением физико-механических свойств основы.

Вместе с тем, износостойкость трущихся поверхностей зависит от их топографии, в частности, от величины и формы микронеровностей. Уменьшение микронеровностей обеспечивает

более благоприятный микропрофиль, облегчающий трение и снижающий износ сопрягаемых поверхностей. Формирование микропрофиля поверхностей деталей происходит при их изготовлении на операциях финишной обработки. В связи с развитием высокоэффективных процессов изготовления заготовок деталей машин (обработка давлением, точное литье, порошковая металлургия и т. п.), возрастает значимость способов чистовой обработки материалов резанием, обеспечивающих высокие показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей. В машиностроении применяют различные технологии формирования параметров микрогеометрии и физико-механических свойств, обеспечивающие заданные показатели качества рабочих поверхностей деталей машин [7]. Среди них для финишной обработки можно выделить следующие группы: пластическое деформирование поверхностного слоя [8, 9], обработка лезвийными и абразивными инструментами [10], электрофизические и электрохимические методы [11, 12].

Для прецизионной обработки поверхностей одним из перспективных направлений является магнитореологическое полирование, использующее в качестве полировального инструмента магниточувствительные структурообратимые неколлоидные жидкости [13]. В основе этого процесса лежит эффект левитации немагнитных тел в магнитной жидкости [14]. Магниточувствительную жидкость, в которую вводят частицы абразивного материала, помещают в зону обработки и воздействуют на нее неоднородным магнитным полем с градиентом, направленным от поверхности обрабатываемой детали. Частицы абразивного наполнителя, испытывая магнитное давление, всплывают к движущейся поверхности полируемой детали и прижимаются к ней.

Из электрохимических методов наиболее перспективным является электроимпульсное полирование [15], отличающееся высокой производительностью обработки. Процессы, протекающие при использовании этого способа обработки, не вызывают деформации обрабатываемой заготовки и имеют принципиальные отличия от традиционной теории обработки резанием. Однако в производстве по экологическим соображениям доминирующим финишным методом остается механическая абразивная обработка,

которая нередко является единственно возможным методом обеспечения требуемого качества поверхности.

Технологии финишной абразивной обработки поверхностей базируются на использовании определенного вида режущего инструмента: с закрепленным, свободным и подвижно-координированным абразивным зерном. При любом способе финишной абразивной обработки важнейшим фактором является возможность управлять давлением абразивных зерен на обрабатываемую поверхность заготовки. В незакрепленном состоянии абразивные зерна более полно реализуют свои режущие, деформирующие и выглаживающие способности, так как происходит нивелирование их рабочих кромок относительно обрабатываемой поверхности, а также переориентация абразивных зерен и их перемещение в процессе обработки. Наличие у абразивных зерен отрицательных передних углов и скругленных вершин режущих кромок вызывает при высоких скоростях и малых глубинах микрорезания проскальзывание зерен и выглаживание ими обрабатываемой поверхности, что скругляет вершины имеющихся на них микронеровностей.

К одному из перспективных способов финишной обработки эластичным (гибким) инструментом относится магнитно-абразивная обработка (МАО). При обработке в магнитном поле ориентация абразивных зерен наиболее острой кромкой к обрабатываемой поверхности осуществляется с помощью энергии магнитного поля. В процессе МАО ферроабразивные зерна, находясь в свободном состоянии, под действием магнитного поля ориентируются так, что их наиболее острые кромки обращены к обрабатываемой поверхности.

В результате этого на протяжении всего цикла обработки имеет место процесс ориентированного абразивного резания эластичным инструментом. Под действием магнитного поля ферроабразивные зерна самоустанавливаются относительно контура обрабатываемой поверхности. Поэтому для реализации МАО не требуется изготавливать профилирующий абразивный инструмент, а также периодически его править, что в 2÷3 раза снижает затраты на инструмент. МАО, как и другие виды финишной абразивной обработки, производится в жидкой смазывающей охлаждающей технологической среде, обеспечивая шероховатость поверхности по параметру  $Ra = (0,01 \div 0,4)$  мкм,

а невысокая температура в зоне резания способствует формированию нового качества поверхности и структуры поверхностного слоя по сравнению с традиционными методами абразивной обработки.

В технологии абразивной обработки МАО занимает промежуточное место между шлифованием жесткими кругами и обработкой свободным абразивным зерном и обладает рядом достоинств, присущих процессу резания, электроэрозионной и электрохимической обработкам.

При подготовке монографии авторы ставили задачу на основе обобщения результатов исследований однородных по виду используемой энергии процессов магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) и магнитно-абразивной обработки (МАО) выработать основные подходы к разработке комбинированных технологий упрочнения и обработки поверхностей деталей в магнитном поле, направленных на формирование заданных показателей качества поверхностей при минимальных затратах. Участие авторов в написании монографии: Л. М. Акулович – введение и заключение, структура, общее редактирование, главы 1, 3, 4; А. В. Миранович – главы 2, 4; Л. Е. Сергеев – главы 2, 3; О. Н. Ворошухо – глава 4.

# 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕССАХ УПРОЧНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Магнитное поле – это невидимое силовое поле, действующее на движущиеся электрические заряды и на тела, обладающие магнитным моментом. Возможность его применения в деятельности и жизни человека вызывает особый интерес, так как энергия магнитного поля является естественным неисчерпаемым источником. Происхождение магнитного поля – одна из величайших загадок природы, которая человечеством в полной мере пока не разгадана. Вместе с тем установлено, что магнитное поле появляется как следствие движения электрических зарядов. С электрическим зарядом и его движением также обусловлено существование электрического поля, то есть электрическое и магнитное поля тесно связаны между собой и образуют электромагнитное поле. Изменяющееся во времени электрическое поле порождает магнитное поле, а измененное магнитное поле порождает электрическое поле. Оба эти компонента электромагнитного поля, непрерывно изменяясь, генерируют друг друга.

Электромагнитные поля широко применяют в машиностроении (неразрушающий контроль качества изделий, термомагнитная обработка для улучшения свойств конструкционных материалов, создание новых магнитных материалов, управление свойствами лезвийного режущего инструмента и динамически нагруженных деталей машин для увеличения их стойкости и надежности работы); в науке (методы ядерного магнитного резонанса, управление плазменными потоками); в технике (магнитные сепараторы, магнитные подъемные устройства); в медицине (для диагностики заболеваний, терапии, оздоровления); в быту и других отраслях народного хозяйства (дверные замки, компасы, радио- и телеаппаратура, сигнальные и преобразующие устройства и многое другое).

Все вещества в природе состоят из элементарных частиц, обладающих в той или иной мере магнитными свойствами. Под магнитными свойствами понимается способность вещества приобретать магнитный момент, т. е. намагничиваться при воздействии на него внешнего магнитного поля. Магнитные свойства вещества

проявляются в том, что намагниченный металл притягивает к себе металлы, обладающие магнитными свойствами. Способность металлов и их сплавов намагничиваться относят к физическим свойствам, равно как тепло- и электропроводность, поскольку намагничивание не сопровождается изменением химического состава вещества. Магнитными материалами могут быть различные металлы и их сплавы, химические соединения, жидкости.

Поскольку в изделиях машиностроения, как по функциональному назначению, так и по их количеству, доминируют детали из металлических сплавов, то при использовании энергии магнитного поля в технологических процессах упрочнения и обработки поверхностей деталей машин необходимо учитывать поведение металлов в магнитном поле, которое зависит от их магнитных свойств. Одной из основных характеристик магнитных свойств металлов является намагниченность, которая представляет собой векторную величину, равную среднему магнитному моменту единицы объема вещества. Намагниченность зависит от величины напряженности  $H$  (А/м) внешнего магнитного поля.

## 1.1. Магнитные свойства металлов

Магнитными веществами, или *магнетиками*, называются вещества, обладающие магнитными свойствами и при взаимодействии с внешним магнитным полем изменяющие его величину. Магнитные материалы характеризуются способностью накапливать, хранить и трансформировать магнитную энергию. Так как магнитное поле возникает при движении электрических зарядов, то способность материалов накапливать магнитную энергию определяется его атомной структурой. Магнитные поля атомов обусловлены:

- орбитальным магнитным моментом электронов при их движении по замкнутой орбите вокруг ядра;
- спиновым магнитным моментом (спином) электронов при их движении относительно собственной оси вращения;
- магнитным моментом атомного ядра, который создается спиновыми моментами протонов и нейтронов.

Суммарные магнитные моменты атомов в обычном состоянии расположены произвольным образом (рис. 1.1, *a*), а при воздействии

внешнего магнитного поля они соответствующим образом ориентируются (рис. 1.1, б), т. е. происходит намагничивание материала [16].

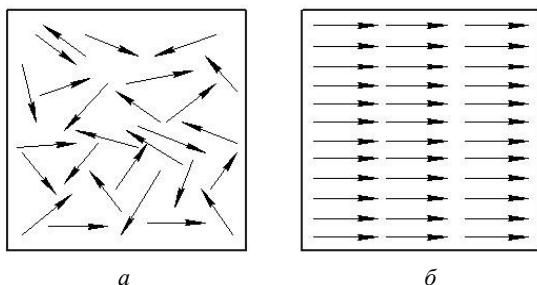


Рис. 1.1. Схематическое изображение расположения спинов атомов: в обычном состоянии (а) и при воздействии внешнего магнитного поля (б)

В обычном состоянии магнитные моменты расположены беспорядочно по отношению друг к другу и взаимно компенсируются, а при наложении внешнего магнитного поля магнитные моменты ориентируются в одном направлении и создают макроскопические области материала (**домены**) с суммарным магнитным моментом. Каждый домен представляет собой постоянный магнит с размерами около  $10^{-3}$  мм.

С усилением внешнего магнитного поля происходит смещение границ доменов, в результате чего увеличивается объем доменов, ориентированных по внешнему полю. В сильном внешнем магнитном поле домены, в которых собственное магнитное поле совпадает по направлению с внешним полем, поглощают все остальные домены, и наступает магнитное насыщение (рис. 1.1, б). Способность вещества под действием внешнего магнитного поля приобретать отличный от нуля магнитный момент называется намагничиванием. Количественной характеристикой намагниченного состояния вещества является векторная сумма магнитных моментов атомов  $J$  в единице объема. Величину силы суммарного магнитного поля в объеме вещества оценивают магнитной индукцией  $B$  (Тл).

Под действием внешнего магнитного поля с магнитной индукцией  $B_0$ , магнетик намагничивается и создает свое магнитное поле с магнитной индукцией  $B^1$ . В итоге при намагничивании результи-

рующая магнитная индукция  $B$  магнетика будет состоять из суммы двух слагаемых [17]

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}^1. \quad (1.1)$$

В зависимости от магнитных свойств, то есть способности намагничиваться под действием внешнего магнитного поля, магнетика делятся на следующие основные группы: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики, ферри-магнетики [18].

У *диамагнетиков* электронные оболочки атомов не обладают постоянным магнитным моментом. При внесении диамагнетика в магнитное поле в электронной оболочке каждого его атома возникают индуцированные круговые токи, которые создают магнитный момент, направленный навстречу внешнему магнитному полю. К диамагнетикам относятся инертные газы в жидком и кристаллическом состояниях, некоторые металлы (цинк, серебро, золото, медь, ртуть) и другие вещества. Диамагнетиками являются также сверхпроводники. У них диамагнитный эффект (выталкивание внешнего магнитного потока) обусловлен поверхностными макроскопическими токами, которые при достижении определенной минусовой температуры создают внутреннее магнитное поле, противоположно направленное внешнему магнитному полю и компенсирующее его, что снижает электрическое сопротивление материала до нуля. Сверхпроводники являются идеальными диамагнетиками, так как при переходе в сверхпроводящее состояние их материалы ведут себя так, как если бы их магнитная проницаемость равнялась нулю.

*Парамагнетики* – это вещества, которые намагничиваются в направлении внешнего магнитного поля. Атомы (молекулы или ионы) парамагнетика обладают собственными магнитными моментами, которые под действием внешних магнитных полей ориентируются по их направлению и тем самым создают результирующее магнитное поле, которое в парамагнетике всегда больше внешнего поля по величине силы. Парамагнетики втягиваются во внешнее магнитное поле, а при его отсутствии парамагнетик не намагничен, так как собственные магнитные моменты атомов ориентированы беспорядочно. Парамагнетики



являются слабомагнитными веществами. К ним относятся алюминий, платина, щелочно-земельные металлы, а также их химические соединения (оксиды, хлориды).

*Ферромагнетики* – это вещества (преимущественно в твердом кристаллическом или аморфном состоянии), имеющие большую положительную магнитную восприимчивость и при воздействии внешнего магнитного поля значительно усиливают его. По сравнению с другими веществами ферромагнетики обладают свойством наиболее сильно намагничиваться при наложении внешнего магнитного поля. После воздействия на ферромагнетик внешним магнитным полем в материале остается остаточная намагниченность. Однако при нагреве до температуры 768 °С (температура Кюри) ферромагнетизм исчезает, и металл становится немагнитным, т. е. переходит в группу парамагнетиков. Из металлов к ферромагнетикам относятся железо, никель, кобальт.

Ферромагнетики обладают более выраженными магнитными свойствами, в частности:

- ферромагнетики притягиваются магнитом;
- магнитная восприимчивость ферромагнетиков положительная и значительно больше единицы;
- для ферромагнетиков характерно явление гистерезиса.

*Антиферромагнетики* – это вещества, которые в отсутствие внешнего магнитного поля имеют магнитное упорядочение. Магнитные моменты соседних атомов или ионов ориентированы в них навстречу друг другу, т. е. антипараллельно, и поэтому намагниченность тела в целом равна нулю. Такое состояние упорядочения существует только ниже точки Нееля (фазового перехода из антиферромагнитного в парамагнитное состояние), т. е. ниже температуры Кюри. Выше этой температуры антиферромагнетик обычно переходит в парамагнитное состояние. Антиферромагнетиками являются хром, марганец, а также ряд редкоземельных металлов.

*Ферримагнетики* – это соединения, которые могут иметь различную структуру кристаллической решетки, состоящей из двух или более подрешеток. Подрешетки состоят из различных атомов или ионов, например, ионы железа  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  (ферриты). Феррит представляет собой соединение оксида железа и оксидов ферри-магнетиков. Ферриты по электрическим свойствам относят к полупроводникам. Магнитные моменты атомов различных подрешеток

не равны и ориентируются антипараллельно, что создает встречные нескомпенсированные магнитные моменты, а результирующий магнитный момент не равен нулю. Кроме ферритов свойствами ферримагнетиков обладают некоторые упорядоченные металлические сплавы и различные оксидные соединения. Для ферримагнетиков, как и для ферромагнетиков, характерно наличие доменной структуры. Ферримагнетики отличаются от ферромагнетиков меньшей величиной индукции насыщения и имеют более сложную температурную зависимость индукции насыщения.

Для оценки магнитных свойств магнетиков вышеуказанных групп используют следующие основные характеристики:

– магнитная восприимчивость  $\chi$  – физическая величина, характеризующая связь между магнитным моментом (намагниченностью) вещества и магнитным полем в этом веществе. Объемная магнитная восприимчивость равна отношению намагниченности единицы объема вещества  $J$  к напряженности  $H$  намагничивающего магнитного поля и является безразмерной величиной [18]

$$\chi = J/H; \quad (1.2)$$

– магнитная проницаемость  $\mu$  – это способность вещества поддерживать распространение в нем магнитного поля, устанавливающая связь между магнитной индукцией  $B$  и напряженностью магнитного поля  $H$  через коэффициент, зависящий от свойств окружающей среды. Магнитная проницаемость показывает, во сколько раз магнитное поле макротокков  $H$  усиливается за счет поля микротокков. Различают абсолютную магнитную проницаемость  $\mu_a$  вещества, относительную магнитную проницаемость  $\mu$  конкретной среды (учитывая ее состав, состояние, температуру и т. п.) и магнитную проницаемость вакуума  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м, называемой магнитной постоянной. Относительная магнитная проницаемость  $\mu$  материала – это отношение магнитной проницаемости среды к магнитной проницаемости вакуума. Магнитная проницаемость воздуха примерно равна магнитной проницаемости вакуума и в технических расчетах принимается равной единице. Для диамагнетиков  $\mu < 1$ , для парамагнетиков  $\mu > 1$ , для ферромагнетиков  $\mu \gg 1$ .

Для характеристики магнитных свойств веществ используют относительную магнитную проницаемость  $\mu$  [17]. Так как  $\mu_a = \mu_0 \mu$ ,

то связь между магнитной индукцией  $B$  и напряженностью внешнего магнитного поля  $H$  имеет вид:

$$B = \mu_a H = \mu_0 \mu H. \quad (1.3)$$

Взаимосвязь основных характеристик (магнитной проницаемости  $\mu$  и магнитной восприимчивости  $\chi$ ) магнитных свойств магнетиков вышеуказанных групп следует из теории электромагнетизма [16–18]. Учитывая, что в (1.1) индукция внешнего магнитного поля  $B_0$  и его напряженность  $H$  связаны в вакууме соотношением  $B_0 = \mu_0 H$ , а индукция  $B^1$  внутреннего магнитного поля, создаваемого микротоками, пропорциональна намагниченности вещества  $B^1 = \mu_0 J$ , то результирующая магнитная индукция

$$B = \mu_0 H + \mu_0 J. \quad (1.4)$$

Вместе с тем из (1.2) следует, что намагниченность  $J$  пропорциональна напряженности внешнего магнитного поля  $H$  макротоков  $J = \chi H$ . Подставив это значение  $J$  в (1.4) и приравняв правые части (1.3) и (1.4), получим зависимость  $B = \mu_0 H + \mu_0 \chi H = \mu_0 H(1 + \chi)$ , которая устанавливает связь между магнитной восприимчивостью  $\chi$  и магнитной проницаемостью  $\mu$  вещества в виде соотношения

$$\mu = 1 + \chi. \quad (1.5)$$

Таким образом, магнитная индукция  $B$  и напряженность  $H$  являются основными характеристиками магнитного поля, а магнитная проницаемость  $\mu$  – магнитной характеристикой вещества.

Из приведенного анализа магнитных свойств рассмотренных групп магнетиков следует, что для использования в технологиях упрочнения изделий машиностроения наибольший интерес представляют ферромагнетики, поскольку они обладают свойством наиболее сильно намагничиваться при наложении внешнего магнитного поля и усиливать его.

## 1.2. Намагничивание ферромагнетиков

Намагничиванием называется процесс ориентации магнитных моментов атомов вещества под влиянием внешнего магнитного поля, в результате которого изменяется намагниченность материала.

Магнитные свойства ферромагнетиков отличаются от свойств диамагнетиков и парамагнетиков [16]. При внесении диамагнетиков и парамагнетиков во внешнее магнитное поле в электронной оболочке их атомов возникают индуцированные круговые токи, которые создают магнитный момент. У диамагнетиков этот магнитный момент направлен навстречу внешнему магнитному полю, а у парамагнетиков – совпадает с направлением внешнего магнитного поля. Намагниченность  $J$  как диамагнетиков, так и парамагнетиков, индуцированная внешним магнитным полем, зависит от величины напряженности  $H$  внешнего поля по линейному закону и исчезает при снятии действия внешнего магнитного поля (рис. 1.2, а).

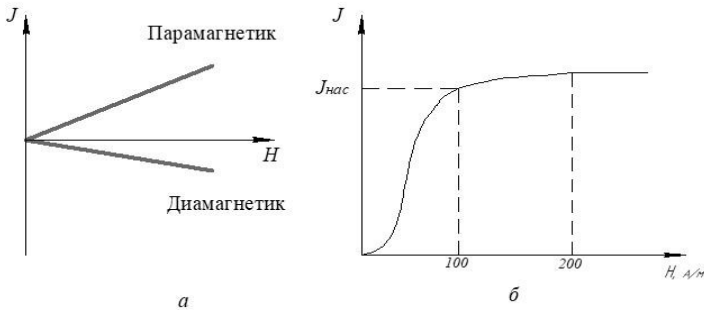


Рис. 1.2. Характер зависимости  $J = f(H)$ :

а – для диамагнетиков и парамагнетиков; б – для ферромагнетиков

То есть, в отсутствие внешнего магнитного поля диамагнетики и парамагнетики намагниченностью не обладают, так как магнитные моменты их атомов ориентированы беспорядочно и при их векторном сложении результирующий магнитный момент вещества равен нулю.

Ферромагнетики обладают свойствами, отличными от свойств диамагнетиков и парамагнетиков, в частности:

- намагниченность  $J$  ферромагнетика является нелинейной функцией напряженности  $H$  внешнего магнитного поля (рис. 1.2, б);
- для намагниченности  $J$  характерно явление насыщения, заключающееся в том, что с увеличением напряженности  $H$  внешнего магнитного поля, начиная с некоторого значения  $H_m$ , величина намагниченности  $J_{нас}$  не изменяется (рис. 1.2, б).

Для ферромагнетиков характерно явление магнитного гистерезиса. Магнитным гистерезисом (запаздыванием) называется явление отставания изменения индукции магнитного поля в ферромаг-

нетике от изменения напряженности  $H$  внешнего поля. Причиной магнитного гистерезиса является необратимость процессов смещения доменных границ.

При циклических изменениях напряженности внешнего магнитного поля зависимость магнитной индукции  $B$  от напряженности поля  $H$  определяется предшествующим состоянием намагниченности ферромагнетика. Петлей гистерезиса (рис. 1.3) называется кривая изменения индукции магнитного поля  $B$  в ферромагнетике в зависимости от изменения напряженности внешнего магнитного поля  $H$ . Физическое объяснение петли гистерезиса может быть дано на основе доменной структуры ферромагнетика. При первоначальном увеличении поля нарастание индукции  $B$  описывается кривой 1 (см. рис. 1.3).

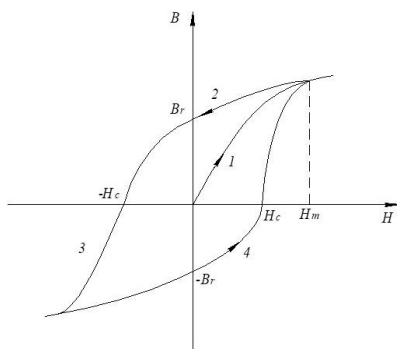


Рис. 1.3. Петля гистерезиса

При этом происходит смещение границ доменов. В этом состоянии намагниченность ферромагнетика достигает насыщения, и индукция магнитного поля  $B$  при дальнейшем увеличении внешнего поля  $H$  растет незначительно. При уменьшении напряженности внешнего поля происходит постепенная разориентация магнитных моментов доменов. Из-за необратимости процесса образования границ доменов уменьшение индукции магнитного поля  $B$  происходит по ветви 2.

Петля гистерезиса свидетельствует, что ферромагнетик при  $H = 0$  обладает остаточной индукцией магнитного поля  $B_r$ , то есть магнитные моменты некоторых доменов ферромагнетика остаются ориентированными в направлении поля, вызвавшего намагниченность. Для полного размагничивания ферромагнетика, при котором остаточная индукция магнитного поля обращается в ноль, необходимо

воздействие внешнего магнитного поля напряженностью  $H_c$ , направленное противоположно полю, вызвавшему намагничивание ферромагнетика. Величина напряженности  $H_c$  внешнего магнитного поля называется коэрцитивной силой.

При дальнейшем изменении величины напряженности поля  $H$  индукция магнитного поля  $B$  изменяется по ветвям 3–4 петли гистерезиса (см. рис. 1.3). Магнитный гистерезис обычно проявляется в ферромагнетиках – Fe, Co, Ni и сплавах на их основе.

Из-за явления гистерезиса при уменьшении напряженности  $H$  магнитная индукция  $B$  убывает не по кривой первоначального намагничивания, а по кривой, лежащей несколько выше нее. Когда же внешнее магнитное поле исчезает совсем, то в материале ферромагнетика сохраняется некоторая остаточная индукция  $B$ .

В процессе намагничивания ферромагнетика часть энергии переходит в тепло, и ферромагнетик нагревается. В зависимости от величины коэрцитивной силы ферромагнитные материалы делятся на две группы: магнитно-мягкие и магнитно-твердые (рис. 1.4).

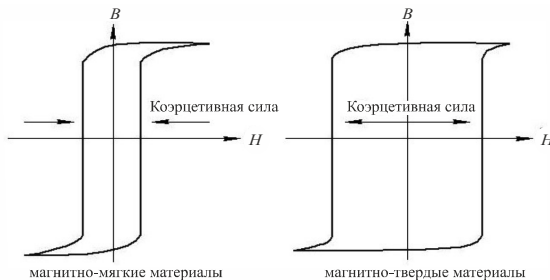


Рис. 1.4. Схема петли гистерезиса при намагничивании ферромагнетиков

Магнитно-мягкие материалы обладают низким значением коэрцитивной силы  $H_c$  (менее 400 А/м), высокой магнитной проницаемостью  $\mu$ , узкой петлей гистерезиса и малыми потерями энергии на перемагничивание. К этой группе материалов относятся: низкоуглеродистые стали; электротехнические стали (сплавы железа с кремнием); сплавы железа, никеля, кобальта (Fe-Ni, Fe-Si-Al, Fe-Al, Fe-Co); магнитомягкие ферриты.

Магнитно-твердые материалы характеризуются высоким значением коэрцитивной силы  $H_c$  (более 400 А/м), широкой петлей гистерезиса и большими потерями энергии на перемагничивание (см. рис. 1.4).

К ним относятся углеродистые легированные стали, недеформируемые литые сплавы на основе тройных соединений Fe-Ni-Al с добавками кремния, кобальта, титана, ниобия, меди; деформируемые железо-кобальт-хромовые, железо-кобальт-ванадиевые сплавы, а также сплавы на основе благородных металлов (Pt-Co, Pd-Fe, Pt-Fe); металлокерамические, металлопластические и оксидные материалы (ферриты). Ферриты – это материалы для постоянных магнитов, использующихся в электродвигателях и других электротехнических устройствах, в которых требуется постоянное магнитное поле.

Из приведенного анализа магнитных свойств металлических материалов и с учетом их стоимости следует, что для магнитных систем устройств упрочнения и обработки поверхностей деталей машин целесообразно использовать низкоуглеродистые стали марок 08, 10, 15, 20.

### **1.3. Методы упрочнения поверхностей деталей машин в магнитном поле**

Упрочнение поверхностей деталей машин с использованием энергии магнитного поля может осуществляться следующими методами:

- модификацией поверхностного слоя;
- нанесением упрочняющих покрытий;
- изменением топографии поверхности.

При реализации указанных методов происходит совмещение электромагнитных, электрохимических и термомеханических воздействий [19].

В общем виде системная модель технологии [20] 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.

Процесс упрочняющей обработки целесообразно рассматривать как некоторую энергетическую систему, воздействующую на заготовку с целью перехода ее из одного состояния в другое, соответствующее новому качеству [21].

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 упрочняющей обработки (производительность, энергозатраты, качество поверхности и т. п.).

Таким образом, процесс обработки (ПО) представляется в виде цепочки преобразования энергии

$$\text{ПО} = \left\{ \mathcal{E}_{\text{раб}} \Rightarrow \mathcal{E}_{\text{возд}} \Rightarrow M_{\text{ф.х}} \right\}. \quad (1.6)$$

Процессы формообразования (ФО) характеризуются составляющими [8]: способом подвода энергии в пространстве  $R_{\text{с.п.э}}$ , видом распределения энергии во времени  $R_{\text{р.э}}$ , кинематической схемой обработки  $R_{\text{к}}$

$$\text{ФО} = \left\{ R_{\text{с.п.э}}, R_{\text{р.э}}, R_{\text{к}} \right\}, \quad (1.7)$$

а также их признаками: для  $R_{\text{с.п.э}}$  – это точечный, линейный, поверхностный, объемный источник; для  $R_{\text{р.э}}$  – непрерывное, пульсирующее, импульсное воздействие; для  $R_{\text{к}}$  – прямолинейное, вращательное, два прямолинейных, вращательно-поступательное движение или его отсутствие.

В результате все способы упрочняющей обработки поверхностей, во-первых, подразделяются на три класса: со съемом материала основы, без съема материала основы и с нанесением на поверхность других функциональных материалов. Во-вторых, для каждого класса выделяются подклассы, характеризующие виды используемой при упрочняющей обработке энергии. В-третьих, существуют отличия по характеру физико-механического воздействия и, в-четвертых, разделяются по виду используемого инструмента и кинематики обработки [20].



На основании данной классификации рассмотрим обобщенные модели способа упрочняющей обработки (СУО), обычно представляемые [22] аналитическим выражением вида:

$$УО = \left\{ R_{c.o}, R_{обл}, \mathcal{E}_{раб}, \mathcal{E}_{возд}, M_{ф.х}, R_k, R_{р.э}, R_{с.п.э}, S, R_m \right\}, \quad (1.8)$$

где  $R_{c.o}$  – вид способа обработки;

$R_{обл}$  – область применения способа обработки;

$S$  – схема базирования и закрепления заготовки;

$R_m$  – обрабатывающий инструмент.

Формулы (1.6)–(1.8) дают достаточно полное и наглядное представление о структуре и составе компонентов процессов упрочняющей обработки и формообразования. Их удобно использовать при создании новых технологических приемов и методов формообразования, но они не позволяют проводить каких-либо логических операций и преобразований.

Для формализации условий целенаправленного синтеза новых способов обработки каждая совокупность одноименных компонентов  $r_i$  описывается как некоторое множество технологических решений  $R_i$ . Такой подход [22] позволяет любой способ обработки  $r_{м.о}$  представить в виде кортежа:

$$r_{м.о} = (r_{пов}, r_m, r_{обл}, r_{в.м}, r_{э.п}, r_{с.о}, r_{с.п.э}, r_{и.э}, r_{р.э}, r_m, r_k, r_c). \quad (1.9)$$

Каждый элемент кортежа (1.4) является компонентом соответствующего множества технологических решений, т. е.

$\{r_i\} = R_i$  или  $r_i \in R_i$ , где множества  $R_i$  и их элементы имеют

следующие обозначения:  $R_{пов} = \{r_{пов}\}$  – обрабатываемые поверхности

детали;  $R_m = \{r_m\}$  – обрабатываемые материалы;  $R_{обл} = \{r_{обл}\}$  – области

применения способа обработки;  $R_{в.м} = \{r_{в.м}\}$  – способы воздействия

на материал заготовки;  $R_{э.п} = \{r_{э.п}\}$  – виды подводимой в зону

обработки энергии;  $R_{с.о} = \{r_{с.о}\}$  – вид способа обработки;

$R_{с.п.э} = \{r_{с.п.э}\}$  – способы подвода энергии в зону обработки;

$R_{и.э} = \{r_{и.э}\}$  – источники энергии;  $R_{р.э} = \{r_{р.э}\}$  – энергетические режимы обработки;  $R_T = \{r_T\}$  – обрабатывающие инструменты;  $R_k = \{r_k\}$  – кинематические схемы обработки;  $R_c = \{r_c\}$  – статические схемы обработки.

Совмещенная (комбинированная) обработка сопровождается взаимодействиями различных технологических объектов. Под технологическим объектом (ТО) понимают любой из объектов, в результате взаимодействия которых происходит определение или изменение состояния предмета производства при изготовлении изделия. Множества ТО, взаимодействующих в процессе изготовления изделия, образуют технологические системы.

Технологическая среда представляет собой совокупность технологических объектов, взаимодействующих с выделенным технологическим объектом на отдельном этапе изготовления изделия. Выделенным технологическим объектом могут быть: предмет производства (заготовка, сборочная единица); отдельная технологическая операция; процесс и т. д. Средой является все, что не принадлежит выделенному технологическому объекту, но с чем у него имеется связь.

Для технологических воздействий при комбинированной упорочняющей обработке, основанной на электромагнитных, электрохимических и термомеханических воздействиях, используют соответствующие источники энергии. Выбор технологических источников энергии, обладающих требуемыми определенными условиями для проведения технологических воздействий, может эффективно осуществляться на базе конструкторско-технологической классификации [23] источников энергии (табл. 1.1).

Конструкторско-технологическая классификация в зависимости от состояния технологической среды предлагает выбор источников энергии, как по уровню концентрации энергии на обрабатываемой поверхности, так и по ее распределению в рабочей зоне.

Таблица 1.1

Конструкторско-технологическая классификация источников энергии

Технологические источники	Технологическая среда	Вид источника энергии	Плотность мощности потоков энергии, $q$ , Вт/см <sup>2</sup>
Распределенные потоки энергии			
1. Поле (распределенный поток)	Не требует изменений рабочей зоны	Электрохимический	$(10^1)...10^2...10^3$
		Индукционный	$(10^2)...10^3...10^4$
		Электромагнитный	$10^3...10^5...(10^6)$
Концентрированные потоки энергии			
2. Поток (концентрированная струя)	Требует изменения участков рабочей зоны	Газопламенный	$10^2...10^3...(3\cdot 10^3)$
		Плазменный	$5\cdot 10^2...3\cdot 10^3$
		Электродуговой	$10^3...10^5...(10^7)$
3. Луч (сфокусированный пучок)	Требует изменений (изоляции) рабочей зоны	Ионный	$(10^2)...10^3...10^5$
		Электронный	$(10^3)...10^5...8\cdot 10^8$
		Лазерный	$(5\cdot 10^3)...10^6...10^9$

Выбор технологии упрочнения и размерной упрочняющей обработки поверхностей деталей машин определяется условиями эксплуатации изделия [1–3]. Одним из наиболее экономичных решений данной проблемы является использование поверхностной модификации деталей с последующей финишной обработкой, а также разработка новых комбинированных способов, использующих совмещение различных технологических воздействий. Электромагнитные потоки наиболее просты в управлении и в этой связи особенно перспективны при создании установок для комбинированной упрочняющей размерной технологии [4–7].

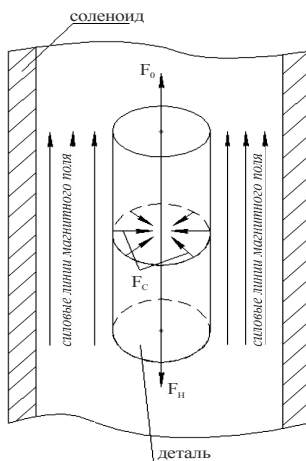
Наибольшее применение в машиностроении получили следующие методы упрочняющей обработки поверхностей деталей машин в магнитном поле.

**Модификация поверхностных слоев деталей в магнитном поле.** Одним из методов, обеспечивающих улучшение эксплуатационных свойств поверхности обрабатываемого материала, является магнитно-импульсное упрочнение (МИУ). Физическая сущность упрочнения деталей машин путем поверхностной модификации основывается на изменении многими материалами своих физико-механических свойств. Улучшение свойств поверхностного слоя металлов, прошедших обработку в

магнитном поле, достигается за счет обеспечения направленной ориентации свободных электронов материала внешним магнитным полем (см. рис. 1.1), вследствие чего увеличивается тепло- и электропроводность материала. В процессе обработки деталей при их изготовлении в результате преобразования энергии согласно (1.6) в материале неравномерно концентрируется некоторое количество избыточной энергии, что приводит к концентрации внутренних напряжений в материале и снижению физико-механических свойств [24]. МИУ обеспечивает значительное уменьшение избыточной энергии материала, связанной с концентрацией внутренних и поверхностных напряжений в детали. Для каждого материала (и детали) существует оптимальное значение напряженности внешнего импульсного магнитного поля  $H_{\text{опт}}$ , при котором концентрация напряжений в материале, а следовательно, и избыточная энергия  $F$  предельно уменьшаются ( $F \rightarrow F_{\text{min}}$ ) [25].

При импульсном воздействии внешнего магнитного поля в поверхностном слое детали возникают вихревые токи и локальные микровихри [24, 25]. Они нагревают участки вокруг кристаллитов напряженных блоков и неоднородностей структуры металла. Взаимодействие импульсного магнитного поля с металлическими токопроводящими материалами происходит тем интенсивнее, чем выше структурная и энергетическая неоднородности этого материала. Поэтому, чем выше концентрации поверхностных и внутренних напряжений в металле, тем больше вероятность локальной концентрации в них микровихрей внешнего поля и тем длительнее течение релаксационных процессов в материале. Выделяющаяся теплота расходуется на процессы, связанные с фазовыми превращениями 1-го и 2-го рода. Микроструктура материала улучшается в течение 0,01÷1,0 с. Одновременно с тепловыми процессами за счет импульсного магнитного поля в металле происходит полярная ориентация спинов электронов атомов, расположенных в области контакта кристаллитов и зерен сплавов. Это приводит к улучшению некоторых механических свойств материала (износостойкости, вязкости и др.). Для каждого материала (а также размеров и формы детали) существует определенная величина напряженности импульсного магнитного поля, а, следовательно, и величина магнитной энергии  $W_i$ , которая поглощается материалом в течение времени обработки и изменяет его физико-механические свойства.

Импульсное магнитное поле, взаимодействуя с материалом детали, изменяет ее тепловые и электромагнитные свойства, улучшает структуру и эксплуатационные характеристики, что положено в основу технологии магнитного упрочнения. Технология магнитно-импульсного упрочнения сводится, как правило, к следующему. Деталь перед обработкой (или инструмент) помещают в полость соленоида со стороны, например, северной полярности таким образом, чтобы центр тяжести детали был удален от положения равновесия. При включении установки деталь силой  $F_0$  «втягивается» магнитным полем в полость соленоида с некоторым ускорением и совершает внутри полости колебательные движения.



$F_и$  – сила инерции;  $F_с$  – сила, сжимающая инструмент;

$F_0$  – сила воздействия магнитного поля

Рис. 1.5. Принципиальная схема магнитно-импульсного упрочнения на примере осевого режущего инструмента

При МИУ за счет инерции деталь (и ее центр тяжести) сместится в противоположную сторону и она испытает втягивание в соленоид со стороны южного полюса. Со стороны другого полюса соленоида на деталь действует сила  $F_и$ , которая и втягивает ее обратно внутрь соленоида. Таким образом, деталь (инструмент), многократно пересекая магнитный поток, совершает в полости соленоида свободные перемещения, которые с течением времени затухают за счет сил трения детали о стенки индуктора. Когда колебания прекратятся, деталь займет положение равновесия, а

сила  $F_{и}$  будет равна нулю. При этом деталь расположится по центру соленоида. При таких перемещениях детали вследствие неоднородной кристаллической структуры в ней возникают вихревые токи. Напряженность внешнего магнитного поля соленоида может достигать 2000 кА/м. Количество импульсов от 2 до 10, длительность каждого импульса от 0,1 до 10 секунд, выдержка между импульсами – от 1 до 20 минут. По завершении магнитной обработки необходима выдержка детали на немагнитной подложке в течение 5÷24 часов. За это время происходят релаксационные процессы в материале, подвергнутом магнитному воздействию.

Экспериментально установлено, что при намагничивании (или повторном намагничивании) в структуре ферромагнитных деталей за счет энергии происходят два процесса, связанные с магнитной восприимчивостью материала детали:

- процесс смещения границ доменов, состоящий в росте их объемов, у которых намагниченность ориентирована близко к направлению поля за счет изменения объема соседних доменов, что повышает теплопроводность образцов;

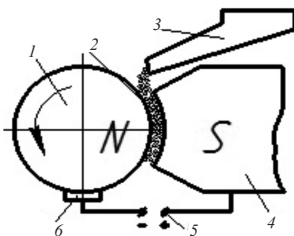
- процесс изменения направления самопроизвольной намагниченности отдельных доменов и кристаллитов путем поворота вектора намагниченности, вследствие чего повышаются вязкость и износостойкость материала.

МИУ позволяет упрочнять поверхности деталей машин, уменьшать остаточные и усталостные напряжения в деталях и конструкциях, повышать стойкость режущего инструмента из слабомагнитных материалов, например, инструмента, оснащенного пластинами из твердых сплавов. Введение отделочно-упрочняющих операций, хотя и связано с дополнительными затратами, позволяет более гибко управлять физико-механическими и микрогеометрическими параметрами инструмента, эффективно повышая его качество.

Таким образом, при МИУ под действием магнитного поля в металле происходит образование новой структуры, характеристики которой зависят от величины напряженности магнитного поля. Структура упрочненного слоя отличается высокой дисперсностью и улучшенными эксплуатационными характеристиками. Исследования образцов металлорежущего инструмента из быстрорежущих сталей и других марок показали, что для улучшения их механических и

технологических характеристик достаточно создать импульсное магнитное поле напряженностью не выше 2000 кА/м. МИУ позволяет также повысить износостойкость металлорежущего инструмента, оснащенного пластинами из металлокерамических твердых сплавов.

**Упрочнение поверхностей деталей нанесением покрытий в магнитном поле.** Из технологий нанесения покрытий предпочтительными являются те технологии, которые пригодны как для упрочнения новых, так и для восстановления изношенных изделий [7]. При этом учитывается возможность создания на детали такого покрытия, которое удовлетворяло бы эксплуатационным требованиям к рабочей поверхности и сохраняло бы физико-механические свойства основы. Одним из таких способов является магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ), позволяющее осуществлять поверхностное упрочнение и восстановление металлических поверхностей [19, 26–28]. Сущность магнитно-электрического упрочнения (рис. 1.6) состоит в том, что упрочняемую поверхность 1 детали и полюсный наконечник 4 магнита располагают относительно друг друга с определенным зазором и их подключают к источнику импульсного технологического тока 5 с помощью скользящего контакта 6.



- 1 – заготовка детали; 2 – ферромагнитный порошок; 3 – бункер-дозатор;  
4 – полюсный наконечник магнита; 5 – источник технологического тока;  
6 – скользящий контакт

Рис. 1.6. Принципиальная схема магнитно-электрического упрочнения поверхностей деталей типа тела вращения

В образованный зазор из бункера-дозатора 3 равномерно подают ферромагнитный порошок (ФМП), частицы 2 которого выстраиваются в токопроводящие «цепочки» по направлению магнитных силовых линий.

Частицы ФМП, контактирующие с поверхностью детали, расплавляются под действием электрических разрядов, и расплав оса-

ждается на упрочняемой поверхности. Физико-механические свойства упрочненного поверхностного слоя зависят от химического состава композиционных ФМП, упрочняемого металла и технологических режимов обработки.

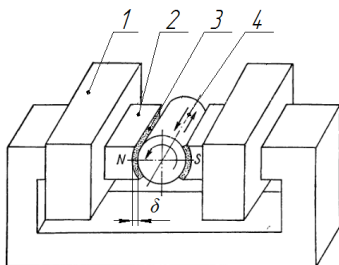
МЭУ обеспечивает повышение износостойкости металлических поверхностей деталей машин путем нанесения тонких слоев покрытий, не превышающих 0,2 мм.

Достоинства МЭУ [27]: не требуется специальной подготовки поверхности перед упрочнением; отсутствует температурная деформация детали; высокая прочность сцепления покрытия с основой; простота управления технологическими режимами; позволяет формировать на металлических поверхностях функционально-адаптированные покрытия.

Недостатком МЭУ является неравномерность распределения по упрочняемой поверхности отдельных вкраплений материала ФМП, вызванная спонтанным формированием токопроводящих цепочек из зерен ФМП и, как следствие, местом возникновения электрических разрядов [27]. Это приводит как к снижению сплошности наносимого покрытия, так и к неэффективному использованию упрочняющего порошка.

***Упрочнение деталей машин в магнитном поле улучшением топографии их поверхностей.*** Срок службы деталей машин во многом зависит от показателей качества поверхностного слоя, которые окончательно формируются на финишных операциях. Например, для трибосопряжений важнейшим показателем является шероховатость контактируемых поверхностей, которая характеризуется такими параметрами, как высота микронеровностей и радиус их скругления. К способам абразивной обработки, обеспечивающим уменьшение высоты микронеровностей и увеличение радиуса их скругления, относится обработка эластичным (гибким) инструментом, в том числе магнитно-абразивная обработка (МАО). Сущность способа МАО на примере обработки наружных цилиндрических поверхностей, получившей наибольшее применение, приведена на рис. 1.7 [29].





1 – электромагнитная система; 2 – полюсные наконечники;  
3 – ФАП; 4 – обрабатываемая деталь

Рис. 1.7. Схема магнитно-абразивной обработки  
наружных цилиндрических поверхностей

Обрабатываемую деталь 4 располагают с зазором  $\delta$  между полюсными наконечниками 2, установленными в электромагнитной системе 1. Зазоры заполняют ферроабразивным порошком 3. Частицы порошка (абразивные зерна) под действием энергии магнитного поля, создаваемого катушками 2, удерживаются в зазоре и, ориентируясь наибольшей осью по направлению магнитных силовых линий, создают ферроабразивную «щетку», которая силой магнитного поля прижимается к обрабатываемой поверхности 4. Детали сообщают вращательное и возвратно-поступательное осциллирующее движение, что обеспечивает перемещение обрабатываемой поверхности относительно абразивного порошка. Для предотвращения засаливания ферроабразивной «щеткой» в рабочие зазоры подаются смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС). Поскольку каждая частица ФАП ориентируется 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 наиболее острыми кромками. Эту особенность позиционируют [10, 27, 29] как процесс ориентированного абразивного резания. При МАО образуется новая шероховатость поверхности, характеризующаяся малой высотой микро-

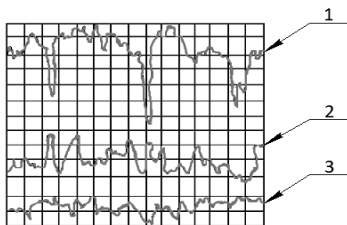
неровностей и увеличенным радиусом их скругления. Топография поверхности в процессе МАО не сопровождается заметным изменением шага неровностей, образовавшихся на предшествующих операциях обработки.

Процесс МАО представляет собой ориентированное и избирательное абразивное микрорезание и микровыглаживание. Его суть состоит в том, что при сравнительно больших величинах микровыступов зерна порошка контактируют преимущественно с вершинами гребешков, являющихся концентраторами магнитных силовых линий. Каждый рабочий элемент (зерно) в магнитном поле устанавливается наибольшей осью по направлению к обрабатываемой поверхности. При износе и затуплении режущей вершины абразивного зерна происходит переориентация элемента таким образом, что вновь образовавшаяся наибольшая ось направляется вдоль магнитных силовых линий. В результате обработка поверхности детали производится острыми кромками, т. е. имеет место процесс ориентированного абразивного резания.

Вследствие трения в зонах контакта зерна несколько смещаются по обрабатываемой поверхности детали и пересекают магнитные линии, в результате чего возникает ЭДС. Появляющиеся микротоки нагревают тонкий поверхностный слой и интенсифицируют процесс резания металла. Интенсификации резания способствует также применение СОТС, которая является скорее носителем поверхностно-активных веществ (ПАВ), а не средством охлаждения детали.

Отличительной особенностью процесса МАО по сравнению с другими отделочными процессами, в которых используется эластичный режущий инструмент, является то, что во время обработки зерна контактируют преимущественно с выступами неровностей поверхности, которые являются концентраторами магнитного поля. Это приводит к удалению наибольших выступов и неровностей на поверхности детали (рис. 1.8).

Шероховатость поверхности после МАО находится, как правило, в пределах  $Ra = (0,02 \div 0,16)$  мкм. На формирование топографии поверхности оказывают влияние индукционные токи, образующиеся на поверхности обрабатываемого изделия и на поверхности единичных зерен ФАП в результате их относительных перемещений.



$$BУ = 100 \times 10^3, ГУ = 800$$

1 –  $Ra$  0,16 мкм; 2 –  $Ra$  0,04 мкм; 3 –  $Ra$  0,02 мкм

Рис. 1.8. Профилограммы поверхностей после МАО

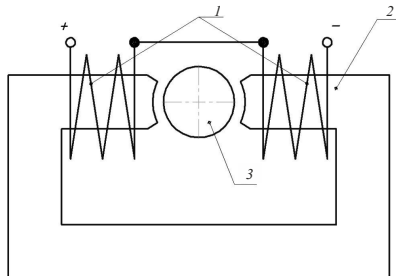
Причиной появления индукционных токов служат периодические изменения плотности магнитного потока в рабочем пространстве, если индуктор создает знакопеременное или пульсирующее магнитное поле. При контакте зерен с обрабатываемой поверхностью суммарные микротокки производят разрушение микро- и субмикровыступов. Прочность зерен ФАП при этом не нарушается, так как у них ферромагнитная матрица защищена тугоплавким слоем, поскольку удельное электрическое сопротивление для зерна ФАП значительно больше его величины для стали. При движении заготовки относительно зерен порошка непрерывно образуются и вновь замыкаются элементарные электрические контуры, в параллельных ветвях которых действуют одинаково направленные ЭДС. Рассматривая ЭДС в качестве основной причины, вызывающей появление электрических токов, отметим, что определяемые ею токи могут протекать как по участкам поверхностного слоя заготовки, так и по параллельным электрическим цепочкам. Наличие разности электрических потенциалов между зернами порошка и обрабатываемой поверхностью объясняет более резкое, чем в других видах абразивной обработки увеличение производительности в присутствии химически активных СОТС, поскольку происходит протекание химических реакций на обрабатываемой поверхности с образованием легко удаляемых окисных пленок. В результате анализа профилограмм поверхности (см. рис. 1.8) установлено, что первая стадия изменения шероховатости поверхности при МАО с  $Ra$  0,63 мкм до  $Ra$  0,16 мкм, характеризуется резким уменьшением высоты микронеровностей, который обусловлен резанием зернами ФАП как превалярующим фактором. Изменение шероховатости с  $Ra$  0,16 мкм до  $Ra$  0,04 мкм также осуществляется преимущественно абразивным резанием, так как одновременно со снижением высоты микронеровностей уменьшается их шаг, чему

способствует снижению предела текучести материала, связанное с проявлением магнитопластического эффекта и воздействием индукционных токов. На последней стадии снижение шероховатости с  $Ra$  0,04 мкм до 0,02 мкм происходит, в основном, путем сглаживания вершин микровыступов, сформированных в период абразивного резания и удаления окисных пленок. То есть, магнитное и электрическое поля дополнительно вносят свой вклад в формирование шероховатости и свойств поверхности.

#### 1.4. Ориентация ферромагнитных частиц в магнитном поле в процессах упрочнения поверхностей деталей машин

Анализ схем упрочняющей обработки на рис. 1.6 и 1.7 показывает, что воздействие энергией магнитного поля принципиально одинаковое как при магнитно-электрическом упрочнении, так и при магнитно-абразивной обработке – заготовку располагают между полюсными наконечниками магнитов с определенным зазором, в который подают ферромагнитный порошок. Отличие состоит в том, что при магнитно-электрическом упрочнении полюсный наконечник магнита и заготовка подключены к источнику импульсного технологического тока (см. рис. 1.6), а при магнитно-абразивной обработке источник технологического тока отсутствует (см. рис. 1.7). Общность указанных способов состоит в одинаковой ориентации ферромагнитных частиц в рабочем зазоре.

Рассмотрим классическую схему воздействия энергией магнитного поля на ферромагнитные частицы на примере обработки наружных цилиндрических поверхностей (рис. 1.9).



1 – электромагнитные катушки; 2 – магнитопровод; 3 – заготовка  
Рис. 1.9. Схема взаимного расположения цилиндрической поверхности и электромагнитов

Заготовку 3 располагают с определенным зазором между полюсными наконечниками магнитопровода 2 с электромагнитными катушками 1. Контур магнитопровода 2 является замкнутым, что позволяет получить наибольшую магнитную индукцию в рабочей зоне.

Частицы ферромагнитного порошка при попадании в зазор между упрочняемой поверхностью заготовки и полюсного наконечника стремятся сориентироваться наибольшей осью в направлении силовых линий магнитного поля под действием вращающего момента [19]:

$$M = P_m H \sin \varphi, \quad (1.10)$$

где  $P_m$  – магнитный момент ферромагнитной частицы,  $A \cdot m^2$ ;

$H$  – напряженность магнитного поля,  $A/m$ ;

$\varphi$  – угол между направлением магнитных силовых линий и наибольшей осью ферромагнитной частицы, град.

В рабочем зазоре всегда имеет место неравномерность распределения магнитного потока, вызванная конечными геометрическими размерами полюсного наконечника и обрабатываемой заготовки. Эта неравномерность характеризуется градиентом магнитной индукции  $\vec{\text{grad}}B$ . Поэтому в неравномерном магнитном потоке, кроме магнитного момента, на ферромагнитную частицу действует сила магнитного поля  $F_m$  в направлении градиента магнитной индукции [30, 31]:

$$F_m = \frac{1}{\mu_a} V B \vec{\text{grad}}B, \quad (1.11)$$

где  $V$  – объем ферромагнитной частицы,  $m^3$ ;

$\mu_a$  – магнитная проницаемость материала ферромагнитной частицы,  $Gn/m$ ;

$B$  – магнитная индукция в точке зазора, где расположено ФАЗ,  $Tл$ ;

$\vec{\text{grad}}B$  – вектор градиента магнитной индукции в рассматриваемой точке рабочего зазора,  $(Tл/m)$ .

Под действием градиента магнитной индукции ферромагнитные частицы выстраиваются в цепочки, которые

замыкают рабочий зазор между полюсным наконечником магнита и обрабатываемой поверхностью детали [30].

Для реальных размеров ферромагнитной частицы в форме трехосного эллипсоида величина силы магнитного поля  $F_M$  в направлении градиента магнитной индукции, действующей на ферромагнитную частицу, определяется по формуле

$$F_M = \frac{\mu_a abc \chi H}{R_d + \delta}, \quad (1.12)$$

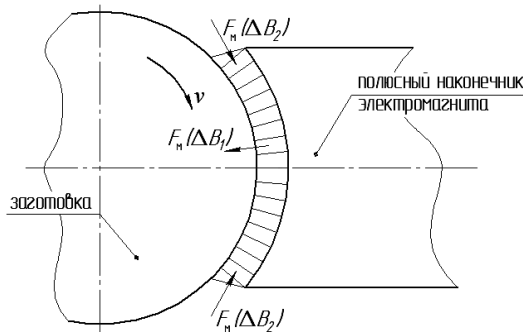
где  $a, b, c$  – размеры большой, средней и малой осей эллипсоида, м;  
 $\chi$  – магнитная восприимчивость материала ферромагнитной частицы, Гн/м;

$H$  – напряженность магнитного поля у верхней границы ферромагнитной частицы, А/м;

$R_d$  – радиус обрабатываемой заготовки, м;

$\delta$  – величина рабочего зазора, м.

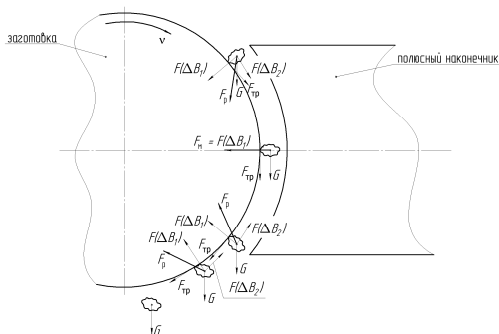
В зонах выхода из рабочего зазора наблюдается неравномерность магнитного потока в тангенциальном направлении и его фокусировка на ребре полюсного наконечника. В таких местах сила магнитного поля  $F_M$  разбивается (рис. 1.10) на нормальную составляющую  $F_M(\Delta B_1)$  и тангенциальную составляющую  $F_M(\Delta B_2)$ .



$F_M(\Delta B_1), F_M(\Delta B_2)$  – нормальная и тангенциальная составляющие силы магнитного поля  $F_M$ ;  $v$  – скорость главного движения

Рис. 1.10. Направление градиента магнитной индукции в рабочем зазоре при МАО цилиндрических поверхностей

Схема сил, действующих на ферромагнитные частицы, представлена на рис. 1.11.



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

Рис. 1.11. Схема сил, действующих на ферроабразивные частицы

Сила тяжести  $G$  [30]:

$$G = V \rho g, \quad (1.13)$$

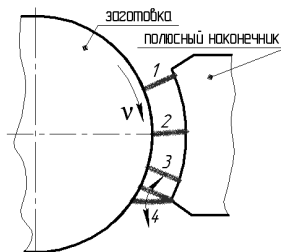
где  $\rho$  – плотность материала порошка, МПа;  
 $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$  (Н/кг).

При вращении заготовки между обрабатываемой поверхностью и ферромагнитной частицей возникает сила трения  $F_{тр}$ :

$$F_{тр} = \eta F_M(\Delta B_1), \quad (1.14)$$

где  $\eta$  – коэффициент трения.

Анализ действующих на ферромагнитную частицу сил магнитного поля показывает, что на входе в рабочий зазор и выходе из него равнодействующая сила направлена в сторону «втягивания» ферромагнитной частицы в пространство рабочего зазора (см. рис. 1.11). Они уже на входе в рабочий зазор ориентируются наибольшей осью вдоль силовых линий магнитного поля (рис. 1.12) и выстраиваются в цепочки, сохраняя начальную ориентацию.



$v$  – скорость главного движения;

$1 \div 4$  – положения цепочки ферромагнитных зерен

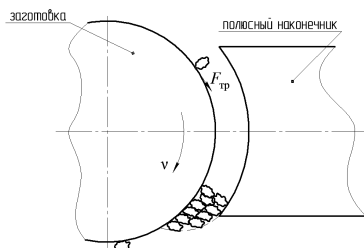
Рис. 1.12. Схема перемещения единичной цепочки ферромагнитных частиц в воздушном зазоре концентричной формы

При вращении заготовки со скоростью  $v$  (см. рис. 1.12), цепочка ферромагнитных частиц движется вместе с ней, занимая последовательно положения  $1 - 2 - 3$ , пока не достигнет границы выхода из рабочего зазора. Там цепочка, закрепившись на кромке полюса (положение  $4$ ), начинает совершать колебательные движения под действием ослабленных сил трения с заготовкой и тангенциальной составляющей  $F_M(\Delta B_2)$ , стремящейся вернуть цепочку в рабочий зазор. Если постепенно увеличивать число цепочек зерен, они проделывают тот же путь, уплотняясь у выхода из рабочего зазора и мешая друг другу совершать там колебательные движения, в результате чего ферромагнитные частицы концентрируются в зоне выхода из рабочего зазора (рис. 1.13) [30, 33, 34].

При эквидистантном профиле полюсного наконечника электромагнита относительно обрабатываемой поверхности расположение ферромагнитной частицы на входе в рабочий зазор и выходе из него будет равновероятным.

При включении вращения заготовки ферромагнитные частицы под действием силы трения, возникающей в месте их контакта с обрабатываемой поверхностью, перемещаются к выходу из рабочего зазора (см. рис. 1.13), где удерживаются силой магнитного поля  $F_M$ , обусловленной градиентом магнитной индукции. Сила тяжести также способствует перемещению ферромагнитной частицы в нижнюю зону рабочего зазора.





$v$  – скорость главного движения;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения  
 Рис. 1.13. Схема перемещения ферромагнитных частиц  
 в зону выхода из рабочего зазора

Рассмотрим механизм возникновения силы магнитного поля  $F_m$ , действующей на ферромагнитную частицу в направлении градиента магнитной индукции. В частице ферромагнитного порошка, попавшей в магнитное 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 упрочняемой поверхности сил магнитного поля на ферромагнитную частицу, находящуюся в рабочем зазоре при упрочнении наружных цилиндрических поверхностей.

Магнитное поле в рабочем зазоре неоднородно, вектор его индукции  $\vec{B}$  можно разложить на два составляющих  $\vec{B}'$  и  $\vec{B}''$  (рис. 1.14, 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.

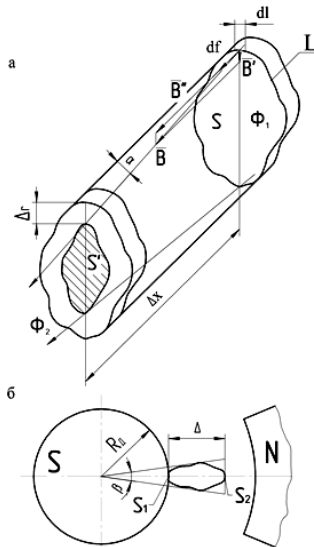
Под действием индукции  $\vec{B}''$  возникают радиальные силы, действующие по периферии участка в плоскости, перпендикулярной направлению магнитных силовых линий. Эти

силы взаимно уравниваются. Составляющая индукции  $\vec{B}'$  вызывает возникновение силы, направленной вдоль вектора  $\vec{B}''$ . На элементарную длину  $d\ell$  периметра рассматриваемого участка действует сила

$$df = J_M B' dl, \quad (1.15)$$

где  $J_M$  – молекулярный ток по периметру участка, возникший вследствие намагничивания частицы, и, учитывая, что  $B' = B \sin \alpha$  (см. рис. 1.14, *a*), и интегрируя (1.15), определим силу  $f$ , действующую на весь периметр участка  $L$

$$f = J_M B \sin \alpha \int_0^L dl \approx J_M BL \frac{\Delta r}{\Delta x}.$$



*a* – для элементарного участка; *b* – для ферромагнитной частицы

Рис. 1.14. Схема расчета сил, действующих в градиентном магнитном поле на частицу ферромагнитного порошка нормально к поверхности детали

Радиальная сила, действующая на частицу ферромагнитного порошка, находящуюся в неоднородном магнитном поле,

$$f_p = \Sigma f = P_m \frac{\Delta B}{\Delta x}, \quad (1.16)$$

где  $P_m$  – магнитный момент частицы ферромагнитного порошка,  $A/m^2$ .

Определим величину градиента напряженности магнитного поля, приняв за  $\Delta x$  наибольший размер частицы порошка –  $\Delta$  (рис. 1.14, б).

$$\text{Тогда } \Delta B = \frac{\Phi}{S_1} - \frac{\Phi}{S_2},$$

где  $\Phi$  – магнитный поток Вб;  $S_1$  и  $S_2$  – площади сечений,  $m^2$ ;

Так как  $S_1 = R_d \beta b$  и  $S_2 = (R_d + \Delta) \beta b$ ,

$$\text{то } \Delta B = \frac{\Phi \Delta}{\beta b R_d (R_d + \Delta)},$$

где  $R_d$  – радиус упрочняемой поверхности, м;

$b$  – размер частицы в направлении оси детали (малая ось эллипсоида), м;

$\beta$  – угол между радиусами деталей, касательными к наибольшему сечению частицы в плоскости, перпендикулярной оси детали.

$$\text{Тогда } \frac{\Delta B}{\Delta x} = \frac{\Phi}{\beta b R_d (R_d + \Delta)}. \quad (1.17)$$

Магнитный момент частицы порошка в форме эллипсоида вращения

$$P_m = \frac{4}{3} K H_1 \Delta^2 b, \quad (1.18)$$

где  $K$  – магнитная восприимчивость материала ферропорошка,  $A/m$ ;

$H_1$  – напряженность магнитного поля на нижней границе частицы,  $A/m$ ;

$\Delta$  – размер большой оси эллипсоида, направленной вдоль магнитного поля, м.

Подставив (1.17) и (1.18) в выражение (1.16) и учитывая, что  $\Phi = B_1 S_1 = \mu H_1 R_d b \beta$ , для единичной частицы, получим

$$f_p = \frac{4}{3} \frac{\mu \Delta^2 b K H_1^2}{R_d + \Delta},$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость материала порошка Гн/м.

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:

$$f_{\text{ц}} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\mu \Delta_i^2 b_i K H_i^2}{R_i + \Delta_i}, \quad (1.19)$$

где  $n$  – число частиц в цепочке;

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

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

$\Delta_i b_i$  – размеры большой и малой осей эллипсоида, описывающего  $i$ -ую частицу, м.

Цепочка из ферромагнитных частиц под действием силы  $f_{\text{ц}}$  прижимается к упрочняемой поверхности и перемещается вместе с ней по зазору.

Таким образом, управлять величиной сил, действующих на ферромагнитную частицу в рабочем зазоре при МАО, можно изменением градиента магнитной индукции, который зависит от плотности магнитного потока, формы рабочего зазора и его величины.

## 2. МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ С НАНЕСЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ

К электроискровым технологиям относится магнитно-электрическое упрочнение (см. рис. 1.6), позволяющее осуществлять нанесение покрытий на металлические поверхности деталей машин с одновременной модификацией поверхностного слоя.

### 2.1. Механизм нанесения покрытий при магнитно-электрическом упрочнении

При МЭУ упрочненный слой формируется путем образования на поверхности детали множества точечных вкраплений [35] в результате нанесения расплавленного материала частиц порошка.

#### 2.1.1. Стадии процесса формирования точечного вкрапления

При подаче порошка в рабочий зазор частицы порошка, смещаясь друг относительно друга, уплотняются (рис. 2.1, а) и образуют цепочки между поверхностью детали и полюсным наконечником. При этом электрическая проводимость промежутка деталь–полюсный наконечник увеличивается. Сближение частиц порошка с поверхностями детали и полюсного наконечника электромагнита при подаче разрядного тока приводит к пробое оксидных пленок на их поверхностях, в результате чего образуются каналы проводимости технологического тока. Места контакта частиц порошка с поверхностью детали оплавляются (рис. 2.1, б), тем самым создаются условия для возникновения кратковременного дугового разряда (рис. 2.1, в). Электрическая дуга расплавляет частицы порошка (рис. 2.1, г) и приваривает их к поверхности детали (рис. 2.1, д).

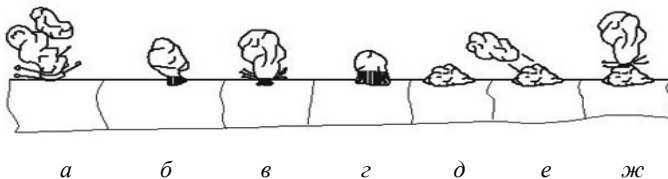
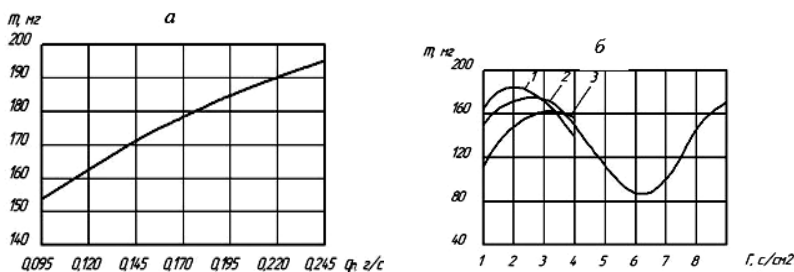


Рис. 2.1. Стадии процесса формирования точечного вкрапления при магнитно-электрическом упрочнении

Формирование покрытия происходит путем расположения на поверхности детали множества точечных вкраплений, по мере заполнения которыми поверхности детали сплошность покрытия увеличивается, а толщина его практически не изменяется, хотя перенос материала порошка на поверхность детали продолжается. В результате этого обеспечивается сглаживание формируемой поверхности.

Согласно режимам МЭУ количество порошка, поданного на единицу поверхности детали, определяется произведением подачи порошка в единицу времени  $q_n$  и удельной длительности упрочнения  $\tau$ . Для обеспечения высокой производительности технологический процесс следует вести при больших значениях  $q_n$  и меньших  $\tau$ . В соответствии с зависимостью изменения массы детали от подачи порошка (рис. 2.2, а) масса нанесенного покрытия  $m$  пропорциональна изменению  $q_n$ . Отсюда следует, что при МЭУ необходимо выбирать максимально допустимую источником питания подачу порошка.

В начале МЭУ перенос материала порошка происходит наиболее интенсивно (рис. 2.2, б), затем этот процесс замедляется, прекращается и начинает частично сниматься нанесенный слой [35, 36]. Длительная наплавка не приводит к непрерывному увеличению толщины покрытия.



*a* – от подачи порошка; *б* – от удельной длительности упрочнения  
 Рис. 2.2. Зависимость массы наносимого покрытия от режимов МЭУ

Покрытия, получаемые при  $\tau > 4 \text{ с/см}^2$  (см. рис. 2.2, б кривая 2), отличаются повышенной шероховатостью поверхности. Время, в течение которого масса перенесенного материала порошка на поверхность детали достигает первого максимума, считается оптимальным.

При увеличении напряжения в рабочем зазоре возрастает переносимая в единицу времени масса материала порошка (см. рис. 2.2, б). Это объясняется тем [37], что с увеличением рабочего напряжения растет энергия импульса, повышаются рабочий ток и температура нагрева участков детали в зоне контакта с зернами порошка, что способствует переносу материала порошка на поверхность детали. Установлено также [38], что наибольший перенос материала порошка достигается при использовании более мощных источников питания.

Образовавшиеся после первых разрядов точечные вкрапления материала порошка выступают над поверхностью детали (см. рис. 2.1, е). Являясь концентраторами магнитного поля, они притягивают последующие цепочки из частиц порошка и тем самым способствуют возникновению электрических разрядов на упрочненной поверхности. В результате многократного воздействия разрядов первоначальные вкрапления частично разрушаются (см. рис. 2.1, ж).

Таким образом, процесс формирования упрочненного слоя сопровождается нанесением покрытия и эрозией его отдельных участков. В результате этого рельеф упрочненной поверхности состоит из хаотически расположенных выступов и мелких лунок. Знак изменения массы покрытия за рассматриваемый промежуток времени зависит от того, какой процесс преобладал в течение этого времени. Если процесс переноса материала порошка на поверхность детали превалирует над эрозией упрочненного слоя, то масса покрытия увеличивается. Если же превалирует эрозия – масса покрытия уменьшается.

Формирование упрочненного слоя обеспечивается путем стохастического распределения на поверхности детали множества точечных вкраплений расплава материала порошка. Толщина покрытия в процессе МЭУ определяется адгезией расплавленного материала ферропорошка к упрочняемой поверхности. Поэтому с ростом длительности процесса наплавки порошка увеличивается сплошность покрытия, происходит сглаживание формируемой поверхности, а толщина упрочненного слоя практически не изменяется.

Изучение процесса переноса ферромагнитного порошка на упрочняемую поверхность детали и поиск путей повышения интенсивности и качества магнитно-электрического упрочнения

обусловили необходимость исследования кинематики частиц порошка в электромагнитном поле и анализа сил, действующих на ферромагнитные частицы в рабочей зоне.

### 2.1.2. Механизм действия сил при электрическом разряде

Рассмотрим действие на частицы порошка сил, возникающих от проходящего по цепочке разрядного тока. Для удобства будем считать, что частица имеет форму эллипсоида вращения и его ось совпадает с осью цепочки (рис. 2.3).

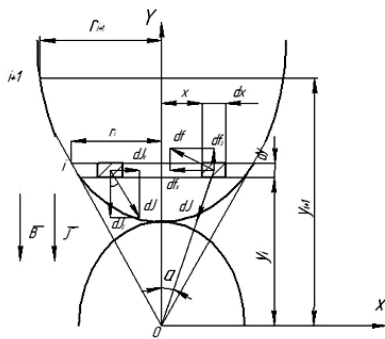


Рис. 2.3. Схема действия сил на частицу порошка при прохождении разрядного тока

Примем, что ось  $Y$  совпадает с осью цепочки, а ось  $X$  перпендикулярна этой оси в плоскости рисунка. Цепочку можно рассматривать как проводник с током, вокруг которого возникло круговое магнитное поле. В рабочем зазоре при прохождении разрядного тока наведены два вида магнитных полей: внешнее, направленное коллинеарно с проходящим током, и круговое поле тока.

Магнитная индукция в произвольной точке кругового поля цепочки согласно закону Био и Савара-Лапласа [39, 40]

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{dJ dl \sin \gamma}{R^2},$$

где  $d\ell$  – длина элемента цепочки в направлении тока;

$dJ$  – величина тока в элементе  $d\ell$ ;

$R$  – радиус-вектор, соединяющий элемент  $d\ell$  с рассматриваемой точкой, м;



$\gamma$  – угол между направлением  $dJ$  и  $R$ ;  
 $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость среды, Гн/м.

Направление вектора магнитной индукции  $dB$ , определяемое по правилу буравчика, перпендикулярно плоскости рис. 2.3.

Согласно теории электромагнетизма [41], сила, действующая на элемент  $d\ell$ ,

$$df = [dB \times dJ] \cdot d\ell. \quad (2.1)$$

Поскольку цепочка образовалась из частиц порошка, имеющих переменное сечение, то по ней протекает ток различной плотности. Рассечем частицу на множество участков плоскостями, перпендикулярными оси  $Y$ . Рассмотрим слой частицы между сечениями  $i$  и  $i+1$ . В этом слое направление тока таково, что его можно считать сходящимся в точку 0. Плотности тока в сечениях  $i$  и  $i+1$  будут равны соответственно

$$\delta_i = \frac{J}{\pi r_i^2} \text{ и } \delta_{i+1} = \frac{J}{\pi r_{i+1}^2},$$

где  $J$  – ток в цепочке, А;

$r_i$  и  $r_{i+1}$  – радиусы частицы в сечениях  $i$  и  $i+1$ , м.

Сходящийся ток  $dJ$  имеет две составляющие: осевую  $dJ_y$  и радиальную  $dJ_x$ . При прохождении составляющей тока  $dJ_y$  на частицу порошка со стороны кругового магнитного поля действует электромагнитная сила, направленная по нормали к оси частицы и создающая радиальное давление. Внешнее магнитное поле не оказывает действия на частицу при прохождении  $dJ_y$ , а при прохождении  $dJ_x$  – вызывает силы, действующие по касательной к радиусу. В рассматриваемом сечении они создают крутящий момент вокруг оси частицы и определяются по формуле

$$df_{sp} = B dJ_x dx.$$

Так как  $dJ_x = dJ \sin \alpha$  (см. рис. 2.3), то величина крутящего момента по сечениям изменяется соответственно изменению угла  $\alpha$ . В среднем сечении частицы ( $\alpha=0$ ) крутящий момент отсутствует. При

сходящемся токе крутящий момент направлен по часовой стрелке, а при расходящемся – против (если смотреть в направлении осевого тока). Рассматривая частицу в целом, не трудно убедиться, что в объеме частицы порошка крутящие моменты взаимно уравновешены.

Определим величину и направление сил, вызванных взаимодействием кругового магнитного поля с составляющей тока  $dJ_x$ . При принятой форме частицы и ее положении в рабочем зазоре можно воспользоваться подходом, применимым при электрической сварке для жидкого проводника в виде капли [42].

Рассмотрим в  $i$ -м сечении на расстоянии  $x$  от оси частицы (см. рис. 2.3) элементарный участок площадью  $dx \cdot dy$ . Действующую на эту площадку силу  $df$  можно разложить на две составляющие  $df_x$  и  $df_y$ . Через кольцевой участок с радиусом  $x$  и сечением  $dx \cdot dy$  будет протекать ток

$$dJ = \delta_i \cdot 2\pi x dx = \frac{2J}{r_i^2} x dx. \quad (2.2)$$

С помощью уравнения для магнитного поля внутри прямолинейного проводника с током [41] определим магнитную индукцию в рассматриваемом элементарном участке

$$dB = \frac{\mu J}{2\pi r_i^2} x. \quad (2.3)$$

Подставляя (2.7) и (2.8) в формулу (2.6) и учитывая, что

$$d\ell = \frac{dy}{\cos \alpha}, \text{ получаем:}$$

$$df_i = \frac{\mu J^2}{\pi r_i^4} \frac{dy}{\cos \alpha} x^2 dx.$$

Сила, действующая на  $i$ -е сечение в направлении оси  $Y$ , определяется с учетом  $\operatorname{tg} \alpha = x/y$ :

$$df_{yi} = df_i \sin \alpha = \frac{\mu J^2}{\pi r_i^4} \frac{dy}{y} x^3 dx.$$

Поскольку  $x$  изменяется от 0 до  $r_i$ , то

$$f_{y_i} = \int_0^{r_i} df_{y_i} = \frac{\mu J^2}{4\pi} \frac{dy}{y}. \quad (2.4)$$

Интегрируя (2.9) по  $Y$  в пределах от  $y_i$  до  $y_{i+1}$ , получаем силу, действующую на слой частицы между сечениями  $i$  и  $i+1$ , в направлении оси  $Y$ .

$$f_y = \int_{y_i}^{y_{i+1}} df_{y_i} = \frac{\mu J^2}{4\pi} \ln \frac{y_{i+1}}{y_i}.$$

Учитывая, что  $\frac{y_{i+1}}{y_i} = \frac{r_{i+1}}{r_i}$ , получаем окончательно

$$f_y = \frac{\mu J^2}{4\pi} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}. \quad (2.5)$$

Если рассматривать половину частицы, расположенной в цепочке, то при точечном контакте частиц между собой наименьший радиус поперечного сечения близок к нулю и сила  $f_y$  достигает значительной величины. Однако в объеме всей частицы эта сила уравнивается и в целом суммарная сила  $f_y$  равна нулю, так как  $\ln(r_{i+1}/r_i) = 0$ .

Таким образом, при прохождении разрядного тока по цепочке частиц вдоль ее оси возникают электродинамические силы, действующие в направлении от меньших поперечных сечений частиц порошка к большим. Причем направление этих сил не зависит от направления тока в цепочке, а их величины определяются током в цепочке и соотношением большего и меньшего поперечных сечений частицы. После плавления контактирующих участков частиц силы  $f_y$  способны разрывать цепочку раньше, чем расплавится вся частица. Это подтверждается наличием оплавленных частиц среди выброшенного из рабочей зоны порошка.

### 2.1.3. Тепловые процессы в рабочей зоне при воздействии электромагнитного поля

Температурно-временной фактор влияет на образование новых фаз в системе покрытие–основа, определяющих физико-механические и эксплуатационные свойства поверхностного слоя. При нанесении покрытия магнитно-электрическим упрочнением источником теплового воздействия является энергия электрического разряда, проходящего по цепочкам из частиц ферропорошка. Поскольку электрическое сопротивление цепочки переменное по длине, то плотность проходящего по ней тока не одинакова, что обуславливает различный градиент температур в зонах контакта частиц порошка между собой и с поверхностями детали и полюсного наконечника.

В общем случае, согласно [43], тепловая мощность  $q_3$ , расходуемая на нагрев и плавление электрода-цепочки, определяется мощностью  $q_6$ , выделяющейся по его длине от проходящего тока и эффективной мощностью  $q_{эд}$  электрической дуги:

$$q_3 = q_6 + q_{эд} = J^2 R_{эц} + \eta_3 J U,$$

где  $J$  – сила тока, А;

$R_{эц}$  – сопротивление электрода-цепочки, Ом;

$\eta_3$  – эффективный к.п.д. нагрева дугой;

$U$  – напряжение дуги, В.

При низкой интенсивности передачи энергии электромагнитного поля и постоянном внешнем давлении, когда потери энергии в окружающую среду минимальны, составляющая тепловой мощности  $q_6$  может вызвать изотермическое расплавление электрода-цепочки. Однако в реальном процессе энергия подводится так быстро, что выделяющаяся теплота не успевает отводиться, и контактирующий участок детали оплавляется.

При наплавке электрод-цепочка состоит из  $n$  частиц ферропорошка с сопротивлениями  $R_1, \dots, R_i, \dots, R_n$ , между которыми существуют дополнительные контактные сопротивления  $R_{12}, \dots, R_{i(i+1)}, \dots, R_{(n-1)n}$ .

Рассмотрим распределение температуры по длине электрода-цепочки из частиц порошка. Примем некоторые допущения: частицы ферромагнитного порошка имеют форму эллипсоидов с

размерами большой оси  $\Delta$  и поперечным сечением  $\Delta S$ ; энергия, выделяющаяся в контакте первой частицы с полюсным наконечником, поступает к частице пропорционально коэффициенту  $0 < k_n < 1$ ; потерями энергии на конвекцию и излучение пренебрегаем, так как время разряда ничтожно мало; окрестности точек контакта частиц порошка с полюсным наконечником и деталью ограничиваются цилиндрическими объемами металла длиной  $\Delta$  и сечением  $\Delta S$ .

При таких допущениях распределение температуры  $\theta$  [44] по длине  $x$  электрода-цепочки описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} c_n p_n &= \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial \lambda_n}{\partial \theta} \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_n \partial^2 \theta}{\partial x^2}; \\ &\dots \dots \dots \\ c_n p_n &= \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\lambda_n \partial J}{\partial x} \right) + \frac{J^2 R_i}{\Delta S}; \\ &\dots \dots \dots \\ c_d p_d &= \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial \lambda_d}{\partial \theta} \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_d \partial^2 \theta}{\partial x^2}; \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

с граничными условиями

$$\left. \begin{aligned} \theta(-\Delta; \tau) &= \theta((n+1)\Delta; \tau) = \theta_c; \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=i\Delta-0} &- \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=i\Delta+0} = \frac{k J^2 R_{i(i-1)i}}{\lambda_n \Delta S} \end{aligned} \right\}, \quad (2.7)$$

где  $c_n, c_p, c_d$  – удельные теплоемкости материалов полюсного наконечника, порошка и детали соответственно Дж/(кг·К);

$p_n, p_p, p_d$  – удельные электрические сопротивления Ом·м<sup>†</sup>;

$\lambda_n, \lambda_p, \lambda_d$  – коэффициенты теплопроводности, Вт/(м·К);

$\theta_c$  – температура окружающей среды, °С;

$J$  – сила тока дуги, А;

$k$  – коэффициент, равный  $k_n$  при  $i=0$  и 1 при  $i=1, \dots, n$ .

Поскольку фактические значения силы тока и контактных сопротивлений в реальном процессе наплавки определить затруднено, то приведенные уравнения (2.6) и граничные условия (2.7) позволяют лишь определить факторы и дать качественную оценку их влияния на место возникновения дугового разряда в рабочей зоне.

Распределение температуры по длине цепочки из частиц порошка согласно граничным условиям (2.7) исследовалось в зависимости от силы проходящего по ней тока  $J$ , контактных сопротивлений между частицами  $R_{i(i+1)}$  и коэффициента распределения энергии  $k_n$ .

Контактные сопротивления  $R_{i(i+1)}$  частиц порошка для сталей и сплавов на основе железа можно определить, используя выражение [110, 111]  $R_{i(i+1)} = R_k / p_k^{0,75}$ , значение [109, 112]

$R_k = p_f t_f / (\pi r^2)$  и, подставив значение силы  $f_{ц}$ ,

$$R_{i(i+1)} = p_f t_f / (\pi r^2 f_{ц}^{0,75}), \quad (2.8)$$

где  $R_k$  – сопротивление в контакте, Ом;

$p_k$  – давление в контакте, МПа;

$p_f$  – удельное сопротивление оксидной пленки, Ом·м;

$t_f$  – суммарная толщина оксидной пленки, м;

$r$  – радиус зоны контакта, м.

Расчеты процесса нагрева электрода-цепочки были проведены с учетом контактных сопротивлений (2.8) между частицами порошка и свидетельствуют о том, что повышенная температура развивается в местах контактов частиц порошка между собой и с поверхностями детали и полюсного наконечника, а место возникновения электрического разряда определяется расположением температурного максимума, в котором металл частиц порошка частично расплавляется и испаряется, создавая условия для возникновения дугового разряда. Температурный максимум находится в зоне контакта частицы порошка с полюсным наконечником при

коэффициенте распределения энергии  $k_n > 0,7$ , а при  $k_n < 0,7$  – температурный максимум возникает у поверхности детали [45, 46].

Следовательно, для обеспечения условий возникновения дугового разряда у поверхности детали необходимо добиться, чтобы контактное сопротивление  $R_{i(i+1)}$  в этой зоне было максимальным. Это возможно путем регулирования величиной магнитной индукции и поддержанием ее заданного значения на протяжении всего хода технологического процесса. Поэтому для стабилизации интенсивности теплового воздействия в системе полюсный наконечник-частицы порошка-деталь устройства для магнитно-электрического упрочнения должны предусматривать адаптивное управление силой тока дуги – параметром, определяющим согласно (2.6), (2.7) температурный режим.

#### **2.1.4. Модели тепловых процессов в поверхностном слое упрочняемой детали**

При МЭУ источник тепла – электрический разряд действует с поверхности детали, у которой возникают максимальные температуры и формируются тепловые потоки. Поэтому математические модели тепловых процессов должны содержать уравнения теплопроводности с учетом теплофизических свойств покрытия и основы и граничных условий I и II рода [47, 48].

Применительно к условиям МЭУ на основе расчетов тепловых полей по методу источников с применением принципа наложения [49, 50], когда покрытие значительной толщины наносится за один проход и сопровождается объемной зоной тепловыделения, и по плоской схеме [51], когда размер зоны тепловыделения при наплавке мал, предложено [52] движущийся источник тепла принимать полосовым малой ширины или даже линейным, распределенным вдоль подачи полюсного наконечника [53]. Закон распределения интенсивности теплового потока  $q_e$  примем равномерным, так как количество тепла, идущего в деталь от быстродвижущегося источника, определяется его скоростью, теплофизическими свойствами материала детали и от закона распределения зависит незначительно [54]. Поэтому для процесса магнитно-электрического упрочнения постановка линейных задач оправдана и дает основание

применять для анализа температурных полей быстродвижущиеся равномерно распределенные источники тепла.

Для моделирования такого источника рассмотрим соотношение, описывающее процесс распространения тепла от точечного источника, быстродвижущегося по полупространству с адиабатической границей [55, 56]:

$$\theta_i = \frac{q_i}{2\pi\lambda(z - z_{и})} \exp\left[-\frac{V_{и}((x - x_{и})^2 + y^2)}{4\omega(z - z_{и})}\right], \quad (2.9)$$

где  $x_{и}, 0, z_{и}$  – координаты точечного источника;

$q_i$  – его интенсивность, Вт/м<sup>2</sup>;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;

$\omega$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$V_{и}$  – скорость движения точечного источника тепла, м/с;

$x, y, z$  – координаты рассматриваемой точки (ось  $X$  – вдоль оси детали, ось  $Y$  – по нормали к поверхности детали со стороны точечного источника, ось  $Z$  – перпендикулярна осям  $X$  и  $Y$ ).

В реальном процессе упрочнения на поверхность детали со стороны полюсного наконечника действует множество точечных источников, которые можно привести к плоскому источнику с размерами рабочей поверхности полюсного наконечника длиной  $2\ell_0$  и шириной  $B_0$ . Для расчета температуры в рассматриваемой точке выражение (2.9) было проинтегрировано по  $x_{и}$  и  $z_{и}$ . Интегрирование по  $x_{и}$  от  $x_{и} = -\ell_0$  до  $x_{и} = \ell_0$  дает выражение [55, 56] для полосового источника:

$$\theta_{\ell} = \frac{q_{\ell}\sqrt{\omega}}{2\lambda\sqrt{\pi V_{и}}} \int_0^{B_0} \frac{dz_{и}}{\sqrt{z - z_{и}}} \left[ -\frac{V_{и}y^2}{4\omega(z - z_{и})} \right] \cdot \left[ \operatorname{erf}\left( (\ell_0 + x) \sqrt{\frac{V_{и}}{4\omega(z - z_{и})}} \right) + \operatorname{erf}\left( (\ell_0 - x) \sqrt{\frac{V_{и}}{4\omega(z - z_{и})}} \right) \right], \quad (2.10)$$

где  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy$  – функция интеграла вероятности Гаусса;



$q_1$  – интенсивность источника, распределенного по площадке  $2\ell_0 \cdot B_0$ , Гн.

Проинтегрировав (2.10) и считая, что все тепло выделяется вдоль оси детали  $X$ , а  $B_0 = z - z_n$ , получено выражение для линейного источника [52, 55, 56]:

$$\theta_r = \frac{q_r \sqrt{\omega}}{2\lambda \sqrt{\pi V_n (z - z_n)}} \exp \left[ -\frac{V_n y^2}{4\omega(z - z_n)} \right] \cdot \left[ \operatorname{erf} \left( (\ell_0 + x) \sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z - z_n)}} \right) + \operatorname{erf} \left( (\ell_0 - x) \sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z - z_n)}} \right) \right], \quad (2.11)$$

где  $q_r$  – интенсивность источника, распределенного по длине  $2\ell_0$ .

Полученные соотношения (2.10) и (2.11) приемлемы для рассмотрения температурных полей деталей больших размеров с достаточным теплоотводом от зоны действия источника.

В случае, если теплоотвод недостаточно интенсивен, происходит накопление тепла, ведущее к повышению температуры детали. Это имеет место при большом числе проходов и незначительной массе детали, то есть цилиндр практически полностью прогревается по толщине. Тогда определение температур можно проводить по аналогии, как и для бесконечного цилиндра с постоянно действующим по боковой поверхности кольцевым источником тепла [53]. Для такой нестационарной одномерной задачи с граничными условиями первого рода дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид [52, 56]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \omega \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right); \quad \tau > 0; 0 < r < R;$$

при начальном условии  $\theta(r, 0) = \theta_0 = \text{const}$  и граничных условиях  $\theta(R, \tau) = \theta_c = \text{const}$ ;  $\partial \theta(0, \tau) / \partial r = 0$ ;  $\theta(0, \tau) \neq \infty$ .

Решение этого уравнения [55]:

$$\frac{\theta_c - \theta}{\theta_c - \theta_0} = \sum_{n=1}^{\infty} 2 \exp \left[ -\frac{\mu_n^2 \omega \tau}{R^2} \right] \cdot j_0 \left( \frac{\mu_n r}{R} \right) / \left( \mu_n j_1(\mu_n) \right), \quad (2.12)$$

где  $r$  – радиус цилиндра, м;

$\tau$  – время, прошедшее с момента выделения теплоты, с;

$j_0$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка от действительного аргумента

$$\mu_n = (2n - 1) \cdot \pi / 2.$$

В случаях, когда длина  $H$  цилиндрической поверхности мала, процесс накопления тепла целесообразно рассматривать при установившемся теплообмене для ограниченного цилиндра с постоянными температурами на его боковой и торцевой поверхностях. Дифференциальное уравнение теплопроводности для нестационарной двумерной задачи [56]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \omega \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right); \quad 0 < r < R; \quad -H/2 < x < H/2;$$

при начальном условии  $\theta(r, x, 0) = \theta_0 = \text{const}$  и граничных условиях

$$\theta(r, \pm H/2, \tau) = \theta_c = \text{const}, \quad \theta(R, x, \tau) = \theta_c = \text{const}.$$

Решение этого уравнения имеет вид [56]:

$$\frac{\theta_c - \theta}{\theta_c - \theta_0} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} 4 \exp \left[ -\left( \mu_m^2 + \left( \mu_n \frac{2R}{H} \right)^2 \right) \frac{\omega \tau}{R^2} \right] \cos \left( \mu_n \frac{2x}{H} \right) \cdot j_0 \left( \mu_n \frac{r}{R} \right) / \left( \mu_n \mu_m \cdot j_1(\mu_m) \right), \quad (2.13)$$

где  $\mu_m$  – нули функции Бесселя первого рода нулевого порядка  $j_0$ , т. е. нули уравнения  $j_0(\mu_m) = 0$ .

По формулам 2.10–2.13 можно проводить расчеты температурных полей рабочей зоны для быстро движущегося полосового или линейного источника [53].

Экспериментальные исследования температурных полей на поверхности обрабатываемой детали для определения граничных условий первого рода показали, что упрочняемая поверхность нагревается в рабочей зоне до температуры в диапазоне  $800^{\circ}\text{C} \div 1200^{\circ}\text{C}$ . При этом температура по глубине всей детали в результате теплообмена с окружающей средой стабилизируется в интервале  $200^{\circ}\text{C} \div 300^{\circ}\text{C}$  [53]. Температурная стабилизация поверхности образца диаметром 40 мм наступает после нескольких оборотов детали на глубине 2,5 мм – через 40 с, а выравнивание температур по всей глубине рассматриваемых слоев происходит через 60 с.

## **2.2. Исследование стабильности процесса магнитно-электрического упрочнения**

На стабильность показателей качества покрытий и производительность процесса магнитно-электрического упрочнения преимущественное влияние оказывают параметры электрических и магнитных импульсов (энергия импульса, длительность и частота следования и др.), создаваемые электромагнитными системами устройств МЭУ. Стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения в основном описывается критериями электромагнитных потоков, которые помимо ориентации частиц ферромагнитного порошка в рабочем зазоре, обеспечивают интенсивное тепловыделение в местах их контакта с поверхностью детали и последующее формирование покрытий [19, 23]. При этом диапазон значений параметров, обеспечивающий стабильный процесс МЭУ, ограничен из-за технологических возможностей ЭМС, которые в основном определяются источниками технологического тока.

### **2.2.1. Влияние вида источника технологического тока на стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения**

Несмотря на большое количество работ, посвященных стабилизации процесса нанесения покрытий в ЭМП, например [57, 58, 35], обоснование технологических требований к источникам технологического тока (ИТТ) различных типов и рекомендаций по их выбору носят разрозненный характер. Поэтому определим основные

факторы, которые ограничивают использование источников технологического тока в устройствах МЭУ, и установим технологические требования, предъявляемые к ним.

Анализ электромагнитных систем устройств МЭУ, выполненный в разделе 1.5, показывает, что ограничивающими факторами использования генераторов импульсов для МЭУ являются повышенная энергоемкость при небольшой величине энергии единичного электрического разряда; увеличенные масса и габаритные размеры; сложность управления оборудованием [60]. Основными недостатками сварочных трансформаторов и выпрямителей, получивших наибольшее применение в устройствах МЭУ, являются невысокая скорость регулирования величины энергии технологического тока, определяемая частотой питающей сети; отсутствие возможности стабилизации режима наплавки при изменении напряжения сети; увеличенные габариты оборудования [59, 60].

На основании изложенного, источники технологического тока для устройств МЭУ должны отвечать следующим требованиям: обеспечивать быстроедействие обратной связи разрядного тока и напряжения дуги с изменяемыми технологическими параметрами в рабочей зоне; иметь невысокий расход электроэнергии и небольшие габариты.

В настоящее время известны инверторные источники питания для дуговой сварки (например, инверторы модельного ряда Invertec фирмы Lincoln Electric, США), главной особенностью которых является высокая скорость каплепереноса электродного металла [61]. Основными преимуществами инверторных сварочных источников являются [62–64, 39]:

- быстроедействие за счет высокоскоростного управления микропроцессорной системой силой сварочного тока и напряжением дуги;
- экономичность (потребление электроэнергии в 2–3 раза меньше);
- коэффициент мощности близок к единице, а коэффициент полезного действия находится в пределах  $0,75 \div 0,95$ ; малые габариты и масса;
- высокая электробезопасность; возможность выполнения сварочно-наплавочных работ, как в стационарных, так и в полевых условиях.

Следует отметить, что в работах [57, 58, 35] стабильность процесса МЭУ авторами определялась визуально по групповому горению цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре и (или) осциллографическими исследованиями электрических параметров ИТТ без привязки к качеству формируемых покрытий и производительности наплавки. Анализировались только внешние формы осциллограмм технологического тока и напряжения без статистической обработки их экспериментальных значений. Поэтому цель исследования – оценка влияния источников технологического тока с различными вольт-амперными характеристиками на стабильность процесса МЭУ, его производительность и качество формируемых покрытий.

В соответствии с поставленной целью выполнялись: оценка стабильности процесса нанесения покрытий на установке МЭУ по осциллограммам электрических параметров и результатам статистической обработки их экспериментальных значений; анализ стабильности параметров качества покрытий (сплошность, разнотолщинность) и производительности наплавки.

#### *Методика проведения экспериментальных исследований.*

Нанесение покрытий из композиционного ферромагнитного порошка на образцы из стали 45 ГОСТ 1050–88 выполняли на установке МЭУ модели ЭУ-5. Исследовали два варианта компоновочных схем электромагнитной системы: ЭМ и сварочный выпрямитель трансформаторного типа (модель ВД-306), ЭМ и сварочный источник инверторного типа (модель Invertec V270 T). Питание электромагнита осуществляли однофазным выпрямленным током по двухполупериодной мостовой схеме, разнотипных источников технологического тока – трехфазным током промышленной частоты. Согласно рекомендациям источников [52], были приняты технологические режимы МЭУ: сила технологического тока,  $I = 110$  А; рабочий зазор,  $\delta = 1,5$  мм; скорость вращения заготовки,  $V = 0,06$  м/с; подача, ФМП  $q = 2,9 \cdot 10^{-3}$  г/(с·мм<sup>2</sup>); величина магнитной индукции в рабочем зазоре,  $B_3 = 1,0$  Тл; размер частиц, ФМП  $\Delta = 320$  мкм; расход рабочей жидкости (СОЖ – 5 %-й раствор эмульсола Э2 в воде)  $q = 2,0 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/(с·мм<sup>2</sup>).

Электрические измерения силы технологического тока в пределах  $0,01 \div 150$  А (с подключением в электрическую цепь безиндуктивного шунта сопротивлением  $R = 3,75 \cdot 10^{-3}$  Ом) и напряжения в

пределах 0,01–80 В выполнялись осциллографом универсальным С1-77 ТУ И22.044.077. Запись осциллограмм технологического тока и напряжения велась на самопишущем приборе Н-307/1 ТУ 25-0445.048–85. Частота следования импульсов электрических сигналов измерялась частотомером электронносчетным ЧЗ-54.

Производительность МЭУ определялась по приращению массы наплавляемого материала ФМП в единицу времени. Масса исходных образцов с наружным диаметром 40 мм, внутренним – 16 мм и толщиной 10 мм составляла 106,0 г. Взвешивание образцов и ФМП выполнялось на лабораторных весах ВЛА-200-2М с точностью до 0,001 г. Измерение толщины и оценка сплошности покрытий осуществлялось на шлифах поперечного среза при помощи светового микроскопа Mef-3 фирмы Reichert-Jung (Австрия) при увеличении в 200 раз. Разнотолщинность покрытий определялась по разности максимальной и минимальной местных толщин покрытий образца. Сплошность определялась как отношение длины участков с покрытием к общей протяженности исследуемого участка, выраженное в процентах [65]. В процессе исследования параметров качества покрытий изучалось по пять наиболее характерных участков одного образца с покрытием.

Для выполнения статистической обработки экспериментальных данных в качестве показателя стабильности процесса МЭУ принят коэффициент вариации силы технологического тока, характеризующий отклонение исследуемого электрического параметра ИТТ от средних значений [64, 66]:

$$k_{vI} = \frac{\sigma_I}{I_{д.ср.}} \cdot 100 \%, \quad (2.14)$$

где  $\sigma_i = \sqrt{\sum_{i=1}^n (i_d - I_{д.ср.})^2 / (n - 1)}$  – среднеквадратичное отклонение отдельного результата измерения силы технологического тока;

$i_d$  – действительное значение тока в  $i$ -й момент, А;

$I_{д.ср.}$  – среднее значение тока за  $n$  измерений, А.

Для получения достоверных результатов эксперименты по определению производительности МЭУ, сплошности и разнотолщин-

ности покрытий повторялись 50 раз, а их точность оценивалась следующим образом [67]:

– среднее арифметическое значение

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (2.15)$$

– абсолютная погрешность каждого опыта

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}; \quad (2.16)$$

– среднеквадратичная погрешность среднего арифметического

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}; \quad (2.17)$$

– доверительный интервал

$$\bar{x} - t_{\alpha, n} \cdot \sigma < x < \bar{x} + t_{\alpha, n} \cdot \sigma; \quad (2.18)$$

– относительная погрешность результатов опытов

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100 \%, \quad (2.19)$$

где  $x_i$  – результат  $i$ -го измерения;

$t_{\alpha, n}$  – критерий Стьюдента;

$\alpha$  – уровень значимости;

$n$  – число измерений.

Стабильность исследуемых параметров качества формируемых покрытий и производительности МЭУ в работе определялась коэффициентом вариации по формуле [66]:

$$k_{vi} = \frac{\sigma_i}{M(\Pi_i)} \cdot 100 \%, \quad (2.20)$$

где  $M(\Pi_i)$  – математическое ожидание  $i$ -го исследуемого параметра.

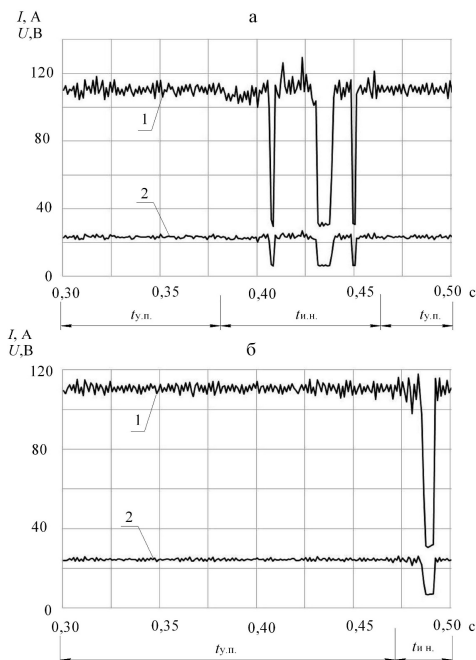
Для оценки сплошности и разнотолщинности покрытий в качестве математического ожидания  $M(\Pi_i)$  в работе использовалось среднее арифметическое значение экспериментов  $\bar{x}$ .

По результатам статистической обработки исследуемых параметров определялся максимально стабильный процесс МЭУ, которому соответствовало минимальное значение коэффициентов вариации [64, 66].

Анализ осциллограмм (фрагменты представлены на рис. 2.4, а и б) показывает, что стабильный процесс МЭУ характеризуется регулярной сменой стадий образования коротких замыканий электродов цепочками ферромагнитного порошка и возбуждения электрических разрядов (участок установившегося процесса кривой тока –  $t_{y.n.}$ ). Выявлено, что в периоды стабильного протекания процесса МЭУ отклонения силы тока от среднего значения 110 А для инверторного и трансформаторного сварочных ИТТ составляют 18 А и 30 А соответственно. Импульсные всплески силы тока при коротких замыканиях обусловлены, вероятнее всего, импульсным изменением проводимости рабочего зазора, периодическими колебаниями напряжений источника питания электромагнита и сварочных аппаратов, электрической сети. Следует отметить, в процессе наплавки возникают периоды холостого хода сварочных ИТТ (участок импульсной нестабильности процесса кривой тока –  $t_{н.н.}$ ) с отклонениями силы тока 78 А и 100 А соответственно от среднего значения 110 А. Длительное отсутствие электрических разрядов и переход к стадии холостого хода ИТТ вызваны неравномерностью подачи ФМП в рабочий зазор из бункера-дозатора.

В процессе экспериментальных исследований установлено, что наименьшая частота повторяемости участков импульсной нестабильности процесса МЭУ характерна для ЭМС с ИТТ инверторного типа. Так, сварочный источник модели Invertec V270 Т в сравнении со сварочным выпрямителем модели ВД-306 обеспечивает на 14 %÷32 % меньшую частоту повторяемости участков импульсной нестабильности процесса МЭУ и снижение на 5,7 %÷14,8 % отклонений силы тока от среднего значения.





$t_{y.n.}$  – участок установившегося процесса МЭУ;  $t_{н.н.}$  – участок импульсной нестабильности процесса МЭУ

Рис 2.4. Осциллограммы технологического тока (1) и напряжения (2) для сварочного выпрямителя модели ВД-306 (а) и инверторного сварочного источника модели Invertec V270 T (б)

Результаты расчетов показывают (табл. 2.1), что значение коэффициента вариации силы тока ( $k_{vj}$ ) для инверторного сварочного источника модели Invertec V270 T на 8,6 % меньше, чем для сварочного выпрямителя модели ВД-306. Следовательно, более стабильный процесс МЭУ обеспечивается применением ИТТ инверторного типа.

Таблица 2.1

Статистическая оценка стабильности процесса МЭУ

Источник технологического тока модели	Количество измерений, $n$	Средне-квадратичное отклонение силы тока ( $\sigma_j$ ), А	Среднее значение силы тока ( $I_{\theta,cp}$ ), А	Значение коэффициента вариации ( $k_{vj}$ ), %
ВД-306	100	34,5	89,1	38,7
Invertec V270 T	100	32,0	90,4	35,4

Это обстоятельство подтверждается результатами исследования показателей качества покрытий и производительности процесса МЭУ (табл. 2.2). В результате применения инверторного ИТТ по сравнению с трансформаторным производительность наплавки и средняя сплошность покрытий повысились на 2,5 %, а средняя разнотолщинность покрытий уменьшилась на 9,0 %.

Таблица 2.2

Статистическая оценка показателей качества покрытий и производительности процесса МЭУ

Источник технологического тока модели	Производительность процесса МЭУ				Средняя разнотолщинность покрытий				Средняя сплошность покрытий			
	Значение показателя, мг/мин	Значения статистических показателей			Значение показателя, мкм	Значения статистических показателей			Значение показателя, %	Значения статистических показателей		
		$\bar{x}$ , мг/мин	$\sigma_i$ , мг/мин	$k_v$ , %		$\bar{x}$ , мкм	$\sigma_i$ , мкм	$k_{vPl}$ , %		$\bar{x}$ , %	$\sigma_i$ , %	$k_{vG}$ , %
ВД-306	210,5	209	28,1	13,5	68,0	64,6	12,2	18,6	90,2	88,1	14,5	16,5
Invertec V270 T	216,0	212	24,6	11,6	62,0	61,6	9,5	15,4	92,5	91,4	11	12,4

Статистическая оценка экспериментальных значений исследуемых параметров (см. табл. 2.2) показывает, что значения коэффициентов вариации производительности  $k_{vPl}$ , сплошности  $k_{vG}$  и разнотолщинности  $k_{vPl}$  покрытий соответственно на 13,9, 25,1 и 17,0 % меньше для инверторного ИТТ модели Invertec V270 T, чем для сварочного выпрямителя модели ВД-306.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы: типы источников технологического тока, используемых в установке МЭУ, оказывают влияние на стабильность процесса наплавки, его производительность, сплошность и разнотолщинность покрытий; наиболее стабильному процессу МЭУ на установке МЭУ с электромагнитной системой, состоящей из электромагнита и инверторного сварочного источника модели Invertec V270 T, соответствует минимальное значение коэффициентов вариации исследуемых параметров.

Учитывая, что инверторный сварочный источник модели Invertec V270 T позволяет получить наибольшую стабильность показателей качества покрытий и производительности наплавки, а

также превосходит по техническим, конструктивным и технологическим показателям традиционные сварочные аппараты, он принят в качестве источника технологического тока для установки МЭУ.

### **2.2.2. Влияние параметров магнитного поля на стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения**

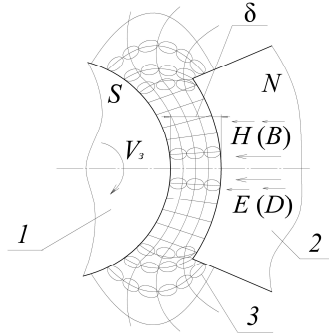
Известно [19, 68], что на стабильность формирования покрытий на поверхностях деталей при МЭУ оказывают значительное влияние равномерность градиента магнитной индукции и постоянство величин временных характеристик электромагнитного поля в рабочем зазоре устройств МЭУ. Вместе с тем, установлено, что изменение магнитного потока, генерируемого электромагнитом в РЗ, носит переменный (пульсирующий) характер. Это является одной из основных причин, оказывающих влияние на распределение и устойчивость цепочек-микроэлектродов из частиц ФМП в рабочем зазоре, синхронизацию воздействия переменными параметрами источника технологического тока и электромагнита. При этом используемые на практике МС сложны в управлении и не обеспечивают стабильности значений величины магнитной индукции в рабочем зазоре [60].

Следует отметить, что исключить вышеперечисленные недостатки возможно за счет использования в магнитных системах устройств МЭУ постоянных магнитов [26]. Тем самым обеспечивают конструктивные преимущества магнитных систем на основе магнитотвердых материалов за счет:

- отказа от электрических схем питания ЭМК и стабилизации временных характеристик ЭМП;
- исключения необходимости в герметизации ЭМК и снижения вероятности выхода из строя МС;
- уменьшения габаритных размеров и массы МС, позволяющей реализовать процесс МЭУ на малогабаритных мобильных устройствах.

Ранее выполненные теоретические исследования магнитных полей при МЭУ были направлены на определение величины магнитной индукции и сил взаимодействия отдельных частиц или всего объема ферромагнитного порошка в рабочей зоне с использованием основных уравнений магнитостатики [19, 57, 58, 35]. Следует отметить, что авторами не учитывалось влияние переменного ха-

рактера электромагнитного поля на проводники разрядного тока (цепочки-микроэлектроды) в рабочем зазоре. Вследствие этого исследование квазистационарного внешнего магнитного поля, генерируемого электромагнитной системой устройств МЭУ в рабочем зазоре (рис. 2.5), в этом подразделе выполняется с помощью основных уравнений Максвелла [69, 70].



1 – заготовка; 2 – полюсный наконечник;  
3 – цепочка-микроэлектрод из частиц ФМП  
Рис. 2.5. Картина магнитного поля в рабочем зазоре

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \gamma \vec{E}, \quad (2.21)$$

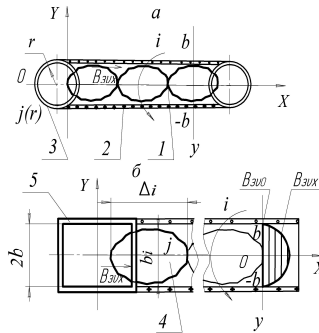
$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.22)$$

где  $\gamma$  – удельная проводимость среды, См/м;  
 $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля, А/м;  
 $\vec{E}$  – напряженность электрического поля, В/м;  
 $\vec{B}$  – индукция магнитного поля, Тл.

Так как внешнее магнитное поле в рабочем зазоре генерируется электромагнитом, пренебрегаем внешним МП токов смещения  $\partial \vec{D} / \partial t$  и используем дифференциальный закон Ома для токов проводимости [70]. В систему уравнений переменного магнитного поля входят уравнения непрерывности линий магнитной индукции  $\vec{B}$  и полного тока  $\vec{D}$  [41, 42]:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \operatorname{div} \vec{D} = 0. \quad (2.23)$$

Приняв направление силовых линий за ось  $X$  системы координат для отличной от нуля компоненты магнитного поля  $B_{zv,x}$  из уравнения соленоидальности (2.23), получим  $(\partial/\partial x)B_{zv,x} = 0$ , а магнитная индукция может изменяться только поперек направления силовых линий. На основании этого рассмотрим воздействие нестационарного внешнего магнитного поля на цепочку-микроэлектрод (рис. 2.6, а), которая ориентирована вдоль силовой линии (по оси  $X$ ).



1 – цепочка-микроэлектрод; 2 – проводник-цилиндр;  
3 – цилиндрический соленоид; 4 – частица ФМП; 5 – плоский соленоид  
Рис. 2.6. Схема представления цепочки-микроэлектрода в рабочем зазоре при расчете индукции с проводником цилиндрической (а) и прямоугольной формы (б)

В результате преобразования по аналогии с [70] уравнений 2.21 и 2.22, исключая вектор напряженности  $\vec{E}$ , получим следующие уравнения:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -rot \vec{E} = -\frac{1}{\gamma} rot rot \vec{H}, \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{1}{\gamma \mu_a} rot rot \vec{B}$$

где  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость среды, Гн/м.

Аналогично источнику [70], как и для вектора-потенциала  $\vec{A}$ , введем лапласиан векторного поля

$$\Delta \vec{B} = -\text{rot rot} \vec{B} + \text{grad div} \vec{B}.$$

Приняв за основу, что замкнутый магнитный поток на входе и выходе в объем равен 0 (при  $\text{div} \vec{B} = 0$ ), можно преобразовать (2.24)

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_a} \Delta \vec{B}. \quad (2.25)$$

Исключив из уравнений (2.21 и 2.22) вектор индукции  $\vec{B}$  (плотность свободных зарядов в рассматриваемом проводнике  $\rho = 0$ ) и проведя такие же преобразования, получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{1}{\gamma \varepsilon_a} \Delta \vec{E}, \quad (2.26)$$

где  $\varepsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м.

Уравнения 2.25 и 2.26 приведены для мгновенных значений векторов МП и являются уравнениями диффузии или теплопроводности [70, 44]. Для рассмотрения этого случая примем следующее допущение: исследуемый объект рассматривается, как соленоид 3 (см. рис. 2.6, а), обеспечивающий воздействие однородного магнитного поля на сплошной проводник-цилиндр 2, который находится соосно соленоиду. После отключения питания соленоида происходит снижение магнитного поля внутри проводника до определенного значения, так как в цилиндре присутствуют круговые токи, индуцируемые вихревым электрическим полем. Эти токи рассматриваются как система вставленных друг в друга соленоидов, которые не могут возбуждать стационарное магнитное поле на внешней стороне цилиндра.

В соответствии с [70] задача определения магнитного поля  $B_{\text{вих}}(r, t)$  в самом проводнике (цепочке-микроэлектроде)  $r \leq b$  (см. рис. 2.6, а) при  $t > 0$  сводится к уравнению

$$\frac{\partial B_{\text{злх}}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_a} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial B_{\text{злх}}}{\partial r} \right), \quad (2.27)$$

где  $r$  – радиус проводника цилиндрической формы, м.  
 $t$  – текущее время, с.

Для рассматриваемого варианта граничные условия будут:  $B_{\text{злх}}(b, t) = 0$  (при  $t > 0$ ) и, соответственно, начальные –  $B_{\text{злх}}(r, 0) = B_{\text{зл0}} = \mu_a i_{\text{п}}$  [70].

где  $i_{\text{п}} = I/2r$  – поверхностная плотность тока проводника, А/м [43];  
 $I$  – электрический ток питания электромагнита, А.

Решение поставленной задачи (2.27) допускается [70, 44] заменой цилиндрической формы соленоида и проводника тока на прямоугольную с толщиной  $2b$  (рис. 2.6, б). В соответствии с таким принятым решением задача определения магнитной индукции и характера воздействия поля на цепочку-микроэлектрод примет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_{\text{злх}}}{\partial t} &= \frac{1}{\gamma \mu_a} \left( \frac{\partial^2 B_{\text{злх}}}{\partial y^2} \right), & (|y| < b, t > 0); \\ B_{\text{злх}}(-b, t) &= B_{\text{злх}}(b, t) = 0 & (n \text{ п } t > 0); \\ B_{\text{злх}}(y, 0) &= B_{\text{зл0}} & (|y| \leq b). \end{aligned} \quad (2.28)$$

Решение этой задачи выполняется последовательно для одномерного уравнения диффузии в виде мультипликативных функций

$$B_{\text{злх}}(y, t) = f(t) F(y). \quad (2.29)$$

Для этого продумаем графические пошаговые решения с помощью разделения переменных уравнения Лапласа [44]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( t \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \frac{1}{t} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (2.30)$$

Подставив зависимость (2.11) в уравнение (2.30), получим

$$F(y) \frac{d}{dt} \left( t \frac{df}{dt} \right) + \frac{1}{t} f(t) \frac{d^2 F}{dy^2} = 0. \quad (2.31)$$

Выполним разделение переменных равенства (2.31) посредством умножения на  $t$  и деления на произведение  $f(t) F(y)$

$$\frac{t}{f(t)} \frac{d}{dt} \left( t \frac{df}{dt} \right) + \frac{1}{F(y)} \frac{d^2 F}{dy^2} = 0. \quad (2.32)$$

Преобразуем полученное выражение (2.32) в обыкновенные уравнения для  $f(t)$  и  $F(y)$  с условием, что каждое из слагаемых (2.32) есть постоянная величина  $C$ :

$$\frac{d^2 F}{dy^2} - F(y) C = 0 \quad \text{и} \quad t \frac{d}{dt} \left( t \frac{df}{dt} \right) + f(t) C = 0.$$

В результате выполненных первых трафаретных пошаговых решений для  $f(t)$ ,  $F(y)$  получены зависимости [70]:

$$\frac{f'(t)}{vf(t)} = \frac{F''(y)}{F(y)} = -k^2. \quad (2.33)$$

где  $v = 1/\gamma\mu_a$  – постоянная,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$k^2$  – произвольная, описывающая затухающий характер квазистационарного магнитного поля в рабочем зазоре.

Решим уравнения (2.33)

$$f'(t) + vk^2 f(t) = 0 \quad \text{и} \quad F''(y) + k^2 F(y) = 0.$$

Подставив решения (2.33) в выражение (2.29), получим зависимости функций

$$f_n(t) = C_n e^{-vk_n^2 t} \quad \text{и} \quad F_n(y) = \cos k_n y, \quad (2.34)$$

где  $C_n$  – коэффициент разложения в ряды Фурье;

$n$  – номер пространственной гармоники;

$k_n$  – коэффициент затухания магнитного поля в рабочем зазоре,  $1/\text{м}$ .



Поскольку искомая функция является четной по переменной  $y$  (т. е. изменяется по косинусоидальному закону), принимаем

$$k_n = \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{b}.$$

Для решения поставленной задачи (2.29) в соответствии с методикой [108] формально составим ряд Фурье, подставив зависимости (2.34) в выражение (2.29)

$$B_{\text{зх}}(y, t) = f_n(t) \cdot F_n(y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\nu k_n^2 t} \cos k_n y. \quad (2.35)$$

Установлено, что нулевые условия на границах  $y = \pm b$  обеспечиваются. При этом начальная функция представляется в виде ступенчатой периодической функции, у которой в пределах  $|y| \leq b$  принимается постоянное значение  $B_{\text{зв}0}$ , а на границах  $-|y| = b, 3b, 5b, \dots$  меняется знак на противоположный [70].

Для ряда Фурье (2.35) с номерами пространственных гармоник 1, 2 и 3, у которых коэффициенты затухания  $k_n$  равны соответственно  $\pi/2b$ ,  $3\pi/2b$  и  $5\pi/2b$ , показатели экспонент показывают, что гармоники с течением времени затухают существенно быстрее. В соответствии с этим наибольшее влияние на процесс удержания цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре оказывают составляющие первой гармоники, коэффициент разложения которой равен  $C_1 = (4/\pi) B_{\text{зв}0} = (4/\pi) \mu_a i_{\text{п}} = (4/\pi) \mu_a I/2r$  [69, 70] с учетом несинусоидальности тока питания электромагнита, магнитной проницаемости и размеров частиц ФМП. Выражение для определения магнитной индукции на поверхности и внутри цепочки-микроэлектрода примет следующий вид в результате преобразования ряда (2.35)

$$B_{\text{зх}1}(y, t) = \frac{4}{\pi} B_{\text{зх}0} e^{-\frac{1}{\gamma \mu_a} \left(\frac{\pi}{2b}\right)^2 t} \cos\left(\frac{\pi}{2b}\right) y = \frac{4}{\pi} B_{\text{зх}0} e^{-\frac{t}{t_3}} \cos \frac{\pi y}{2b}. \quad (2.36)$$

где  $t_3 = \gamma \mu_a (2b)^2 / \pi^2$  – время, характеризующее затухание магнитного поля в проводнике (цепочке-микроэлектроде), с.

С учетом размеров частицы ФМП (см. рис. 2.6, б) величина времени, необходимая для затухания магнитного поля в цепочке-

микроэлектроде (или проникновения на глубину частицы ФМП  $l_i = b_i / 2$ ), определяется по формуле

$$t_3 = \gamma \mu_a b_i^2 / 4,$$

где  $b_i$  – размер малой оси эллипсоида, описывающего  $i$ -ю частицу ФМП, м.

Анализ выражения (2.36) показывает, что воздействие на цепочку-микроэлектрод характеризуется распределением внешнего магнитного поля по координате  $y$  с экспоненциальным затуханием со временем  $t_3$ .

В результате выполненного численного счета выражения (2.36) установлено, что значение величины магнитной индукции на поверхности цепочки-микроэлектрода составляет  $B_{3x1} = 0,76$  Тл, а величина времени затухания магнитного поля в цепочке-микроэлектроде  $t_3 = 0,2 \cdot 10^{-3}$  с.

Экспериментально измерение магнитной индукции  $B_{3x1}$  выполняли на установке для МЭУ модели ЭУ-5 с помощью тесламетра ТИ-10 (погрешность измерения не более 2,5 %) со специальными датчиками Холла, установленными в рабочем зазоре вдоль цепочки-микроэлектрода, состоящей из частиц ФМП размером  $240 \div 320$  мкм. Результаты измерений показали, что магнитная индукция  $B_{3x1}$  находилась в пределах  $0,74 \div 0,82$  Тл, что соответствует расхождению между теоретическими расчетами и экспериментальными  $2,6 \% \div 7,3 \%$ .

В соответствии с тем, что продолжительность электрического разряда ( $10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}$  с) при МЭУ больше, чем время затухания индукции в цепочке-микроэлектроде, устойчивое положение цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре зависит от силового воздействия на них переменного внешнего МП. Гармоническое изменение напряженности магнитного поля (рис. 2.7, а) приводит к изменению во времени величин силы прижима  $f_{ц}$  частиц ФМП к обрабатываемой поверхности заготовки детали [71]:

$$f_{ц} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\mu \Delta_i^2 b_i K H_{vi}^2}{L_i + \Delta_i}, \quad (2.37)$$

где  $n$  – число частиц в цепочке-микроэлектроде;

$\mu$  – магнитная проницаемость материала порошка, Гн/м;  
 $L_i$  – расстояние от границы  $i$ -й частицы до оси упрочняемой поверхности, м;  
 $\Delta_i$  – размер большой оси эллипсоида, описывающего  $i$ -ю частицу ФМП, м;  
 $K$  – магнитная восприимчивость материала ФМП;  
 $H_{vi}$  – напряженность магнитного поля на границе  $i$ -й частицы ФМП, А/м.

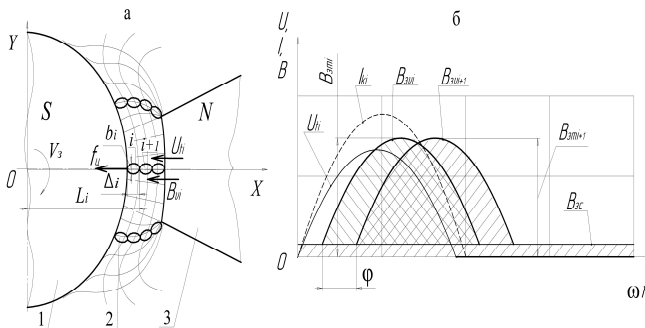
С учетом существующей связи между магнитной индукцией и напряженностью МП  $B_{vi} = \mu H_{vi}$  [23] формула для определения величины силы прижима  $f_{ц}$  цепочки-микроэлектрода к обрабатываемой поверхности (2.37) примет вид:

$$f_{ц} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i^2 b_i K B_{vi}^2}{\mu(L_i + \Delta_i)}, \quad (2.38)$$

где  $B_{vi}$  – мгновенная индукция внешнего переменного магнитного поля на границе  $i$ -й частицы порошка в рабочем зазоре, Тл.

Следовательно, сила прижима  $f_{ц}$  цепочки-микроэлектрода к обрабатываемой поверхности определяется размерами частиц ФМП и неоднородностью внешнего магнитного поля в рассматриваемой точке рабочего зазора. Ранее проведенные исследования [19] показывают, что внешнее МП в рабочем зазоре, ограниченное эквидистантными поверхностями полюсного накопника и обрабатываемой поверхностью заготовки, неоднородно. Используемые электромагниты, как нелинейные элементы электрической цепи в МС устройств МЭУ, генерируют индукцию  $B_{vi}$ , текущее значение которой непостоянно.

Оценку влияния неоднородности переменного внешнего магнитного поля в рабочем зазоре на стабильность формирования и устойчивое положение цепочек-микроэлектродов рассмотрим с учетом амплитудной и временной составляющих индукции. Так, мгновенная индукция внешнего магнитного поля в точке  $(x_i, y_i)$  цепочки-микроэлектрода, находящейся в рабочем зазоре (см. рис. 2.7, а), изменяется по косинусоидальному закону (рис. 2.7, б) [46]:



1 – заготовка; 2 – частица порошка; 3 – полюсный наконечник  
 Рис. 2.7. Схема действия силы прижима  $f_{cl}$  на цепочку-микроэлектрод

в рабочем зазоре устройства МЭУ (а), временная диаграмма тока электромагнита ( $I_{ki}$ ) и напряжения источника питания технологического тока ( $U_{li}$ ), индукций в рабочем зазоре (б)

$$B_{\omega i} = B_{\omega mi} \cos \omega t,$$

где  $B_{\omega mi}$  – амплитудная величина индукции внешнего МП в точке  $(x_i, y_i)$  цепочки-микроэлектрода, находящейся в рабочем зазоре вдоль силовой линии, Тл;

$\omega$  – круговая частота магнитного поля, рад/с.

В другой точке цепочки-микроэлектрода  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  индукция внешнего магнитного поля может отличаться от первой как по амплитуде, так и по фазе, т. е.

$$B_{\omega i+1} = B_{\omega mi+1} \cos(\omega t + \phi), \quad (2.39)$$

где  $\phi$  – сдвиг по фазе между векторами индукций МП  $B_{\omega i}$  и  $B_{\omega i+1}$ , рад.

Так как для электромагнитных катушек I-образной конструкции, питаемых током промышленной частоты, угол  $\phi$  (рис. 2.8) достигает небольшого значения (порядка  $5 \cdot 10^{-3}$  рад) [71], получим

$$\frac{B_{\omega i+1} - B_{\omega i}}{B_{\omega i}} = \frac{B_{\omega mi+1} - B_{\omega mi}}{B_{\omega mi}} + \left( \frac{B_{\omega mi+1}}{B_{\omega mi}} \right) \frac{\phi}{\text{tg} \omega t}. \quad (2.40)$$

Поскольку значение отношения амплитудных величин магнитной индукции  $B_{\omega mi+1}/B_{\omega mi}$  близко к единице, то выражение для оценки влияния неоднородности переменного внешнего магнитного поля в

рабочем зазоре на стабильность формирования и устойчивое положение цепочек-микроэлектродов из частиц ФМП, с учетом преобразования формулы (2.44), примет следующий вид:

$$\frac{B_{3vi+1} - B_{3vi}}{B_{3vi}} = \frac{B_{3mi+1} - B_{3mi}}{B_{3mi}} + \frac{\varphi}{\operatorname{tg}\omega t}. \quad (2.41)$$

Полученное выражение позволяет учитывать амплитудную  $(B_{3mi+1} - B_{3mi}) / B_{3mi}$  и временную или фазовую  $(\varphi / \operatorname{tg}\omega t)$  составляющие индукции внешнего магнитного поля с достаточной точностью.

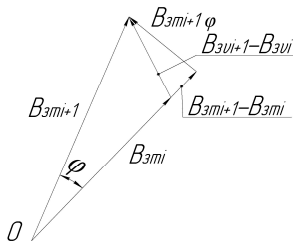


Рис. 2.8. Векторная диаграмма магнитных индукций цепочек-микроэлектродов

Для установления влияния амплитудной и фазовой составляющих индукции на силу прижима  $f_{ц}$  проведены исследования и численный расчет неоднородности переменного внешнего магнитного поля в рабочем зазоре установки МЭУ модели ЭУ-5 при питании электромагнита I-образной конструкции однофазным выпрямленным током по одно- и двухполупериодной схемам силой и напряжением, изменяемыми в пределах  $3 \div 5$  А и  $12 \div 36$  В. Фазовый сдвиг магнитного потока в различных точках рабочего зазора определялся путем измерения линейной развертки при подаче напряжений на входы каналов вертикального отклонения [72] с использованием универсального осциллографа С1-77.

Результаты экспериментальных исследований (табл. 2.3) показывают, что неоднородность в рабочем зазоре наиболее характерна для переменного внешнего магнитного поля, генерируемого электромагнитом, питаемым одно фазным током по однополупериодной схеме. Амплитудная и фазовая составляющие индукции превышают в  $2,25 \div 3,0$  раза и  $2,25 \div 2,5$  раза составляющие

неоднородности магнитного поля, формируемого электромагнитом, питаемым однофазным током по двухполупериодной схеме. Значение величины постоянной магнитной индукции в 2 раза меньше.

Таблица 2.3

Результаты исследования неоднородности внешнего магнитного поля в рабочем зазоре устройства МЭУ

Схема питания источника магнитного поля	Среднее значение величины магнитной индукции, Тл		Фазовый сдвиг, рад	Неоднородность магнитного поля, %	
	амплитудная	постоянная		амплитудная	фазовая
Одно-полупериодная	0,75	0,32	$(5 \div 7) 10^{-3}$	6 ÷ 9	18 ÷ 25
Двух-полупериодная	0,78	0,63	$(3 \div 4) 10^{-3}$	2 ÷ 4	8 ÷ 10

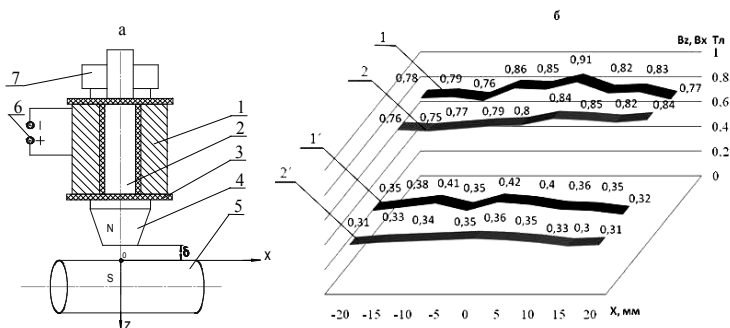
Следует отметить, что неоднородность магнитного поля в рабочем зазоре, обусловленная непостоянством амплитудной составляющей индукции, возникает за счет несимметричности конструкции магнитной системы, неточности изготовления и сборки отдельных деталей магнитопровода, рассеяния магнитного потока в технологических и рабочих зазорах. Неоднородность магнитного поля, возникающая в результате фазового сдвига магнитного потока в одной точке цепочки-микроэлектрода относительно потока в другой точке, объясняется потерей неодинакового количества энергии при прохождении потока в колебательных системах по отдельным участкам магнитопровода [71].

Установлено, что наибольшее влияние на силу прижима цепочки-микроэлектрода к обрабатываемой поверхности оказывает фазовая составляющая индукции, с увеличением частоты (100 Гц и более) питания которой ее значение снижается до нуля. При этом гармонический характер изменения величины магнитной индукции  $B_{vi}$ , наиболее выражен для однополупериодной схемы выпрямления и определяет импульсное периодическое воздействие силы прижима  $f_{ц}$  на цепочки-микроэлектроды в рабочем зазоре устройства МЭУ.

Результаты исследований (см. табл. 2.1 и 2.3) показывают, что превышение амплитудной и фазовой составляющих неоднородности магнитного поля более 24 % приводит к значительным колебаниям силы технологического тока и хаотичному распределению частиц ФМП в рабочем зазоре.

В результате неоднородность магнитного поля на отдельных участках рабочего зазора меняется с частотой образования разрядных цепочек из частиц порошка. При таких условиях магнитная сила  $f_{ц}$ , удерживающая цепочки-микроэлектроды в рабочем зазоре, не будет одинаковой для всех частиц ФМП.

Для исследования интенсивности образования цепочек-микроэлектродов из частиц ФМП под воздействием внешнего магнитного поля проведены исследования распределения индукции в рабочей зоне установки ЭУ-5. Индукция в рабочем зазоре  $B_{зв}$  изменялась в пределах  $0,35 \div 0,9$  Тл. Измерения выполняли тесламетром ТИ-10 со специальными датчиками Холла, установленными на краях и в центре рабочего зазора. По изменению величины индукции в различных точках оценивали интенсивность МП в РЗ. Питание электромагнитных катушек (рис. 2.9, а) в первом случае осуществлялось от источника питания выпрямленным током по однополупериодной схеме с частотой 50 Гц, а во втором – от источника питания, обеспечивающего прямоугольные импульсы с частотой 12,5 Гц. Анализ полученных результатов показывает, что магнитные поля (частотой 12,5 и 50 Гц) недостаточно однородны (рис. 2.9, б) что не обеспечивает устойчивое положение цепочек-микроэлектродов [59].



1 – обмотка; 2 – сердечник; 3 – изолятор; 4 – полюсный наконечник;

5 – заготовка; 6 – источник питания; 7 – оправка

$X$  – расстояние от продольной оси полюсного наконечника

Рис. 2.9. Схема электромагнитной системы (а); диаграммы распределения в рабочем зазоре продольной  $B_z$  (1 и 2) и поперечной  $B_x$  (1' и 2') составляющих магнитной индукции в рабочем зазоре при частотах 50 Гц (1 и 1') и 12,5 Гц (2 и 2') (б)

Данное обстоятельство, вероятно, связано не только с влиянием неоднородности внешнего магнитного поля, генерируемого элект-

ромагнитом и источниками питания на интенсивность образования цепочек-микроэлектродов из частиц ФМП и возникновения электрических разрядов в РЗ, но и с синхронностью следования импульсов напряжения и тока этих источников [19, 59].

Для проверки и подтверждения результатов теоретических исследований были проведены эксперименты, целью которых на первом этапе являлось установление на основании принципа суперпозиций влияния характеристик источников внешнего переменного магнитного поля и технологического тока на интенсивность образования цепочек-микроэлектродов из частиц ФМП и возникновения электрических разрядов в рабочем зазоре. На втором этапе требовалось определить значения величин технологических факторов (индукции постоянного магнитного поля в рабочем зазоре и плотности разрядного тока), при которых обеспечивается стабилизация процесса МЭУ и формирование покрытий с максимальной сплошностью.

Исследования синхронности следования импульсов напряжений источника питания электромагнита ( $U_{ki}$ ) и ИТТ модели Invertec V270 T ( $U_{ii}$ ) в рабочем зазоре установки МЭУ модели ЭУ-5 выполнялись с помощью осциллографа универсального С1-77. По изменению импульсов напряжения ИП электромагнитов и ИТТ инверторного типа модели Invertec V270 T оценивали интенсивность образования во времени цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре и их участие в электрических разрядах с последующим переносом расплава частиц ФМП на обрабатываемую поверхность. Киносъемка процесса формирования цепочек-микроэлектродов и прохождения по ним электрических разрядов выполнялась высокоскоростной камерой модели СКС-1М. Питание исследуемых ЭМК осуществлялось однофазным выпрямленным током по однополупериодной схеме, а также источником, обеспечивающим прямоугольные импульсы с частотой 12,5 Гц.

Результаты осциллографических исследований показывают, что синхронность следования импульсов напряжения источников внешнего магнитного поля и технологического тока в рабочем зазоре затруднена вследствие питания сварочного источника инверторного типа трехфазным током (частота пульсации до



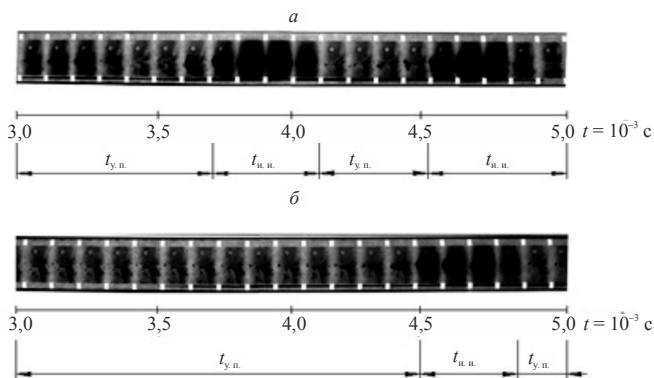
80 кГц), а ЭМК – однофазным током выпрямленным по одно- и двухполупериодной схемам (частота пульсации 50 и 12,5 Гц соответственно).

Установлено, что для электромагнитной системы ИТТ с электромагнитом, питание которого осуществляется выпрямленным током по однополупериодной схеме, в момент паузы тока в катушке электромагнита минимальное значение магнитной индукции не обеспечивает стабильное формирование цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре. Вследствие этого электрические разряды отсутствуют, и процесс МЭУ идет неустойчиво с пульсирующим «горением» цепочек-микро-электродов ФМП в РЗ.

Для электромагнитной системы с электромагнитом, питаемым током с прямоугольными импульсами частотой 12,5 Гц, изменение во времени величины индукции не оказывает значительного влияния на интенсивность образования цепочек-микроэлектродов ФМП в РЗ и перенос расплава на поверхность детали. Это объясняется небольшой пульсацией напряжения источника питания внешнего магнитного поля.

На рис. 2.10 дан анализ кинограмм следования электрических разрядов в РЗ в процессе МЭУ, который иллюстрирует, что частота повторяемости участков импульсной нестабильности процесса наплавки в  $2,2 \div 2,85$  раза меньше для ИТТ и электромагнита, питаемого напряжением частотой 12,5 Гц. Это связано с меньшими значениями переменных составляющих магнитной индукции в рабочем зазоре, что обеспечивает более устойчивое положение цепочек-микроэлектродов и стабильное формирование и развитие электрических разрядов в рабочем зазоре.

Установлено, что механизм формирования цепочек-микроэлектродов состоит из следующих стадий: ориентирование и выстраивание их вдоль силовых магнитных линий на входе в рабочий зазор; последующее перемещение их с поверхностью заготовки; прекращение перемещения с поверхностью заготовки и концентрирование их на выходе из рабочего зазора, совершение ими колебательных движений; разрыв крайних цепочек-микроэлектродов и выброс отдельных частиц ФМП из рабочего зазора.



Частота следования импульсов напряжения источников питания электромагнитов: а – 50 Гц; б – 12,5 Гц

Рис. 2.10. Кинограммы электрических разрядов в рабочем зазоре при МЭУ

Для проведения исследований на втором этапе была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 2.11), позволяющая исследовать параметры внешнего МП (величину и характер распределения магнитной индукции в РЗ) варьированием различными формами и геометрическими размерами магнитов относительно обрабатываемой поверхности заготовки детали.

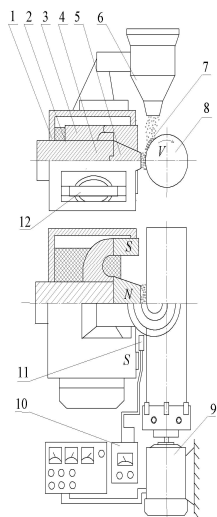


Рис. 2.11. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка (см. рис. 2.11) состоит из корпуса 1 и основания 2, в направляющих пазах которого устанавливаются постоянные магниты 3 различных форм; сердечника 4 со сменным полюсным наконечником 5; контейнера 6 с ферромагнитным порошком 7 и заготовки 8; электродвигателя постоянного тока 9; тесламетра Т-10/1 со специальными датчиками Холла 11 с размерами  $80 \times 5,0 \times 0,8$  мм, установленными по краям и в центре РЗ; крепления корпуса 12, обеспечивающего расположение установки в горизонтальном и вертикальном положениях. Сердечник 4 и заготовка подключены разными полюсами к инверторному сварочному источнику Invertec V 270 Т (на рис. 2.11 не показан). Для скоростной съемки процесса МЭУ в РЗ перпендикулярно направляющим основания 2 крепилась камера СКС-1М (на рис. 2.11 не показана).

Оправка с образцами из стали 45 с наружным диаметром – 40 мм, внутренним – 16 мм и толщиной – 10 мм устанавливались в патрон установки. В момент начала вращения образцов из контейнера в рабочий зазор подавался ферромагнитный порошок Fe-2 %V, включался инверторный сварочный источник.

Анализ ранее проведенных исследований [19, 68] показал, что для проведения экспериментов достаточно центрального композиционного ротатбельного униформ-планирования (ЦКРУП) второго порядка, методика которого изложена [27]. Исследуемым параметром принята сплошность покрытий  $G$ , от значений которой зависит средняя площадь опорной поверхности покрытия [19]. Независимыми переменными были технологические факторы – величина магнитной индукции в рабочем зазоре  $B_{zc}$  и плотность разрядного тока  $i$ , оказывающие основное влияние на величину магнитно- и электродинамических сил, действующих на частицы ФМП в РЗ [52].

Постоянными факторами приняты следующие: рабочий зазор,  $\delta = 2,0$  мм; размер частиц, ФМП  $\Delta = 240 \div 320$  мкм; скорость вращения образцов,  $V = 0,05$  м/с; расход ФМП,  $q = 2,8 \cdot 10^{-3}$  г/(с·мм<sup>2</sup>); расход РЖ,  $q = 2,0 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/(с·мм<sup>2</sup>); длина  $R_n$ , высота рабочего торца  $h$  и угол охвата полюсного наконечника  $\alpha$  соответственно 15 мм, 5,7 мм и  $12^\circ$  [143]; ферромагнитный порошок Fe-2 %V ГОСТ 9849–86; форма постоянного магнита – прямоугольная с габаритными размерами  $100 \times 80 \times 40$  мм, материал – ЮНДК18. Значения величины

магнитной индукции в РЗ обеспечивались изменением расстояния между магнитотвердым материалом и образцами посредством перемещения постоянного магнита 3 по направляющим пазам сердечника 4 с полюсным наконечником 5 (см. рис. 2.11).

С учетом работ [19, 52, 23] установили условия проведения экспериментов, опыты которых рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Условия проведения опытов

Уровень факторов	Технологические факторы	
	$i, \text{А/мм}^2$	$B_{зс}, \text{Тл}$
	$X_1$	$X_2$
Основной (0)	1,8	0,50
Верхний (+1)	2,4	0,68
Нижний (-1)	1,2	0,32
Звездная точка (+ $\alpha$ )	2,6	0,80
Звездная точка (- $\alpha$ )	1,0	0,20
Интервалы варьирования:		
основной	0,6	0,18
по $\alpha$	0,8	0,30

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКРУП второго порядка с использованием стандартного пакета *Excel Microsoft Office*, позволила получить математико-статистическую модель в нормированном виде, определяющую зависимость сплошности покрытий  $G$  от основных характеристик электрического и магнитного полей  $i$  и  $B_{зс}$ :

$$Y = 90,990 + 6,286 \cdot X_1 + 4,245 \cdot X_2 - 2,417 \cdot X_1 \cdot X_2 - 2,366 \cdot X_1^2 - 0,573 \cdot X_2^2. \quad (2.42)$$

Выявлено, что все коэффициенты регрессии (2.42) значимы с 95 %-й доверительной вероятностью по критерию Стьюдента. Установлено, что модель адекватна при 5 %-м уровне значимости по критерию Фишера.

Графическое отображение модели (2.42) представлено одномерными сечениями функции отклика  $Y$  в двумерной системе координат (рис. 2.12).

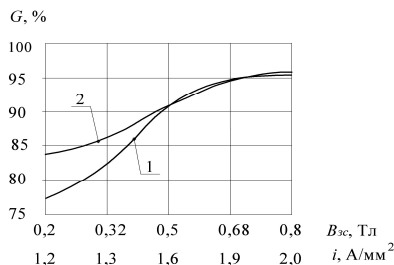


Рис. 2.12. Зависимость сплошности покрытий  $G$  от величины магнитной индукции  $I$  в рабочем зазоре и плотности разрядного тока  $i$

Анализ математико-статистической модели (2.42) позволил определить степень влияния технологических факторов на сплошность покрытий (табл. 2.5) и расположить их в порядке убывания значимости в следующей последовательности  $G$ :  $B_{zc} \rightarrow i$ . Проанализировав зависимости (см. рис. 2.12), можно сделать вывод, что для магнитной индукции в рабочем зазоре  $B_{zc}$  и плотности разрядного тока  $i$  рациональными являются диапазоны, при которых удовлетворяются следующие условия:  $0,65 < B_{zc} < 0,75$  Тл и  $1,80 < i < 1,95$  А/мм<sup>2</sup>.

Таблица 2.5

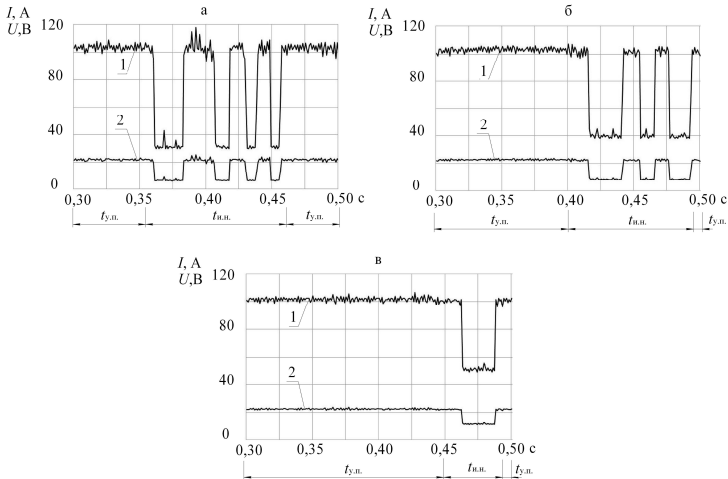
Влияние технологических факторов на сплошность покрытий

Технологические факторы		Степень влияния технологических факторов, %	
		$G$	
		$Y$	
$i$	$X_1$	40,3	
$B_{zc}$	$X_2$	59,7	

При уменьшении значений величин магнитной индукции и плотности разрядного тока ( $B_{zc} < 0,65$  Тл и  $i < 1,80$  А/мм<sup>2</sup>) снижается интенсивность образования цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре и мощность единичного электрического разряда, что приводит к нестабильному процессу МЭУ и формированию покрытия с невысокой сплошностью.

Анализ результатов осциллографирования (рис. 2.13, а) показывает, что для процесса МЭУ характерно преобладание участков

импульсной нестабильности, имеющих диапазон изменения разрядного тока  $30 \div 118$  А (относительное отклонение тока – 74,6 %).



$t_{уст.}$  – участок установившегося процесса МЭУ;  $t_{и.н.}$  – участок импульсной нестабильности процесса МЭУ

Условия проведения экспериментов:  $a - B_{зс} < 0,20$  Тл и  $i < 1,20$  А/мм<sup>2</sup>,  
 $б - B_{зс} > 0,75$  Тл и  $i > 1,95$  А/мм<sup>2</sup>;  $в - B_{зс} = 0,7$  Тл и  $i = 1,95$  А/мм<sup>2</sup>

Рис. 2.13. Осциллограммы технологического тока (1) и напряжения (2)

Для периодов стабильного процесса МЭУ отклонение силы разрядного тока от среднего значения составляет 12 А (значения коэффициентов вариации плотности тока  $k_{vi} = 39,3$  % и сплошности покрытий  $k_{vG} = 21,4$  %).

Следует отметить, что при значениях величин магнитной индукции и плотности разрядного тока ( $B_{зс} < 0,20$  Тл и  $i < 1,20$  А/мм<sup>2</sup>) энергии магнитного и электрического полей недостаточно для удержания и расплавления частиц ФМП в рабочем зазоре. Процесс МЭУ протекает неустойчиво с превалирующим одиночным пульсирующим горением цепочек-микроэлектродов. В результате точечного и переменного возникновения электрических разрядов в рабочем зазоре на поверхности образцов образуются участки, на которых отсутствует покрытие.

При повышении значений величин магнитной индукции и плотности разрядного тока ( $B_{зс} > 0,75$  Тл и  $i > 1,95$  А/мм<sup>2</sup>) увеличивается воздействие электродинамических сил на частицы

ФМП, происходит рост мощности электрического разряда и температуры нагрева частиц ФМП. Вследствие этого наблюдается выброс расплавленных частиц ФМП из рабочего зазора и перегрев отдельных участков обрабатываемой поверхности. Покрытие формируется недостаточно качественным из-за наличия сквозных каналов, направленных от поверхности нанесенного слоя к основному металлу. Установлено, что повторяемость периодов стабильного процесса МЭУ и участков импульсной неустойчивости одинаковая (рис. 2.13, б). Для участков импульсной неустойчивости относительное отклонение силы разрядного тока составляет 62,7%, для периодов стабильного процесса МЭУ отклонение силы тока – 8 А. Значения коэффициентов вариации плотности тока  $k_{vi}$  и сплошности  $k_{vG}$  покрытий соответственно составляют 32,2% и 16,7%. На участках импульсной неустойчивости относительное отклонение силы разрядного тока – 51,5%.

В результате принятых технологических ограничений с учетом работ [51, 52, 57, 70] и выполненного анализа зависимости (см. рис. 2.12) установлено, что при значениях магнитной индукции в рабочем зазоре  $B_{zc}$  и плотности разрядного тока  $i$ , находящихся в пределах диапазонов  $0,65 < B_{zc} < 0,75$  Тл и  $1,80 < i < 1,95$  А/мм<sup>2</sup>, процесс МЭУ идет стабильно с формированием покрытия, состоящего из плотно расположенных точечных капель расплава. Анализ результатов осциллографирования (рис. 2.13, в) показывает, что для МЭУ характерно преобладание периодов стабильного процесса, для которых отклонение силы разрядного тока от среднего значения составляет 5 А.

На основании выполненных экспериментальных исследований и численного расчета с помощью математического пакета MathCAD установлено, что максимальная сплошность покрытий ( $G$ ) равная 95,1% обеспечивается при величине магнитной индукции в рабочем зазоре ( $B_{zc}$ ) равной 0,7 Тл и плотности разрядного тока ( $i$ ) – 1,95 А/мм<sup>2</sup>. Выявлено, что большие стабильность процесса МЭУ и качество покрытия (значения коэффициентов вариации плотности тока  $k_{vi} = 26,1\%$  и сплошности покрытий  $k_{vG} = 11,4\%$ ) обеспечивают магнитотвердые материалы при величине рабочего зазора 2,0 мм, высоте рабочего торца полюсного наконечника 5,7 мм и угле охвата 12°.

Результаты исследований показывают, что стабильность процесса наплавки обеспечивается применением постоянного магнита, для которого требуется с учетом технических ограничений определить оптимальные геометрические размеры.

### 2.3. Проектирование магнитопроводов на основе постоянных магнитов

Задачей проектирования магнитной системы устройств МЭУ является создание оптимальных по габаритным размерам, массе и стоимости конструкций, обеспечивающих в рабочей зоне устройств МЭУ требуемую величину магнитной индукции. Исходя из этого, предложена методика определения конструктивных параметров магнитной системы установки МЭУ на постоянных магнитах, которая предполагает следующую последовательность действий [26]:

1. Получить требуемую величину магнитной индукции в рабочем зазоре  $B_{zc}$  при отсутствии ферромагнитного порошка.

2. Определить минимальные размеры основного элемента магнитной системы (постоянного магнита): ширины –  $R_m$  и длины –  $L_m$ .

Для этого выполнялись:

- выбор магнитотвердого материала;
- расчет принятых магнитных систем;
- конструирование магнитной системы с применением математического планирования эксперимента (установление закономерности зависимостей  $B_{zc} = f(L_m)$  при  $R_m = \text{const}$  и  $B_{zc} = f(R_m)$  при  $L_m = \text{const}$ );

– определение оптимальных параметров конструкции магнитной системы.

Из литературных источников [71] известно, что управление величиной индукции в РЗ при использовании постоянных магнитов реализуется только способами шунтирования или нейтрализации магнитного потока. В связи с этим при проектировании МС особое значение имеет форма ПМ и относительное расположение звеньев магнитопровода.



На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса МЭУ, конструктивных особенностей устройств МЭУ, опыта проектирования и изготовления магнитных систем [46, 71] в качестве источника постоянного магнитного поля были выбраны магниты Е-образной, призматической и прямоугольной форм с дополнительными замыкающими звеньями и без них. Как концентраторы известных типовых магнитных систем они обеспечивают более однородное и симметричное магнитное поле относительно продольной оси рабочего воздушного зазора [26].

### 2.3.1. Методика расчета параметров магнитной системы

В процессе магнитно-электрического упрочнения в рабочей зоне устройств воздействуют на магнитную систему следующие возмущающие факторы: высокая температура, магнитное поле контура технологического тока и внешнее магнитное поле оборудования, смазочно-охлаждающая жидкость [50, 52, 73]. В связи с этим магнитотвердые материалы должны обеспечивать стабильность магнитных свойств в широкой области температур (требуемое значение остаточной индукции  $B_r$ ), высокую механическую прочность, коррозионную устойчивость и иметь невысокую стоимость по сравнению с другими материалами [26, 71].

Сравнительный анализ основных характеристик магнитотвердых материалов (табл. 2.6) показывает, что ферриты и гибкие магниты не обладают требуемой остаточной индукцией ( $B_r$ ) и максимальной удельной магнитной энергией ( $BH/2$ ) макс, а редкоземельные магниты на основе сплавов Nd-Fe-B и Sm-Co не рационально использовать для магнитных систем устройств МЭУ из-за высокой стоимости. Наиболее полно соответствуют вышеприведенным требованиям магнитные материалы на основе сплава Al-Ni-Co-Fe (ЮНДК). Магниты обладают стабильностью параметров магнитного поля: достаточными магнитной индукцией  $B_{sc}$  (до 1,2 Тл), коэрцитивной силой  $H_c$  (до 140 кА/м) и удельной магнитной энергией (до 16,5 кДж/м<sup>3</sup>), требуемыми механической прочностью и коррозионной устойчивостью, значительно дешевле редкоземельных материалов.

Таблица 2.6

Сравнительные характеристики магнитотвердых материалов

Магнитотвердый материал	$B_r$ , Тл	$(BH/2)$ макс, кДж/м <sup>3</sup>	$H_c$ , кА/м	Относительная стоимость материала (за 1 принята стоимость магнитопластов)
Гибкие магнитные материалы (магнитопласты)	0,17	6,4	105,50	1,0
Керамика (БИ, БА, СА)	0,40	12,0	191,10	0,2
Альнико (ЮНДК)	1,35	20,0	143,50	до 4,0
Sm-Co	1,05	80,0	732,50	до 50,0
Спеченные Nd-Fe-B	1,42	200,0	950,25	до 15,0

Известный аналитический расчет электромагнитной составляющей рабочей зоны позволяет определить величины сопротивлений отдельных участков МС на пути прохождения магнитного потока [73–75]:

$$R_M = R_{ст} + R_b, \quad (2.43)$$

где  $R_{ст}$  – магнитное сопротивление участков стального магнитопровода, 1/Гн;

$R_b$  – сопротивление воздушного зазора, 1/Гн.

При этом магнитное сопротивление участков стального магнитопровода и воздушного зазора описывается формулами [74, 75]:

$$R_{ст} = \frac{l}{\mu_b \cdot \mu_{ст} \cdot S}; \quad R_b = \frac{\Delta}{\mu_0 \cdot S}, \quad (2.44)$$

где  $l$  – суммарная длина участков стального магнитопровода, м;

$\mu_b$  – относительная магнитная проницаемость воздушного участка, Гн/м;

$\mu_{ст}$  – относительная магнитная проницаемость стали, Гн/м;

$\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0 \gg 12,5 \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$S$  – площадь поперечного сечения магнитопровода, м<sup>2</sup>;

$\Delta$  – длина воздушного участка, м.

Для упрощения расчета конструкции МС, изготавливаемой на основе ПМ, принимаются следующие допущения: магнитное сопротивление стального магнитопровода отсутствует; магнитное поле плоскопараллельно; поверхности между которыми определяются проводимости, – эквипотенциальны [68].

На основании условий (рабочая зона не заполнена ФМП, магнитный поток проходит по воздуху в зазоре) величины индукции и напряженности магнитного поля в рабочем зазоре определяются по формулам:

$$B_{зс} = k_3 \cdot B; H_{зс} = \frac{B_{зс}}{\mu_0}, \quad (2.45)$$

где  $k_3$  – коэффициент, учитывающий соотношение величин индукций в середине и центре полюсных наконечников магнита,  $k_3 = 1,05 \div 1,1$ ;

$B$  – индукция магнитопровода магнитной системы на основе ПМ, Тл.

Длина  $L_M$  и площадь нейтрального сечения  $S_M$  постоянного магнита представляют основные искомые величины [76]:

$$L_M = \frac{H_3 \cdot f \cdot \sigma}{H_d}; S_M = \frac{B_{зс} \cdot \sigma \cdot S_{зс}}{B_d}, \quad (2.46)$$

где  $f$  – коэффициент, учитывающий изменение намагничивающей силы в магнитопроводе, стыках и зазорах,  $f = 1,1 \div 1,4$ ;

$S_{зс}$  – площадь поперечного сечения рабочего зазора, м<sup>2</sup>;

$H_d$  – напряженность магнитного поля, соответствующая точке  $(BH)_{\max}$  кривой размагничивания постоянного магнита, А/м;

$\sigma$  – коэффициент рассеяния магнитного потока;

$B_d$  – индукция магнитного поля, соответствующая точке  $(BH)_{\max}$  кривой размагничивания постоянного магнита, Тл.

Согласно [144], ориентировочно величину  $\sigma$  принимаем  $10 \div 25$  для системы, армированной полюсным наконечником.

По вычисленным величинам  $L_M$ ,  $S_M$  магнитной системы и на основании результатов экспериментальных исследований потоко-

пределения в МС, магнитная цепь условно разбивается на ряд участков и рассчитывается проводимость каждого звена магнитной системы. Проводимости рабочего  $G_{\text{в}}$  и технологических воздушных зазоров  $G_{\text{т}}$  находятся по зависимостям [73, 74]:

$$G_{\delta} = \frac{\mu_0 \cdot S_{\text{зс}}}{\delta_3}; \quad G_{\text{т}} = \frac{\mu_0 \cdot S_{\text{т}}}{\delta_{\text{т}}}, \quad (2.47)$$

где  $S_{\text{т}}$  – площадь поперечного сечения технологического зазора, м<sup>2</sup>;  
 $\delta_{\text{т}}$ ,  $\delta_3$  – длины технологического и рабочего зазоров соответственно, м.

Общая проводимость всех воздушных путей магнитного потока рабочей зоны определяется по формуле [73, 74]:

$$G = G_{\delta} + G_{\text{а}} + G_{\text{м}},$$

где  $G_{\delta}$  – проводимости технологического и рабочего зазоров, м;

$G_{\text{а}}$  – проводимости отдельных участков арматуры, м;

$G_{\text{м}}$  – полная проводимость воздушных путей магнита, м.

Определение величин  $B_{\text{м}}$ ,  $H_{\text{м}}$  (индукция, напряженность постоянного магнита) и  $B_{\text{зс}}$  производится графически с помощью кривой размагничивания  $B_{\text{м}} = f(H_{\text{м}})$ . После строятся характеристики полной проводимости магнитной системы  $k_1$  и рассеяния магнита и деталей арматуры с учетом углового коэффициента  $k_2$ , соответственно [73–75]:

$$k_1 = G \frac{L_{\text{м}}}{S_{\text{м}}}; \quad k_2 = (G_{\text{м}} + G_{\text{а}}) \cdot \frac{L_{\text{м}}}{S_{\text{м}}}. \quad (2.48)$$

Величина индукции  $B_{\text{м}}$  постоянного магнита устанавливается по графической зависимости возврата, а величина  $B_{\text{зс}}$  в рабочем зазоре определяется по выражению [73, 74]:

$$B_{\text{зс}} = \frac{B_{\text{м}} \cdot S_{\text{м}}}{S_{\text{зс}} \cdot \sigma}. \quad (2.49)$$

Для расчета исследуемых конструкций магнитных систем устройств МЭУ была разработана программа с использованием языка программирования *Visual Basic 6.0* (рис. 2.14).

Программа выполняла численный расчет вариантов конструкций магнитных систем, варьируя различными магнитными материалами и размерами следующих магнитных систем: Е-образной разомкнутой, Е-образной замкнутой – с двумя оппозитно расположенными постоянными магнитами, Е-образной разомкнутой; призматической и прямоугольной форм с дополнительными замыкающими звеньями.

При расчете учитывались геометрические размеры заготовки детали; размеры, форма и материал постоянных магнитов, магнитопровода, арматуры, полюсных наконечников, технологическая схема упрочнения (одно- или многополюсная схема обработки, т. е. количество полюсов МС).

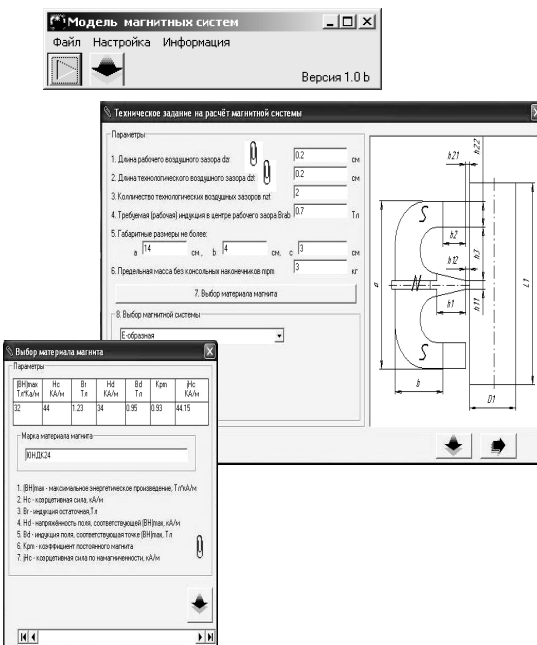


Рис. 2.14. Фрагменты интерфейса программы расчета конструкций магнитных систем для установок МЭУ

Расчет магнитных систем с применением программы производили по известной методике [73], использующей эмпирические соотношения и коэффициенты (2.43–2.45), полученные ранее и проверенные многолетним опытом [74, 75]. Программа позволяла предварительно вычислить размеры магнитной системы  $L_m, S_m$  (2.46) и построить картину рассеяния магнитного потока на основании экспериментальных данных потокораспределения в исследуемой конструкции, затем рассчитать проводимости каждого звена магнитной системы: постоянного магнита  $G_m$ , катушки магнитопровода  $G_a$ , рабочего и технологических зазоров  $G_\delta$  (2.47). Определение действительной рабочей точки графической зависимости размагничивания магнита ( $B_m, H_m$ ) с учетом марки материала магнита и магнитопровода, потоков утечки  $\Phi$ , сопротивления в зазорах и стыках проводились графическим методом, используя зависимость  $B_m = f(H_m)$ .

После этого определялись напряженность  $H_{zc}$  и индукция  $B_{zc}$  магнитного поля в рабочем зазоре, а также величина коэффициента рассеяния магнитного поля  $\sigma$  для оптимизируемой конструкции магнитной системы (2.48, 2.49). В случае несовпадения полученного значения  $B_{zc}$  с заданным размером МС или отдельных ее деталей производилась корректировка, и вся цепь автоматически рассчитывалась повторно в том же порядке.

Расчет магнитных систем проводили при следующих постоянных значениях факторов: рабочий зазор,  $\delta_n = 2,0$  мм; материал магнитопровода – отожженная сталь Ст. 3 ГОСТ 380–88; диаметр обрабатываемой заготовки 40 мм; материал заготовки – сталь 45 ГОСТ 1050–88; величина индукции в рабочем зазоре,  $B_{zc} = 0,7$  Тл.

Анализ полученных данных расчетов магнитных систем показал, что наиболее рациональной является разомкнутая конструкция МС на основе Е-образного магнита из сплава ЮНДК24Т ГОСТ 17809–72, имеющего длину,  $L_m = 125$  мм и площадь нейтрального сечения последнего,  $S_m = 23,5 \cdot 10^2$  мм<sup>2</sup>.

Исследуемая система (рис. 2.15) состоит из экранирующего корпуса 4, внутри которого находится постоянный магнит Е-образной формы 1, к торцевым поверхностям которого примыкают два плоских наконечника 5, установленных с зазором  $\Delta_n$  относительно заготовки 6. Сердечник 2 системы со сменным полюсным наконечником 3 установлен в центральной части

магнита с возможностью регулирования величины магнитной индукции  $B_{зс}$  в рабочем зазоре посредством изменения расстояния  $\Delta_n$  между магнитотвердыми материалами (боковыми ПН) и обрабатываемой поверхностью заготовки.

При этом величина рабочего зазора  $\delta_n$  остается постоянной, а магнитный поток  $\Phi$ , который проходит по ПМ, полюсным наконечникам, рабочим и технологическим воздушным зазорам и заготовке, образует замкнутую  $\Phi$ -образную магнитную цепь.

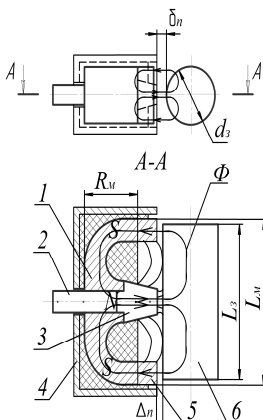


Рис. 2.15. Схема конструкции Е-образной магнитной системы с разомкнутым магнитопроводом

### 2.3.2. Определение конструктивных параметров магнитной системы на основе постоянных магнитов

Для определения конструктивных параметров магнитной системы установки МЭУ применили ЦКРУП второго порядка. В качестве исследуемого параметра приняли магнитную индукцию в рабочем зазоре  $B_{зс}$ , а независимыми переменными были факторы  $L_m$  и  $R_m$  (см. рис. 2.15).

Постоянными факторами на основании анализа расчетов магнитных систем приняты: рабочий зазор,  $\delta_n = 2,0$  мм; технологические зазоры,  $\Delta_n = 2,0$  мм; диаметр обрабатываемой заготовки 40 мм; длина обрабатываемой заготовки детали,  $L_3 = 140$  мм; длина полюсных наконечников 20 мм; материал постоянного магнита – ЮНДК24Т.

С учетом работ [26] установили условия проведения экспериментов (табл. 2.7), опыты которых рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Измерение величины магнитной индукции  $B_{зс}$  производили тесламетром Т-10/1 со специальными датчиками Холла, установленными в контрольных точках рабочего зазора (по краям и в центре).

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКРУП второго порядка с использованием стандартного пакета Excel Microsoft Office, позволила получить математико-статистическую модель в нормированном виде, определяющую зависимость исследуемого параметра  $B_{зс}$  от факторов  $L_m$  и  $R_m$ :

$$Y = 0,580 + 0,093 \cdot X_1 + 0,123 \cdot X_2 + 0,029 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,063 \cdot X_1^2 - 0,067 \cdot X_2^2. \quad (2.50)$$

Таблица 2.7

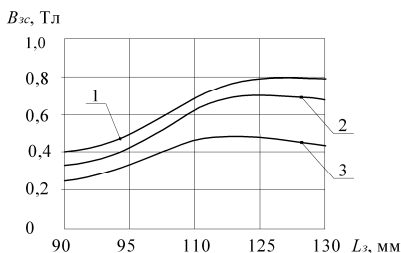
Условия проведения опытов

Уровень факторов	Технологические факторы	
	$L_{m2}$ мм	$R_{m2}$ мм
	$X_1$	$X_2$
Основной (0)	110,0	30,0
Верхний (+1)	125,0	35,0
Нижний (-1)	95,0	25,0
Звездная точка (+ $\alpha$ )	130,0	38,0
Звездная точка (- $\alpha$ )	90,0	22,0
Интервалы варьирования:		
основной	15,0	5,0
по $\alpha$	20,0	8,0

Выявлено, что все коэффициенты регрессии (2.50) значимы с 95 %-й доверительной вероятностью по критерию Стьюдента. Также установлено, что математическая модель адекватна при 5 %-м уровне значимости по критерию Фишера.

Степень влияния факторов  $L_m$  и  $R_m$  на параметр  $B_{зс}$  определяли по величине коэффициентов модели (2.50), геометрическая интерпретация которой представлена в виде одномерных сечений в двумерной системе координат (рис. 2.16).





1 –  $R_M = 38$  мм; 2 –  $R_M = 36$  мм; 3 –  $R_M = 30$  мм

Рис. 2.16. Зависимость величины магнитной индукции в рабочем зазоре от длины постоянного магнита при следующих значениях его ширины

Для определения оптимального значения величины параметра  $B_{зс}$  в уравнении регрессии использовали два фактора – длину постоянного магнита  $L_M$  и фиксированную стандартную ширину  $R_M$  последнего, равную 30,0; 36,0; 38,0 мм.

Для определения размеров (минимального объема магнита  $V_{M_{\min}}$ ) принимали следующие ограничения:

$95,0 \text{ мм} < (X_1) L_M < 125,0 \text{ мм}$ ;  $30,0 \text{ мм} < (X_2) R_M < 38,0 \text{ мм}$ ;  
 (Y)  $B_3 = 0,7 \text{ Тл}$ .

Нахождение величины магнитной индукции в рабочем зазоре МС на ПМ выполнялось с использованием математического пакета MathCAD.

В результате выполненных расчетов, получены оптимальные геометрические размеры магнитной системы ( $L_M = 125,0$  мм и  $R_M = 36,0$  мм, а также масса магнитной системы без арматуры 1,8 кг), обеспечивающие в рабочем зазоре требуемую величину магнитной индукции  $B_{зс} = 0,7 \text{ Тл}$ .

### 2.3.3. Синтез магнитопроводов различной конфигурации с использованием постоянных магнитов

Так как расчет конструктивных параметров магнитной системы на основе постоянного магнита Е-образной формы выполнен с некоторыми допущениями, потребовалось проведение экспериментальных исследований различных конфигураций МС с постоянными магнитами [68]. Экспериментально определены величина магнитной индукции и характер распределения магнитного поля в рабочем зазоре. Форма постоянных магнитов

при одинаковой массе и ориентации их полюсов относительно поверхности обрабатываемой заготовки детали варьировалась. Для этого в установке (см. рис. 2.11) в направляющих пазах основания 2 устанавливались постоянные магниты 3 различной формы. Измерение магнитной индукции осуществлялось посредством тесламетра Т-10/1 и специальными датчиками Холла 11, установленными по краям и в центре рабочего зазора.

Опыты проводили при следующих постоянных значениях факторов: рабочий зазор 2,0 мм, магниты из сплава ЮНДК24Т, масса магнитотвердых материалов 1,8 кг, магнитопровод из отожженной стали Ст. 3, диаметр обрабатываемой заготовки 40 мм, материал заготовки сталь 45. В качестве переменных значений факторов выступали: форма ПМ, расстояние от заготовки до магнитов (технологические зазоры).

Исследования выполнены для конструкций МС, представленных на рис. 2.17 (а–з).

Система 1 (рис. 2.17, а) является разомкнутой и представляет собой два оппозитно расположенных звена, каждый из которых состоит из магнитопровода длиной 100 мм с полюсным наконечником и постоянного магнита квадратного сечения.

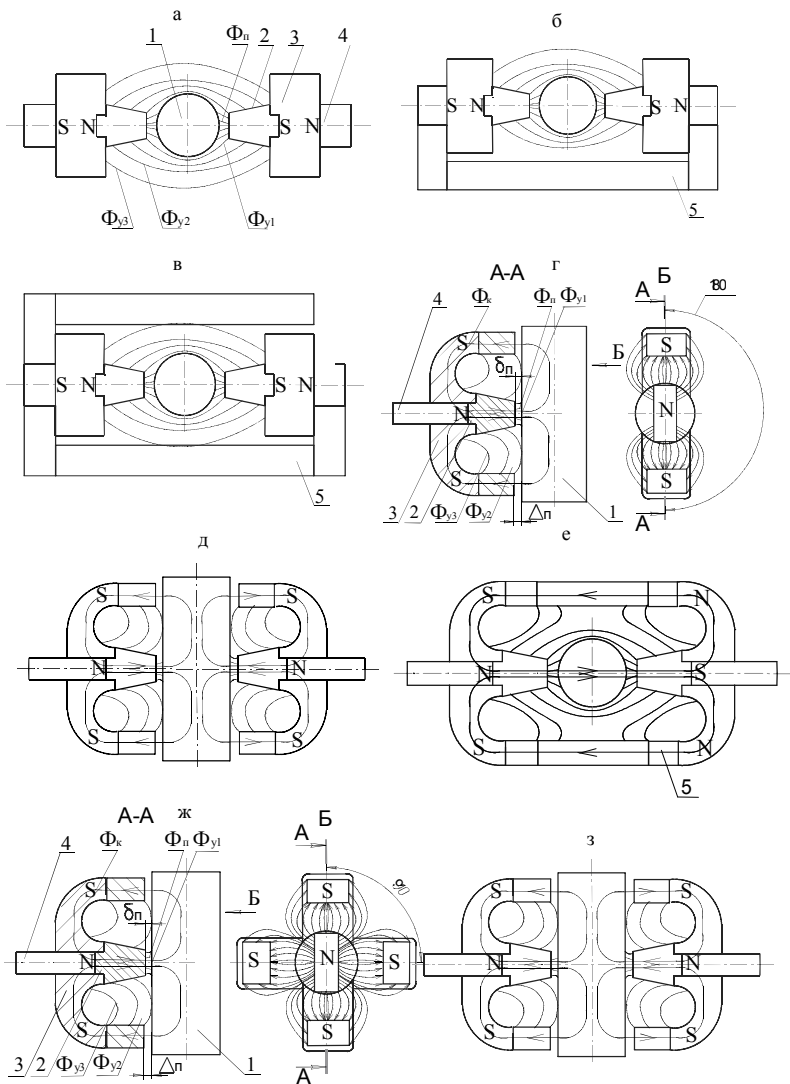
Система 2 (рис. 2.17, б) является замкнутой и дополнительно к элементам магнитопровода с полюсными наконечниками и постоянными магнитами крепится замыкающее звено длиной 200 мм.

Система 3 (рис. 2.17, в) также замкнута, содержит добавочную симметричную ветвь замыкающего звена.

Система 4 (рис. 2.17, г) является разомкнутой и представляет собой одно звено, состоящее из постоянного магнита Е-образной формы, в отверстие которого входит сердечник магнитопровода длиной 100 мм с полюсным наконечником. Сердечник магнитопровода выполнен круглого сечения с целью сведения к минимуму рассеяния магнитного потока [140, 142].

Система 5 (рис. 2.17, д) является разомкнутой и представляет собой два оппозитно расположенных звена, состоящих из двух постоянных магнитов Е-образной формы, двух сердечников магнитопроводов с ПН.

Системы 4 и 5 расположены в горизонтальной плоскости относительно обрабатываемой заготовки. При этом одноименные полюса магнитов расположены под углом 180°.



1 – заготовка; 2 – полюсный наконечник; 3 – постоянный магнит; 4 – сердечник; 5 – замыкающее звено

Рис. 2.17. Схемы магнитных систем с разомкнутым (а, б, г, д, ж, з) и замкнутым (в, е) магнитопроводами

Система 6 (рис. 2.17, *е*) является замкнутой и представляет собой два оппозитно расположенных звена в вертикальной плоскости, а к двум постоянным магнитам Е-образной формы дополнительно крепятся замыкающие звенья длиной 200 мм. Одноименные полюса магнитов расположены под углом 180°.

Система 7 (рис. 2.17, *ж*) является разомкнутой и представляет собой два звена, состоящих из двух постоянных магнитов Е-образной формы, двух сердечников магнитопроводов с полюсными наконечниками. Одноименные полюса ПМ расположены под углом 90°. Система 8 (рис. 2.17, *з*) показывают, что система 1 (см. рис. 2.17, *а*) обеспечивает получение наименьшей величины магнитной индукции в рабочем зазоре, является разомкнутой и представляет собой два оппозитно расположенных звена, состоящих из четырех постоянных магнитов Е-образной формы, двух сердечников магнитопроводов с полюсными наконечниками. Одноименные полюса магнитов расположены под углом 90°. Результаты исследований сердечника магнитопровода длиной 100 мм и полюсного наконечника представлены на рис. 2.18.

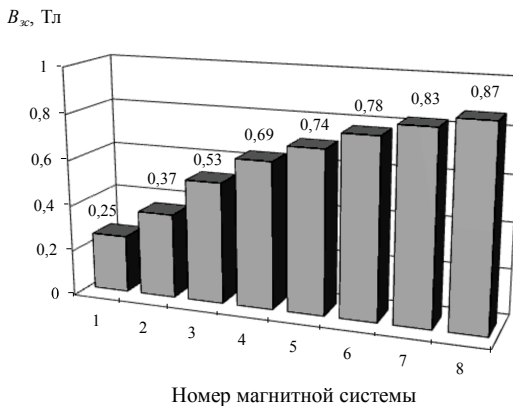
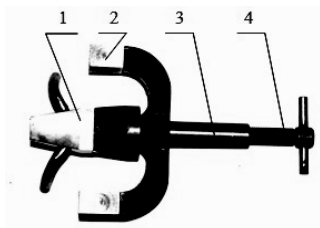


Рис. 2.18. Зависимости значений магнитной индукции в рабочем зазоре от конструктивного исполнения магнитных систем

Это связано, прежде всего, с тем, что для данной разомкнутой МС наряду с рабочим (полезным) магнитным потоком  $\Phi_n$ , проходящим по стальным участкам магнитопровода, в значительной степени присутствуют потоки утечки (рассеяния)  $\Phi_y$ .

Данные потоки не попадают в стальную арматуру и проходят по воздуху с боковых и торцевых поверхностей полюсного наконечника ( $\Phi_{y1}$ ,  $\Phi_{y2}$ ), а также с боковых поверхностей постоянных магнитов ( $\Phi_{y3}$ ). Добавление к магнитам квадратного сечения замыкающих звеньев в виде бруска длиной 200 мм (системы 2 и 3, представленные на рис. 2.17, б, в) позволяет уменьшить потоки рассеяния и тем самым увеличить полезный поток. Однако такое решение не обеспечивает получение необходимой величины индукции в рабочем зазоре.

Более эффективна, исходя из конструктивных особенностей устройств МЭУ, магнитная система 4 (см. рис. 2.17, г), состоящая из постоянного магнита Е-образной формы (рис. 2.19).



1 – полюсный наконечник; 2 – постоянный магнит; 3 – сердечник магнита;  
4 – винт регулировочный

Рис. 2.19. Фотография исследуемой конструкции  
Е-образной магнитной системы

Достоинство ее состоит в том, что данный магнит образует два кольцевых рабочих магнитных потока  $\Phi_k$ , которые, замыкаясь, проходят через обрабатываемую заготовку. Тем самым значительно уменьшаются потоки рассеяния ( $\Phi_{y1}$  и  $\Phi_{y2}$ ) и обеспечивается высокая концентрация магнитного потока в рабочем зазоре. Установлено удовлетворительное совпадение расчетных данных и результатов измерений. Так, расхождение величины магнитной индукции принятой для расчета и измеренной в рабочем зазоре составило  $0,04 \div 0,07$  Тл (или  $5\% \div 8\%$ ).

Сравнительный анализ систем 5 и 6 (см. рис. 2.17, д и е) показывает, что применение оппозитно расположенных магнитов с арматурой, у которых одноименные полюса расположены под углом  $180^\circ$ , позволяет увеличить индукцию на  $6,8\%$  и  $11,5\%$  соответственно по сравнению с системой 4.

Следует отметить, что решающее значение расположения магнитов по отношению к обрабатываемой заготовке детали. Так, вер-

тикальное расположение системы 6 (см. рис. 2.17, *е*) позволяет получить большую индукцию магнитного поля в рабочем зазоре за счет меньшего количества технологических зазоров. Расположение магнитов Е-образной формы с одноименно расположенными полюсами магнитов под углом  $90^\circ$  (см. рис. 2.17, *ж, з*), позволяет увеличить индукцию на 16,9 и 20,7 % соответственно по сравнению с системой 4. При этом вдвое увеличивается количество применяемого магнитотвердого материала и арматуры, что, несомненно, повышает производительность МЭУ за счет большей площади обрабатываемой поверхности. Применение данных МС рекомендуется для МЭУ плоских поверхностей и последующей магнитно-абразивной обработки.

Таким образом, анализ схем и результатов измерений магнитной индукции в рабочем зазоре систем 1÷8 (рис. 2.17 и 2.18) показывает, что наиболее рациональными являются магнитные системы 4÷8, которые обеспечивают необходимую концентрацию полезного магнитного потока в рабочей зоне [68]. Конструкции этих МС предполагают симметричное расположение постоянных магнитов относительно друг друга и на максимально близком расстоянии к рабочей зоне и заготовке детали.

Для обработки деталей типа тела вращения рекомендуются схемы (см. рис. 2.17, *г, д*) с расположением одноименных полюсов под углом  $180^\circ$ , а для обработки плоских поверхностей деталей – схемы с расположением одноименных полюсов под углом  $90^\circ$  (см. рис. 2.17, *ж, з*) [26].

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что переменное магнитное поле, генерируемое магнитной системой с электромагнитом, недостаточно однородно, в частности, изменение среднего значения величины индукции по длине полюсного наконечника в рабочем зазоре составило  $0,03 \div 0,07$  Тл. В аналогичных условиях магнитное поле, генерируемое магнитной системой с постоянным магнитом, более однородно, так как изменение среднего значения величины индукции по длине полюсного наконечника в рабочем зазоре составило  $0,01 \div 0,02$  Тл.

Одним из основных факторов, влияющих на изменение свойств постоянных магнитов, является температура их нагрева и продолжительность эксплуатации. В связи с этим проводились экспериментальные исследования по определению степени влияния температуры на стабильность характеристик постоянного магнита на установке модели УНП 1 в течение 1120 часов. Измерение температуры производили с помощью хромель-алюмелевой

термопары, установленной в отверстие сердечника полюсного наконечника магнитной системы. Термопару подключали к регистрирующему прибору Ф564 компенсационными проводами. Термоэлектродвижущая сила на 100 °С составляла 3,4 мВ.

Степень влияния на обратимые изменения свойств постоянного магнита определяли температурным коэффициентом магнитной индукции [26, 75]:

$$\alpha_B = \frac{\Delta B_{3c}}{B_{3c} \cdot \Delta t},$$

где  $\Delta B_{3c}$  – изменение индукции, вызванное изменением температуры на  $\Delta t$ , Тл;

$B_{3c}$  – магнитная индукция в рабочем зазоре при начальной температуре, Тл;

$\Delta t$  – изменение температуры, °С.

В результате проведенного эксперимента установлено, что при одновременном охлаждении рабочей жидкостью сменного ПН и заготовки детали температура нагрева постоянного магнита находилась в пределах 30 °С÷80 °С, изменение магнитной индукции  $\Delta B_{3c}$  в рабочем зазоре наблюдалось в пределах (0,05÷0,10) Тл, а среднее значение температурного коэффициента МС составляет  $\alpha_B = 0,018 \text{ \%}/1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Проведенные исследования стабильности характеристики магнитотвердого материала показали, что постоянный магнит Е-образной формы обеспечивает требуемые технические и эксплуатационные характеристики, предъявляемые к магнитной системе для установки магнитно-электрического упрочнения модели УНП 1.

Таким образом, в результате теоретических и экспериментальных исследований суперпозиций импульсов электрических разрядов и магнитного поля в рабочем зазоре устройств магнитно-электрического упрочнения установлено, что наибольшее влияние на силу прижима цепочки-микроэлектрода оказывают амплитудная (до 9 %) и фазовая (до 25 %) составляющие магнитной индукции. Обоснована необходимость стабилизации переменных сил прижима цепочек-микроэлектродов к обрабатываемой поверхности путем применения магнитотвердых материалов, обеспечивающих стабильность

формирования и устойчивое положение цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре. Экспериментально установлено, что наибольшую стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения обеспечивают постоянные магниты с величиной индукции, равной 0,7 Тл в рабочем зазоре 2,0 мм при высоте полюсного наконечника 5,7 мм и угле охвата  $12^\circ$ .

В результате численных расчетов и экспериментальных исследований в соответствии с разработанной методикой определения конструктивных параметров магнитной системы устройства магнитно-электрического упрочнения в зависимости от параметров рабочей зоны устройства и технологической схемы наплавки установлена рациональная конструкция магнитной системы на основе постоянного магнита E-образной формы из сплава ЮНДК24Т, получены математико-статистические зависимости магнитной индукции в рабочем зазоре  $B_{зс}$  от длины  $L_m$  и ширины  $R_m$  магнита и определены его оптимальные конструктивные размеры:  $L_m = 125$  мм,  $R_m = 36$  мм и масса системы без арматуры 1,8 кг.

Установлено, что оптимальной является E-образная форма постоянных магнитов, у которых одноименные полюса расположены под углами  $180^\circ$  и  $90^\circ$ . Показано, что целесообразно применять для обработки поверхностей цилиндрических деталей – с расположением одноименных полюсов под углом  $180^\circ$ , а для обработки плоских деталей – под углом  $90^\circ$ .

## **2.4. Исследование технологических параметров магнитно-электрического упрочнения**

### **2.4.1. Моделирование процесса магнитно-электрического упрочнения**

Ввиду высокой сложности описания в магнитном поле физических процессов осаждения расплавляемых ферромагнитных частиц порошка на поверхность металла и большого числа факторов, влияющих на эти процессы, исследование технологии магнитно-электрического упрочнения выполнено на основе стохастического подхода. Эффективной методологией решения этой проблемы является математическое моделирование, основанное на получении



многофакторных уравнений, описывающих поведение технологического процесса, и его многокритериальную оптимизацию с помощью построенной математической модели.

В качестве параметров оптимизации МЭУ приняты производительность процесса  $Q$ , мг/мин и сплошность покрытия, СП %. Производительность магнитно-электрического упрочнения оценивалась по массе покрытия, нанесенного на упрочняемую поверхность в единицу времени. Измерения веса образцов производились до и после упрочнения на лабораторных весах ВЛА-200-2М с точностью до 0,001 г. Для определения сплошности покрытия на участках длиной 10 мм проводили измерения длины поверхности с покрытием в продольном и поперечном направлениях. Длину участков измеряли на большом инструментальном микроскопе (БИМ-1Ц). Сплошность покрытия рассчитывали, как отношение суммы длин с покрытием ко всей длине участка. Значение показателей для данных условий МЭУ определялось как среднее арифметическое результатов замеров на пяти образцах.

Экспериментальные исследования проводились на образцах из стали 30ХГС ГОСТ 4543–71, представляющих собой кольца с наружным диаметром 40 мм, внутренним – 16 мм и высотой 12 мм. Масса исходных образцов – 125 г. Образцы подвергались нормализации и обрабатывались до шероховатости поверхности  $Ra = 12,5$  мкм. Упрочнение поверхностей образцов с использованием двухкомпонентного легированного порошка на основе железа Fe-2V% проводилось на экспериментальной установке модели УНП-1, смонтированной на токарно-винторезном станке модели 1Е61М.

На постоянных уровнях поддерживались следующие технологические факторы: размер частиц композиционного порошка  $\Delta = 240 \div 320$  мкм; величина рабочего зазора  $\delta = 1,0$  мм; расход смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ)  $q = 0,4 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/с·мм<sup>2</sup> – (5 %-й раствор эмульсола Э<sub>2</sub> в воде).

Исходя из априорной информации, в качестве независимых управляющих факторов приняты технологические факторы, которые оказывают наибольшее влияние на показатели формирования упрочненного слоя (табл. 2.8).

Величину тока в катушках электромагнитов  $I_k$ , обеспечивающего заданное значение магнитной индукции  $B$ , определяли из зависимости  $B = f(I_k)$ , построенной по экспериментальным данным.

Таблица 2.8

Перечень управляющих технологических факторов и средств их измерения

Технологические факторы		Методы регулирования	Средства измерения	Точность фиксации
наименование	обозначения и единицы измерения			
Величина магнитной индукции в рабочем зазоре	$B$ , Тл	величиной тока в катушках электромагнитов	Измеритель магнитной индукции ИМИ-1	$\pm 1,5\%$
Плотность разрядного тока	$i$ , А/мм <sup>2</sup>	изменением параметров электрических импульсов инверторного сварочного источника	Источник технологического тока Invertec V270 T	$\pm 2\%$
Удельная длительность упрочнения	$\tau$ , с/см <sup>2</sup>	продольной подачей полосного наконечника электромагнита относительно упрочняемой поверхности	Секундомер	$\pm 0,05$ с/см <sup>2</sup>
Окружная скорость заготовки детали	$V$ , м/с	настройкой токарно-винторезного станка мод. 1Е61М	Механический тахометр MVR RY-850	$\pm 0,02\%$
Подача ферромагнитного порошка	$q$ , г/с	изменением величины напряжения электродвигателя вибратора	Весы аналитические ВЛА-200-2М	$\pm 1$ мг/с

На основе анализа существующих вариантов и методов математического моделирования технологических процессов [77–80] установлено, что процесс МЭУ можно адекватно описать регрессионными уравнениями второго порядка. Для получения необходимых данных были реализованы опыты по матрице центрального композиционного ротатабельного равномерного плана экспериментов. Интервалы варьирования управляющих технологических факторов приведены в табл. 2.9. Результаты опытов и рассчитанные значения статистических критериев представлены в табл. 2.10.

Таблица 2.9

Интервалы варьирования технологических факторов

Уровень факторов	Технологические факторы				
	$B$ , Тл	$i$ , А/мм <sup>2</sup>	$\tau$ , с/см <sup>2</sup>	$V$ , м/с	$q$ , г/с
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
Основной (0)	0,60	1,80	2,50	0,06	0,17
Верхний (+1)	0,75	2,20	3,00	0,08	0,20
Нижний (-1)	0,45	1,40	2,00	0,04	0,14
Звездная точка (+ $\alpha$ )	0,90	2,60	3,50	0,10	0,23
Звездная точка (- $\alpha$ )	0,30	1,00	1,50	0,02	0,11

Таблица 2.10

Матрица планирования экспериментов, результаты опытов  
и их статистические оценки

Номер опыта	$B,$ Тл	$i,$ А/мм <sup>2</sup>	$\tau,$ с/см <sup>2</sup>	$V,$ м/с	$q,$ г/с	дубли	$Q,$ мг/мин		СП, %	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$		эксп. средн.	расч.	эксп. средн.	расч.
1	-1	-1	-1	-1	1	5	213,8	214,0	68,4	67,9
2	1	-1	-1	-1	-1	5	219,2	219,4	72,6	72,3
3	-1	1	-1	-1	-1	5	216,6	216,6	66,6	66,1
4	1	1	-1	-1	1	5	226,0	226,0	91,4	91,1
5	-1	-1	1	-1	-1	5	205,4	205,5	79,4	79,4
6	1	-1	1	-1	1	5	221,6	221,7	99,8	100,0
7	-1	1	1	-1	1	5	213,2	213,0	90,6	90,6
8	1	1	1	-1	-1	5	220,8	220,7	92,2	92,4
9	-1	-1	-1	1	-1	5	204,0	203,9	78,4	77,6
10	1	-1	-1	1	1	5	223,2	223,1	91,4	90,8
11	-1	1	-1	1	1	5	212,2	212,3	78,8	78,6
12	1	1	-1	1	-1	5	239,2	239,3	99,0	99,0
13	-1	-1	1	1	1	5	219,6	219,5	86,0	85,6
14	1	-1	1	1	-1	5	216,8	216,7	91,8	91,6
15	-1	1	1	1	-1	5	203,2	203,3	88,0	88,2
16	1	1	1	1	1	5	223,8	223,9	100	100,4
17	-2	0	0	0	0	5	195,0	195,0	73,4	74,1
18	2	0	0	0	0	5	220,8	220,7	100	100,0
19	0	-2	0	0	0	5	217,6	217,6	88,4	89,4
20	0	2	0	0	0	5	225,4	225,4	100	99,7
21	0	0	-2	0	0	5	221,6	221,5	77,0	78,2
22	0	0	2	0	0	5	213,8	213,9	100	99,4
23	0	0	0	-2	0	5	223,0	222,9	72,2	72,4
24	0	0	0	2	0	5	224,2	224,2	85,0	85,4
25	0	0	0	0	-2	5	220,2	220,2	83,8	84,2
26	0	0	0	0	2	5	227,2	227,2	93,6	93,9
27	0	0	0	0	0	30	224,6	224,6	95,6	95,5
Дисперсия воспроизводимости							0,316		1,98	
Дисперсия адекватности							0,180		3,84	
Критерий Фишера					эксперим.		1,75		1,94	
					критич.		2,96		2,01	

Обработка результатов экспериментов выполнена по алгоритму шагового регрессионного анализа с последовательным исключением из уравнения регрессии коэффициентов, статистически незначимых по критерию Стьюдента. Вычислительная процедура реализована в программе Mathcad.

В результате получены уравнения в нормированных координатах, определяющие зависимости производительности процесса МЭУ  $Q$ , мг/мин и сплошности покрытия СП, % от управляющих технологических факторов:

$$Q = 224,61 + 6,43X_1 + 1,96X_2 - 1,89X_3 + 0,33X_4 + 1,76X_5 + 1,66X_1X_2 - 1,21X_1X_3 + 1,59X_1X_4 - 1,94X_1X_5 - 2,26X_2X_3 - 2,34X_2X_5 + 2,24X_3X_5 + 0,19X_4X_5 - 4,18X_1^2 - 0,78X_2^2 - 1,73X_3^2 - 0,26X_4^2 - 0,23X_5^2. \quad (2.51)$$

$$СП = 95,49 + 6,47X_1 + 2,58X_2 + 5,30X_3 + 3,25X_4 + 2,42X_5 + 0,95X_1X_2 - 1,40X_1X_3 + 2,80X_3X_4 - 0,98X_1X_5 - 0,70X_2X_3 - 0,53X_2X_5 + 0,73X_3X_5 - 2,53X_4X_5 - 2,11X_1^2 - 0,24X_2^2 - 1,66X_3^2 - 4,14X_4^2 - 1,61X_5^2. \quad (2.52)$$

Установлено, что регрессионные модели адекватны при 5 %-м уровне значимости по критерию Фишера (см. табл. 2.10).

Полученные математические стохастические модели процесса МЭУ позволяют установить характер и степень влияния технологических факторов на параметры оптимизации и определить оптимальные режимы нанесения упрочняющих покрытий.

#### **2.4.2. Влияние технологических факторов на параметры оптимизации**

Многофакторное математическое моделирование, основанное на получении уравнений регрессии, описывает технологический процесс в широком диапазоне взаимодействия входных факторов и взаимовлияния выходных параметров.

Полученные математико-статистические модели процесса МЭУ позволяют установить степень и характер влияния технологических режимов на производительность МЭУ и сплошность покрытий (табл. 2.11), а также диапазоны рациональных режимов упрочнения.

Таблица 2.11

Степень влияния технологических режимов на производительность МЭУ  
и сплошность покрытия

Технологические режимы	Степень влияния технологических режимов на	
	производительность, $Q$ , %	на сплошность покрытия, СП, %
Величина магнитной индукции, $B$ , Тл	51,98	32,32
Плотность разрядного тока, $i$ , А/мм <sup>2</sup>	15,84	12,89
Удельная длительность упрочнения, $\tau$ , с/см <sup>2</sup>	15,28	26,47
Окружная скорость заготовки, $V$ , м/с	2,67	16,23
Подача ферромагнитного порошка, $q$ , г/с	14,23	12,09

Анализ математико-статистических моделей (2.51) и (2.52) и данных табл. 2.11 показывает, что в порядке убывания значимости влияния на исследуемый параметр технологические режимы можно расположить в следующий ряд:

$$Q: B \rightarrow i \rightarrow \tau \rightarrow q \rightarrow V;$$

$$СП: B \rightarrow \tau \rightarrow V \rightarrow i \rightarrow q.$$

По обобщенной значимости степень влияния технологических режимов в порядке ее убывания располагается в такой последовательности: магнитная индукция  $B$ , удельная длительность упрочнения  $\tau$ , плотность разрядного тока  $i$ , подача ферромагнитного порошка  $q$  и окружная скорость заготовки  $V$ .

При анализе влияния величины конкретного технологического режима на исследуемые параметры процесса в уравнениях (2.51) и (2.52) все остальные режимы были стабилизированы на нулевом уровне. Каждая зависимость представлена в графическом виде и приведено ее физическое толкование.

Наибольшее влияние как на производительность процесса МЭУ, так и на сплошность покрытия оказывает величина магнитной индукции  $B$  в рабочем зазоре. При ее увеличении до 0,75 Тл интенсивно возрастают как производительность процесса, так и сплошность покрытия (рис. 2.20).

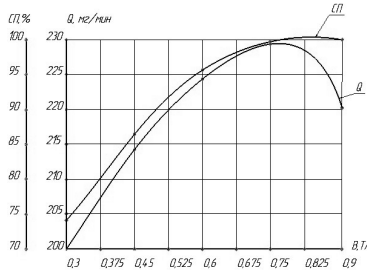


Рис. 2.20. Зависимость производительности  $Q$ , мг/мин МЭУ и сплошности покрытия СП, % от величины магнитной индукции  $B$ , Тл

Такой характер зависимостей можно объяснить тем, что величина магнитной индукции влияет не только на интенсивность образования цепочек-микроэлектродов из зерен упрочняющего ФМП, но и на электрическую проводимость этих токопроводящих цепочек. При прохождении электрического тока по образовавшимся цепочкам последние можно рассматривать как проводники с током, находящиеся во внешнем магнитном поле. На элемент цепочки длиной  $\Delta l$  в рабочем зазоре действует сила

$$\Delta F = I \cdot B \cdot \Delta l,$$

где  $I$  – величина разрядного тока в цепочке, А;

$B$  – величина магнитной индукции в рабочем зазоре, Тл.

Если цепочка располагается строго вдоль магнитных силовых линий, то сила  $\Delta F$  равна нулю. Однако в реальном процессе в рабочем зазоре одновременно формируется множество токопроводящих цепочек с различной электрической проводимостью, и некоторые из них могут иметь направление, не совпадающее с направлением магнитных силовых линий. В таком случае на зерна ферромагнитного порошка действуют силы  $\Delta F$  и силы взаимодействия токов в цепочках, которые с увеличением магнитной индукции способны разорвать цепочку до момента прохождения электрического разряда и расплавления зерен. Этим можно объяснить наличие экстремумов в зависимостях на рис. 2.20.

Вторым по значимости технологическим режимом является удельная длительность упрочнения  $\tau$ , качественное влияние которой и на производительность процесса, и на сплошность покрытия одинаковое (рис. 2.21).

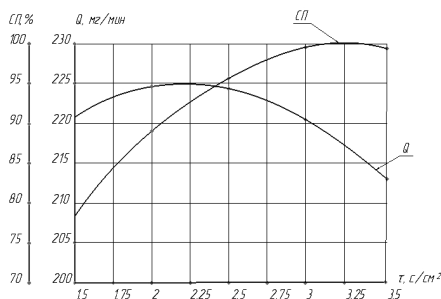


Рис. 2.21. Зависимость производительности  $Q$ , мг/мин МЭУ и сплошности покрытия СП, % от удельной длительности упрочнения  $\tau$  (с/см<sup>2</sup>)

Однако максимум производительности достигается при длительности упрочнения 2,25 с/см<sup>2</sup>, а максимум сплошности покрытия – при длительности упрочнения 3,25 с/см<sup>2</sup>. Для выявления причин снижения массы наносимого покрытия с увеличением времени упрочнения была проведена серия экспериментов, результаты которых позволили раскрыть механизм формирования покрытия.

С увеличением времени производительность МЭУ повышается, достигает максимального значения, затем уменьшается (рис. 2.22).

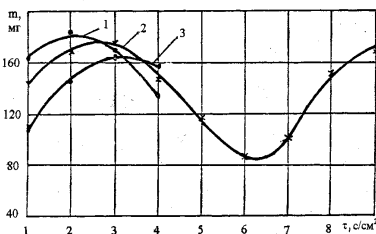


Рис. 2.22. Зависимости изменения массы покрытия  $m$  от удельной длительности упрочнения  $\tau$  при напряжении между полюсами 34 В (1), 29 В (2), 23 В (3)

Упрочненный слой формируется путем образования на поверхности детали множества точечных вкраплений из расплавленного материала частиц порошка. Образовавшиеся после первых разрядов точечные вкрапления материала порошка выступают над поверхностью детали. Являясь концентраторами магнитного поля, они притягивают последующие цепочки из частиц порошка и тем самым способствуют возникновению

электрических разрядов на уже упрочненной поверхности. В результате воздействия электрических разрядов первоначальные вкрапления частично разрушаются. Следовательно, процесс МЭУ одновременно сопровождается двумя явлениями: нанесением покрытия и его эрозией. Масса наносимого покрытия в каждый момент времени зависит от того, какое явление преобладает. Из рис. 2.22 видно, что на восходящей линии зависимости преобладает нанесение покрытия, а на нисходящей – явление эрозии преобладает над нанесением покрытия.

Покрытие наносится в один слой: первоначально на поверхности формируются единичные точечные вкрапления округлой формы, затем свободные участки заполняются новыми вкраплениями. При этом сплошность покрытия (см. рис. 2.22) и его масса увеличиваются, а толщина практически не изменяется. Рельеф упрочненной поверхности состоит из хаотически расположенных выступов и мелких лунок. Продолжительность упрочнения, в течение которого масса перенесенного материала порошка на поверхность детали достигает первого максимума, считается оптимальной.

Из рис. 2.21 следует, что компромиссное значение величины удельной длительности упрочнения для производительности МЭУ и сплошности покрытия находится в интервале  $(2,25 \div 3,25)$  с/см<sup>2</sup>. Из полученных данных можно сделать вывод, что МЭУ следует вести с удельной длительностью упрочнения  $\tau$ , не превышающей 2,8 с/см<sup>2</sup>.

Существенное влияние на производительность  $Q$  процесса и сплошность покрытия оказывает плотность разрядного тока  $i$  (рис. 2.23).

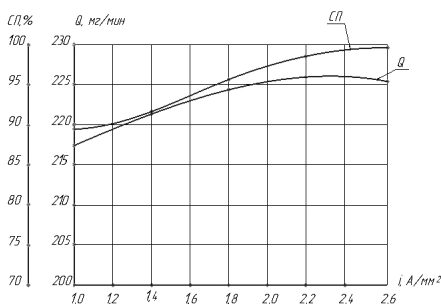


Рис. 2.23. Зависимость производительности  $Q$ , мг/мин МЭУ и сплошности покрытия СП, % от плотности разрядного тока  $i$ , А/мм<sup>2</sup>



Плотность разрядного тока характеризует степень энергетического воздействия электрических разрядов при расплавлении металла зерен и формировании покрытия. При увеличении плотности разрядного тока до  $2,4 \text{ А/мм}^2$  происходит интенсивное преобразование электрической энергии в тепловую, необходимую для расплавления материала зерен ферромагнитного порошка, расположенных в цепочках-микроэлектродах, и осаждение расплава на упрочняемой поверхности. При большей плотности разрядного тока мощность подводимой энергии возрастает, в результате чего увеличиваются производительность процесса МЭУ и сплошность покрытия. Вместе с тем, при превышении максимального значения плотности тока (более  $2,4 \text{ А/мм}^2$ ) производительность снижается, так как, согласно источникам [81], возрастает вероятность возникновения электрического разряда у поверхности полюсного наконечника по причине увеличения коэффициента передачи энергии. Плотность разрядного тока при МЭУ определяется как мощностью, формой и частотой импульсов источника технологического тока, так и электрической проводимостью токопроводящих цепочек, зависящей от величины магнитной индукции [8].

$$R_{i(i+1)} = p_f t_f / (\pi r^2 f_u^{0,75}), \quad (2.53)$$

где  $R_i$  – сопротивление в контакте, м;

$p_f$  – удельное сопротивление оксидной пленки, Ом·м;

$t_f$  – суммарная толщина оксидной пленки, м;

$r$  – радиус зоны контакта, м;

$f_u$  – сила прижима частицы ФМП к упрочняемой поверхности, Н;

$$f_u = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i^2 b_i K B_{vi}^2}{\mu(L_i + \Delta_i)}, \quad (2.54)$$

где  $n$  – число частиц в цепочке-микроэлектроде;

$L_i$  – расстояние от границы  $i$ -й частицы до оси упрочняемой поверхности, м;

$\Delta_i, b_i$  – размеры большой и малой осей эллипсоида, описывающего  $i$ -ю частицу ФМП, м;

$\mu$  – магнитная проницаемость порошкового материала, Гн/м;

$K$  – магнитная восприимчивость материала ФМП, Гн/м;

$B_{vi}$  – мгновенная индукция внешнего переменного магнитного поля на границе  $i$ -й частицы порошка в рабочем зазоре, Тл.

Из (2.54) следует, что сила прижима  $f_{ц}$  цепочки-микроэлектрода к обрабатываемой поверхности определяется размерами зерен ФМП и неоднородностью внешнего магнитного поля в рассматриваемой точке рабочего зазора.

Область рационального значения плотности разрядного тока  $i$  (рис. 2.23) находится в пределах  $(2,1 < i < 2,4)$  А/мм<sup>2</sup>.

Зависимости производительности и сплошности покрытия от подачи ферромагнитного порошка в рабочий зазор  $q$  неоднозначные. Линейная зависимость производительности от подачи порошка логически вполне понятна: чем больше подаем порошка, тем больше масса переносимого его расплава. С увеличением подачи порошка в рабочем зазоре образуется большее количество токопроводящих цепочек. Это повышает производительность МЭУ.

Характер зависимости сплошности покрытия от величины подачи порошка можно объяснить тем, что наличие в рабочем зазоре одновременно большого количества токопроводящих цепочек резко увеличивает электрическую проводимость рабочего зазора и при этом появляется опасность возникновения короткого замыкания межэлектродного промежутка. Экспериментально установлено пороговое значение величины подачи ферромагнитного порошка в рабочий зазор  $q = 0,2$  г/с, свыше которого количество токопроводящих цепочек сильно возрастает. Поэтому величина подачи порошка не должна превышать 0,2 г/с. Это значение соответствует точке пересечения графиков зависимостей (рис. 2.24).

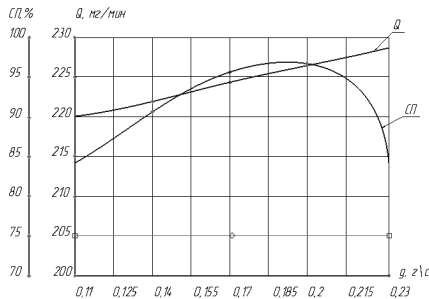


Рис. 2.24. Зависимость производительности  $Q$ , мг/мин МЭУ и сплошности покрытия СП, % от подачи ферромагнитного порошка в рабочий зазор  $q$ , г/с

Влияние величины окружной скорости заготовки  $V$  на производительность  $Q$  и сплошность покрытия СП приведено на рис. 2.25, из которого следует, что окружная скорость заготовки не оказывает существенного влияния на производительность МЭУ. Функциональное назначение этого фактора состоит в подводе к рабочей зоне новых участков упрочняемой поверхности.

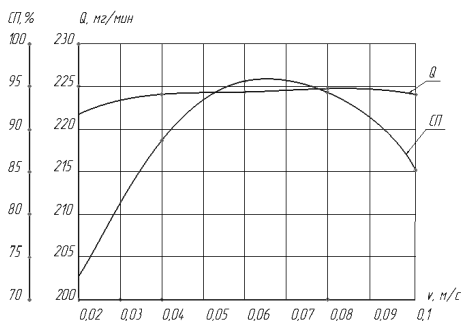


Рис. 2.25. Зависимость производительности  $Q$ , мг/мин МЭУ и сплошности покрытия СП, % от величины окружной скорости заготовки  $V$ , м/с

В интервале  $(0,02 \div 0,10)$  м/с окружной скорости движения упрочняемой поверхности резкое изменение сплошности покрытия (рис. 2.25) с возрастания на убывание может быть вызвано следующими причинами:

- с увеличением скорости вращения заготовки происходит принудительный разрыв возникших электрических разрядов «убегающей» зоной контакта;
- происходит повторный подвод одних и тех же участков поверхности, что вызывает частичную эрозию предшествующих вкраплений материала ФМП;
- с увеличением скорости вращения заготовки часть зерен ФМП под действием сил трения уносится из рабочего зазора до электрического разряда.

Установлено [14], что продолжительность электрического разряда при МЭУ составляет  $(10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-3})$  с. За это время в проведенных экспериментах упрочняемая поверхность перемещалась на расстояние не более 0,2 мм, что при диаметре вкрапления  $(1 \div 2)$  мм исключает принудительный разрыв электрических разрядов.

Следовательно, уменьшение сплошности покрытия с увеличением окружной скорости заготовки можно объяснить тем, что часть зерен ФМП уносится из рабочего зазора до электрического разряда под действием центробежной силы и силы трения зерен при их контакте с образовавшимися на поверхности неровностями в виде выступающих вкраплений металла порошка. Область рационального значения величины окружной скорости заготовки  $V$  (см. рис. 2.25) находится в пределах  $(0,06 < V < 0,07)$  м/с.

### **2.4.3. Оптимизация технологических режимов магнитно-электрического упрочнения**

В реальном процессе МЭУ из-за одновременного спонтанного формирования в рабочем зазоре множества токопроводящих цепочек с различной электрической проводимостью имеет место нестабильность процесса возбуждения и развития электрических разрядов. Эти явления возникают периодически и изменяются как в пространстве, так и во времени. Указанные особенности дают основание процесс МЭУ уподобить открытой нелинейной самоорганизующейся системе [82], подверженной колебаниям, в результате которых она развивается и движется к относительно устойчивому состоянию. Этому способствует постоянный энергетический и материальный обмен системы с окружающей средой. Нелинейный характер параметров самоорганизации процесса МАО затрудняет однозначно прогнозировать результаты обработки и оптимизировать режимы технологического процесса традиционными методами.

При решении подобных технологических задач, как правило, показатели качества (сплошность покрытия) и производительности (масса нанесенного покрытия в единицу времени) являются конфликтующими параметрами, оптимальные значения которых достижимы при различных значениях управляющих факторов. Поэтому оптимизация технологического процесса требует поиска варианта, компромиссного по обоим критериям. Эффективной методологией решения этой проблемы является математическое моделирование, основанное на получении многофакторных уравнений, описывающих поведение технологического процесса, и его многокритериальную оптимизацию с помощью построенной математической модели.

Воздействие управляющих факторов на параметры оптимизации зависит от их сочетания и взаимовлияния, на что указывают коэффициенты взаимодействия факторов в уравнениях регрессии (2.51) и (2.52). Поэтому для определения наиболее предпочтительного режима МЭУ решены задачи поиска максимумов наибольшей производительности и сплошности покрытия в границах исследованного факторного пространства (табл. 2.12). Соответствующие математические модели имеют вид:

$$\begin{aligned} Q(X_1, \dots, X_5) \rightarrow \max \quad \text{и} \quad \text{СП}(X_1, \dots, X_5) \rightarrow \max \\ -2 \leq (X_1, \dots, X_5) \leq 2 \quad -2 \leq (X_1, \dots, X_5) \leq 2. \end{aligned} \quad (2.55)$$

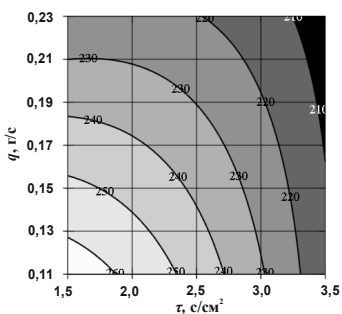
Вычислительная процедура реализована в программе Mathcad с использованием библиотеки программного обеспечения оптимизации KNITRO 7.0 и мультистарта из 100 случайных точек факторного пространства с целью поиска всех возможных локальных экстремумов.

Таблица 2.12

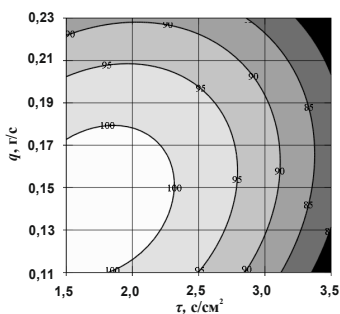
Значения технологических факторов процесса МЭУ, оптимальные по различным критериям

Технологические факторы в нормированных и натуральных координатах		Параметры оптимизации		
		$Q \rightarrow \max$	СП $\rightarrow \max$	$Q \rightarrow \max$ СП = 100 %
Величина магнитной индукции в рабочем зазоре	$X_1$	2,000		2,000
	$B$ , Тл	0,9		0,9
Плотность разрядного тока	$X_2$	2,000		1,961
	$i$ , А/мм <sup>2</sup>	2,6		2,58
Удельная длительность упрочнения	$X_3$	-2,000	1,105	-2,000
	$\tau$ , с/см <sup>2</sup>	1,5	3,05	1,5
Окружная скорость заготовки	$X_4$	2,000	- 0,488	2,000
	$V$ , м/с	0,10	0,05	0,10
Подача ферромагнитного порошка	$X_5$	-2,000	1,660	-2,000
	$q$ , г/с	0,11	0,22	0,11
Производительность процесса	$Q$ , мг/мин	265,8±1,7	206,6±1,1	265,3±1,7
Сплошность покрытия	СП, %	100,2±4,2	110,6±2,7	100±4,1

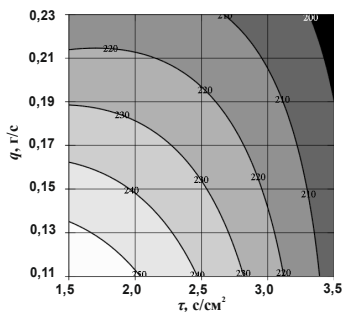
Найденные оптимальные по каждому отдельному параметру режимы МЭУ совпадают только по величине магнитной индукции и плотности разрядного тока. По другим управляющим факторам оптимальные значения лежат в разных областях факторного пространства, что наглядно отображается сечениями поверхностей отклика, представленными на рис. 2.26. При этом в области оптимальных по критерию производительности режимов достигается 100 %-я сплошность покрытия (рис. 2.26, а, 2.26, в), а по критерию максимальной сплошности эти области расположены в противоположных сторонах исследованного факторного пространства (рис. 2.26, б, з).



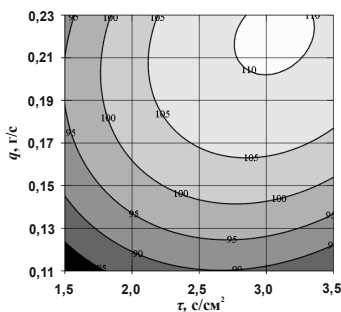
а



б



в



з

Рис. 2.26. Линии равных уровней производительности процесса  $Q$ , мг/мин (а, в) и сплошности покрытия СП, % (б, з) МЭУ в зависимости от удельной длительности упрочнения  $\tau$ , с/см<sup>2</sup> и подачи ферромагнитного порошка  $q$ , г/с при оптимальных режимах по критериям максимальной производительности (а, в) или максимальной сплошности покрытия (б, з)

Прогнозируемые значения сплошности, превышающие 100 %, указывают на то, что при этих режимах в отдельных областях будет либо наноситься покрытие увеличенной толщины, либо происходить эрозия покрытия.

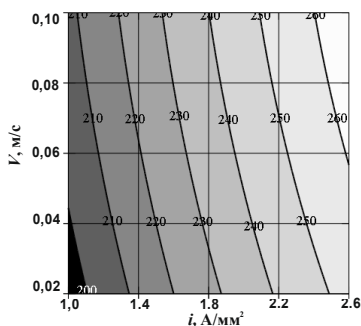
Кроме того, режимы, оптимальные по критерию максимальной производительности, лежат на границах интервалов варьирования управляющих факторов, где по матрице плана эксперимента наблюдения отсутствовали, что может вызывать значительную погрешность прогнозирования вследствие экстраполяции в неисследованную область.

Для поиска компромиссного по обоим критериям решения были рассчитаны режимы МЭУ по следующей математической модели (см. табл. 2.12):

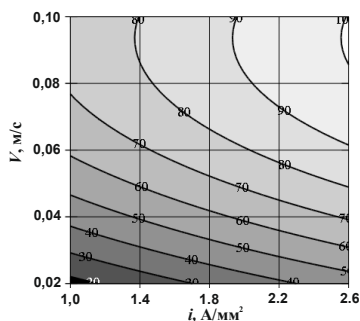
$$\begin{aligned} Q(X_1, \dots, X_5) &\rightarrow \max \\ \text{СП}(X_1, \dots, X_5) &= 100\% \\ -2 &\leq (X_1, \dots, X_5) \leq 2. \end{aligned} \tag{2.56}$$

Полученное решение в геометрическом виде показано на рис. 2.26, из которого следует, что существенное влияние на производительность процесса и сплошность покрытия в области компромиссных режимов оказывает плотность разрядного тока. При увеличении плотности разрядного тока происходит преобразование электрической энергии в тепловую и обеспечивается интенсивный нагрев и плавление зерен ферромагнитного порошка, расположенных в цепочках-микроэлектродах.

В результате возрастают производительность процесса нанесения упрочняющего покрытия. При этом высокая сплошность покрытия достигается при одновременном увеличении окружной скорости заготовки (рис. 2.27, б), которая способствует более равномерному распределению интенсивно наносимой массы ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность.



*a*



*б*

Рис. 2.27. Линии равных уровней производительности процесса  $Q$ , мг/мин (*a*) и сплошности покрытия СП, % (*б*) МЭУ в зависимости от плотности разрядного тока  $i$ , А/мм<sup>2</sup> и окружной скорости заготовки  $V$ , м/с при оптимальных режимах по компромиссному критерию (2.56)

Проведенный анализ влияния технологических режимов на производительность МЭУ и сплошность покрытий позволил определить средние значения диапазона рекомендуемых их величин (табл. 2.13).

Таблица 2.13

Рациональные величины технологических режимов, обеспечивающие максимальные производительность МЭУ и сплошность покрытия

Технологические режимы	Величины технологических режимов, обеспечивающие максимальные		Компромиссный вариант
	производительность МЭУ	сплошность покрытия	
Величина магнитной индукции, $B$ , Тл	0,7	0,8	0,75
Плотность разрядного тока, $i$ , А/мм <sup>2</sup>	2,1	2,4	2,4
Удельная длительность упрочнения, $\tau$ , с/см <sup>2</sup>	2,25	3,25	2,6÷2,8
Окружная скорость заготовки, $V$ , м/с	0,05÷0,08	0,065	0,065
Подача ферромагнитного порошка, $q$ , г/с	0,23	0,19	0,2



Полученные стохастические модели в виде 5-факторных регрессионных уравнений 2-го порядка показывают, что влияние технологических факторов на параметры оптимизации нелинейно и неоднозначно, так как зависит от их сочетания, на что указывают коэффициенты взаимодействия факторов в уравнениях регрессии.

Выявлено, что наибольшее влияние на производительность процесса МЭУ и сплошность формируемого покрытия оказывает величина магнитной индукции в рабочем зазоре. Анализ полученных зависимостей с экстремумами показывает, что с увеличением магнитной индукции наиболее интенсивно возрастает сплошность покрытия и повышается до определенного значения производительность процесса упрочнения. Такой характер изменения исследуемых параметров объясняется одновременным формированием множества токопроводящих цепочек-микроэлектродов с различной электрической проводимостью, некоторые из которых имеют направление, не параллельное магнитным силовым линиям в рабочем зазоре. При этом происходит разрыв цепочек-микроэлектродов до момента начала расплавления зерен ферромагнитного порошка в результате одновременного разнонаправленного действия сил магнитного поля на них, а также взаимодействия токов в цепочках и увеличения магнитной индукции в рабочем зазоре. Вместе с тем, при увеличении плотности разрядного тока преобразование электрической энергии в тепловую происходит более интенсивно, что обеспечивает стабильный нагрев и плавление устойчиво расположенных цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре. При одновременном увеличении окружной скорости заготовки повышается сплошность покрытия, чему способствует более равномерное распределение интенсивно наносимой массы ферромагнитного порошка на упрочняемую поверхность.

## **2.5. Исследование физико-механических свойств поверхностного слоя после магнитно-электрического упрочнения**

### **2.5.1. Материалы для нанесения покрытий**

При выборе материалов ферромагнитных порошков, используемых для нанесения покрытий, учитывались основные требования: во-первых, материал должен обладать хорошими

магнитными свойствами, электропроводностью и невысокой температурой плавления; во-вторых, формировать покрытия с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами и обладать невысокой стоимостью [52, 53].

Этим требованиям соответствуют гранулированные композиционные порошки на основе железа, изготовленные путем распыления струи жидкого расплава водой или газом высокого давления [52, 68].

Требования к форме ФМП [52, 68]:

- хорошая текучесть, обеспечивающая плавность перемещения порошка в дозирующих устройствах;
- равномерное распределение ФМП в рабочем зазоре.

Обобщенная форма частиц ферромагнитных порошков – трехосный эллипсоид. Гранулометрический состав 160÷360 по ГОСТ 18318–73.

В исследованиях при нанесении покрытий использовались двухкомпонентные легированные порошки на основе железа Fe-2 %V и Fe-Ti (ГОСТ 9849–86), а также высокоуглеродистый порошковый сплав ФБХ-6-2 (ГОСТ 11546–75). Химический состав используемых ФМП для магнитно-электрического упрочнения покрытий приведен в табл. 2.14.

Таблица 2.14

Химический состав композиционных ферромагнитных порошков

Марка ФМП	Содержание элементов, массовая доля, %								
	Fe	Ni	V	Ti	Si	B	C	Mn	Cr
Fe-2 %V	осн.	–	1,7÷2,0	–	0÷0,5	–	0,3÷0,5	0÷0,5	–
Fe-2 %Ti	осн.	–	–	1,9÷2,1	0÷0,5	у–	0,3÷0,5	0÷0,5	–
ФБХ-6-2	осн.	–	–	–	1,0÷2,5	1,5÷2,0	3,5÷4,5	2,5÷4,5	28÷35

Выбор вышеуказанных материалов (табл. 2.14) для сравнения свойств упрочненного слоя обусловлен тем, что:

- ферросплавы на основе железа выпускаются в достаточном количестве в металлургической промышленности и значительно дешевле, чем сплавы на основе кобальта;
- сплавы Fe-2%V и Fe-Ti имеют небольшое количество леги-

рующих компонентов и при их наплавке возможно образование устойчивых твердых карбидов ванадия и титана с углеродом, а также упрочнение твердого раствора интерметаллидными фазами;

– двухкомпонентный сплав ФБХ-6-2 обеспечивает получение покрытий, сохраняющих высокие свойства (твердость, плотность и износостойкость) до температуры, не превышающей 500 °С в сопряжениях пар трения.

### **2.5.2. Микроструктура поверхностных слоев**

Исследование микроструктуры покрытий проводилось на микрошлифах поперечного среза, изготавливаемых в следующей последовательности: цилиндрические образцы с покрытиями разрезались вулканитовым кругом с одновременным охлаждением в потоке СОЖ, вставлялись в металлическую форму в виде кольца с диаметром 30 мм и высотой 7 мм и заливались эпоксидной смолой для предотвращения заваливания кромок. Затем образцы обрабатывались на плоскошлифовальном станке кругами с различной зернистостью, после чего осуществляли чистовое шлифование мелкозернистым кругом и окончательную доводку с применением фетрового круга и мелкозернистой абразивной пастой ГОИ.

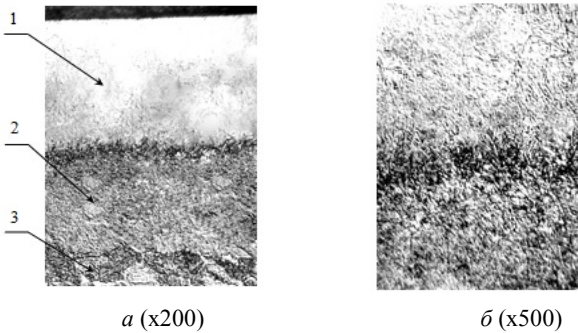
Перед исследованиями шлифы подвергались травлению в 4 %-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте, что давало возможность выявить структуру основы покрытий и зоны термического влияния.

Микроструктура покрытий изучалась с использованием светового микроскопа Mef-3 с диапазоном увеличения 100÷1000 раз, фирмы Reichert-Jung (Австрия) и цифрового фотоаппарата «HP photosmart 715 digital camera».

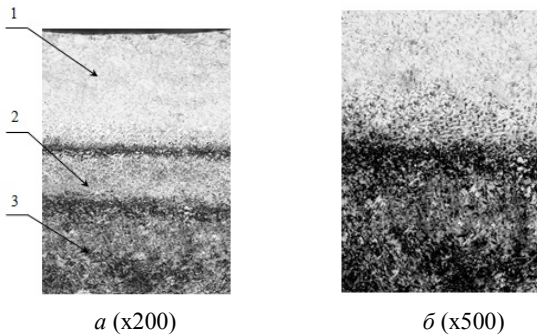
Основными факторами, влияющими на формирование структуры наплавленного слоя, являются высокая скорость нагрева частиц ФМП (порядка  $10^3\div 10^6$  °С/с), обусловленная большой плотностью энергии, и охлаждение, достигаемое за счет теплоотвода в СОЖ и основу металла (скорость охлаждения достигает до  $10^3\div 10^5$  °С/с). Это обстоятельство в большинстве случаев при МЭУ приводит к неполному протеканию

диффузионных процессов и формированию литой, мелко-дисперсной, неравновесной структуры [19, 52].

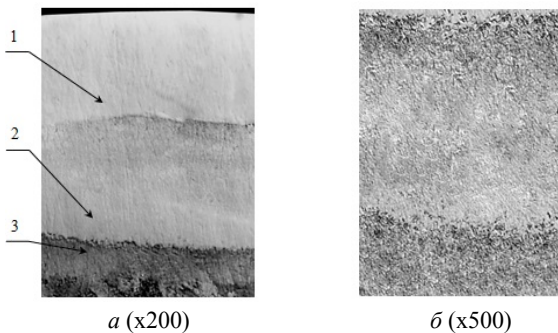
Анализ фотографий микроструктуры покрытия из композиционных двухкомпонентных легированных ферромагнитных порошков на основе железа Fe-2%V и Fe-Ti, а также высокоуглеродистого порошкового сплава ФБХ-6-2 (рис. 2.28, 2.29, 2.30) позволяет выделить характерные зоны, образующиеся при МЭУ.



1 – покрытие; 2 – зона термического влияния; 3 – основной материал  
Рис. 2.28. Фотографии микроструктуры поверхностного слоя после магнитно-электрического упрочнения композиционным ферромагнитным порошком Fe-2 %V



1 – покрытие; 2 – зона термического влияния; 3 – основной материал;  
Рис. 2.29. Фотографии микроструктуры поверхностного слоя после магнитно-электрического упрочнения композиционным ферромагнитным порошком Fe-Ti



1 – покрытие; 2 – зона термического влияния; 3 – основной материал  
 Рис. 2.30. Фотографии микроструктуры поверхностного слоя  
 после магнитно-электрического упрочнения  
 композиционным высокоуглеродистым порошковым сплавом ФБХ-6-2

Упрочненный слой состоит из двух зон – наплавленного покрытия и зоны термического влияния. Покрытие представляет собой монолитный слой, полученный из множества капель расплава порошка. Зона термического влияния формируется за счет фазовых и структурных превращений в материале основы в результате очень быстрого нагрева поверхности образцов при контакте с каплями расплава наносимого материала. При этом определяющее влияние на размеры и строение этих зон оказывают химический состав наплавляемого материала и его теплофизические свойства, режим наплавки, тепловые условия процесса и скорость охлаждения [19, 57].

Наплавленный слой характеризуется литой макроструктурой металла, в которой не выявлено окислов и посторонних включений. Микроструктуры наплавленных металлов мелкодендритного строения. Причем наружная часть покрытия имеет равноосное ячеистое строение, а на границе с основой – столбчатое дендритно-ячеистое, которое ориентировано в направлении максимального теплоотвода (перпендикулярно поверхности образца).

Анализ фотографий микроструктуры покрытий, полученных ЭМН композиционного порошка Fe-2 %V (см. рис. 2.28), показывает, что наплавленный слой характеризуется литой макроструктурой металла, в которой не выявлено окислов и посторонних включений. Микроструктуры наплавленных металлов мелкодендритного строения. Структура наплавленного металла состоит из основы – твердого раствора ванадия в  $\alpha$ -железе, остаточного аустенита, карбидов ванадия ( $V_2C$ ,  $V_4C_{2,67}$ ) и железа ( $FeC$ ,  $FeC_8$ ). Поверхности

раздела, расположенные между наплавленными слоями и основой, четко обозначены. Под зоной термического влияния находится область неполной закалки, структура которой представляет феррит и отдельные участки перлита, превратившегося в троосто-мартенсит.

В покрытиях, полученных ЭМН композиционного порошка Fe-Ti (рис. 2.29), не обнаружено окислов и посторонних включений. Структура покрытия состоит из дендритов твердого раствора титана в  $\alpha$ -железе, а также незначительного количества остаточного аустенита, интерметаллидов (FeTi, Fe<sub>2</sub>Ti), карбидов титана (TiC) и железа (FeC). Поверхности раздела на границе «покрытие-основа» имеют плавный переход, в котором на глубину до 50–90 мкм происходит полная фазовая перекристаллизация материала основы с последовательным образованием структур – однофазной (дислокационный мартенсит) и двухфазной (дислокационный мартенсит и рекристаллизованный феррит).

В нетравленном виде в покрытии, полученном ЭМН композиционного ферромагнитного порошка ФБХ-6-2 (рис. 2.30), не выявлено дефектов в виде посторонних включений. Наплавленный слой покрытия имеет микроструктуру мелкодисперсного строения. На границе «покрытие-основа» частицы карбидов игольчатого строения вытянуты в сторону основного металла. Структура покрытия состоит из основы – твердого раствора хрома в  $\alpha$ -железе, а также остаточного аустенита, карбидов железа (Fe<sub>2</sub>C), боридов (FeB, CrB<sub>2</sub>, Cr<sub>5</sub>B<sub>3</sub>) и ферроборида (Cr<sub>1,65</sub>Fe<sub>0,35</sub>B<sub>0,96</sub>). Переход от основного металла к наплавленному резкий, а граница сплавления – плотная. Покрытие характеризуется небольшой зоной термического влияния и имеет структуру рекристаллизованного феррита и перлита. Это обусловлено тем, что основной металл не успевает нагреться выше температуры аустенитного превращения из-за высокой скорости охлаждения [27, 81].

### 2.5.3. Микротвердость поверхностного слоя

Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при величине статической нагрузки на индентор  $P \sim 0,49$  Н (50 г). Толщину диффузионных слоев и зоны термического влияния измеряли по распределению микротвердости в сечении образцов при помощи окулярной вставки со шкалой и увеличением в 200 раз. Твердость покрытий по Роквеллу (шкала HRC) для цилиндрических образцов определялась на твердомере модели

ТК-2 М по стандартной методике (ГОСТ 9013–59) при величине статической нагрузки на индентор  $P \sim 60$  кг.

Порядок подготовки образцов, тарировка приборов, приемы измерения и оценка полученных величин выполнялись согласно [65, 84].

Известно [52], что износостойкость материала покрытий во многом определяется структурным состоянием и степенью легирования основы, количеством и составом карбидной фазы, то есть в некоторой степени зависит от их микротвердости. При этом по характеру распределения микротвердости можно судить об изменении фазового состава и толщины упрочненной зоны [85]. На рис. 2.31 представлены фотографии микроструктуры покрытий из ФМП с дорожками уколов индентора прибора ПМТ-3, а на рис. 2.32 – характерные кривые распределения микротвердости по глубине наплавленного слоя.

Анализ результатов исследований показывает, что микротвердость изменяется по трем четко выраженным участкам – покрытие, зона термического влияния и основа. Характерной особенностью покрытий является высокая однородность наплавленных слоев. При этом незначительные изменения значений микротвердости по толщине покрытий из порошков Fe-2 %V и Fe-Ti в пределах 4,5÷6,2 ГПа, что обусловлено однородностью наплавленных слоев. Максимальная микротвердость (в пределах 7,3÷8,7 ГПа) наблюдается у покрытий из ФМП ФБХ-6-2, что обусловлено формированием в результате скоростного охлаждения мелкодисперсной структуры слоев, в которых присутствуют закалочный мартенсит и комплексные бориды хрома  $CrB_2$ ,  $Cr_3B_3$ , ферроборид  $Cr_{1,65}Fe_{0,35}B_{0,96}$ , а также бориды на основе железа FeV и  $FeB_2$ .

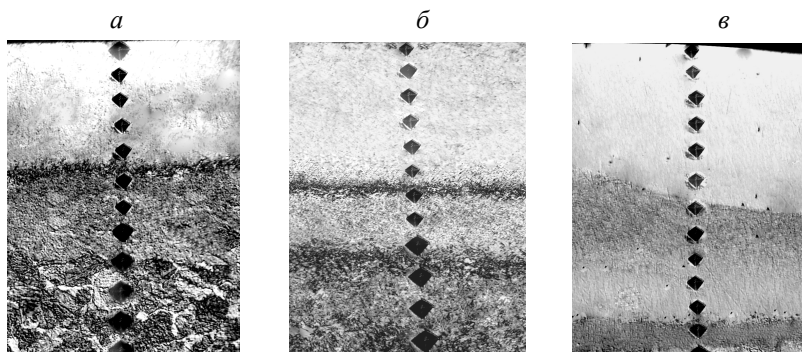
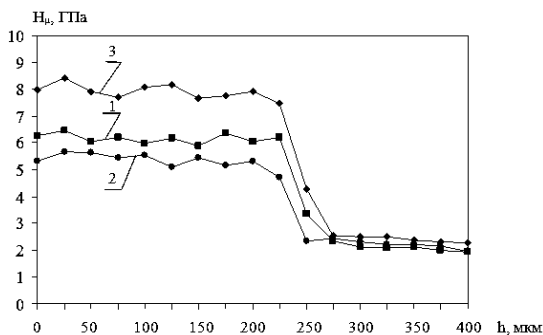


Рис. 2.31. Фотографии микроструктуры покрытий из ФМП Fe-2 %V (а), Fe-Ti (б) и ФБХ-6-2 (в) с дорожками уколов ( $\times 200$ )



Покрyтия из ФМП: 1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2

Рис. 2.32. Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя после МЭУ

Толщина наплавленных слоев покрытий, полученных МЭУ исследуемых ферромагнитных порошков, находится в пределах 200÷300 мкм, а протяженность зоны термического влияния колеблется от 80 до 110 мкм [59, 86].

#### 2.5.4. Пористость, сплошность и разнотолщинность покрытий

На работоспособность упрочненных и (или) восстановленных поверхностей деталей значительное влияние оказывают сплошность, пористость и толщина образовавшихся покрытий [19]. При этом управление процессами формирования поверхностей при МЭУ осуществляется электромагнитными потоками. Так, в результате совместного воздействия разрядного тока и магнитной индукции в рабочем зазоре на частицы ФМП и обрабатываемую поверхность формируются покрытия с регулируемыми параметрами качества [23].

Объемная пористость покрытий определялась методом гидростатического взвешивания [52, 83]. Насыщающей жидкостью служил керосин, в котором время выдержки образцов при нормальной температуре составляло 24 ч. Образцы взвешивались на лабораторных весах ВЛА-200-2М с точностью до 0,001 г. Объемная пористость  $\Pi$  определялась по формуле



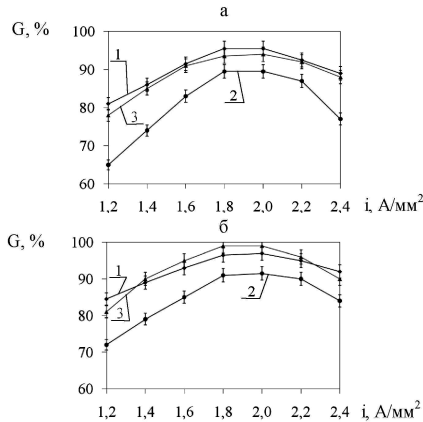
$$\Pi = \frac{(m_1 - m_2)}{\rho_{\text{ж}}} \cdot \frac{1}{V} \cdot 100 \%,$$

где  $m_1, m_2$  – масса покрытия до и после пропитки соответственно, кг;  
 $\rho_{\text{ж}}$  – плотность насыщающей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  
 $V$  – объем покрытия, м<sup>3</sup>.

Исследование распределения пористости по глубине покрытий, оценка толщины и сплошности покрытий выполнялись на шлифах поперечного среза пяти образцов при помощи светового микроскопа Mef-3 (фирма Reichert-Jung) при увеличении в 200 раз.

В процессе МЭУ на сплошность покрытий оказывают наибольшее влияние магнитная индукция  $B_{\text{зс}}$  и плотность разрядного тока  $i$ , а на пористость и разнотолщинность покрытий – плотность разрядного тока  $i$  и размер частиц порошка  $\Delta$  [52, 53]. Так, магнитная индукция характеризует устойчивость образования и формирования цепочек-микроэлектродов в РЗ с определенной интенсивностью. Плотность разрядного тока характеризует условие нагрева и последующего плавления цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре, а размер частиц ФМП – плотность распределения жидкой фазы порошка по толщине покрытия. Следует отметить, что стабилизация процесса МЭУ обеспечивается постоянным во времени значением величины магнитной индукции в рабочем зазоре, равным 0,7 Тл.

В соответствии с этим в задачу исследований параметров качества покрытий, полученных наплавкой на установках МЭУ с МС на электро- и постоянных магнитах, входило исследование зависимости сплошности покрытий, от плотности разрядного тока  $i$ , а пористости и разнотолщинности покрытий – от плотности разрядного тока  $i$  и размера частиц композиционного порошка  $\Delta$ . Анализ результатов исследований (рис. 2.33, а, б) показывает, что сплошность покрытий, полученных на установках МЭУ с МС на ЭМ и ПМ, изменяется в пределах 65,2 % ÷ 95,6 % и 71,3 % ÷ 98,7 % соответственно.



1 – разброс значений сплошности покрытий из ФМП:

1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2

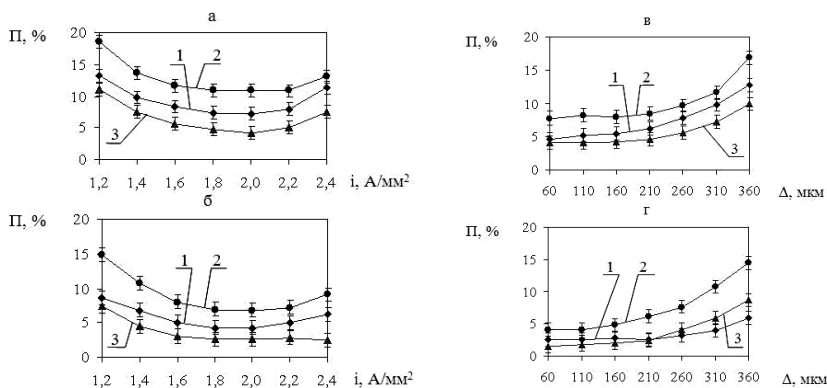
Рис. 2.33. Зависимость сплошности покрытий, полученных наплавкой на установках МЭУ с МС на электро- (а) и постоянных магнитах (б) от плотности разрядного тока  $i$

Высокая сплошность покрытий из ФМП Fe-2 %V и ФБХ-6-2 объясняется тем, что в процессе МЭУ происходит стабильное формирование в рабочем зазоре цепочек-микроэлектродов. В результате расплав порошков равномерно распределяется по обрабатываемой поверхности. Меньшее количество и неустойчивое положение образованных цепочек-микроэлектродов из частиц порошка Fe-Ti увеличивает их подвижность в РЗ. Вследствие этого покрытие формируется с хаотически расположенными на поверхности точечными вкраплениями.

Установлено, что повышение температуры в рабочем зазоре при наплавке за счет увеличения плотности разрядного тока от 1,2 до 2,0 А/мм<sup>2</sup> приводит к увеличению сплошности покрытий вследствие уменьшения расстояния между каплями расплава частиц ФМП на поверхности образцов. Дальнейшее повышение плотности разрядного тока более 2,0 А/мм<sup>2</sup> ведет к уменьшению сплошности покрытий, так как МЭУ при высоких значениях плотности разрядного тока сопровождается эрозией отдельных участков наплавленного слоя. Покрытия формируются с низкой сплошностью из-за наличия сквозной пористости.

Выявлено, что сплошность покрытий, полученных при МЭУ на установке с МС на ПМ, на 2,7 %÷6,3 % выше, чем для покрытий,

наплавленных на установке с МС на ЭМ. Следует отметить, что для покрытий из порошков ФБХ-6-2 и Fe-2 % V в некоторых случаях наблюдается повышенная однородность и плотность покрытий, при которых сплошность составляет около 100 %. Анализ результатов исследований (рис. 2.34, *а-г*) показывает, что объемная пористость покрытий, полученных на установках МЭУ с МС на ЭМ и ПМ, изменяется в пределах 5,0 %÷18,0 % и 3,0 %÷15,0 % соответственно.



I – разброс значений объемной пористости покрытий из ФМП:

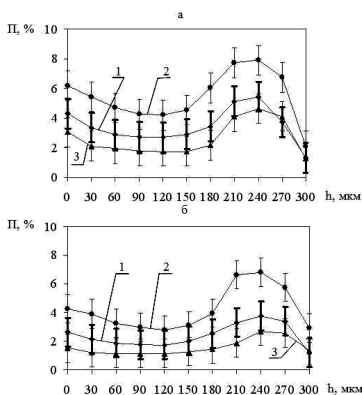
1 – Fe-2 %V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2

Рис. 2.34. Зависимость объемной пористости покрытий после МЭУ с МС на электро- (*а, в*) и постоянных магнитах (*б, г*) от плотности разрядного тока *i* (*а, б*) и размера частиц порошка  $\Delta$  (*в, г*)

Более низкая объемная пористость покрытия из порошка ФБХ-6-2 по сравнению с другими покрытиями обусловлена высокой химической активностью хрома и бора, которые активизируют процесс уплотнения наплавленного слоя за счет увеличения жидкотекучести расплава ФМП и более полного вывода шлаков и газов. Наибольшее влияние на объемную пористость оказывает плотность разрядного тока, наименьшее – размер частиц композиционного порошка. Выявлено, что с увеличением плотности разрядного тока от 1,2 до 2,0 А/мм<sup>2</sup> пористость покрытий снижается. Вместе с тем при увеличении плотности разрядного тока более 2,0 А/мм<sup>2</sup> тепло, выделяемое в рабочем зазоре, значительно превышает температуру плавления частиц порошка. В результате происходит увеличение пористости покрытий из-за увеличения растворимости газов.

Выявлено, что изменение размеров частиц зерен ФМП от 360 до 180 мкм приводит к снижению пористости в 1,35 раза.

В результате экспериментальных исследований установлено, что объемная пористость в покрытиях, полученных наплавкой на оптимальных режимах различных ФМП на установках с МС на ЭМ и ПМ, находится в пределах 5,0 %÷12,0 % и 3,0 %÷7,0 % соответственно. Анализ распределения пор по глубине покрытий (рис. 2.35, а, б) показывает, что наибольшая пористость находится на границе наплавленного слоя и основы.



I – разброс значений пористости покрытий из ФМП:

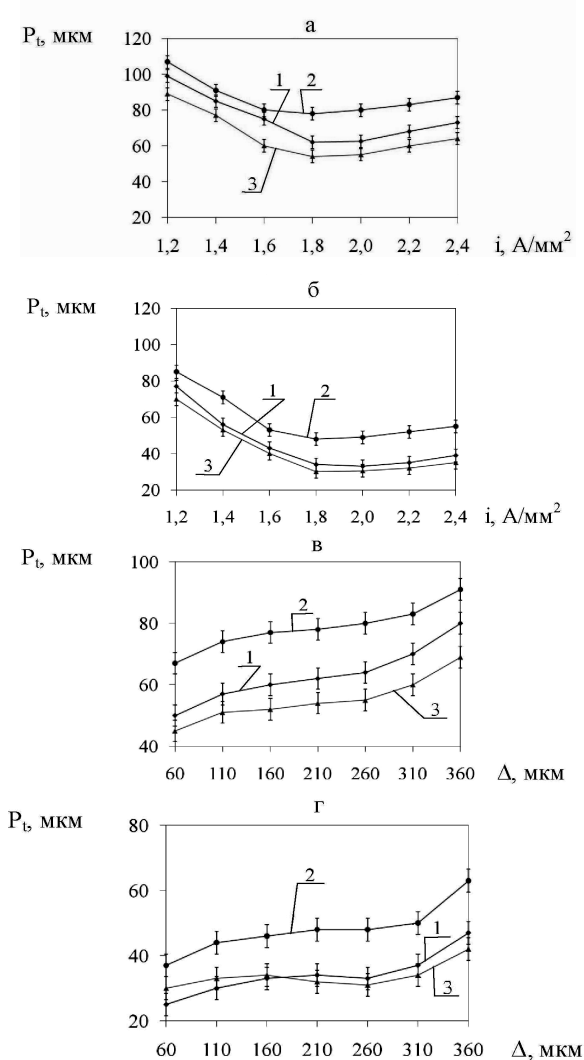
1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2

Рис. 2.35. Распределение пористости по глубине покрытий, полученных наплавкой на установках МЭУ с МС на электро- (а) и постоянных магнитах (б)

Это объясняется тем, что при МЭУ сначала происходит захлопывание газа каплями расплава ФМП на поверхности образца, после – усадка наплавленного слоя при переходе из жидкой фазы в твердую. Усадка возникает из-за уменьшения растворимости газов при отводе тепла в основу. Выявлено, что на границе покрытия и основы преимущественно фиксируются шаровидные поры размером 10÷20 мкм [59, 86].

Установлено, что объемная пористость покрытий, полученных на установке модели УНП-1, ниже в 1,67÷1,71 раза, чем пористость покрытий, наплавленных на установке модели ЭУ-5. Пористость на границе с основой меньше в 1,26÷2,12 раза. Анализ результатов исследований (рис. 2.36, а-г) показывает, что разнотолщинность

покрытий, полученных на установках МЭУ с МС на ЭМ и ПМ, изменяется в пределах 52÷110 мкм и 31÷82 мкм соответственно.



1 – Fe-2 %V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2

Рис. 2.36. Зависимость разнотолщинности покрытий после МЭУ с МС на электро- (а, б) и постоянных магнитах (в, г) от плотности разрядного тока  $i$  (а, б) и размера частиц порошка  $\Delta$  (в, г)

Меньшая разнотолщинность покрытий, наплавленных в постоянном магнитном поле, обусловлена более равномерным распределением и уплотнением по поверхности образцов точечных вкраплений расплава материала ФМП.

Высота микронеровностей покрытий, полученных на установке МЭУ с МС на ПМ, в 1,3÷1,7 раза меньше, чем у покрытий, наплавленных на установке МЭУ с МС на ЭМ. Наибольшее влияние на разнотолщинность покрытий оказывает плотность разрядного тока, наименьшее – размер частиц композиционного порошка.

Выявлено, что с увеличением плотности разрядного тока от 1,2 до 1,8 А/мм<sup>2</sup> разнотолщинность покрытий снижается. Однако при увеличении плотности разрядного тока более 2,2 А/мм<sup>2</sup> происходит подплавление отдельных участков покрытий с увеличением высоты их микронеровностей. Изменение размеров частиц ФМП от 360 до 180 мкм приводит к снижению разнотолщинности покрытий в 1,8÷2,0 раза.

Результаты экспериментальных исследований показывают (табл. 2.15), что средние значения толщины покрытий, полученных МЭУ на оптимальных режимах различных ФМП на установках с МС на ЭМ и ПМ, находятся в пределах 221,0÷256,0 мкм и 243,0÷294,0 мкм соответственно. Средние значения сплошности покрытий изменяются в пределах 89,3 %÷95,3 % и 91,2 %÷98,7 % соответственно. Средние значения разнотолщинности – в пределах 54÷72 мкм и 22÷48 мкм соответственно.

Таблица 2.15

Сплошность, толщина и разнотолщинность покрытий из ФМП

Материал ФМП	Средняя сплошность покрытий, %	Средняя толщина покрытий, мкм	Средняя разнотолщинность покрытий, мкм
МЭУ на установке с МС на ЭМ			
Fe-2 %V	95,3	256	62
Fe-Ti	89,3	221	74
ФБХ-6-2	95,1	249	54
МЭУ на установке с МС на ПМ			
Fe-2 %V	97,9	294	24
Fe-Ti	91,2	243	48
ФБХ-6-2	98,7	289	22

Таким образом, использование постоянных магнитов вместо электрических в магнитной системе устройств МЭУ позволяет снизить объемную пористость и разнотолщинность покрытий на 40,0 %÷41,6 % и 33,3 %÷59,3 % соответственно, несущественно увеличить сплошность покрытий на 2,0 %÷3,4 %, обеспечить большую стабильность исследуемых параметров (значения коэффициентов вариации объемной пористости  $k_{vП}$ , разнотолщинности  $k_{vПт}$  и сплошности  $k_{vГ}$  покрытий меньше соответственно на 25,3, 28,9 и 18,1 %).

### 2.5.5. Износостойкость упрочненных поверхностей

Установлено [19], что характерной особенностью внешнего ЭМП, генерируемого электромагнитом, является наличие переменной составляющей напряженности, оказывающей преобладающее влияние на контактные сопротивления частиц ФМП

$$R_{i(i+1)} = p_f t_f / (\pi r^2 f_{ц}^{0,75}), \quad (2.57)$$

где  $R_i$  – сопротивление в контакте, Ом;

$p_f$  – удельное сопротивление оксидной пленки, Ом·м;

$t_f$  – суммарная толщина оксидной пленки, м;

$r$  – радиус зоны контакта, м;

$f_{ц}$  – сила, прижима частицы ФМП к упрочняемой поверхности, Н.

В свою очередь, согласно (2.38), преобладающее влияние на силу прижима частицы ФМП к упрочняемой поверхности оказывает напряженность магнитного поля у верхней границы зерна.

Вместе с тем, выявлено [26, 87], что эффективные электромагнитные воздействия на частицы ФМП обеспечиваются при условии равномерного распределения в рабочем зазоре градиента магнитной индукции и величин временных характеристик внешнего ЭМП (1.11).

Результаты исследований [81, 87] показывают, что магнитная индукция внешнего ЭМП в рабочей зоне ЭМС непостоянна и ее текущее значение изменяется от нуля до амплитудного значения, по закону, установленному источником питания электромагнитных катушек. Переменная составляющая магнитной индукции

оказывает влияние на интенсивность образования цепочек-электродов из частиц ФМП и их электрическую проводимость, что приводит к значительным колебаниям силы технологического тока и, соответственно, хаотичному распределению ФМП в РЗ.

Анализ технологических схем устройств МЭУ показал, что применяемые ЭМС достаточно сложны в управлении и не в полной мере обеспечивают синхронную работу электромагнитов и источников технологического тока (ИТТ). Так, частично несовпадающие импульсы напряжений ЭМ и ИТТ приводят к уменьшению интенсивности расплава и, соответственно, увеличению частиц ФМП, не участвовавших в разрядах. Вследствие этого нарушается стабильность процесса МЭУ, снижаются качество покрытий и его производительность [27, 87].

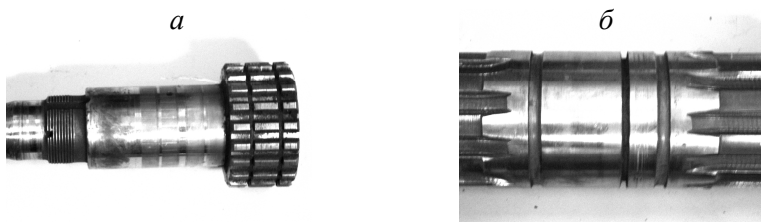
На основании зависимостей (2.57, 2.38, 1.11) выявлена возможность управления тепловым воздействием на упрочняемую поверхность и ФМП стабилизацией магнитной индукции внешнего ЭМП в рабочей зоне устройств МЭУ [19, 52]. Установлено, что в результате изменения величины магнитной индукции внешнего ЭМП от нуля до амплитудного значения зона неустойчивого формирования цепочек-микроэлектродов составляет 30 %. Экспериментальное подтверждение получено путем кино съемки камерой СКС-1М со скоростью 3000 кадров в секунду процесса формирования цепочек-микроэлектродов и прохождения по ним электрических разрядов.

В результате теоретических и экспериментальных исследований предложено для синхронизации воздействий электрическими разрядами и внешним ЭМП на частицы ФМП и упрочняемую поверхность в рабочей зоне устройств МЭУ использовать постоянные магниты (ПМ) вместо электромагнитов. В качестве ИТТ принят инверторный источник питания модели Invertec V270 T, обеспечивающий наименьшую импульсную нестабильность процесса МЭУ [6].

На структуру покрытия, соответственно, и на эксплуатационные свойства поверхностей оказывает влияние не только химический и фазовый составы материалов порошков, но и технологические параметры МЭУ. Так, при изменении технологических режимов изменяются и условия формирования покрытий, геометрические характеристики и химическая неоднородность наплавленного материала.



В основном способ МЭУ применяют для упрочнения и восстановления посадочных поверхностей деталей типа «тела вращения» под слабо- и средненагруженные подшипники скольжения. Вместе с тем, известны детали, у которых рабочие поверхности находятся в контакте с роликоподшипниками. Например, вторичный вал коробки перемены передач автомобиля КамАЗ-53212 (рис. 2.37, *а*) и первичный вал коробки перемены передач трактора К-701 (рис. 2.37, *б*), у которых триботехническая система «ролики шестерни передачи – шейка вала» работает в условиях трения качения со смазкой, в том числе загрязненной частицами абразива.



*а* – вал вторичный коробки перемены передач автомобиля КамАЗ-53212;  
*б* – вал первичный коробки перемены передач трактора К-701

*Рис. 2.37.* Фотографии изношенных посадочных поверхностей деталей автотракторной техники

Износ рабочих поверхностей валов происходит в результате абразивного и коррозионно-механического изнашивания и составляет  $0,05 \div 0,10$  мм. Характерными повреждениями контактирующих деталей являются: ямки, раковины, местное отслаивание или выкрашивание поверхностных слоев, что приводит к уменьшению диаметра шейки вала и появлению локальных углублений на контактируемых поверхностях.

Износостойкость покрытий, полученных наплавкой двухкомпонентного легированного порошка на основе железа Fe – 2 %V (ГОСТ 9849–86) и высокоуглеродистого порошкового сплава ФБХ 6-2 (ГОСТ 11546–75), измерялась для условий изнашивания со смазкой, загрязненной частицами абразива при трении качения. Испытание материалов проводилось с использованием машины 2070 СМТ- 1 по схеме «диск – диск».

Покрyтия наносили на цилиндрические нормализованные образцы из стали 45 ГОСТ 1050–88 с наружным диаметром 40 мм и высотой 12 мм на установке УНП-1. Режимы МЭУ варьировались в

зависимости от материала используемого ФМП в следующих пределах: плотность разрядного тока  $i - 1,9 \text{ А/мм}^2$ ; расход композиционного порошка  $q - 0,32 \div 0,39 \text{ г/с}\cdot\text{мм}^2$ ; окружная скорость заготовки,  $V - 0,05 \div 0,07 \text{ м/с}$ ; магнитная индукция в рабочем зазоре,  $B - 0,7 \text{ Тл}$ ; скорость подачи,  $S - 0,18 \div 0,22 \text{ мм/об}$ ; расход рабочей жидкости,  $q - 2,86 \div 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ дм}^3/(\text{с}\cdot\text{мм}^2)$ . Контртело из стали ШХ15 ГОСТ 801–78, подвергнутое закалке в камерной печи и отпуску до твердости  $60 \div 62 \text{ HRC}$ , имело высоту 10 мм, что позволяло сохранять измерительную базу. Линейные измерения образцов проводили в двух взаимноперпендикулярных плоскостях по двум сечениям, толщину колодки измеряли по двум сечениям, используя оптический длинномер ИЗВ-1 (точность измерения 0,001 мм). Исследование изношенных поверхностей выполнялось на растровом электронном микроскопе марки LEO 1455 VP фирмы «Карл Цейсс» (Германия).

Для ускорения процесса изнашивания наплавленной поверхности использовали масляно-абразивную смесь (масло трансмиссионное ТМ-3-18 (Тап-15В) ГОСТ 23652–79, содержащее 2 % карбида бора зернистостью  $4 \div 5 \text{ мкм}$ ). Для каждой партии испытываемых образцов в ванну установки заливали новую порцию смеси. Абразивные частицы во взвешенном состоянии в период испытаний поддерживались лопастями крыльчатки, закрепленной на одном валу с образцом, стабильность температурного режима масла или смеси контролировалась посредством хромель-копелевой термопары и электронного потенциометра КСП-4, установленного в измерительном блоке машины трения.

Образцы после нанесения покрытий шлифовали на станке модели ЗБ12 до шероховатости поверхности  $Ra = 0,63 \text{ мкм}$ . Затем они прирабатывались с колодкой. Окончание приработки определяли по стабилизации величины момента трения пары.

Для обеспечения точности и достоверности исследований на износостойкость образцы с покрытиями испытывались в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным с применением метода математического планирования эксперимента.

Режим испытаний соответствовал усредненным условиям работы деталей в реальных условиях работы узла машины, для которых характерна относительная скорость качения  $V_{\text{к}}, 0,5 \div 3,0 \text{ м/с}$ ; нагрузка  $P$ , задающая давление в контакте,

0,5 ÷ 2,5 МПа; концентрация абразивных частиц в масле  $K_{ч}$ , 0,05÷0,25 г/см<sup>3</sup>; температура масла в ванне  $t_{м}$ , 25 °С±90 °С. Испытывали партии по пять образцов.

В целях сокращения числа опытов применен центральный композиционный ортогональный план (ЦКОП) второго порядка. В качестве параметра оптимизации приняли интенсивность изнашивания образцов  $I$ , а независимыми переменными – факторы  $P$ ,  $K_{ч}$ ,  $t_{м}$  и  $V_{к}$ .

С учетом результатов исследований [52, 68] установили условия проведения экспериментов (табл. 2.16), которые рандомизировали во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Таблица 2.16

Условия проведения экспериментов

Уровни факторов	Факторы			
	$p$ , кН	$K_{ч}$ , г/см <sup>3</sup>	$t_{м}$ , °С	$V_{к}$ , м/с
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
основной (0)	1,5	0,15	60,0	1,75
верхний (+1)	2,0	0,20	77,5	2,37
нижний (-1)	1,0	0,10	42,5	1,12
звездная точка (+ $\alpha$ )	2,5	0,25	90,0	3,00
звездная точка (- $\alpha$ )	0,5	0,05	25,0	0,50
Интервалы варьирования				
основной	0,5	0,05	17,5	0,62
по $\alpha$	1,0	0,10	35,0	1,25

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКОП второго порядка, с использованием прикладных программ *Mathcad 2002* и *Excel*, работающих в среде Windows, позволила получить статистические модели (2.58 и 2.59), определяющие зависимости исследуемого параметра  $I$  покрытий, полученных ЭМН, от факторов  $X_1 = P$ ,  $X_2 = K_{ч}$ ,  $X_3 = t_{м}$  и  $X_4 = V_{к}$ .

$$\begin{aligned}
 Y_1 = I_{ФБХ-6-2} = & 1,211 - 0,812 \cdot X_1 + 5,612 \cdot X_2 - 0,035 \cdot X_3 - 0,0047 \cdot X_4^* + \\
 & + 0,127 \cdot X_1 X_2 + 1,521 \cdot X_1 X_3 - 0,0034 \cdot X_1 X_4^* - 1,126 \cdot X_2 X_3 - 0,0098 \cdot X_2 X_4^* - \\
 & - 0,0018 \cdot X_3 X_4^* + 0,745 \cdot X_1^2 + 5,612 \cdot X_2^2 + 0,00058 \cdot X_3^2 + 0,0019 \cdot X_4^{*2};
 \end{aligned}
 \tag{2.58}$$

$$\begin{aligned}
 Y_2 = I_{\text{Fe-2\%V}} = & 1,46 - 1,045 \cdot X_1 + 6,440 \cdot X_2 + 0,0009 \cdot X_3 + 0,00064 \cdot X_4^* + \\
 & + 0,567 \cdot X_1 X_2 + 1,932 \cdot X_1 X_3 - 0,0091 \cdot X_1 X_4^* - 2,314 \cdot X_2 X_3 - 0,0014 \cdot X_2 X_4^* - \\
 & - 0,00715 \cdot X_3 X_4^* + 0,910 \cdot X_1^2 + 6,975 \cdot X_2^2 + 0,00090 \cdot X_3^2 + 0,00047 \cdot X_4^{2*} .
 \end{aligned}
 \tag{2.59}$$

Выявлено, что не все коэффициенты регрессий (2.58 и 2.59) значимы с 95 %-й доверительной вероятностью по критерию Стьюдента (\* – коэффициент не значим). Установлено, что модель адекватна при 5 %-м уровне значимости по критерию Фишера.

Анализ статистических моделей (2.58 и 2.59) показывает, что в принятых пределах варьирования относительная скорость трения не оказывает существенного влияния на интенсивность изнашивания образцов.

Степень влияния факторов на параметр  $I$  для различных композиционных порошков определяли по величине коэффициентов моделей (2.58 и 2.59), геометрическая интерпретация которых представлена в виде одномерных сечений в двумерной системе координат (см. рис. 2.38–2.40). Зависимости, представленные на рис. 2.38–2.40, находятся в факторном пространстве, так как пределы экстраполяции были ограничены условием  $-2 < X_i < +2$ .

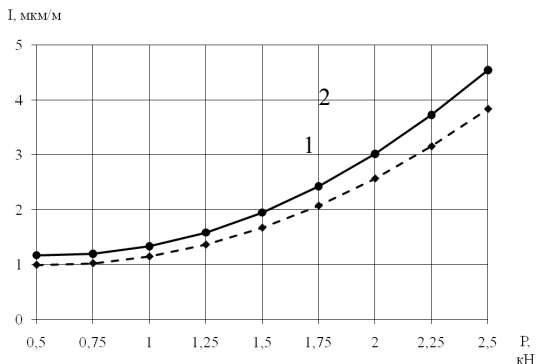
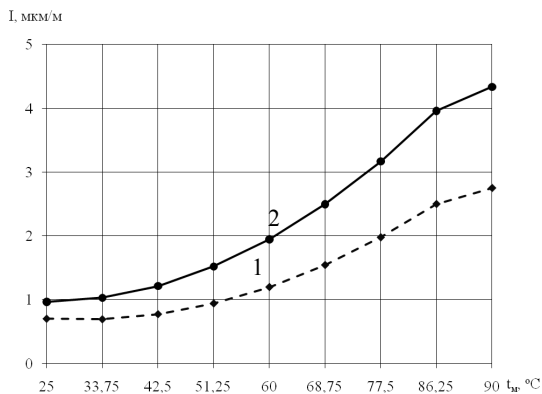
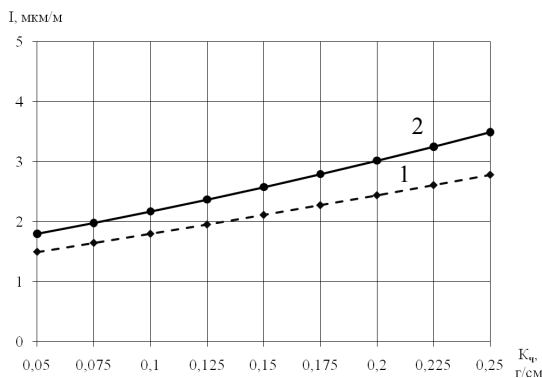


Рис. 2.38. Зависимость интенсивности изнашивания покрытий после МЭУ ФМП Fe – 2 %V (1), ФБХ 6-2 (2) от нагрузки  $P$  в условиях трения качения со смазкой, загрязненной частицами абразива



*Рис. 2.39.* Зависимость интенсивности изнашивания покрытий после МЭУ ФМП Fe – 2 %V (1), ФБХ 6-2 (2) от концентрации абразивных частиц в масле  $K_q$  в условиях трения качения со смазкой, загрязненной частицами абразива



*Рис. 2.40.* Зависимость интенсивности изнашивания покрытий после МЭУ ФМП Fe – 2 %V (1), ФБХ 6-2 (2) от температуры масла в ванне  $t_m$  в условиях трения качения со смазкой, загрязненной частицами абразива

Анализ зависимостей интенсивности изнашивания покрытий от нагрузки  $P$  показывает, что износ имеет нелинейных характер, увеличение концентрации абразивных примесей в масле приводит к росту интенсивности изнашивания покрытий по зависимости, близкой к линейной. При трении со смазкой, загрязненной частицами абразива, интенсивность изнашивания возрастает при

нижней величине нагрузки  $0,5 \div 0,75$  кН. При этом наблюдается процесс разрушения трущихся поверхностей, сопровождающийся резким увеличением интенсивности тепловыделения и износа образцов. Это обстоятельство, вероятно, связано с влиянием выкрошившихся боридных частиц покрытий и продуктов износа, попавших в зону трения. В связи с этим необходимо исключить попадание абразивных частиц в масло в условиях эксплуатации таких узлов трения, как «шейка вала – ролики».

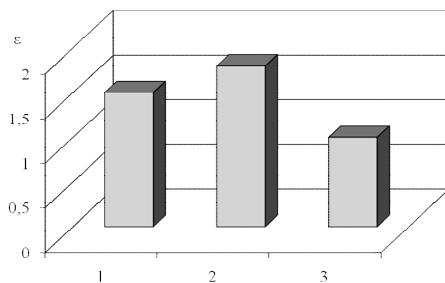
Установлено, что с уменьшением концентрации абразивных частиц в масле влияние температуры масла в ванне на изнашивание покрытий, полученных ЭМН ФМП ФБХ-6-2, Fe-2 %V, повышается. Так, при температуре масла более  $50$  °С интенсивность изнашивания покрытий резко увеличивается, что, возможно, связано с нарушением гидродинамического режима смазки и значительным снижением прочности и толщины смазочного слоя.

Как видим (рис. 2.38–2.40), по приведенным характеристикам наилучшую совместимость имеет пара трения «покрытие из ФМП Fe-2 %V – сталь ШХ15».

С применением графоаналитического метода двухмерных сечений для принятых условий изнашивания определена оптимальная область работы исследуемых трибосопряжений при трении со смазкой, загрязненной частицами абразива:  $P = 0,5 \div 0,8$  кН,  $t_m = 25 \div 40$  °С,  $K_q = 0,05$  г/см<sup>3</sup>.

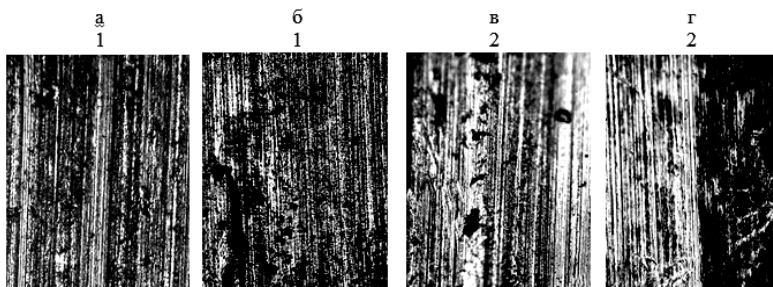
Анализ результатов испытаний износостойкости контртела и покрытий (рис. 2.41) показывает, что наибольшей износостойкостью обладают покрытия из ФМП Fe-2 %V. Износостойкость этого покрытия при трении качения со смазкой при наличии частиц абразива в  $1,7 \div 1,8$  выше износостойкости эталона. Износостойкость покрытий по сравнению с эталоном для ФБХ 6-2 больше в  $1,3 \div 1,5$ .

Результаты исследований на износостойкость свидетельствуют о высоком уровне физико-механических свойств покрытий, полученных МЭУ на установке с УНП-1. Преимущество таких покрытий в том, что обусловлено это тем, что при нанесении покрытий с использованием ПМ снижается пористость, шероховатость, повышается однородность покрытий. При этом достаточно высокое содержание метастабильного аустенита обеспечивает необходимую пластичность основы ФМП Fe-2 %V и ФБХ-6-2, в результате чего приповерхностные микрообъемы покрытий способны выдерживать большее количество циклов передеформирования в процессе изнашивания.



*Рис. 2.41.* Диаграммы относительной износостойкости покрытий из ФМП ФБХ 6-2 (1), Fe – 2 %V (2) и эталона (3) в условиях трения качения со смазкой, загрязненной частицами абразива

Изучение изношенных поверхностей показывает, что на поверхностях имеются участки с отколовшимися частицами, а также выглаженные участки с рисками, расположенными вдоль направления относительного перемещения контактирующих поверхностей (рис. 2.42).



*а, в* – после приработки образцов с диском; *б, г* – после испытания, путь трения образцов составил  $20 \times 10^3$  м

*Рис. 2.42.* Фотографии поверхностей трения образцов с покрытиями из ФМП Fe – 2 %V (1), ФБХ 6-2 (2) в условиях трения качения со смазкой, загрязненной частицами абразива ( $\times 200$ )

При этом по всей поверхности контакта имеет место комбинированное взаимодействие поверхностей – адгезионное и упругопластическое, продуктами изнашивания которых являются равновесные тонкодисперсные частицы. По мере увеличения нагружения образцов происходит нарушение когезионного взаимодействия между частицами, их выкрашивание, а также

разрушение отдельных неоднородных частиц. Наряду с этим видны контуры еще не отделившихся частиц на границе участка и мелкие фрагменты их на участке со следами разрушения. Сравнительные испытания износостойкости посадочных мест под подшипники качения валов коробок перемены передач автомобиля КамАЗ- 53212 (вторичный 14.1701105, промежуточный 14.1701048, первичный 15.1701027) изготовленных по типовой технологии и восстановленных на установке УНП-1, выполнялись в условиях ремонтного производства автотракторной техники. Результаты исследований показали, что интенсивность изнашивания посадочных мест валов, изготовленных по типовой технологии и восстановленных, составила  $3,2 \div 5,9$  мкм/км и  $2,7 \div 5,3$  мкм/км соответственно. Анализ дисперсии результатов испытаний износостойкости посадочных мест под подшипники качения валов коробок перемены передач показал, что разброс экспериментальных данных не превышает 11 % для стендовых и 14 % – для производственных испытаний.

На основании полученных результатов исследований износостойкости поверхностей после МЭУ на установке УНП-1 можно сделать следующие выводы:

– использование постоянных магнитов в магнитной системе для установок МЭУ стабилизирует технологические параметры процесса (силу технологического тока и магнитную индукцию в РЗ), обеспечивает равномерность и однородность покрытий по толщине;

– статистические модели, определяющие зависимости исследуемого параметра – интенсивности изнашивания покрытий в условиях трения качения от нагрузки  $P$  показывают, что износ имеет нелинейный характер, а увеличение концентрации абразивных примесей в масле приводит к росту интенсивности изнашивания покрытий по зависимости близкой к линейной. Выявлено, что с уменьшением концентрации абразивных частиц в масле влияние температуры масла в ванне на изнашивание поверхностей после МЭУ ФМП ФБХ-6-2 и Fe-2 %V, увеличивается;

– установлено, что наибольшей износостойкостью обладают поверхности упрочненные ФМП Fe-2 %V. Износостойкость таких поверхностей при трении качения со смазкой при наличии частиц абразива в  $1,7 \div 1,8$  выше износостойкости эталона. Износостойкость покрытий по сравнению с эталоном для ФМП ФБХ-6-2 больше в  $1,3 \div 1,5$ .



### **3. ФИНИШНАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Основные показатели качества изделий машиностроения определяются свойствами материалов, из которых изготавливают входящие в них детали, и геометрическими параметрами поверхностей деталей. Показатели свойств материалов деталей и геометрические параметры их поверхностей в условиях эксплуатации изделий образуют многосвязные технологические и эксплуатационные среды, которые влияют друг на друга [87]. Например, геометрические параметры изделий, такие как их конфигурация и размеры, могут оказывать влияние на напряжения, распределяемые в материале основы и поверхностных слоях. И, наоборот, напряжения, формируемые в ходе технологических операций упрочнения и стадий эксплуатации, могут с течением времени привести к изменениям геометрических параметров поверхностей деталей. Это свидетельствует о взаимной связи приведенных параметров и обуславливает явления, сопровождающие технологические и эксплуатационные процессы.

Последовательность процессов наследования основных показателей качества рассматривается с синергетических позиций совместного действия технологических, геометрических и эксплуатационных показателей при их взаимном влиянии [87, 88]. Согласно синергетической концепции определено, что доминирование контролируемых параметров приводит к ограничению числа состояний системы, которые определяются отношениями времен релаксации параметров системы. Переходы технологической и эксплуатационной систем из одного состояния в другое описываются критериями переноса, характеризующими важнейшие параметры интенсивных воздействий, а механизмы формирования физико-химических параметров качества определяются режимами равновесных состояний системы.

Начальные показатели качества деталей машины в процессе эксплуатации изменяются. В большинстве случаев это происходит в начальный период эксплуатации. Если структура основного материала и остаточные напряжения в нем могут сохраняться до полного разрушения трущихся поверхностей деталей, то шероховатость поверхности и структура поверхностного рельефа в большинстве случаев существенно меняются уже в период приработки. Волнистость и структура поверхностных слоев детали изменяются при



К способам финишной обработки, обеспечивающим уменьшение шероховатости поверхности до  $Ra = (0,02 \div 0,16)$  мкм и снижающим ее волнистость, относится магнитно-абразивная обработка.

Эффективность магнитно-абразивной обработки в значительной мере определяется соотношением двух взаимосвязанных технологических факторов:

- величиной давления порошкового магнитно-абразивного инструмента (МАИ) на поверхность обрабатываемой детали, которая определяется величиной магнитной индукции в рабочих зазорах станков, их конструкции, динамики процесса обработки;

- скоростью относительного перемещения частиц порошкового МАИ и обрабатываемой поверхности.

Увеличение сил магнитного поля в рабочих зонах магнитных щелей обеспечивает формирование МАИ повышенной жесткости, которая приводит к росту давления со стороны отдельных объемов МАИ на поверхность деталей. Однако при этом снижается возможность инструмента нивелировать относительно обрабатываемой поверхности, то есть осуществлять равномерное силовое воздействие на каждый элементарный участок детали, особенно в случаях с деталями сложной пространственной конфигурации.

Увеличение скорости перемещения деталей относительно магнитно-абразивного порошка, фиксированного магнитным полем, обеспечивает рост динамической составляющей со стороны МАИ на обрабатываемую поверхность. Это, в свою очередь, приводит к активному переформированию МАИ и образованию в нем специфических уплотненных зон. Максимальная фиксация МАИ в рабочих зазорах реализуется при обработке деталей простой формы – тела вращения, плоскости, когда возможно использование магнитных зазоров малой ширины, создающих в них достаточно «большие» магнитные поля – до  $1,0 \div 1,2$  Тл.

### **3.1. Ферроабразивные порошки**

#### **3.1.1. Материалы ферроабразивных порошков**

Режущим инструментом при МАО являются ферроабразивные порошки. Эффективность МАО зависит от формы и размеров

частиц ФАП, их гранулометрического состава, химической активности к обрабатываемому материалу, микротвердости режущей части.

Для осуществления процесса резания при МАО должны соблюдаться общие закономерности теории резания, главным из которых является требование, чтобы твердость частиц ФАП была больше твердости обрабатываемого материала. Материалы, используемые для ферроабразивных порошков, достаточно разнообразные и имеют разные физические и специальные свойства. Для изготовления ферроабразивных порошков могут быть использованы как обычные инструментальные материалы, так и специальные композиционные.

Различают два вида ФАП:

- изготовленные из однородных материалов;
- специальные композиционные ферроабразивные порошки.

Порошки однородных материалов обладают магнитными свойствами и достаточно высокой твердостью для осуществления абразивного резания (ферриты, альсифер, альперм). Эти порошки существенно уступают порошкам других типов, однако находят применение благодаря низкой стоимости. Применение таких порошков ограничено: их используют для обработки материалов с невысокой твердостью, например, цветные металлы и сплавы. Использование порошков однородных материалов в начальный период развития МАО было эффективным, благодаря преимуществам метода обработки [30, 33, 68].

Намного лучшие эксплуатационные свойства имеют специальные композиционные ферроабразивные порошки [90], которые состоят из механических смесей магнитных и абразивных составляющих. В качестве магнитной составляющей чаще всего применяют порошки обычного или легированного железа, а также, специально для работы в переменных магнитных полях, – порошки магнитно-твердых сплавов (Fe-Ni-Al, Fe-Ni-Al-Co, ферритов). Абразивной составляющей могут быть практически все известные абразивные материалы (алмаз, эльбор, корунд, карбид кремния, карбид бора и др.).

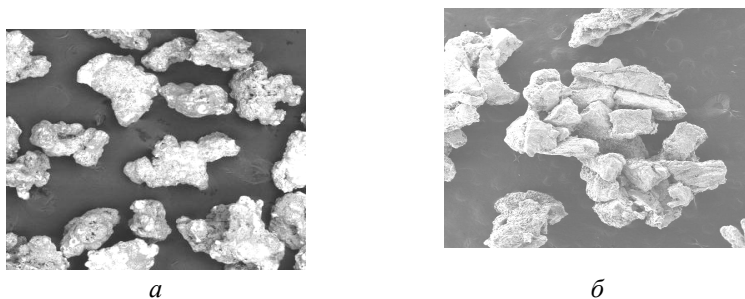
Композиционные ферроабразивные порошки обеспечивают более высокую производительность обработки и качество поверхности, поэтому являются наиболее востребованными. Состав, области применения, данные сравнительных исследований

эксплуатационных характеристик ФАП различных марок [91–93] приведены в табл. 3.1.

Исследования порошковых материалов для MAO показали, что эффективность обработки в значительной степени зависит от формы зерен ФАП [91–94].

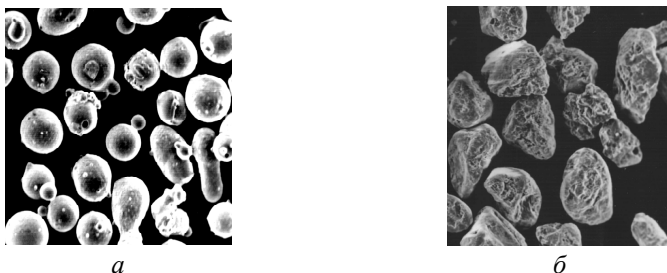
Основными геометрическими параметрами, определяющими режущую способность ферроабразивного зерна, являются форма зерен, число вершин (режущих кромок), углы при вершинах и радиусы округления вершин. У зерен ФАП, как правило, отсутствует правильная геометрическая форма.

Форма зерен ФАП зависит от материалов магнитной и абразивной составляющих, технологии его получения, зернистости и других факторов. Можно выделить две типовые формы зерен, которые определяются, прежде всего, способом их изготовления (рис. 3.2, 3.3): осколочные зерна, полученные в результате размола



*a* – Fe-TiC; *б* – порошок на основе алмазов

Рис. 3.2. ФАП осколочной формы, полученные в результате размола ( $\times 500$ )



*a* – порошок на основе Р6М5; *б* – порошок ЦРАМАМ

Рис. 3.3. ФАП округлой формы ( $\times 400$ )

гранулированных расплавленных материалов, которые имеют практически беспористую структуру. К порошкам с такой структурой относится порошок на основе аморфного железа ПОЛИМАМ-Т «ФЕРОМАП» – округлые зерна, полученные в результате расплава, без последующего размола. Примерами таких порошков являются порошки на основе Р6М5, ПОЛИМАМ-М, ЦАРАМАМ.

ФАП одного и того же состава могут иметь различную геометрическую форму, что обусловлено способом получения, дополнительной обработкой, размером фракции и другими факторами.

Способность к уплотнению частиц ФАП зависит от их формы. По данным [90], предпочтительно, чтобы форма частиц ФАП описывалась различными геометрическими показателями.

При этом также важным является степень свободы отдельных частиц и их возможность поворачиваться относительно обрабатываемой поверхности. Это подтверждает тот факт, что частички округлой формы обеспечивают повышенную полирующую способность за счет выглаживания обрабатываемой поверхности деталей, в сравнении с использованием осколочных зерен и зерен-конгломератов. Для того, чтобы обеспечить возможность поворота частиц ФАП относительно обрабатываемой поверхности, коэффициент внутреннего трения в ферроабразивной «щетке» должен быть минимальным.

Большинство ферроабразивных зерен имеет несколько вершин, образованных тупыми углами, с определенными радиусами их округления. Количество вершин на абразивном зерне, а также их углы и радиусы округления зависят от марки ФАП и его зернистости. Значение углов при вершинах зерен находится в диапазоне ( $30^\circ \div 130^\circ$ ), а большая часть углов составляет ( $100^\circ \div 130^\circ$ ) [85]. Ферроабразивное зерно, как правило, имеет несколько граней, которые образуют в пересечениях углы при вершинах. В большинстве зерен имеется несколько вершин, каждая из которых характеризуется определенным углом и радиусом округления.

Поскольку в процессе МАО происходит ориентация частиц ФАП вдоль силовых линий магнитного поля, то предпочтительно

их вытянутая или осколочная форма, что облегчает процесс переориентации (табл. 3.1.).

Таблица 3.1

Эксплуатационные свойства феррообразивных порошков

Феррообразивный порошок (состав)	Метод изготовления	Рекомендуемые к обработке материалы	Практическое применение		
			обрабатываемый материал	массовый съем, г	шероховатость по параметру Ra, мкм
1	2	3	4	5	6
23AM40-80 (80 % Fe-20 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Механическая смесь	Стали, сплавы на медной основе	У10А	6,74	0,08
			Д-16	3,2	0,58
Ж-15КТ (85 % Fe-5 % TiC)	Керметная технология	Стали, инструментальные, твердые сплавы	ШХ15	11,66	0,064
			P6M5	1,34	0,21
Fe-TiC (80 % Fe-20 % TiC)	Распыление расплава	Стали, инструментальные, твердые сплавы	У10А	2,30	0,68
			P6M5	1,12	0,37
Fe-ZrC (90 % Fe-10 % ZrC)	Распыление расплава	Стали инструментальные	У10А	3,48	0,68
Fe-VC (80 % Fe-20 % VC)	Керметная технология	Стали, цветные металлы и сплавы	ШХ15	14,1	0,045
			Д16	7,3	0,82
(60 % Fe-40 % VC) плавленный	Распыление расплава	Стали, цветные металлы и сплавы	ШХ15	15	0,13
			Д-16	8,6	0,6
Cr3C2 (80 % Fe-20% Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> )	Керметная технология	Чугуны, стали	У10А	5,26	0,69
(93,5 % Fe-6,5 % Si)-TiC	Распыление расплава	Стали	ШХ15	17,48	0,062
Fe-TiC-WC (80 % Fe-16,5 % TiC-3,5 % WC)	Распыление расплава	Стали, сплавы на основе меди, алюминия и титана	Сталь 45	3,3	0,06
			T15K6	1,3	0,06
Fe-Nb (95 % Fe-5 % Nb)	Распыление расплава	Стали, сплавы на основе меди, алюминия и титана	Сталь 45	3,2	0,1
			T15K6	0,9	0,13
Fe-WC (80 % Fe-20 % WC)	Керметная технология	Стали инструментальные	У10А	2,74	0,71
Fe-W2B5 (80% Fe-20 % W <sub>2</sub> B <sub>5</sub> )	Керметная технология	Стали, инструментальные, твердые сплавы	У10А	4,52	0,685
			P6M5	2,3	0,54
Fe-(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Ni)	Керметная технология	Цветные металлы и сплавы	Д-16	3,78	0,66
Fe-[Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +(Ni-Co)]	Керметная технология	Цветные металлы и сплавы	Д-16	3,48	0,62

1	2	3	4	5	6
ФАПР-3	Распыление расплава	Стали, титан, чугун	ШХ15	7,6	0,68
			Р6М5	3,4	0,74
Полимам-Т	Распыление расплава	Стали, твердые сплавы	Сталь 45	3,8	0,07
			ВК 6	1,2	0,05
Полимам-М	Распыление расплава	Медь, сплавы на основе меди	Д-16	4,2	0,08
			Т15К6	1,6	0,05
Стружковые отходы стали Р6М5	Механическое измельчение стружки	Конструкционные стали, твердые сплавы	Сталь 45	12,4	0,09
			Р6М5	4,6	0,12
Ферабраз-310	СВС	Стали, твердые сплавы	У10А	3,8	0,12
Ферабраз-311	СВС	Стали, твердые сплавы, титановые сплавы	Т15К6	1,9	0,09
ПАСМ (Алмазосодержащий порошок)	Керметная технология	Инструментальные стали, твердые сплавы	ВК8	6,9	0,07
			Т15К6	7,2	0,07

По структуре различают следующие типы ферроабразивных порошков [92] (рис. 3.4).

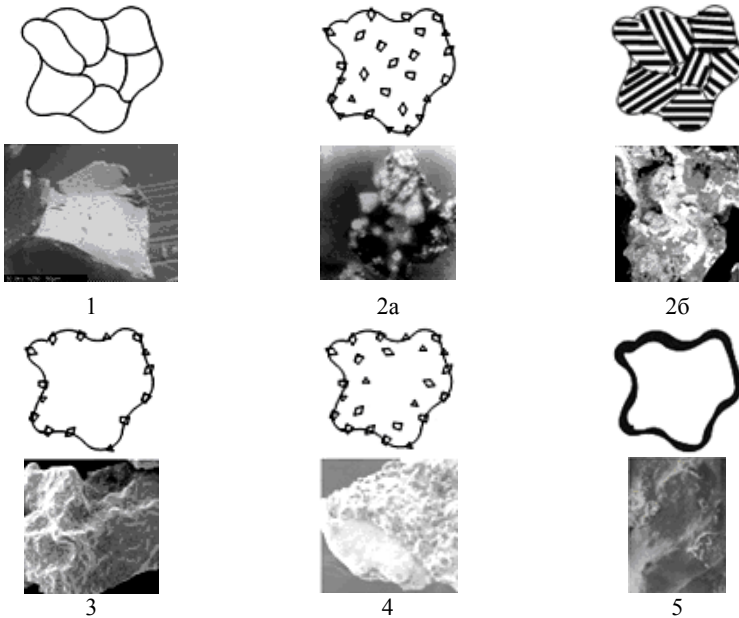


Рис. 3.4. Типы ферроабразивных порошковых материалов



Тип 1 – порошки, изготовленные из однородных материалов, которые обладают магнитными свойствами и высокой твердостью (ферриты, чугунная дробь, порошки ферросплавов). По режущей способности они существенно уступают порошкам других типов, однако находят применение благодаря низкой стоимости.

Тип 2 – это специальные композиционные ферроабразивные порошки, которые состоят из ферромагнитной матрицы и абразивного наполнителя, распределенного по всему объему частиц. Эти порошки имеют намного лучшие эксплуатационные свойства и чаще всего используются в качестве инструмента для МАО.

Порошки подтипа 2а изготавливают традиционными методами порошковой металлургии, которые включают: смешивание исходных компонентов в заданном соотношении; прессование брикетов из полученной смеси в пресс-формах при давлении 300÷400 МПа; спекание брикетов в защитной среде при температуре 1300 °С в течение 30 мин и медленное охлаждение; дробление брикетов и их размельчение в порошок, рассев порошка на фракции. 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 ( $TiB_2$ ,  $ZrB_2$ ), алмаз, эльбор.

К подтипу 2б относятся псевдосплавленные порошки, в которых абразивный компонент образует каркас. Их получают 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.

Тип 3 представляет собой порошки с ферромагнитным ядром, покрытые слоем абразива. Стойкость частиц с такой структурой определяется прочностью сцепления абразива с ферромагнитной матрицей.

Порошки, близкие к 3-му типу, со структурой 4-го типа, имеют абразив с несколькими поверхностями разного состава, расположенными на поверхности частиц ФАП.

Порошки 3-го и 4-го типов получают прокаткой или обкатыванием смеси железного порошка и абразива в валках, а

также методами азотирования или цементации порошков сплава железа из нитридо- и карбидосодержащих элементов.

Порошки 5-го типа состоят из магнитного ядра, полностью покрытого абразивным материалом. Порошки 5-го типа исключают контакт материала ферромагнитного ядра с обрабатываемыми изделиями. Структура порошков этого типа характеризуется наличием сплошной плотной пленки абразивного компонента на ферромагнитном зерне. Такой тип структуры можно получить, например, борированием железного порошка.

По способу получения специальные порошки для МАО можно разделить на два класса: 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 2-го, 3-го и 4-го типов. К литым порошкам относят порошки, полученные распылением или грануляцией из расплава. Они имеют преимущественно структуру 2-го типа (из приведенной выше классификации).

В реальных условиях при МАО действует одновременно комплекс параметров, характеризующих ФАП. Это строение и форма ферроабразивных порошков, их состав, концентрация, размер частиц, а также распределение и способ закрепления абразивного элемента в магнитной матрице, его физико-механические свойства (микротвердость, хрупкость и другие), магнитные и физико-механические свойства матрицы [94]. Сочетанием высоких абразивных и магнитных свойств обладают лишь композиционные ФАП.

Физико-механические свойства ФАП в большой степени зависят от микротвердости абразивной и магнитной компоненты зерен-композиций.

Намагниченность насыщения – важная характеристика, в значительной степени определяющая работоспособность ФАП. Прибор и методика для определения намагниченности насыщения описаны в [95]. Как показал магнитный анализ, наибольшей намагниченностью насыщения обладают МАП на основе карбида титана и железа. В ряду композиций на основе железа и карбидов титана, ванадия и хрома намагниченность насыщения убывает от карбида титана к карбиду хрома. С ростом концентрации абразива для каждой композиции намагниченность насыщения монотонно снижается.

### 3.1.2. Магнитная проницаемость и насыпная плотность 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 [29]. Магнитная проницаемость – физическая величина, характеризующая изменение магнитной индукции  $B$  среды под воздействием магнитного поля напряженностью  $H$ .

В случае однородной изотропной среды магнитная проницаемость  $\mu$ :

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H},$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Магнитная проницаемость ферромагнетиков сложным образом зависит от напряженности МП ( $H$ ). 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 железо-кремниевых сплавов с содержанием кремния (15 %÷20 %), то существует возможность в проведении исследований по созданию порошка (Fe-Si)-TiC – двумя способами.

Сущность первого заключается в смешивании Fe-Si (6,5 % Si, размер частиц 250/63 мкм) с порошком TiC, прессовании при давлении 250 МПа, спекании при температуре 1100 °С в течение 0,5 часа и измельчении спеков.

По второму способу смешивались порошки железа, чистого кремния и карбида титана, прессовались и спекались при температуре 1100 °С в течение часа, затем измельчались. Для этого процесса необходимо длительное спекание для протекания процесса диффузионного насыщения железа кремнием из «точечных источников». Результаты испытаний абразивных и

магнитных свойств материалов, полученных обоими способами, представлены в табл. 3.2.

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.

Таблица 3.2

Абразивные и магнитные свойства материала порошка (Fe-Si)-TiC

Содержание кремния, способ изготовления ФАП	Съем металла при MAO, $10^{-3}$ г	Шероховатость поверхности после MAO, Ra, мкм	Магнитная проницаемость при 60000 А/м, $10^{-3}$ мкГ/м
Si 10 %	71	0,400	4,40
Si 15 %	54	0,350	5,40
Первый способ	328	0,071	9,21
Второй способ	117	0,095	5,50

Кермет МАМ40 представляет собой частицы композиционного материала на основе железа (80 масс. %) и электрокорунда ЭБМ40 (20 масс. %). 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 составляющих 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 табл. 3.3.

Таблица 3.3

Абразивные и магнитные свойства различных материалов для MAO

Обозначение магнитно-абразивного материала		МAM40	ЖИ5КТ
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 TiC ТУ 06173–74
Количество абразивной составляющей, весов, %		20	15
Гранулометрический состав материалов, мкм		250/63	250/63
Абразивная способность (при MAO образцов из стали ШХ15, 58÷62 HRC)	съем металла при MAO, G·10 <sup>2</sup> , г	173	257
	шероховатость поверхности после MAO, Ra, мкм	0,098	0,064
Магнитная проницаемость (при H = 86 200 А/м), мкГ/м		6,6	7,3
Основные технологические параметры технологического процесса изготовления	давление прессования, МПа	150÷250	150÷250
	температура спекания, °С	1200	1300
	длительность спекания, час	0,5	0,5

Неудовлетворительная прочность соединения ферромагнитной и абразивной составляющих зерен кермета, а также его сравнительно невысокая микротвердость обусловили появление материалов с улучшенными магнитными свойствами и 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>, Zr<sub>3</sub>C, WC, полученные смешиванием исходных компонентов в соответствующем весовом соотношении, прессованием брикетов под давлением 400÷600 МПа, спеканием полученных брикетов при температурах 1100 °С ÷1300 °С в течение 0,5÷1,0 часа в среде водорода с последующим измельчением спеков в щековой и шаровой мельницах.

Из всех материалов, представленных в табл. 3.4, лучшие абразивные и магнитные свойства имеет порошок Fe-TiC.

Повышение магнитной проницаемости консолидированной порошковой массы частиц ФАП способствует повышению производительности обработки и качества обрабатываемых поверхностей. Это объясняется тем, что магнитная проницаемость ферроабразивных порошков совместно с насыпной плотностью характеризует их режущую способность и возможность самоорганизации процесса MAO путем переориентации зерен порошка в направлении магнитных силовых линий.

Таблица 3.4

Абразивные и магнитные свойства порошков композиционных материалов

Материал	Количество абразивной составляющей, масс. %	Шероховатость поверхности образцов после MAO, Ra, мкм	Съем металла при MAO, G, г	Магнитная проницаемость (H = 70 000 A/м), мкГ/м
Fe+TiC	10	0,090	149	6,31
	20	0,079	189	6,11
	30	0,087	160	5,79
Fe+WC	20	0,118	62	6,30
Fe+Zr <sub>3</sub> C	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

Насыпная плотность – это отношение массы к объему ( $\rho_{ac}$ , г/см<sup>3</sup>), она определяет степень уплотнения частиц ФАП при размещении в рабочем зазоре порции порошка. Известны два основных метода определения насыпной плотности ферроабразивных порошков: метод с использованием воронки или волюмометра Скотта.

Свободно насыпанное состояние получается при заполнении емкости с помощью воронки, расположенной над ней на определенном расстоянии.

Проба для испытания должна быть объемом не менее 100 см<sup>3</sup> для обеспечения выполнения определений на трех испытываемых порциях. Пробу для испытания отбирают и готовят в соответствии с ГОСТ 23148–98.

При необходимости пробу порошка, отобранную для испытаний, сушат в сушильном шкафу при температуре (110±5) °С до стабилизации массы. Высушенную пробу охлаждают в эксикаторе.

Насыпную плотность вычисляют по формуле

$$\rho_{ac} = \frac{m}{V} = \frac{m}{25},$$

где  $m$  – масса испытываемого порошка в емкости, г;  
 $V$  – вместимость емкости, см<sup>3</sup>.

## **3.2. Магнитно-абразивный инструмент**

### **3.2.1. Формирование ферроабразивного инструмента**

При MAO частицы ФАП не имеют жесткой связи между собой, поэтому процессы, происходящие в малом объеме обрабатываемого материала вокруг режущих кромок абразивных зерен, во многом отличаются от традиционной теории резания при шлифовании и определяют качественные показатели работы ансамбля частиц ФАП, удерживаемых магнитным полем.

Применяемый при MAO ФАП представляет собой конгломерат, состоящий из микрообъемов сплава на основе ферромагнитного материала (железа) и абразивных частиц, имеющих осколочную форму частиц, радиус скругления вершин в пределах 6–12 мкм.

Процесс снятия стружки определяется микрогеометрическими характеристиками поверхности абразивных частиц. На механизм процесса абразивной обработки в магнитном поле можно влиять изменением величины магнитного потока в рабочей зоне, сочетанием технологических режимов, выбором ферроабразивного материала, конфигурацией полюсных наконечников и др.

Исследование процесса резания абразивным зерном в составе ФАП и закономерностей образования микрорельефа формируемой поверхности позволит раскрыть сущность абразивного воздействия и установить оптимальные технологические режимы процесса обработки.

Спецификой MAO является микрорезание абразивным зерном, не закрепленным жестко в связке. Под действием силы притяжения  $F_{\gamma}$  магнитно-абразивное зерно одним или несколькими микро- и субмикровыступами прижимается к поверхности изделия (рис. 3.5, а). При наличии относительных перемещений между обрабатываемой поверхностью и зерном порошка возникает тангенциальная сила  $F_{\alpha}$ . Процесс пластического деформирования и микрорезания будет иметь место, если  $F_{\alpha} \geq \tau_c$  (где  $\tau_c$  – напряжение сдвига в металле).

При условии  $\tau_c > F_{\alpha}$  зерно под действием крутящего момента развернется и в контакт с поверхностью изделия вступит новая режущая кромка с радиусом  $\rho$ . При этом плоскость  $P'P'$  будет нормальной к плоскости резания. Очевидно, что разворот зерна возможен, если радиус округления режущей кромки  $\rho$  и угол  $\gamma$  увеличиваются.

Таким образом, анализ схемы резания при MAO показывает, что процесс контакта режущих кромок с изделием носит дискретный характер, а переориентация зерен в пространстве рабочего зазора осуществляется за счет действия крутящего момента, вызывающего их перекатывание [96].

С изменением  $\gamma$  плоскость сдвига LL, а, следовательно, и возникающая при этом пластическая деформация, смещаются вглубь материала изделия (плоскость L1L1), способствуя наклепу обработанной поверхности. Прерывистый контакт абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью изделия объясняется также наличием исходной шероховатости.

Форма и размеры образовавшегося на изделии следа в зависимости от скорости, давления на острие, свойств материала, его способности к деформационному упрочнению и адгезионному



взаимодействию, температуры и других факторов являются результатом действия ряда факторов:

- пластического деформирования и оттеснения материала по бокам и впереди индентора с образованием навалов;
- пластического циклического деформирования материала в области острия и усталостного разрушения тонких поверхностных слоев;
- пластического деформирования с адгезией;
- пластического деформирования с микрорезанием и элементами адгезионного взаимодействия;
- микрорезания (рис. 3.5, б);
- хрупкого разрушения без пластического деформирования с отделением микростружки.

Из теории шлифования [96] известно, что при внедрении абразивного зерна на глубину  $a_x$  величина фактического переднего угла  $\gamma_x$  в любой точке контакта будет равна

$$\gamma_x = \arcsin \frac{\rho - a_x}{\rho}, \quad (3.1)$$

где  $a_x$  – толщина снимаемого слоя в рассматриваемой точке, м;

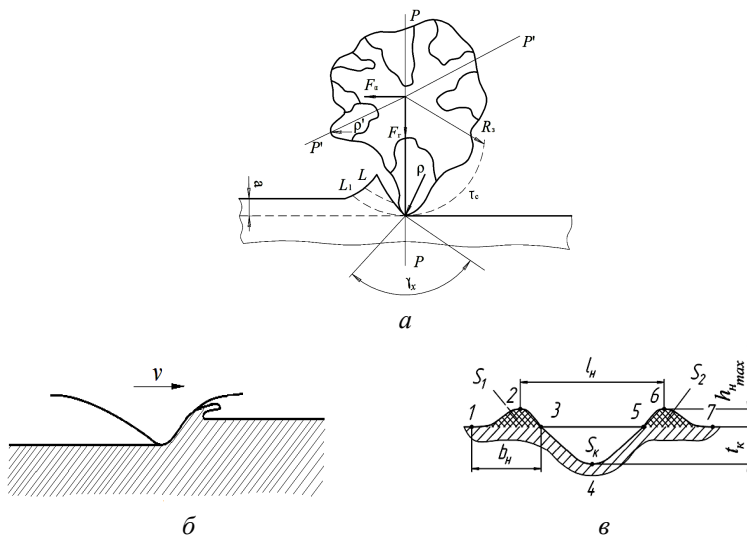
$\rho$  – радиус закругления вершины субмикронеровности зерна абразивного порошка, м.

Абразивное зерно, внедрившееся на большую глубину, выдавит большой объем материала и образует канавку с большими по высоте навалами.

Глубину канавки  $t_k$  в первом приближении можно принять равной максимальной толщине среза  $a_{z \max}$ , поскольку этот параметр характеризует максимальную глубину внедрения режущих кромок зерен в обрабатываемый материал.

В результате проведенных исследований [97] было получено следующее уравнение для высоты навалов

$$h_{t \max} = \sqrt{\frac{2S_{y \max}}{\pi}}, \quad (3.2)$$



$F_y$  – сила взаимодействия,  $F_x$  – тангенциальная сила,  $\tau_c$  – напряжение сдвига,  
 $\gamma_x$  – угол резания,  $\rho, \rho'$  – радиус при вершине,  $P'P'$  – плоскость;  
 а – схема резания единичным зерном при магнитно-абразивной обработке;  
 б – схема образования дорожек при царапании обрабатываемой поверхности  
 (микрорезание);  
 в – профиль царапины, полученной округленным царапающим элементом:  $S_1$  и  
 $S_2$  – площадь поперечного сечения левого и правого навалов,  
 $h_{\max}$  – высота навалов,  $b_n$  – ширина навалов;  $t_k$  – глубина риски,  
 $S_k$  – площадь шлифовочной канавки

Рис. 3.5. Схема стружкообразования при MAO

$$S_{y \max} = \begin{cases} \int_{h_{\text{изн}}}^{t_k + h_{\text{изн}}} f(y) dy, & t_k + h_{\text{изн}} \leq y_{\min}; \\ \int_{h_{\text{изн}}}^{t_k + h_{\text{изн}}} f(y) dy - \int_{h_{\text{изн}}}^{t_k + h_{\text{изн}}} f(y - y_{\min}) dy, & h_{\text{изн}} \geq y_{\min}; \\ \int_{h_{\text{изн}}}^{t_k + h_{\text{изн}}} f(y) dy - \int_{y_{\min}}^{t_k + h_{\text{изн}}} f(y - y_{\min}) dy, & \begin{cases} h_{\text{изн}} < y_{\min}; \\ t_k + h_{\text{изн}} > y_{\min}; \end{cases} \end{cases} \quad (3.3)$$

где  $f(y)$  – уравнение профиля режущей кромки в центральной плоскости XOY.

$$f(y) = b \cdot y^v,$$

где  $n$  и  $b$  – параметры формы, образующей рабочую кромку;

$h_{\text{изн}}$  – линейный износ рабочей кромки;

$y_{\text{min}}$  – минимальная глубина внедрения неизношенной рабочей кромки ( $h_{\text{изн}} = 0$ ), при которой начнется процесс снятия стружки.

$$y_{\text{min}} = [1g(\beta_1) b v]^{1/(1-v)}, \quad (3.4)$$

где  $\beta_1$  – угол сдвига, определяющий направление скольжения слоев обрабатываемого материала в момент отрыва.

Используя разработанную математическую модель образования единичной риски [92], можно получить формулы для оценки ее параметров:

– ширины навалов,  $b_{\text{н}}$

$$b_{\text{н}} \approx 2h_{i \text{ max}}; \quad (3.5)$$

– расстояния между вершинами навалов,  $l_{\text{н}}$

$$l_{\text{н}} = b_{\text{к}} + b_{\text{н}};$$

$$l_{\text{н}} \approx b t_{\text{к}}^v 2h_{i \text{ max}}; \quad (3.6)$$

где  $b_{\text{к}}$  – ширина канавки;

– коэффициента навалов,  $\epsilon_{\text{н}}$

$$\epsilon_{\text{н}} = \frac{S_{y \text{ max}}}{\frac{b}{v+1} \left[ (t_{\text{к}} + h_{\text{изм}})^{v+1} - h_{\text{изм}}^{v+1} \right]}; \quad (3.7)$$

– относительной высоты навалов  $\epsilon_{\text{вн}}$

$$\epsilon_{\text{вн}} = \frac{h_{i \text{ max}}}{t_{\text{к}}}. \quad (3.8)$$

Поперечный профиль канавки всегда имеет в середине след от округленной части абразивного зерна и навалы (выступы) по

краям, подобно тому, как это указано на рис. 3.5, в. Эти навалы, расстояние между серединами которых равно  $l_n$  (4÷6), расположены по краям царапины шириной (3÷5) и являются результатом пластического деформирования металла. Общая ширина внешне наблюдаемой деформированной зоны в поперечном сечении (1÷7) является «полной» шириной царапины. При исследовании царапания обычно измеряют чистую ширину царапины  $b_n$  (3÷5). При царапании значительная (местная) пластическая деформация имеет место, как впереди царапающего элемента, так и ниже линии среза.

На механизм процесса абразивной обработки в магнитном поле можно влиять изменением величины магнитного потока в рабочей зоне, сочетанием технологических режимов, выбором ферроабразивного материала, конфигурацией полюсных наконечников и др.

Интенсивность и качество MAO зависит от стабильности формирования ферроабразивного порошка в магнитно-абразивный инструмент.

Независимо от схемы реализации для процесса MAO общим является:

- роль режущего инструмента выполняет порция ФАП;
- заготовку размещают между полюсами магнитного индуктора либо рядом с ними;
- пространство между индуктором и заготовкой частично или полностью заполняют ферроабразивным порошком.

Порция ФАП при наличии магнитного поля удерживается его силами в рабочем пространстве и оказывается прижатой к обрабатываемой поверхности. При движении заготовки относительно полюсов индуктора (или наоборот) осуществляется полирование. При этом удаляется припуск и формируется изделие с новым микрорельефом и измененными физико-механическими свойствами поверхностного слоя.

Вся порция порошка, помещенного в рабочий зазор, под действием сил трения со стороны двигающейся заготовки (или полюса) смещается в направлении движения и уплотняется, встречая там основное сопротивление со стороны магнитного поля. Силы трения между зернами и поверхностью полюса помогают магнитному полю удерживать порошок внутри рабочего зазора.

При МАО основное абразивное воздействие на поверхность детали происходит на дуге контакта с ферроабразивной «щеткой». Дуга контакта определяется ее предельно возможной жесткостью при конкретных технологических параметрах процесса. Основное воздействие производит упругодеформируемый ферроабразивный слой, форма которого определяется профилем поверхности детали.

Существует несколько гипотез, объясняющих процесс съема металла при МАО. В работе [30] показано, что, кроме ориентированного абразивного резания, при обработке деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками наблюдается воздействие малых электрических токов, протекающих между ферромагнитным рабочим элементом и поверхностью детали. При этом, суммарный съем металла за счет действия микротоков лишь немного меньше величины съема металла, получаемого в результате абразивного резания.

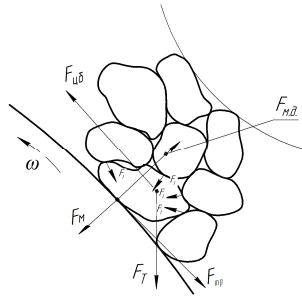
Установлено, что процесс удаления металла сопровождается не только отделением микростружек, но и в некоторых условиях происходит перемещение металла на края микронеровностей, что говорит о наличии пластического деформирования обрабатываемой поверхности. Также отмечается, что при МАО имеет место электромагнитный характер действия сил, которые обеспечивают притяжение зерен к обрабатываемой поверхности и их удержание в рабочем зазоре. Специфика поведения мелкодисперсной ферромагнитной системы (рабочего порошка) в рабочих зазорах обуславливает возникновение дополнительного механического давления магнитно-абразивной массы на обрабатываемую поверхность, что было экспериментально зафиксировано [93].

В работе [98] утверждается, что при МАО имеет место пластическое деформирование поверхностного слоя изделия, а это значит, что исключается оплавление обрабатываемой поверхности микротоками, так как оплавленный поверхностный слой характеризуется совершенно другими закономерностями формирования.

Общим для многих работ является утверждение о том, что одной из основных характеристик при МАО является давление ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность

детали, которое определяет характер протекания абразивного воздействия.

На каждое зерно ферроабразивного порошка, находящегося в рабочем зазоре, действует комплекс сил магнитного, электромагнитного и механического происхождения (рис. 3.6).



$\vec{F}_м$  – магнитная сила;  $\vec{F}_и$  – инерционная сила;  $\vec{F}_цб$  – центробежная сила;

$\vec{F}_мд$  – сила механического давления;  $\vec{F}_тр$  – сила трения;  $\vec{F}_т$  – сила тяжести

Рис. 3.6. Схема сил, действующих на зерна ФАП

Соотношение сил определяется характером внешнего магнитного поля, электропроводимостью материала порошка; выбранной схемой обработки; механическими характеристиками порошковой среды; формами и размерами зерен; свойствами применяемого СОТС.

Результирующая сила  $F$ , действующая на единичное зерно порошковой среды в рабочем зазоре, является векторной суммой составляющих ее сил и определяется по формуле

$$\vec{F} = \vec{F}_м + \vec{F}_и + \vec{F}_цб + \vec{F}_мд + \vec{F}_тр + \vec{F}_т, \quad (3.9)$$

где  $\vec{F}_м$  – магнитная сила, Н;

$\vec{F}_и$  – инерционная сила, Н ;

$\vec{F}_цб$  – центробежная сила, Н;

$\vec{F}_мд$  – сила механического давления, Н;

$\vec{F}_тр$  – сила трения, Н;

$\vec{F}_т$  – сила тяжести, Н.

В каждом конкретном способе МАО действуют все или только часть перечисленных сил.

Суммарная сила  $F$ , действующая на зерно ФАП, составляет  $(0,5\div 16)\cdot 10^{-3}$  Н. При обработке материалов с низкой магнитной проницаемостью значение результирующей силы значительно снижается. Учитывая, что  $F_m$  является одной из основных составляющих силы  $F$  при МАО, возникает необходимость при обработке материалов с низкой магнитной проницаемостью компенсировать действие магнитной силы. При более высоких силах, действующих на зерно порошка  $(20\div 50)\cdot 10^{-3}$  Н, происходит более интенсивное снятие микростружки.

Для увеличения давления на зерно ФАП необходимо создать в зоне обработки дополнительные силы, которые позволят увеличить суммарную силу, действующую на ФАП, и, следовательно, интенсифицировать процесс обработки, компенсируя низкую магнитную проницаемость (например, при обработке цветных металлов, твердых сплавов).

Внедрение вершины абразивного зерна в металл обрабатываемой детали зависит от приложенной к зерну нагрузки, величины радиуса округления вершины и физико-механических свойств материала детали.

Значение угла резания  $\delta$  в этом случае

$$\delta_x = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{\rho - a_x}{\rho}. \quad (3.10)$$

Величины углов  $\gamma_x$  и  $\delta_x$  имеют большое значение в процессе резания. При малых значениях  $ax$  величины этих углов становятся настолько большими, что делают практически невозможным процесс резания. При этом происходит только деформирование металла – упругое или пластическое.

С увеличением глубины внедрения вершины абразивного зерна в металл поверхности обрабатываемой детали происходит увеличение объема металла, подвергаемого пластическому деформированию, как впереди абразивного зерна, так и по бокам его и ниже линии среза. При определенном критическом значении глубины внедрения перемещение абразивного зерна сопровождается снятием стружки.

Физико-механические свойства металла обрабатываемой детали имеют большое значение в процессе стружкообразования при абразивной обработке. При одних и тех же условиях микрорезания единичным абразивным зерном с повышением пластичности металла увеличивается его количество, пластически оттесняемое по краям царапины, и уменьшается доля металла, который удаляется в виде микростружки. Это приводит к ухудшению обрабатываемости деталей абразивным инструментом. В более прочных и хрупких материалах, наоборот, доля пластически оттесняемого металла уменьшается, а удаляемого в виде микростружки возрастает. Количественная оценка этого явления производится с помощью коэффициента стружкообразования  $K = V_c/V_{ц}$ ,

где  $V_c$  – объем металла, удаленного в виде микростружки;

$V_{ц}$  – теоретический объем царапины.

При  $K = 0$  имеет место только пластическое деформирование металла. С увеличением значения  $K$  сьем металла возрастает.

С учетом того, что практически при любом процессе абразивной обработки наряду со снятием металла в форме микростружки происходит и пластическая деформация, значение коэффициента стружкообразования будет всегда меньше единицы. Поверхность большинства абразивных зерен имеет определенную шероховатость, обусловленную внутренним несовершенством кристалла и условиями его возникновения. Вследствие этого поверхность вершин зерен представляет собой совокупность непрерывно чередующихся микровыступов и субмикровыступов, которые играют определенную роль в процессе резания металла.

Внешняя сила, действующая на единичное абразивное зерно, может быть разложена на нормальную силу  $P_y$ , прижимающую зерно к обрабатываемой поверхности, и тангенциальную силу  $P_z$ , возникающую при перемещении абразивного зерна и срезающую металл. При обработке связанным абразивом соотношение этих сил зависит от фактического переднего угла  $\gamma$  и коэффициента трения при микрорезании  $f$ .

Теоретическими и экспериментальными исследованиями доказано, что при одном и том же радиусе округления вершины абразивного зерна с уменьшением его внедрения в металл



увеличивается передний угол  $\gamma$  и отношение  $P_y/P_z$  значительно возрастает. При определенных значениях  $h$  и  $f$  отношение этих сил может быть очень большим.

Поскольку угол резания превышает  $90^\circ$ , то увеличение силы  $P_y$  вызывает деформацию сжатия металла, в результате которой повышается сопротивление сдвигу деформируемого слоя вследствие увеличения силы трения в плоскости скалывания при формировании стружки. Увеличивается при этом и сила внешнего трения между поверхностью абразивного зерна и поверхностью обрабатываемого материала. Возникающие в процессе резания абсолютные значения сил  $P_y$  и  $P_z$  зависят от физико-механических свойств обрабатываемого материала и толщины среза  $h$ . С увеличением прочности обрабатываемого материала и глубины среза  $h$  значения этих сил возрастают. Но при этом нормальная сила  $P_y$  всегда больше тангенциальной  $P_z$ .

При малом давлении абразивного зерна на обрабатываемый материал происходит только скольжение зерна по поверхности материала и соотношение сил  $P_z = P_y/f$ , где  $f$  – коэффициент трения абразива по обрабатываемому материалу. В этом случае удельный вес работы трения при абразивном воздействии составляет 100 %.

В зоне упругого и пластического деформирования соотношение сил определяется из выражения  $P_z = P_y/F'$ . Здесь  $F'$  – площадь поперечного сечения деформированного слоя. Зависимость показывает, что в области пластических деформаций деформирующая сила  $P_z$  уменьшается с увеличением площади поперечного сечения деформированного слоя.

В зоне микрорезания имеет место зависимость  $P_z = P_y/F$ , где  $F$  – площадь поперечного сечения царапины.

Увеличение толщины снимаемого слоя при микрорезании, а следовательно, и площади поперечного сечения царапины при тупом угле резания практически не изменяет работы деформирования. Этим объясняется тот факт, что при значительных толщинах снимаемых слоев условное напряжение микрорезания мало зависит от изменения толщины снимаемого слоя.

В [100] подтверждено, что абсолютное значение силы  $P_z$ , а, следовательно, и условное напряжение микрорезания определяются главным образом физико-механическими свойствами абразива и обрабатываемого материала.

Можно сделать вывод, что при любом виде абразивного воздействия на поверхность обрабатываемой детали большую роль играет сила трения. Если удельный вес работы трения при активном микрорезании составляет 80 %, то при обработке ферроабразивным инструментом из-за разности размеров и формы зерен значительная часть которых оказывает только упругое и пластическое деформирование, работа трения будет еще больше. Если учесть трение связки о поверхность обрабатываемой детали и адгезионное налипание металла на абразивные зерна, то удельный вес работы трения при обработке связанным абразивом, по данным [100], достигает 95 %÷98 %. Это делает актуальной проблему уменьшения трения при обработке связанным абразивом за счет применения рациональной смазки и других мер.

Процесс обработки деталей уплотненным потоком свободного абразива имеет характерные особенности в реализации абразивного воздействия и формировании характеристик поверхностного слоя, обусловленные следующими причинами: абразивное зерно не закреплено, как в абразивных инструментах, поэтому контактирует с обрабатываемым материалом не одной какой-то вершиной, а последовательно разными гранями, ребрами и вершинами. В связи с этим форма абразивного зерна играет в этом процессе более значимую роль; единичное абразивное зерно прижимается к обрабатываемой поверхности постоянной по величине силой, значение которой определяется центробежными силами. Следовательно, усилия резания в этом случае будут ограничиваться конечными значениями.

Плотность абразивных зерен в зоне контактирования уплотненного абразивного слоя с обрабатываемой поверхностью выше, чем в случае обработки связанным абразивом.

Модель рабочей поверхности абразивного инструмента при МАО может быть представлена в виде пространственного расположения зерен ФАП, аппроксимированных эллипсоидами вращения и имеющими наклон относительно обрабатываемой поверхности (рис. 3.7).

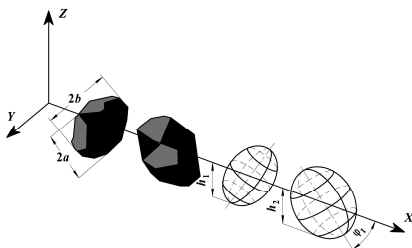


Рис. 3.7. Схема вариантов расположения абразивных зерен, участвующих в процессе обработки

В зависимости от ориентации зерен они могут осуществлять процесс резания или упруго деформировать поверхность. Используя известный подход по разделению абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента на режущие и деформирующие, можно определить процентное содержание режущих зерен. Его можно принять равным отношению количества зерен с ненулевой режущей площадью передней поверхности к общему количеству рабочих зерен  $N$

$$N_{\text{реж}} = \frac{\sum_{k_3=1}^Z (S_p [k_3] > 0)}{\sum_{k_3=1}^Z ((S_p [k_3] + S_d [k_3]) > 0)} \cdot 100 \%, \quad (3.11)$$

где индексы у единиц обозначают, что суммирование выполняется только при соответствующих условиях.

Количество деформирующих зерен

$$N_{\text{деф}} = \frac{\sum_{k_3=1}^Z (S_d [k_3] > 0 \text{ при } S_p = 0)}{\sum_{k_3=1}^Z ((S_p [k_3] + S_d [k_3]) > 0)} \cdot 100 \%. \quad (3.12)$$

Для определения количества абразивных зерен  $Z$ , принимающих участие в процессе обработки, рассчитывается среднестатистическое расстояние между зёрнами ФАП, входящими в ферроабразивную «щётку» (рис. 3.7):

$$Z = \frac{\frac{V_0 k}{100}}{\sum_{y=1}^{2b} \pi a^2 \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)}, \quad (3.13)$$

где  $V_0$  – единичный объем рабочего слоя абразивного инструмента, м<sup>3</sup>;  
 $k$  – объемная концентрация абразивного материала (в процентах);  
 $a, b$  – полуоси эллипсоида вращения.

Тогда среднестатистическое расстояние  $l_c$  между зернами в связке определяется как отношение длины ребра единицы объема к количеству зерен, расположенных вдоль этого ребра:

$$l_c = \frac{\sqrt[3]{V_0}}{Z} = \sqrt[3]{\frac{100}{k} \sum_{y=1}^{2u} \pi a^2 \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)}. \quad (3.14)$$

Реальное значение расстояния между вершинами зерен находится в пределах:

$$(d_{31} + d_{32}) \leq l_\phi \leq l_c, \quad (3.15)$$

где  $d_{31}$  и  $d_{32}$  – размеры от вершины зерна до его границы в направлении последующего и предыдущего зерен соответственно (зависят от зернистости и пространственной ориентации зерен), м.

Выражение (3.15) характеризует реальное расположение зерна в профиле ферроабразивного инструмента.

Максимальное расхождение величины среднестатистического расстояния не превышает 15 %, что, учитывая хаотичность расположения зерен в рабочем зазоре, можно считать вполне приемлемым.

Абразивное зерно в зоне контактирования с поверхностью вдавливается в металл на определенную глубину  $a_x$  под действием суммарной силы  $P_{\Sigma N}$  которая создается центробежными силами и давлением лежащих выше слоев абразивных зерен. Значение суммарной силы для обработки может быть вычислено с учетом сил, действующих со стороны лежащих выше абразивных зерен в

уплотненной «щетки». В общем случае на единичное зерно будут действовать приведенная нормальная сила  $Q$  и сила трения  $T$  (рис. 3.8).

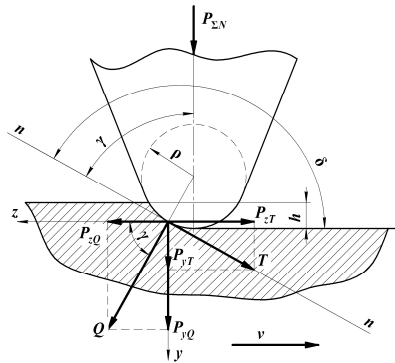


Рис. 3.8. Схема действующих сил при микрорезании единичным абразивным зерном

Указанные силы можно приложить в некоторой точке в середине дуги контактирования абразивного зерна с металлом.

Раскладывая их по направлениям осей  $x$  и  $y$ , можем определить силу  $P_y$ , прижимающую абразивное зерно к обрабатываемой поверхности, и  $P_z$ , которая срезает микростружку:

$$P_{zQ} = Q \cos \gamma; P_{yQ} = Q \sin \gamma.$$

$$P_{zT} = T \sin \gamma; P_{yT} = T \cos \gamma. \text{ с.}$$

$$P_y = P_{yQ} + P_{yT} = Q \sin \gamma + T \cos \gamma.$$

$$P_z = P_{zQ} + P_{zT} = Q \cos \gamma + T \sin \gamma.$$

Или

$$P_y = Q(\sin \gamma + f \cos \gamma);$$

$$P_z = Q(\cos \gamma + f \sin \gamma),$$

откуда получаем

$$Q = \frac{P_{\Sigma N}}{\sin \gamma + f \cos \gamma}.$$

Величина силы резания:

$$P_z = \frac{P_{\Sigma V} (\operatorname{ctg}\gamma - f)}{1 + f \operatorname{ctg}\gamma}. \quad (3.16)$$

### 3.2.2. Механизм стружкообразования при магнитно-абразивной обработке

Известно, что основная доля тепла (до 90 %), выделяемая в процессе абразивной обработки, поглощается материалом детали. Поглощаемое тепло приводит к упругим и пластическим деформациям обрабатываемого материала в зоне резания, которые, в свою очередь, являются источником излучения тепловой энергии, влияющим на качество обрабатываемой поверхности.

Рассмотрим деформированное состояние зоны резания при образовании стружки, снимаемой абразивным зерном под действием силы  $P_z$  с учетом скорости резания и температуры в зоне контакта.

Потенциальная энергия упругой деформации  $U$  тела определяется:

$$U = \int_V \frac{1}{2E} \left[ \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\nu(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z) + \right. \\ \left. + 2(1+\nu)(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right] \cdot dV. \quad (3.17)$$

Если ввести относительные удлинения по осям  $X, Y, Z$

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta dx}{dx}; \quad \varepsilon_y = \frac{\Delta dy}{dy}; \quad \varepsilon_z = \frac{\Delta dz}{dz},$$

относительные сдвиги сечений  $\gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}; \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G}\tau_{yz}; \quad \gamma_{xz} = \frac{1}{G}\tau_{xz}$

и относительное изменение объема  $\varepsilon = \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ , то

получим

$$U = \int_V G \left[ \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon^2 \frac{1}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{xz}^2) \right] \cdot dV. \quad (3.18)$$

где  $G$  – модуль сдвига;

$E$  – модуль упругости  $E=2G(1+\nu)$ ;

$\nu$  – коэффициент Пуассона ( $\nu = \epsilon_{\text{поп}}/\epsilon_{\text{прод}}$ ;  $\epsilon_{\text{поп}}$ ,  $\epsilon_{\text{прод}}$  – поперечное и продольное удлинения).

Определим энергию деформации элемента стружки, снимаемой при абразивной обработке одним зерном, вдоль оси  $Z$  с силой резания  $P_z$  (рис. 3.9 и 3.10).

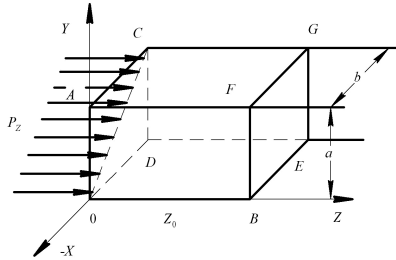


Рис. 3.9. Схема действия сил на элемент стружки

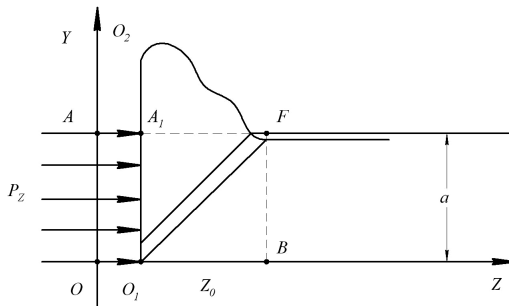


Рис. 3.10. Схема деформации стружки

Деформация элемента  $OACDEBFG$  направлена по оси  $Z$  при сжатии и по оси  $Y$  при растяжении. Упругая деформация происходит по треугольнику  $AOF$ , пластическая деформация или сдвиг по линии  $O_1F$  (см. рис. 3.9). По линиям  $OO_1B$  и  $OA$  в сечениях плоскостей  $XOZ$  и  $XOY$  и по бокам сжимаемой стружки возникают касательные напряжения –  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ . Рассматриваемый элемент стружки сжимается на величину объема  $OAA_1O_1$  под

действием  $P_z$  и выдавливается в объем  $A_1O_2F$  в результате действия касательных напряжений по торцу и бокам элементов  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ .

Объем  $O_1O_2FB$ , подверженный деформированию, будет равен:

$$V_{\text{деф}} = ab \left[ \left( 1 + \frac{\nu P_z}{2abE} \right) z_0 - \frac{P_z}{bE} - \frac{\nu}{2} \frac{P_z^2}{ab^2 E^2} \right]. \quad (3.19)$$

Сила  $P_z$  по ОХ (рис. 3.10) будет создавать изгибающий момент:

$$M = P_z \frac{1}{2} (a + \varepsilon_{\text{пон}}). \quad (3.20)$$

Момент  $M$  изгибает полосу  $abz_0$ , в результате чего стружка, снимаемая одним зерном, должна «наплывать» на него и закручиваться по направлению движения. При абразивной обработке деформация стружки происходит не плавно, а поэлементно в направлении линии  $OO_1$  (рис. 3.11).

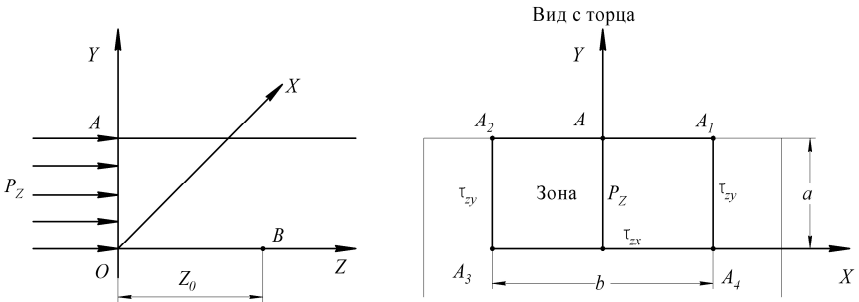


Рис. 3.11. Схема действия касательных напряжений

По линии  $OO_2$  проходит пластическое течение стружки, при котором изгибающий момент (3.20) увеличивается до величины, достаточной для отрыва стружки от зерна и увода ее в межзеренное пространство  $O_2O_3$ . Пластическое течение по линии  $OO_1$  (а не точно по оси  $Z$ ) объясняется именно наличием значительного изгибающего момента, действие которого ускоряет пластическую деформацию. По линии  $OO_1$  происходит одновременно и сжатие снимаемого слоя обрабатываемой поверхности детали. Объемная



деформация  $OO_2O_1$  шириной  $b$  приводит к возникновению наплыва толщиной  $\epsilon_{\text{ноп}}$  (рис. 3.12) и изменению всего объема на величину:

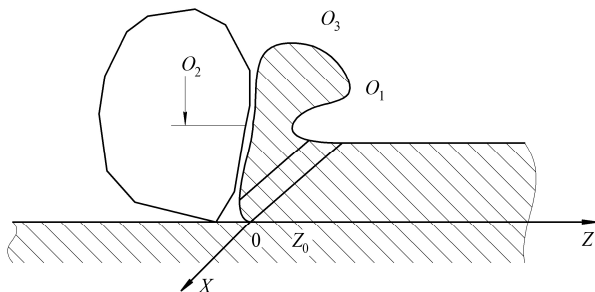


Рис. 3.12. Схема деформации стружки

$$\Delta V = V - V_{\text{деф}} = ab \left\{ z_0 - \left[ \left( 1 + \frac{vP_z}{2abE} \right) z_0 - \frac{P_z}{bE} - \frac{v}{2} \frac{P_z^2}{ab^2E^2} \right] \right\}. \quad (3.21)$$

Изменение объема сопровождается выделением тепловой энергии и нагревом стружки. Величина нагрева зависит от скорости деформации, т. е. от скорости резания.

Для расплавления пластически деформированного слоя толщиной  $h_c$  необходимо затратить теплоту плавления стружки  $Q_{\text{пс}}$  от одного абразивного зерна:

$$Q_{\text{пс}} = h_c L_{OO_2OO_1} b Q_{\text{п}} \gamma_m, \quad (3.22)$$

где  $Q_{\text{п}}$  – теплота плавления, Дж;

$\gamma_m$  – удельный вес;  $b$ ;

$L_{OO_2OO_1}$  – размеры зерна, м.

Так как полного расплава слоя по толщине не происходит, то стружка успевает отделиться от обрабатываемой детали со скоростью  $V_{\text{окр}}$  (рис. 3.13). Элемент стружки  $OO_2O_3O_1$  находится в состоянии объемного сжатия.

По поверхностям  $OO_2$  и  $OO_1$  объем сжимается непосредственно под действием сил резания  $P_z$ . По поверхности  $O_2O_3O_1$ , которая условно считается свободной от нормальных напряжений, момент (3.20) создает деформацию сжатия самой поверхности. Тогда за модель деформации элемента стружки  $OO_2O_3O_1$  можно взять

модель стесненного сжатия с одной только «полусвободной» поверхностью  $O_3O_1$ , в сторону которой происходит вытеснение материала стружки при действии  $P_z$ . Стружка раскаляется и закручивается. Следовательно, изменение температуры составит:

$$\Delta\theta = \theta_{\text{конечное}} - \theta_{\text{начальное}} = \frac{\Delta V}{V\beta} \geq \frac{\left[ \left( 1 + \frac{\nu P_z}{2abE} \right) z_0 - \frac{P_z}{bE} - \frac{\nu}{2} \frac{P_z^2}{ab^2 E^2} \right]}{\beta z_0}, \quad (3.23)$$

где  $P$  – коэффициент объемного температурного расширения.

Чтобы разогреть массу стружки объемом  $bS_{OO_2O_3O_1}$  от  $\theta_{\text{начальное}}$  до  $\theta_{\text{конечное}}$  необходимо затратить количество тепла [101]:

$$Q_M = \frac{1}{2} C_p \gamma_M ab z_0 \Delta\theta, \quad (3.24)$$

где  $C_p$  – изобарная теплоемкость обрабатываемого материала.

Учитывая, что пластические деформации происходят в тонком слое  $OO_1$ ,  $OO_2$  (рис. 3.13) можно принять, что остальная масса стружки находится в состоянии упругой деформации.

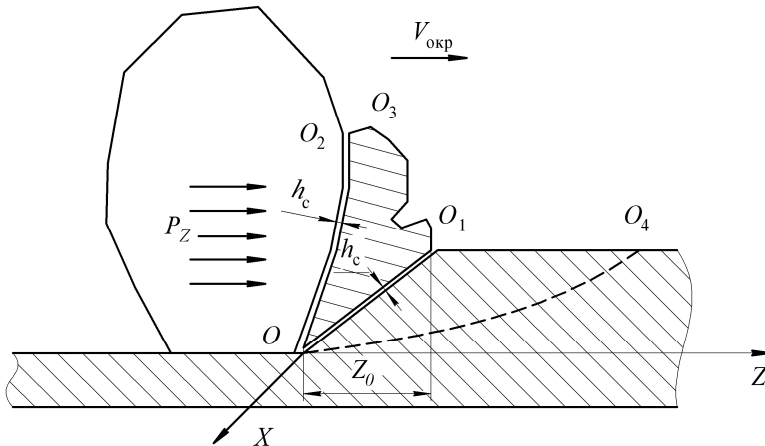


Рис. 3.13. Стадии формирования стружки

Выделяемая тепловая энергия должна соответствовать энергии, необходимой объему обрабатываемой детали, равному  $V_{\text{деф}}$  и расширяться до  $V$  при нагревании. При МАО возникают потери механической энергии на изменение формы деформируемого тела, на его передвижение с некоторой скоростью с преодолением касательных напряжений, на расплав или размягчение слоя  $L_{O_2O_1}$ . Поэтому реальное выделение тепла  $Q_p$  при деформации

$$Q_p = k(Q_m + Q_{\text{nc}}), \quad (3.25)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий истинное выделение тепловой энергии.

В рассматриваемых условиях  $\sigma_x = \sigma_y = 0$ ;  $\tau_{xy} = 0$ ;

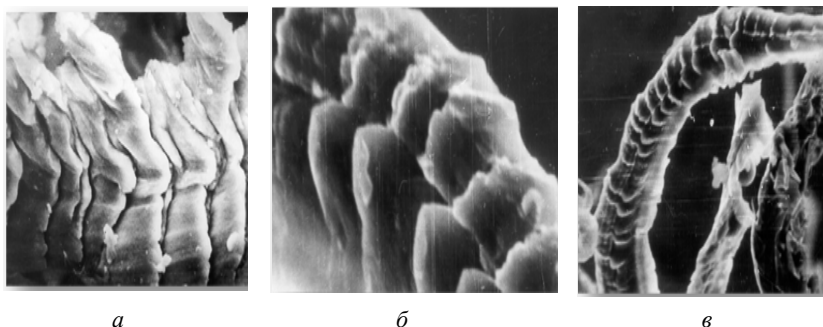
$\tau_{xz} = \tau_{xy} = \frac{P_z}{(2a+b)z_0}$ ;  $\sigma_z = \frac{P_z}{ab}$ . Тогда потенциальная энергия упругой деформации

$$U = \frac{P_z^2}{2E} \left( \frac{1}{a^2b^2} + \frac{4(1+\nu)}{(2a+b)^2 z_0^2} \right) ab z_0. \quad (3.26)$$

Формулы 3.21–3.26 позволяют для конкретных глубин резания определять оптимальные значения  $a$ ,  $b$ ,  $l$  для достижения максимальной производительности. За счет регулирования температуры МАО, возникающей под действием деформаций, можно управлять качеством обрабатываемой поверхности.

Стружкообразование при шлифовании в широком диапазоне скоростей резания происходит в условиях адиабатического сдвига. При этом тепло, выделяемое в результате работы пластической деформации, локализуется в узкой зоне, деформация сдвига становится концентрированной, а стружка – суставчатой или элементной.

Внешним признаком адиабатического сдвига при обработке со скоростями резания, соответствующими исследованию, является вид стружек, которые при обработке сталей представляют собой длинные, изогнутые ленты разной толщины и ширины с тонкими рваными краями (рис. 3.14).



*а*

*б*

*в*

$a - v_{кр} = 40 \text{ м/с } (\times 1420);$

$б - v_{кр} = 40 \text{ м/с } (\times 3570); в - v_{кр} = 160 \text{ м/с } (\times 720)$

*Рис. 3.14.* Фотографии стружек при микрорезании стали 45 единичным абразивным зерном из белого электрокорунда 24А

Края имеют округленные вершины, которые образуются при достижении частицами стружек температуры красного каления в воздухе после их отделения от обрабатываемого материала и последующего отверждения. Увеличение скорости резания с 35 до 100 м/с не приводит к заметному изменению размеров стружки. При больших скоростях в составе стружек появляется значительный процент мелких стружек.

Изучение стружек, полученных прерывистым микрорезанием единичным абразивным зерном, показывает, что характер стружкообразования, внешний вид, структура стружек принципиально не изменяются по сравнению со шлифованием. Хорошо видны элементы сдвига при разных скоростях резания. Толщина элементов сдвига колеблется в пределах  $1,5 \div 5,0$  мкм, а длина пути резания-скольжения –  $\sim 10 \div 30$  мкм при толщине среза, не превышающей несколько микрометров. Внешний вид поверхностей сдвига свидетельствует об интенсивной пластической деформации; хорошо видны следы оплавления металла, особенно на вершинах элементов. Поверхности лепестков неровные, имеют углубленные борозды, срывы ламинарного течения металла.

Результаты изучения стружек показывают, что элементный характер стружкообразования, характерный для адиабатического сдвига, предопределяет условия сопротивления сталей пластическому деформированию, цикличности действия сил сдвига в плоскости сдвига. Количество элементов сдвига при одном врезании

режущей кромки в металл определяет частоту колебаний силы сдвига за время контакта, а изменение сопротивления металла сдвигу в начале и конце пути скольжения в условиях высокой температуры, большой скорости деформации и гидростатического сжатия определяет величину амплитуды силы. В результате процесс образования стружки при шлифовании со скоростями до 160 м/с происходит в условиях неустойчивого резания, что ведет к выделению большого количества теплоты, возникновению макроскопических остаточных напряжений первого рода в металле поверхностного слоя заготовки, интенсивному износу абразивных зерен и динамической неустойчивости в замыкающей подсистеме – зоне резания.

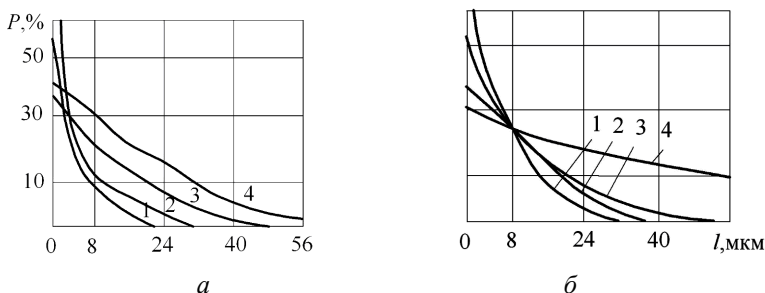
Анализ полученных стружек и их распределения по размерам показал, что они достаточно точно аппроксимируются экспоненциальной кривой вида

$$y = y_0 e^{-ax}, \quad (3.27)$$

где  $y$  – процентное содержание стружки данного размера в общей ее массе;

$x$  – размер стружки.

При использовании порошка  $\Delta = 0,10/0,16$  мм наибольшее количество стружек ( $\sim 80\%$ ) не превышает по размеру 1 мкм. С увеличением зернистости порошка наблюдается [100] перераспределение размеров стружек (кривые 2–4 на рис. 3.15, а).



1 –  $\Delta = 0,16$  мм; 2 –  $\Delta = 0,25$  мм; 3 –  $\Delta = 0,4$  мм; 4 –  $\Delta = 1$  мм

Рис. 3.15. Распределение размера стружки в зависимости от зернистости порошка без использования СОТС (а) и с использованием СОТС (б)

При обработке порошком  $\Delta = 0,6/1$  мм размер стружек достигает 60 мкм. Увеличение числа стружек больших размеров является показателем снижения шероховатости. При использовании порошка  $\Delta = 0,1/0,16$  мм  $Ra_2$  0,096, а порошка  $\Delta = 0,6/1$  мм (кривая 4)  $Ra_2$  0,192. Из рис. 3.15, б видно, что на характер распределения размеров стружки заметное влияние оказывают смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС), подаваемые в рабочую зону. Так, например, МАО без СОТС порошком  $\Delta = 0,16 \div 0,25$  мм обеспечивает размер стружек до 8 мкм ~ 55 %, а при использовании в качестве СОТС водного раствора ПАВ (Аквол-10) и порошка той же зернистости количество стружек до 8 мкм увеличивается до 75 %. При этом наибольший размер стружек снижается с  $48 \div 50$  до  $32 \div 35$  мкм.

Кривые 2 и 3 (рис. 3.15, б) показывают также характер изменения размера стружек при МАО меди и алюминия, а кривая 4 – размер стружек при обработке абразивной лентой. Очевидно, что обработка алюминия сопровождается образованием более крупных по размерам стружек. Максимальный размер стружек при МАО меди – 48 мкм (кривая 2), а алюминия  $56 \div 60$  мкм (кривая 3). Как видно из рис. 3.16 [100], стружки после МАО представляют собой сегментообразные элементы или запятые.

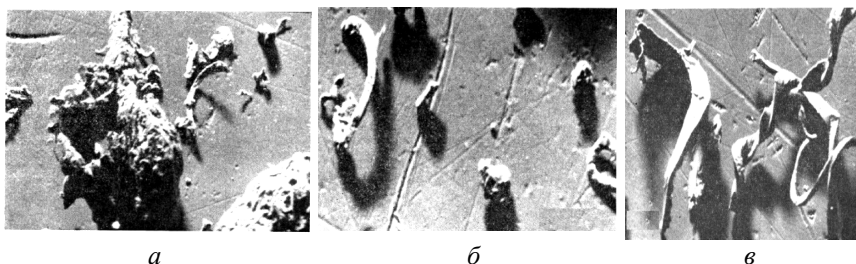


Рис. 3.16. Фотографии зерна ФАП (а),  $\rho = 1$  мкм и стружек, полученных МАО (б) и полированием абразивной лентой (в)

Отношение ширины стружки к ее длине при этом составляет 5:20. На поверхности стружек видны отдельные сильно деформированные участки, что свидетельствует о высоких пластических деформациях в зоне резания. Косвенным показателем, характеризующим величину пластической деформации при

резании магнитно-абразивным методом, является радиус кривизны стружки, уменьшающийся с увеличением коэффициента ее усадки. Замеры показали, что стружки по радиусу кривизны распределяются статистически следующим образом:  $\rho_{\text{мао}} = (0 \div 30)$  мкм,  $\rho_{\text{ал}} = (40 \div 110)$  мкм. Радиусы кривизны завитка стружки после МАО ( $\rho_{\text{мао}}$ ) и после полирования абразивной лентой ( $\rho_{\text{ал}}$ ) характеризуют также степень пластической деформации при резании указанными способами. Распределение стружек по их размерам при магнитно-абразивной обработке носит экспоненциальный характер и является функцией геометрии режущих кромок применяемого МАП.

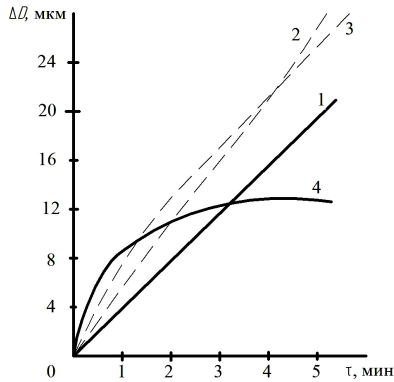
### 3.2.3. Способы магнитно-абразивной обработки

По мере магнитного насыщения порошковой массы, заполняющей рабочие зазоры, картина магнитного поля на границах рабочих зазоров изменяется: увеличивается их магнитное сопротивление, которое становится близким по величине магнитному сопротивлению соседних воздушных участков, являющихся путями прохождения магнитных потоков утечки. В связи с этим плотности магнитных потоков утечки и основного потока, пронизывающего рабочий зазор, становятся соизмеримыми, а градиент магнитной индукции на границах рабочего зазора приближается к нулю. При этом, согласно формуле

$$F_{\text{м}} = \frac{1}{\mu_0} VB\Delta B, \quad (3.28)$$

силы  $F_{\text{МЗ}}$  и  $F_{\text{МХ}}$ , удерживающие порошок в рабочем зазоре и обеспечивающие осцилляцию зерен относительно изделия, уменьшаются.

Последнее обстоятельство немедленно отражается на интенсивности обработки. Порошок силами трения выбрасывается из рабочих зазоров, и процесс снятия стружки затухает. Это хорошо видно на графиках, полученных при различных значениях магнитной индукции в рабочих зазорах (рис. 3.17).



1 –  $B = 0,6 \text{ Т}$ ; 2 –  $B = 0,8 \text{ Т}$ ; 3 –  $B = 1,2 \text{ Т}$ ; 4 –  $B = 1,4 \text{ Т}$

Рис. 3.17. Влияние времени обработки на интенсивность съема металла  $\Delta D$  при различных величинах магнитной индукции

Наиболее благоприятными значениями магнитной индукции являются  $B = 0,8 \div 1,2 \text{ Т}$ . Создавать более высокую магнитную индукцию в рабочих зазорах нет необходимости, поскольку это, наряду с увеличением нормальных сил резания, ухудшает условия удерживания порошка в рабочих зазорах и, кроме того, требует резкого увеличения мощности обмоток электромагнитного индуктора.

Геометрические размеры элементов полюсных наконечников отнесены к магнитным параметрам процесса МАО, поскольку они влияют на распределение основного магнитного потока внутри рабочего зазора и на соотношение между основным магнитным потоком  $\Phi_0$ , и магнитными потоками утечки  $\Phi_y$ . Необходимо отметить важность с этой точки зрения таких размеров, как величина рабочего зазора  $\delta$ , диаметр расточки полюса  $D_n$ , углы охвата  $\beta$  и наклона вспомогательных поверхностей  $\gamma$  (рис. 3.18, а).

Величина рабочего зазора  $\delta$  измеряется вдоль силовых линий поля и определяет собой его магнитное сопротивление ( $R_M = \delta / \mu S$ ). ФАП имеет большое магнитное сопротивление, и увеличение размера  $\delta$  влечет за собой заметное изменение в соотношении основного магнитного потока и потоков утечки.

Влияние величины  $\delta$  на интенсивность резания представлено в табл. 3.5. По форме поперечного сечения рабочие зазоры разделяются на концентричные ( $D_n = D + 2\delta$ ), серповидные ( $D_n < D + 2\delta$ ) и расходящиеся ( $D_n > D + 2\delta$ ).

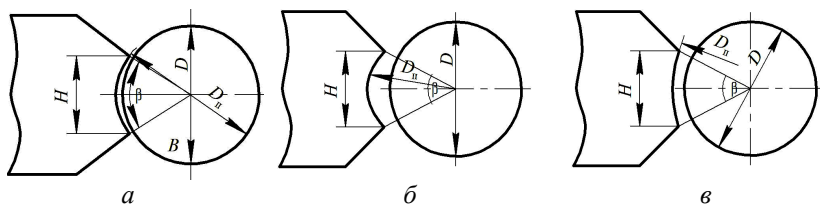


Серповидность можно оценивать отношением

$$\Psi = \frac{D_{\pi}}{D + 2\delta}. \quad (3.29)$$

Для получения серповидного зазора необходимо обеспечить условие  $\Psi < 1$ , но с учетом приведенных выше рекомендаций следует придерживаться значения  $\Psi = 0,8 \div 0,9$ .

В зависимости от формы полюсных наконечников и величины рабочих зазоров классификация видов МАО приведена в табл. 3.6, 3.7.



*a* – концентричный; *б* – серповидный; *в* – расходящийся

Рис. 3.18. Виды формы поперечного сечения зазоров

Таблица 3.5

Интенсивность съема материала в зависимости от величины рабочего зазора  $\delta$

Величина рабочего зазора $\delta$ , мм	Производительность (съем материала, $q$ , мг/(см <sup>2</sup> ·мин)
1,0	25,4
1,5	29,1
2,5	25,5
3,0	20,6

При  $\delta = 3,5$  мм силы  $F_{MZ}$  оказываются настолько малыми, что уже после  $15 \div 20$  с обработки рабочие зазоры остаются пустыми.

Зазоры с  $\delta < 1$  плохо заполняются ферромагнитным порошком, и сравнительно небольшое количество режущих зерен в таких рабочих зазорах быстро теряет свои режущие свойства. Увеличение  $\delta$  позволяет разместить в рабочих зазорах большую порцию порошка. Зерна порошка в этом случае имеют большую свободу перемещений внутри зазора, необходимых для самозатачивания порошковой массы. Стойкость порции порошка и интенсивность

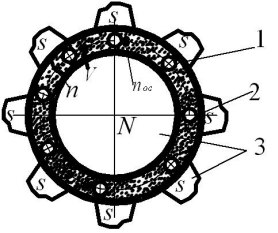
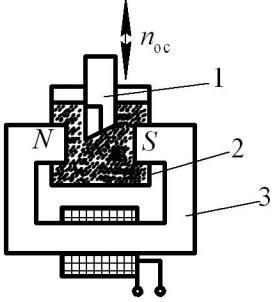
резания увеличиваются. Чрезмерное увеличение  $\delta$  и соответственно магнитного сопротивления рабочих зазоров приводит к появлению больших потоков утечки, снижению тангенциальных магнитных сил и к плохому удерживанию порошка в зазорах.

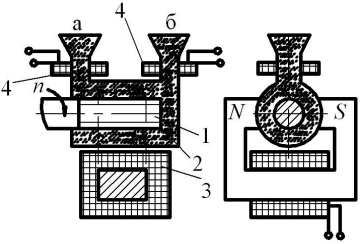
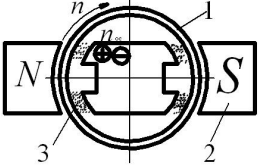
Таблица 3.6

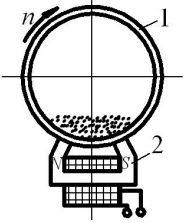
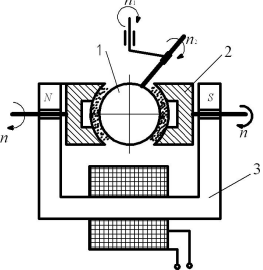
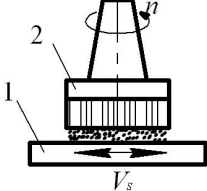
Классификация видов МАО

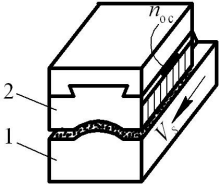
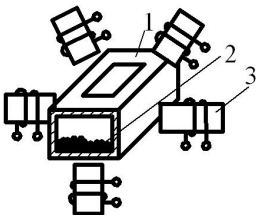
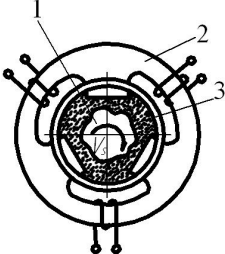
По назначению магнитного поля		
Шифр группы	Функции магнитного поля	
I	Формирование абразивного инструмента (АИ) из порошка, создание сил резания	
II	Формирование АИ из порошка, придание ему рабочих движений, создание сил резания	
III	Сообщение движений частицам, не сформированным в АИ	
IV	Сообщение рабочих движений заготовке или АИ, создание сил резания	
V	Интенсификация или улучшение качественных характеристик видов абразивной обработки	
По форме обрабатываемых поверхностей		
A	Наружные поверхности тел вращения	
B	Внутренние поверхности тел вращения	
B	Плоские поверхности	
Г	Линейчатые и трехмерные фасонные поверхности	
По типу используемого магнитного индуктора (МИ) и характеру магнитного поля		
Шифр подгруппы	Характер магнитного поля	Тип МИ
1	Постоянное	Электромагнитный индуктор (ЭМИ), питаемый постоянным током
2	Переменное	ЭМИ, питаемый знакопеременным или пульсирующим током
3	Бегущее или вращающееся	ЭМИ, питаемый трехфазным знакопеременным или пульсирующим током
4	Постоянное	Индуктор на постоянных магнитах (ИПМ)

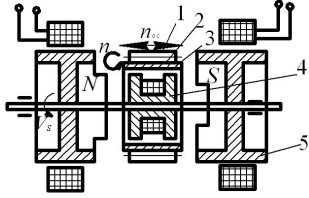
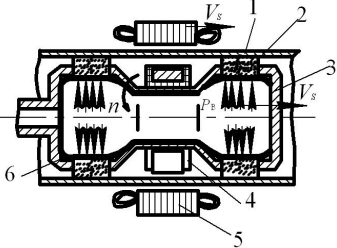
Виды МАО, относящиеся к различным группам классификации

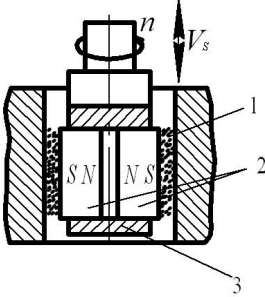
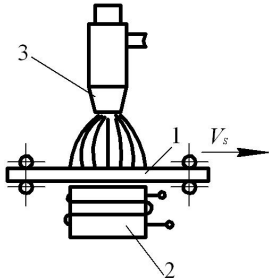
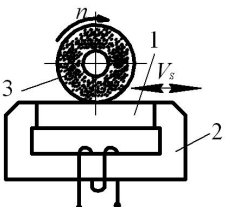
Шифр и операции МАО	Схема обработки	
<i>I</i>	<i>2</i>	
<p>I-A-1 – МАО наружных цилиндрических и фасонных поверхностей тел вращения</p>		<p><i>I</i> – заготовки; <i>2</i> – кольцевая рабочая зона; <i>3</i> – полюсы ЭМИ постоянного тока</p>
<p>I-B-2 – МАО лезвий резцов</p>		<p><i>I</i> – резец; <i>2</i> – камера с порошком; <i>3</i> – ЭМИ переменного тока</p>
<p>Резец движется (<math>n_{ос}</math>) синхронно с включениями выключениями ЭМИ. При этом периодически изменяется жесткость порошка и осуществляется полированием резца без притупления его режущих кромок</p>		

1	2	
<p>I-Г-1 – МАО поверхностей наружной резьбы</p>		<p>1 – заготовка; 2 – камера с порошком; 3 – ЭМИ постоянного тока; 4 – электромагниты для создания сопротивления выходу порошка из камеры ЭМИ придает жесткость порошку и создает силы резания</p>
	<p>При вращения заготовки (<math>n</math>) ее резьбовая часть перемещает порошок по замкнутому пути (входные отверстия <math>a</math> и <math>b</math> камеры сообщаются). Обрабатывается одна сторона профиля резьбы; для обработки 2-й стороны изменяют направление вращения (<math>n</math>)</p>	
<p>I-Б-1 – МАО отверстий втулок переменного сечения</p>		<p>1 – заготовка; 2 – полюсы ЭМИ постоянного тока; 3 – порошок</p>
	<p>АИ из порошка формируется в рабочих зазорах между отверстием заготовки и внутренним полюсом. Обработка производится при вращении (<math>n</math>) заготовки и осцилляции (<math>n_{oc}</math>) полюса</p>	

1	2	
<p>I-Б-1 – MAO профильных отверстий тонкостенных изделий</p>		<p>1 – немагнитная заготовка; 2 – ЭМИ постоянного тока</p>
<p>П-А-1 – MAO наружных сферических поверхностей</p>		<p>1 – заготовка; 2 – вращающиеся полюсы; 3 – ЭМИ постоянного тока</p>
<p>П-Б-1 – MAO наружных плоских поверхностей с элементами переменного профиля</p>		<p>1 – заготовка; 2 – ИПМ</p>
<p>Магнитное поле удерживает порошок на торцевой активной поверхности ИПМ, заставляя порошок вращаться вместе с вращающимся ИПМ (<math>n</math>) и одновременно создавая силы резания. Заготовке сообщается движение подачи (<math>V_s</math>)</p>		

1	2	
<p>II-Г-4 – МАО фасонных линейчатых поверхностей</p>		<p>1 – заготовка; 2 – осциллирующий ИПМ</p>
<p>III-ВГ-2 – МАО внутренних поверхностей полых крупногаба- ритных заготовок</p>		<p>1 – немагнитная за- готовка; 2 – ферромагнитные тела; 3 – ЭМИ, питаемый пульсирующим током</p>
<p>III-АГ-3 – МАО наружных поверхностей немагнитных заготовок переменного профиля</p>		<p>1 – заготовка; 2 – ЭМИ трехфазного тока; 3 – камера с порошком</p>
	<p>ЭМИ создает внутри камеры вращающееся магнитное поле, увлекающее за собой порошок. Для равномерной обработки всех участков заготовке сообщается движение подачи (<math>V_s</math>)</p>	

1	2
<p>IV-A-1 – МАО цилиндрических поверхностей заготовок малых диаметров с пазами и канавками</p>	<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>1 – ферромагнитные заготовки; 2 – шлифовальная шкурка; 3 – неподвижный барабан; 4 – внутренний электромагнит; 5 – боковые электромагниты с зубчатыми сердечниками</p> </div> </div> <p>При вращении электромагнитов заготовки, прижатые к шлифовальной шкурке, под воздействием магнитного притяжения электромагнита 4, обкатываются (<math>n</math>) по барабану и от притяжения электромагнитов 5 совершают осцилляцию (<math>n_{ос}</math>)</p>
<p>IV-B-3.1 – МАО отверстий немагнитных труб переменно- го сечения</p>	<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>1 – заготовка; 2 – абразивные бруски; 3 – корпус АИ; 4 – ЭМИ постоянного тока; 5 – ЭМИ трехфазного тока; 6 – эластичный баллон</p> </div> </div> <p>Баллон заполнен сжатым воздухом (<math>P_в</math>) и прижимает абразивные бруски к обрабатываемой поверхности. ЭМИ перемещают вдоль заготовки (<math>V_s</math>), взаимодействие магнитных полей ЭМИ заставляет АИ вращаться (<math>n</math>) внутри заготовки, двигаться вдоль нее и осуществлять обработку отверстия</p>

1	2	
<p>IV-B-4 – МАО отверстий с глухими пазами</p>		<p>1 – абразивные бруски; 2 – постоянные магниты; 3 – корпус хонинговальной головки</p>
	<p>Постоянные магниты с наклеенными на них абразивными брусками отталкиваются друг от друга и прижимают бруски к обрабатываемой поверхности. Рабочие движения (<math>n</math>, <math>V_s</math>) те же, что и при хонинговании без МАО</p>	
<p>V-B-1 – МАО обработка листовых материалов, имеющих рельеф</p>		<p>1 – листовый материал; 2 – ЭМИ постоянного тока; 3 – сопло, распыляющее абразивные зерна сжатым воздухом</p>
<p>V-B-2– МАО ребристых и гофрирован- ных поверх- ностей</p>		<p>1 – заготовка из ферромагнитного материала; 2 – ЭМИ переменного тока; 3 – ФАП</p>



### 3.3. Магнитно-абразивная обработка типовых поверхностей

#### 3.3.1. Обработка поверхностей простейших форм

Движение ферроабразивных частиц в рабочем зазоре при МАО и интенсивность съема микронеровностей с обрабатываемой поверхности определяется характером действия на контактирующие частицы магнитных сил на различных стадиях процесса абразивного воздействия.

Оборудование и технологическую оснастку для МАО создают как в виде индивидуальных образцов, так и путем модернизации различных станков. В последнем варианте разрабатывается принципиальная рабочая схема и механизмы привода обрабатываемых изделий и их осцилляция.

Оборудование для МАО включает следующие основные системы:

- магнитная, состоящая из электрических магнитных катушек на постоянном выпрямленном токе и предназначенной для удержания ФАП;

- механическая, обеспечивающей позиционирование и закрепление обрабатываемых деталей в зоне обработки и соотношения им рабочих и вспомогательных движений, а также выполняющей функцию несущей системы;

- электрическая, предназначенной для питания ЭМС, привода и управления механизации станка;

- система подачи СОТС и ФАП в зону обработки.

Обработка конических поверхностей. Технологическая проблема МАО конических поверхностей заключается в обеспечении одинакового значения магнитной индукции  $B$  на всех участках конуса детали. Формообразование полюсных наконечников связано с созданием такой их формы, которая эквидистантно копирует конфигурацию детали. Поскольку конусность деталей варьируется в широких пределах, то и растет количество полюсных наконечников как технологической оснастки.

В результате математического моделирования [102] топографии магнитного поля и численных расчетов на основе проведенных исследований получены зависимости напряженности данного поля от конусности рабочего зазора и определены величины магнитной индукции при различных формах полюсных наконечников (табл. 3.8).

Проведены экспериментальные исследования двух способов финишной обработки – шлифование и МАО. Обрабатывали детали конусностью 7:24, шероховатость конусной поверхности  $Ra$  0,16 мкм.

Режимы шлифования: скорость шлифовального круга,  $v_k = 25$  м/с; величина подачи шлифовальной бабки,  $S_{np} = 0,04$  мм/об; величина поперечной подачи,  $S_n = 0,01$  мм/об; частота вращения шпинделя,  $n_d = 400$  об/мин. Инструмент – круг абразивный  $D \times d \times h = 256 \times 76 \times 20$  мм из электрокорунда ГОСТ 2424–84.

Режимы MAO: магнитная индукция,  $B = 1$  Тл; скорость резания,  $v_p = 2,5$  м/с; скорость осцилляции  $v_0 = 0,2$  м/с; амплитуда осцилляции,  $A = 1$  мм; коэффициент заполнения зазора,  $k_3 = 1$ ; величина рабочего зазора,  $\delta = 1$  мм; время обработки  $t = 60$  с; ФАП – Ферабраз-310, зернистость порошка,  $\Delta = 100/160$  мкм; СОТС СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 5 %-й водный раствор.

Исходная шероховатость поверхности  $Ra_1 0,8 \div 1,2$  мкм.

В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что разница величин магнитной индукции на малом и большом диаметрах деталей с конусностью 7:24 составляет менее 15 %, что позволяет произвести их качественную обработку. Результаты обработки стальной (50÷54 HRC) конической детали представлены в табл. 3.9.

Таблица 3.8

Рекомендуемые формы полюсных наконечников для MAO конических поверхностей

Диапазон диаметров обрабатываемых деталей, мм (большой диаметр конуса)	Размер обрабатываемой поверхности, $L$ , мм	Форма полюсного наконечника	Отклонения величины магнитной индукции при увеличении длины конусной части детали, % *	
			теоретическое	экспериментальное
Конус 10÷25 (15,87÷25,40)	21,8÷39,8	цилиндрическая, эквидистантная зазору	6÷9	7÷10
Конус 30÷40 (31,75÷44,45)	49,2÷65,6	коническая с углом 8°	12÷16	10÷15
Конус 45÷55 (57,15÷88,90)	84,8÷131,6	коническая с углом 8°	18÷24	15÷20

\*Примечание: величина зазора  $\delta = 0,8$  мм на большем диаметре конуса.

Таблица 3.9

Сравнительные показатели обработки поверхностей конической детали

Вид обработки	Величина размерного съема, мкм	Шероховатость после обработки, $Ra_2$ , мкм	Прилегание конусных поверхностей, %
Шлифование	120÷180	0,4	90
МАО	20÷40	0,12	95

Исходя из полученных результатов теоретического и экспериментального исследования, установлена возможность эффективного использования процесса МАО для финишной обработки конических поверхностей деталей машин.

**Обработка сферических поверхностей.** Кинематика обработки поверхности шаров должна обеспечивать трехосное их вращение в рабочей зоне. При поиске оптимального решения по кинематике обработки необходимо учитывать два требования: недопустимость ухудшения качества обрабатываемых поверхностей шаров, с одной стороны, и возможность использования схем доводки, существующих в крупносерийном и массовом производстве шаров, с другой стороны.

Основное требование для достижения необходимой шероховатости и точности сферической поверхности заключается в соблюдении одинаковых параметров технологического процесса обработки на всех участках обрабатываемой поверхности. При этом даже незначительная разноразмерность шаров по диаметру в партии часто не позволяет добиться эквидистантного движения контура режущей кромки жесткого инструмента по обрабатываемой поверхности.

Одним из путей решения данной проблемы является применение для доводки поверхностей МАО [97]. В отличие от известных схем доводки при МАО шаров, кроме реализации кинематических и динамических факторов процесса, происходит интенсивное воздействие магнитного поля. При МАО необходимая равномерность обработки достигается изменением положения оси мгновенного вращения шаров, что положительно сказывается на производительности и качестве доводки деталей в форме шара.

Экспериментальные исследования по магнитно-абразивной доводке шаров проводили на станке с торообразной формой рабочей поверхности полюсов магнита. Обрабатывались шары из стали

ШХ15,  $58\div 62$  HRC диаметром  $2\div 4$  мм, соответствующие техническим требованиям по 40 степени точности ГОСТ 3722–81. Для обработки использовалась паста, имеющая в своем составе ряд компонентов, среди которых масло индустриальное И-40А ГОСТ 20799–75, фракция  $C_{17}\div C_{20}$  синтетических жирных кислот, окись хрома ОХА-0 ГОСТ 2912–79. Заполнение пастой канавки нижнего притира (рис. 3.19) производилось либо на станке (при отключенной электромагнитной системе), либо путем снятия притира. Кинематическая схема процесса MAO шаров изображена на рис. 3.20.



Рис. 3.19. Фотография диска-притира для обработки шаров

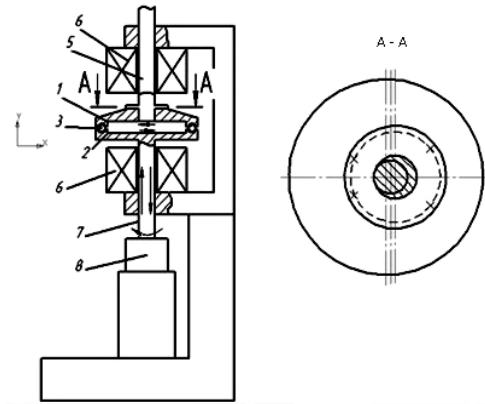


Рис. 3.20. Кинематическая схема MAO шаров

Верхний полюсный наконечник *1*, находится в крайнем верхнем положении, открывая доступ в рабочую зону. Обрабатываемые шарики *3* помещают на кольцевую канавку

нижнего полюсного наконечника 2. Туда же подаются ферроабразивный порошок и СОТС. Затем осуществляется установка верхнего притира, который базируется на обрабатываемые шарики. Выполняется требуемая фиксация притиров и включают электродвигатель. Устанавливают рабочее давление в пневмоцилиндре. На катушки 6 электромагнитной системы подают напряжение, в результате чего под действием магнитного поля верхний полюсный наконечник 1 притягивается к нижнему наконечнику 2 и занимает свое рабочее положение.

Затем приводят во вращение верхний и нижний полюсные наконечники. При вращении верхний 1 и нижний 2 полюсные наконечники также получают поперечные колебания заданной амплитуды. Одновременно включают генератор 8 колебаний, нижний полюсный наконечник 2 начинает вибрировать с заданной частотой. Шары 3 обкатываются между наконечниками 1 и 2. Частицы ферроабразивного порошка ориентируются в магнитном поле и, выстраиваясь по периметру окружности рабочих канавок дисков-притиров, производят микрорезание поверхности шаров. Колебания дисков полюсных наконечников интенсифицируют процесс МАО, способствуют равномерному съему металла и формированию геометрической точности.

Режимы процесса МАО шаров представлены в табл. 3.10, где  $P$  – рабочее давление в пневмоцилиндре;  $n$  – частота вращения верхнего диска;  $I$  – сила тока электромагнитной катушки;  $d$  – диаметр рабочей канавки диска. Изменение частоты вращения (вращение нижнего сердечника шпинделя) осуществляется сменными шкивами. Допустимое радиальное биение диска не более 0,1 мм, торцовое – 0,05 мм. Несоосность верхнего и нижнего сердечников – не более 0,1 мм. Диапазон магнитной индукции в рабочей зоне: 0,3÷1,2 Тл (в зависимости от величины тока, подаваемого на электромагнитные катушки).

Таблица 3.10

Режимы МАО шаров

Диаметр обрабатываемых шаров, мм	$P$ , МПа	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$I$ , А	$d$ , мм
2,0÷2,5	0,12	200	2,5	140
2,5÷3,0	0,19	200	2,5	235
3,0÷3,5	0,25	200	3	235
3,5÷4,0	0,28	320	3	235

Температура нагрева притиров не превышала  $70\text{ }^{\circ}\text{C}\div 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В процессе МАО шаров достигнута 16 степень точности по ГОСТ 3722–81. Следует отметить, что шероховатость поверхности в основном снижалась в начальный период обработки (до 5 мин), а затем практически не изменялась. Уменьшение овальности и гранности происходит в течение всего времени обработки и достигает своих минимальных значений к окончанию процесса обработки. Также равномерно осуществляется съём материала (рис. 3.21).

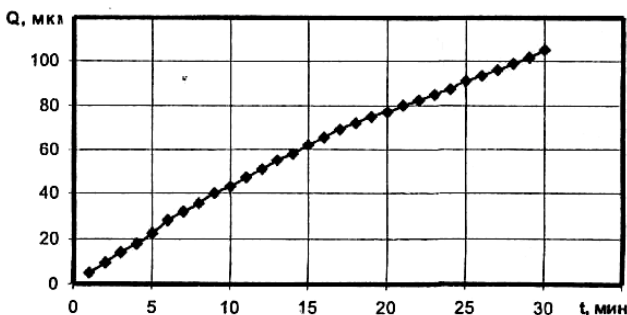


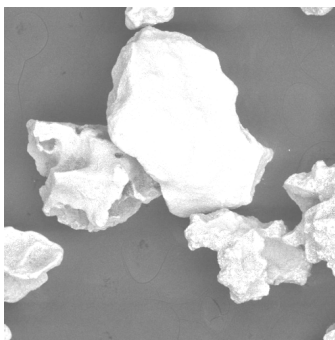
Рис. 3.21. Зависимость съема материала ( $Q$ , мкм) от времени МАО ( $t$ , мин) шаров  $d = 3$  мм

Таким образом, экспериментально установлена возможность использования процесса МАО шаров, при которой достигается степень точности 16 ГОСТ 3722–81 для деталей диаметром  $2\div 4$  мм.

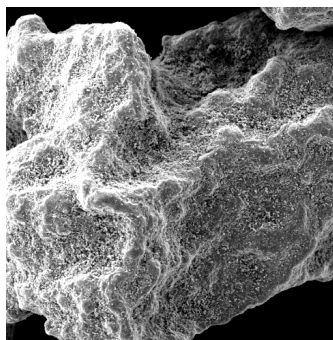
С использованием способа МАО можно также производить декоративную отделку сферических усеченных поверхностей деталей.

**Обработка наружных поверхностей поршневых колец.** МАО является эффективным методом обработки наружных поверхностей поршневых колец из высокопрочного чугуна ( $94\div 102$  НВ) перед нанесением гальванического хромового покрытия.

Режимы обработки: скорость,  $v = 5$  м/с; рабочий зазор,  $\delta = 1$  мм; ФАП Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81 (рис. 3.22); зернистость ферроабразивного порошка,  $\Delta = 160/200$  мкм; смазочно-охлаждающие технологические средства – СинМА-1ТУ 38.5901176–91; магнитная индукция,  $B = 0,8\div 1,1$  Тл; – амплитуда осцилляции,  $A = 1\div 3$  мм; скорость осцилляции,  $v_o = 0,15\div 0,25$  м/с; время обработки,  $t = 45\div 120$  с.



*a*



*б*

Рис. 3.22. Форма частиц ФАП: *a* – х20; *б* – х100

Сравнительный анализ результатов финишной обработки поршневых колец различными способами (табл. 3.11) показывает, что основным недостатком суперфиниширования является невозможность обработки боковых фасок одновременно с цилиндрической наружной поверхностью колец.

Оптимальная шероховатость поверхности изделий при MAO чугуна достигается при следующем соотношении [105]:

$$\frac{\Delta_3}{D_r} = 2,5 - 3,$$

где  $\Delta_3$  – размер абразивного зерна ФАП, мкм;

$D_r$  – средний диаметр глобул графитных включений, мкм.

Таблица 3.11

Прочность сцепления хромового покрытия

Способ обработки	Количество изломов	Количество сколов по фаске кольца	Количество сколов по наружной поверхности	Показатель прочности, К
Суперфиниширование	–	3	1	0,050
MAO	4	0	5	0,040
Крацевание	–	1	5	0,033

МАО по производительности уступает суперфинишированию, однако шероховатость поверхности после МАО ниже. После крацевания съема металла практически не наблюдается, и некоторое уменьшение шероховатости происходит за счет пластического деформирования микровыступов от предшествующей обработки.

Выявлено (табл. 3.12), что изменения толщины покрытия по периметру наблюдаются при любом виде обработки и объясняются неточной установкой электродов в процессе хромирования. Как было указано выше, сцепление хромового покрытия с металлом кольца обеспечивается силами механического взаимодействия. Однако для получения хорошего сцепления необходимо, чтобы растущий осадок воспроизводил кристаллическую структуру металла катода [105].

Таблица 3.12

Толщина хромового покрытия при различных способах обработки

Способ обработки	Исходная шероховатость $Ra$ , мкм	Толщина хромового покрытия, мкм				
		номер сечения				
		1	2	3	4	5
Суперфиниширование	0,28	190	190	200	210	200
МАО	0,24	180	190	200	190	190
Крацевание	1,57	190	180	190	190	200

Таблица 3.13

Шероховатость хромового покрытия при различных способах обработки

Способ обработки	Исходная шероховатость $Ra_1$ мкм	Шероховатость после нанесения покрытия $Ra_2$ , мкм	Коэффициент изменения шероховатости, $K_{ш}$
Суперфиниширование	0,25	15	60
МАО	0,22	34	154
Крацевание	1,55	46	30

Обработанные различными способами поверхности поршневых колец отличаются как по высоте микронеровностей, так и по их характеру. Согласно данным, приведенным в табл. 3.13 и на рис. 3.23, видно, что способ обработки оказывает влияние на качество хромового покрытия. Поверхность образцов после

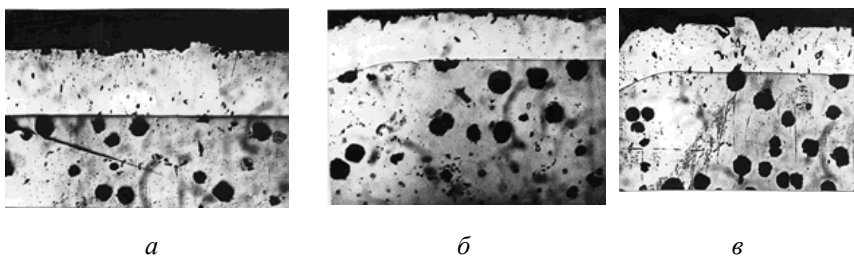


суперфиниширования и MAO имеет примерно одинаковую шероховатость, однако величина микронеровностей хромового осадка в обоих случаях существенно различается. Для оценки соотношения шероховатости поверхности основного металла к высоте микронеровностей хромового покрытия был введен коэффициент изменения шероховатости

$$K_{\text{ш}} = \frac{Ra_x}{Ra_1},$$

где  $Ra_x$  – шероховатость хромового покрытия, мкм;

$Ra_1$  – шероховатость поверхности перед хромированием, мкм. поршневого кольца, обработанного различными способами ( $\times 60$ ).



*a*

*б*

*в*

*a* – суперфиниширование; *б* – MAO; *в* – крацевание

Рис. 3.23. Фотографии микрошлифов хромового покрытия на поверхности

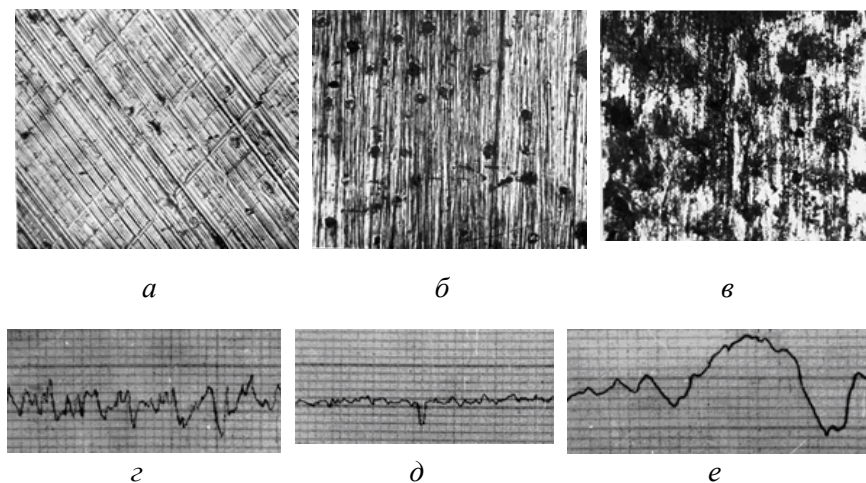
Отношение коэффициента изменения шероховатости после MAO к коэффициенту изменения шероховатости после суперфиниширования

$$\frac{K_{\text{ш мао}}}{K_{\text{ш сф}}} = 2,56.$$

Согласно полученным результатам такое различие объясняется тем, что чередующиеся через строго определенные интервалы выступы и впадины на поверхности при суперфинишировании приводят при нанесении покрытия к равномерному распределению плотности тока по всей поверхности. Методом MAO невозможно достичь строгой периодичности шага микронеровностей. В этом случае неравномерное распределение плотности тока на поверхности вызывает неоднородность структуры и неравномерность толщины покрытия. На участках с повышенной

плотностью тока количество выделившегося металла (толщина покрытия) будет больше. Уменьшение числа неровностей, приходящихся на единицу длины профиля поверхности, ослабляет эффективность выравнивающего действия осадка. Скорость этого действия падает с увеличением толщины покрытия.

При нанесении покрытия наблюдается эффект положительного и отрицательного выравнивания, который заключается в том, что более интенсивное осаждение покрытия происходит во впадинах и выступах микропрофиля. Это приводит к уменьшению глубины впадины в первом случае и увеличивает размер выступа во втором. При МАО образуется микрорельеф с симметричным отношением выступов и впадин. Их величина и тип имеют стохастический характер. Для такого профиля геометрическое выравнивание будет заключаться в копировании достигаемого методом МАО микрорельефа. На рис. 3.24 показаны топография и профилограммы поверхности поршневого кольца, обработанного различными способами. Различие в шероховатости хромового покрытия, зависит от состояния свободного графита. Его обнажение при МАО приводит к высокой чистоте металлической основы, но усугубляет структурную неоднородность поверхностного слоя, как и при крацевании. Данный факт оказывает влияние на условия осаждения покрытия.



*а, з* – суперфиниширование; *б, д* – МАО; *в, е* – крацевание  
 Рис. 3.24. Топография ( $\times 100$ ) (*а, б, в*) и профилограммы (ВУ-200, ГУ-4 $\times 10^3$ ) (*з, д, е*) поверхности поршневого кольца, обработанного различными способами

При МАО осуществляется обнажение графитных включений на поверхности, что приводит к увеличению шероховатости хромового покрытия в сравнении с суперфинишированием. При крацевании происходит распределение графита по металлической основе, в связи с этим ухудшаются условия электроосаждения покрытия и возрастает его шероховатость.

По влиянию на качество хромового покрытия рассмотренные выше способы финишной обработки можно расположить следующим образом: суперфиниширование – МАО – крацевание.

### **3.3.2. Обработка фасонных поверхностей**

Создание оборудования и средств технологического оснащения для МАО фасонных поверхностей, к которым предъявляются высокие требования по точности и шероховатости, рассмотрим на примерах специфических изделий текстильного, инструментального и оптического производства.

**Обработка поверхностей прядильных колец для текстильного производства.** Технологический процесс изготовления колец включает в себя комплекс токарных, сверлильных и фрезерных операций, закалку в защитной среде (в случае использования заготовки из стали) и шлифования. Однако при изготовлении колец существует ряд трудностей по обеспечению шероховатости поверхностей. В связи с особенностями технологии формирования пряжи, в случае достижения показателя шероховатости поверхности, характеризующегося отсутствием узких и глубоких впадин и большой высоты микронеровностей, существует реальная возможность снизить уровень обрывности данной нити.

Сформированная методом МАО топография поверхности обеспечивает в отличие от шлифования уменьшение обрывности нити в среднем на 10 %÷20 %. Надежность работы крутильно-мотального механизма приводит к снижению числа отказов оборудования по причинам обрыва нити и соответственно к повышению производительности труда.

При МАО использовали порошок ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81 (рис. 3.25), СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 5 %-й водный раствор. Размер зерна ФАП,  $\Delta = 100/160$  мкм.

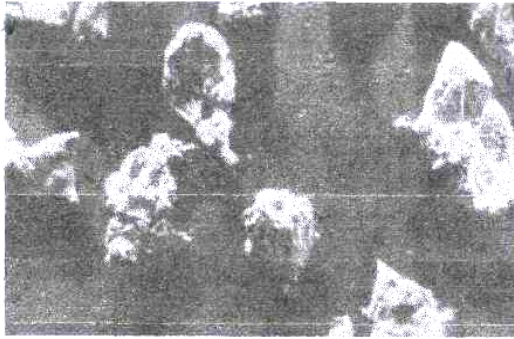
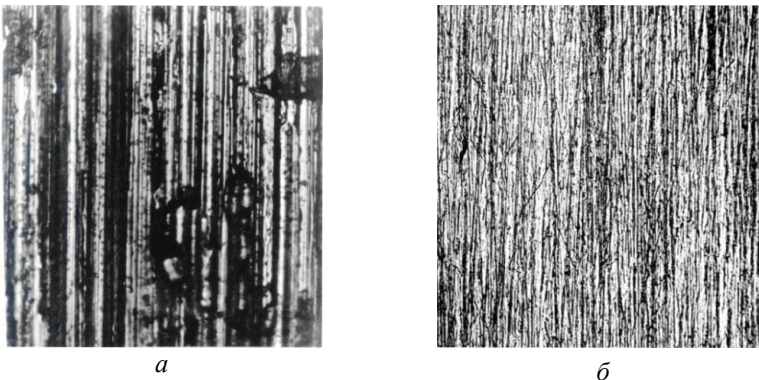


Рис. 3.25. Форма частиц ФАП Ж15КТ ( $\times 100$ )

Параметры и режимы обработки: величина магнитной индукции,  $B = 1,1$  Тл; скорость вращения детали,  $v_d = 2$  м/с; амплитуда осцилляции,  $A = 3$  мм; величина рабочего зазора,  $\delta = 1$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора,  $K_3 = 1$ ; время обработки,  $t = 120$  с. Исходная шероховатость поверхности кольца  $Ra_1 0,8 \div 1,0$ , материал кольца 40X13,  $42 \div 46$  HRC. Выходными показателями служит величина массового съема материала  $G$  (мг) и достигаемая шероховатость поверхности  $Ra_2$  (мкм). На рис. 3.26 представлена топография поверхности прядильного кольца, а в табл. 3.14 – шероховатость поверхности прядильных колец после шлифования и МАО.



$a$  – шлифование, ( $\times 150$ );  $b$  – МАО, ( $\times 150$ )

Рис. 3.26. Топография поверхностей прядильного кольца, обработанных различными способами

В результате проведенных исследований установлено, что применение MAO в качестве финишной операции позволяет получить на сложнопрофильной поверхности прядильных колец в местах их рабочего контакта с нитью пряжи шероховатость  $Ra_2$   $0,01 \div 0,02$  мкм. Полученные показатели шероховатости обеспечивают снижение обрывности нити пряжи до 20 %, что повышает эффективность прядильного производства.

Таблица 3.14

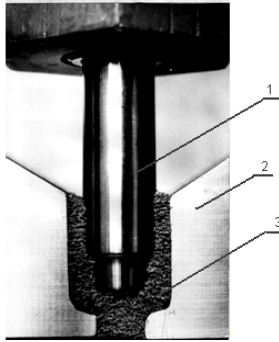
Шероховатость поверхности прядильных колец

Параметр $Ra_2$ (мкм) после обработки	
Шлифованием	MAO
$0,1 \div 0,4$	$0,01 \div 0,02$

### ***Обработка поверхностей инструментов вытяжных штампов.***

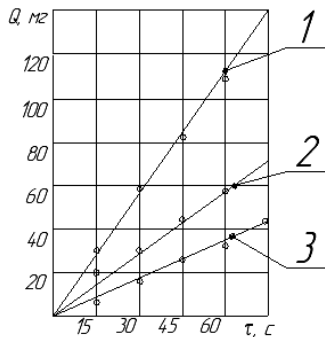
В современном машиностроении широко используются высокопроизводительные процессы изготовления деталей холодным деформированием. В качестве инструментов для осуществления этих процессов используется стержневой инструмент сложного профиля (пуансоны), отличающиеся своей формой от плоскости, цилиндра и конуса. Установлено, что основными причинами их выхода являются: адгезия контактной части материала пуансона к материалу обрабатываемой поверхности (30 %), деформация (35 %) и скалывание рабочей части пуансона (35 %). При этом практика показывает, что качество поверхности стержневого инструмента сложного профиля играет существенную роль в надежности его работы, и поэтому вопрос повышения качества поверхностей инструментов крайне актуален.

Наиболее эффективными способами абразивной обработки инструментов со сложным профилем рабочей части являются те, которые основаны на использовании эластичной связки или незакрепленного абразива. Одним из перспективных методов обеспечения высокого качества рабочей поверхности является технология MAO. На рис. 3.27 представлена фотография зоны MAO пуансона. В качестве исходных материалов применялись порошки карбид титана (TiC), а также ФАП комбинированного состава  $Fe-Al_2O_3$  и  $Fe-Al_2O_3+(Ni-Co)$  с химической металлизацией электрокорунда белого ЭБМ40 никелем и никель-кобальтовым сплавом в количестве 5 % от общего веса металлизированного порошка. ФАП готовился в этом случае в виде механической смеси в объемном отношении 1:1.



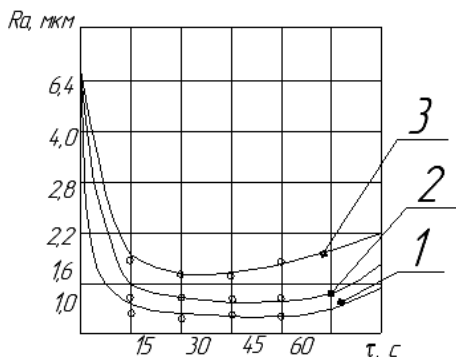
1 – пуансон; 2 – полосный наконечник; 3 – ферроабразивная «щетка»  
 Рис. 3.27. Фотография зоны MAO пуансона

Обработка выполнялась при следующих режимах: окружная скорость,  $v_{\text{окр}} = 1,5 \text{ м/с}$ ; скорость осцилляции,  $v_o = 0,2 \text{ м/с}$ ; амплитуда осцилляции,  $A = 2 \text{ мм}$ , магнитная индукция в рабочем зазоре,  $B = 1 \text{ Тл}$ ; коэффициент заполнения рабочего зазора,  $K_z = 1$ ; величина рабочего зазора,  $\delta = 1,2 \text{ мм}$ ; зернистость порошка,  $\Delta = 160/125 \text{ мкм}$ ; СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3%-й водный раствор. Результаты исследования влияния продолжительности обработки на величину съема металла (рис. 3.28) показывают, что при MAO съем металла носит монотонный характер, отличающийся постоянным ростом в течение всего периода обработки.



1 – Fe-TiC; 2 – Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+(Ni-Co)  
 Рис. 3.28. Зависимость величины съема металла (Q) от времени (τ) обработки при использовании различных ФАП

На рис. 3.29 приведены результаты исследований влияния продолжительности обработки на шероховатость поверхности.



1 – Fe-TiC; 2 – Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+(Ni-Co)

Рис. 3.29. Зависимость шероховатости ( $Ra$ ) поверхности от времени ( $\tau$ ) обработки при использовании различных ФАП

При MAO формирование микропрофиля поверхности происходит первые 15 секунд, в отличие от операции полирования. В пределах исследованного диапазона с увеличением длительности обработки шероховатость поверхности уменьшается, что обусловлено удалением исходных микронеровностей.

Таким образом, для получения высокого массового съема металла и качества поверхности следует применять ФАП железокарбид титана (Fe-TiC). При этом необходимо стремиться, чтобы коэффициент заполнения рабочей зоны MAO  $K_3$  был равен 1.

Использование метода MAO при финишной обработке пуансонов для холодного выдавливания, позволило обеспечить получение шероховатости их поверхности, равной  $Ra_2$   $0,04 \div 0,06$  при исходной  $Ra_1$   $0,12 \div 0,18$ . Время обработки каждой детали составило  $6 \div 10$  с в зависимости от ее размерности. Производственные испытания показали, что стойкость таких пуансонов по сравнению с обработанными по традиционной технологии повысилась на  $15 \div 20$  %. Сила тока, используемого для создания ЭМП, составляет  $4 \div 5$  А. ФАП, применяемый при обработке, имеет размерность  $\Delta = 63/100$  мкм. Материал – Ж15КТ ТУ 6-03-483–81. СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 5 %-й водный раствор, расход  $1,0 \div 1,5$  л/ мин.

**Обработка светоотражающих поверхностей металлооптики.** Для достижения необходимой светоотражательной способности поверхности оптических элементов фотометрических приборов применяют различные методы финишной обработки,

С целью определения возможности МАО достичь требуемого показателя светоотражательной способности металлооптических элементов была проведена экспериментальная обработка кольцевых дисков ( $D \times d \times L = 90 \times 25 \times 2$  мм, материал – сталь 30, ГОСТ 1050–88). Порошок ФАП – ПФА Р6М5-1 ТУ 27-104-02–88, СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3-%-й водный раствор, размер зерна,  $\Delta = 100/160$  мкм. Параметры режима МАО:  $B = 1$  Тл; угловая скорость шпинделя,  $\omega = 50$  с<sup>-1</sup>; скорость вращения детали,  $v = 0,6$  м/мин; рабочий зазор,  $\delta = 1$  мм; время обработки,  $t = 180$  с; параметр шероховатости поверхности до обработки  $Ra$   $0,3 \div 0,5$  мкм.

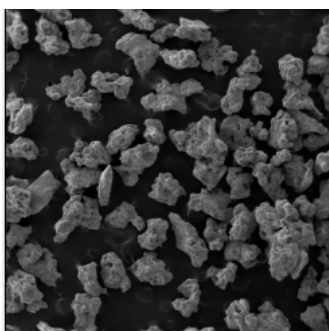
В результате проведенных испытаний установлено, что коэффициент светоотражательной способности гладкой однотонной поверхности, полученной МАО, на кольцевом диске –  $75 \% \div 70 \%$ . Параметр шероховатости поверхности –  $0,05 \div 0,07$  мкм. На поверхности дисков отсутствуют следы шаржирования инструментом, риски, царапины и другие дефекты.

Согласно ГОСТ 15150–69 при обработке зеркал и линз коллиматоров необходимо обеспечить следующие параметры: шероховатость поверхности по параметру  $Ra \leq 0,0025$ ; коэффициент светоотражения –  $85 \% \div 95 \%$ . При этом к минимальным значениям должны быть приведены такие параметры как хроматическая абберация и шаржирование поверхностного слоя. Для достижения требуемого показателя светоотражательной способности металлооптических элементов была проведена МАО тонкого сплошного диска ( $D \times h = 100 \times 0,5$  мм). СОТС – СинМА-1 (ТУ 38.5901176–91), 3 %-й водный раствор. Параметры режима МАО: магнитная индукция,  $B = 0,9$  Тл; угловая скорость шпинделя,  $\omega = 50$  с<sup>-1</sup>; скорость осцилляции детали  $v = 1,0$  м/мин; амплитуда осцилляции,  $A = 1 \div 5$  мм; рабочий зазор,  $\delta = 1$  мм; время обработки,  $t = 210$  с; параметр шероховатости поверхности до обработки  $Ra$   $0,4 \div 0,6$  мкм. Светоотражательную способность поверхности оценивали при дневном рассеянном свете на расстоянии  $0,3$  м визуально путем

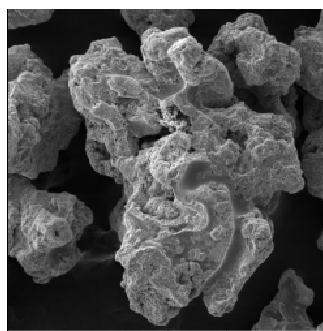


сопоставления с образцом-свидетелем при помощи лупы ЛИ-3 ( $\times 10$ ) по ГОСТ 25706–83. В качестве образца-свидетеля использовали покрытие медь–олово, характеризующееся высоким коэффициентом отражения  $80\% \div 75\%$ . Также использовался блескомер Ф-1.

Другим необходимым аспектом для достижения требуемой шероховатости поверхностного слоя металлооптических элементов является использование ФАП различной грануляции и морфологии. На первом этапе обработки применялся порошок на основе алмаза,  $\Delta = 0,200/0,315$  мм, обработка производилась в течение  $t = 30 \div 45$  с. Затем осуществлялся процесс окончательного полирования порошком «Ферабраз-310» (форма частиц порошка приведена на рис. 3.30 *а, б*),  $\Delta = 0,10/0,63$  мм, обработка производилась в течение  $t = 135 \div 150$  с.



*а* ( $\times 20$ )



*б* ( $\times 100$ )

*Рис. 3.30.* Морфология порошка «Ферабраз-310»:

В результате проведенных испытаний установлено, что коэффициент светоотражательной способности гладкой однотонной поверхности, полученной при MAO, составляет на металлооптическом элементе более  $85\%$  (рис. 3.31).



Рис. 3.31. Фотография металлооптического элемента после МАО

Параметр  $Ra$  шероховатости поверхности находился в пределах  $0,002 \div 0,0025$  мкм. На поверхности тонкого металлооптического элемента отсутствуют следы шаржирования инструментом, риски, царапины и другие дефекты.

**Обработка поверхностей внутренних обойм подшипников.** При исследованиях МАО использовали кольца подшипников  $d_{\text{вн}} = 215$  мм из стали 12Х2Н4А ГОСТ 4543–71, твердостью  $61 \div 63$  HRC (рис. 3.32).

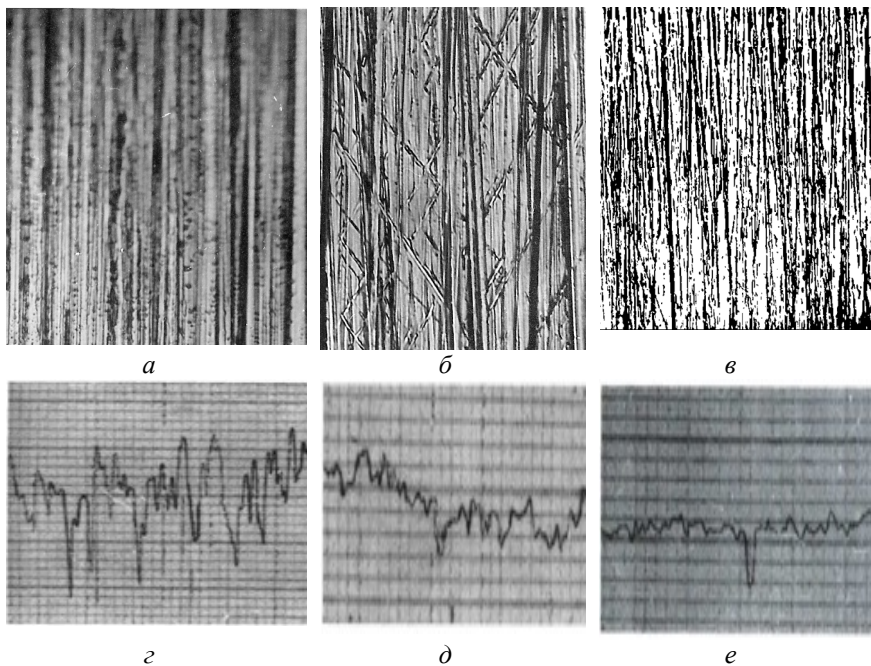


Рис. 3.32. Фотография кольца подшипника

Традиционно финишная обработка обоймы тяжело-нагруженного крупного подшипника из стали 12Х2Н4А и 20Х2Н4А, изготовленного с цементированными рабочими поверхностями, включает шлифование и последующее хонингование. Альтернативный вариант технологии – шлифование и

МАО. Режущим инструментом при МАО являлся ферро-абразивный порошок Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81 на основе карбидов титана, зернистость которого составляет 160/200 мкм. Время обработки при МАО в среднем составляло 60 с.

На рис. 3.33 показана топография поверхности деталей после различных операций финишной обработки. Шероховатость после шлифования, хонингования и МАО составляет  $Ra$  0,6, 0,2 и 0,1 мкм соответственно.



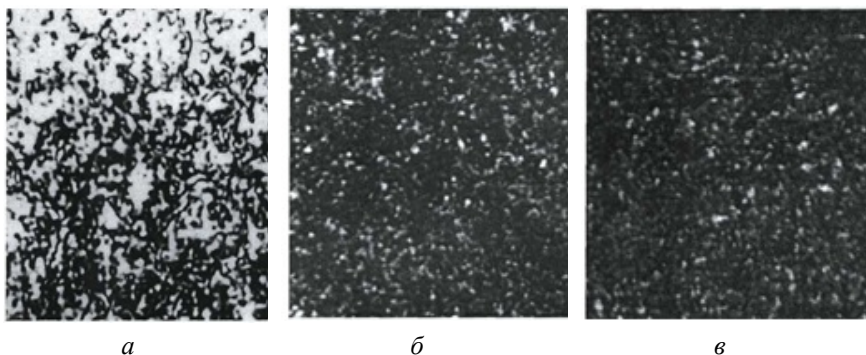
*а, z* – шлифование; *б, d* – хонингование; *в, e* – МАО  
 Рис. 3.33. Топография ( $\times 150$ ) поверхности (*а, б, в*) и профилограммы (*z, d, e*) с увеличением по горизонтали ( $\times 200$ ) и по вертикали ( $\times 4 \cdot 10^3$ ) при обработке стали 12Х2Н4А различными способами

Профилограммы поверхностей после шлифования, хонингования и МАО приведены там же. Для поверхности, обработанной шлифованием, характерна большая высота микронеровностей, чем для хонингования и МАО, что может

привести к снижению его несущей способности и повышению вероятности падения давления в масляном слое. MAO образует наиболее приближенный к оптимальному микрорельеф, который, однако, по сравнению с хонингованием отличается меньшей упорядоченностью. Вместе с тем заметно более высокая степень сглаживания вершин и впадин микронеровностей, что увеличивает фактическую площадь контакта трущихся поверхностей. Согласно [98], контактная жесткость и износостойкость поверхностей тем выше, чем больше их опорная площадь и меньше углы профиля микронеровностей, что и характерно для поверхностного слоя, сформированного при MAO.

В табл. 3.15 представлены величины остаточных напряжений в поверхностном слое деталей после различных способов финишной абразивной обработки. Установлено, что при рассмотренных видах обработки поверхностей образуются остаточные напряжения сжатия. Наибольшее их значение присуще MAO. Это объясняется тем, что в этом случае процесс резания сопровождается тонким пластическим деформированием в большей степени, чем при других способах обработки, в результате чего происходит образование сжимающих напряжений, аналогичных хонингованию.

Микроструктура поверхностного слоя стали 12Х2Н4А после шлифования, хонингования и MAO показана на рис. 3.34.



*а* – шлифование; *б* – хонингование; *в* – MAO  
Рис. 3.34. Микроструктура поверхностного слоя (x100)  
после обработки различными способами

При травлении детали после шлифования на ее поверхности выявлены границы зерен остаточного аустенита. Глубина этого слоя составляет 30÷50 мкм. В деталях, подвергшихся контактному циклическим нагрузкам, на последующих финишных операциях следует удалять образовавшийся белый поверхностный слой. После хонингования и МАО структура имеет мелкодисперсное строение с равномерно распределенными мелкими округленными зёрнами карбидов. Такая структура способствует росту контактной прочности и износостойкости и в полной мере соответствует требованиям специальных технических условий.

Таблица 3.15

Величина остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое после различных методов финишной обработки

Способ обработки	Величина остаточных напряжений, МПа
Исходное состояние (цементация, закалка, отпуск)	660
Шлифование	750
Хонингование	810
МАО	980

В табл. 3.16 показано влияние способа финишной обработки на количество остаточного аустенита и размеры кристаллической решетки в поверхностном слое деталей.

Таблица 3.16

Содержание остаточного аустенита и величины блоков когерентного рассеяния

Способ обработки	Остаточный аустенит, %	Размер областей когерентного рассеяния, нм
Исходное состояние (цементация, закалка, отпуск)	20,7	36,7
Шлифование	25,1	48,2
Хонингование	16,2	43,9
МАО	14,8	42,0

Применение таких финишных операций абразивной обработки, как хонингование и МАО, не допускает образования дефектного слоя и способствует формированию структуры поверхности, обеспечивающей более высокие значения показателей качества материала по сравнению со шлифованием. В отличие от хонингования МАО обеспечивает увеличение остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое деталей в среднем на 20 % при равных размерах областей когерентного рассеяния.

### **3.4. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей тел вращения**

#### **3.4.1. Расчет топографии магнитного поля для магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей**

Сложность алгоритма и реализации аналитического расчета ЭМП по отношению к реальному отображению топографии является основной проблемой на пути получения точного решения. ЭМП является особым видом материи и характеризуется определенным распределением в пространстве, обладая при этом дискретной структурой [106].

Существует ряд работ [30, 106, 107], в которых представлены исследования параметров и источники МАО. Однако в них ставятся преимущественно частные задачи, возникающие в результате изучения отдельных конкретных устройств. Поэтому эта информация пригодна лишь для анализа данного устройства и обычно не поддается обобщению. Такой подход не удовлетворяет требованиям современного производства и затрудняет процесс конструирования нового оборудования.

Следовательно, успех в рациональном и правильном создании устройств, использующих энергию ЭПМ, во многом зависит от степени понимания физических процессов, протекающих при взаимодействии данного поля с обрабатываемой деталью. Это требует теоретически описать топографию магнитного поля для сложнопрофильных поверхностей тел вращения.

**Исследование топографии магнитного поля матричными формами представления системы уравнений Максвелла.** Считается, что начало исследования, целью которых являлось представление системы уравнений Максвелла, положено В. И. Фушичем [108].

В рассмотрение вводятся матрицы [109].

$$\alpha_1 = i \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \alpha_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \alpha_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3.32)$$

удовлетворяющие алгебре Клиффорда, функция-столбец

$$\Psi = i \begin{pmatrix} 0 \\ E_1 - iH_1 \\ E_2 - iH_2 \\ E_3 - iH_3 \end{pmatrix}, \quad (3.33)$$

и уравнения Максвелла в отсутствие зарядов и токов приобретают вид:

$$\left( i \frac{\partial}{\partial t} - \alpha \cdot p \right) \Psi = 0. \quad (3.34)$$

Имеется стационарный магнитопровод с магнитной проницаемостью  $\mu_2$ . В магнитопроводе сделан разрез границами  $f(x_1)$ ,  $g(x_1)$ , соответственно (рис. 3.35).

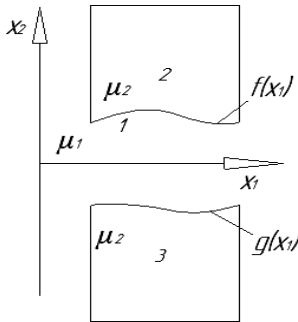


Рис. 3.35. Схема магнитопровода с разрезом сложного профиля

Среда в разрезе имеет магнитную проницаемость  $\mu_1$ . 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  $\mu_2$ .

$$\partial_1 \xi^1 \Phi_{12} + \partial_2 \xi^2 \Phi_{12} = 0. \quad (3.35)$$

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

$$\Phi_{12} = \Phi_1 \Phi_2, \quad (3.36)$$

для которых справедливы следующие соотношения

$$\Phi_1 = \Phi_1^k + \Phi_1^a, \quad [\Phi_1^k, \xi^2] = 0, \quad [\Phi_1^k, \xi^2]^+ = 0, \quad (3.37)$$

$$\Phi_2 = \Phi_2^k + \Phi_2^a, \quad [\Phi_2^k, \xi^1] = 0, \quad [\Phi_2^k, \xi^1]^+ = 0, \quad (3.38)$$

$$[\Phi_1, \Phi_2] = 0. \quad (3.39)$$

С учетом (3.35, 3.36) уравнения Максвелла в матричной формулировке приобретает вид:

$$\partial_1 \xi^1 \Phi_1 = \Phi_1 K_{12} \partial_2 \xi^2 \Phi_2 = \Phi_2 K_{12}. \quad (3.40)$$

Для общего решения можно получить:



$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{0x} \\ E_{0y} \\ -E_{0z} \\ -H_{0z} \\ H_{0y} + \int_{-\infty}^{\infty} \{C'_{11}(\lambda) \sin(i\lambda x_1) + C'_{12}(\lambda) \cos(i\lambda x_1)\} \{C'_{21}(\lambda) e^{i\lambda x_2} + C'_{22}(\lambda) e^{-i\lambda x_2}\} d\lambda + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} \{C_{11}(\lambda) \sin(\lambda x_1) + C_{12}(\lambda) \cos(\lambda x_1)\} \{C_{21}(\lambda) e^{\lambda x_2} + C_{22}(\lambda) e^{-\lambda x_2}\} d\lambda \\ H_{0x} + \{-C'_{12}(\lambda) \sin(i\lambda x_1) + C'_{11}(\lambda) \cos(i\lambda x_1)\} \{C'_{21}(\lambda) e^{i\lambda x_2} - C'_{22}(\lambda) e^{-i\lambda x_2}\} d\lambda + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} \{-C_{12}(\lambda) \sin(\lambda x_1) + C_{11}(\lambda) \cos(\lambda x_1)\} \{C_{21}(\lambda) e^{\lambda x_2} - C_{22}(\lambda) e^{-\lambda x_2}\} d\lambda \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

В (3.41)  $\lambda$  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. Нормальную и тангенциальную составляющие поля внутри магнитопровода и на границе будем обозначать  $\rho_1(x_1)$ ,  $\rho_2(x_2)$  и  $q_1(x_1)$ ,  $q_2(x_2)$  соответственно. В этом случае поле на  $i$ -й границе внутри ограниченной ими области можно описать следующим образом:

$$H_1^i = H_n^i(x_1) \sin(\alpha) + H_\tau^i(x_1) \cos(\alpha) = \rho_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}}, \quad (3.42)$$

$$H_2^i = H_n^i(x_1) \cos(\alpha) + H_\tau^i(x_1) \sin(\alpha) = \rho_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} \quad (3.43)$$

При этом справедливы соотношения:

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

$$G(x_1 + ix_2) = \frac{H_2(x_1, x_2) + iH_1(x_1, x_2)}{2}. \quad (3.44)$$

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

$$F_i(-x_1 + if_i(x_1)) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \rho_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} - \\ -i\rho_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} - iq_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} \end{bmatrix}. \quad (3.45)$$

$$G_i(x_1 + if_i(x_1)) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \rho_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + q_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + \\ +i\rho_i(x_1) \frac{f_i'(x_1)}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} + iq_i(x_1) \frac{1}{\sqrt{1+f_i'(x_1)^2}} \end{bmatrix}. \quad (3.46)$$

Проведя далее соответствующие вычисления, для поля внутри разрыва магнитпровода окончательно получим

$$\tilde{H}_1(x_1, x_2) = \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \left\{ i\tilde{C}_{\lambda 1} e^{\lambda(-x_1+ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 4} e^{-i\lambda(-x_1+ix_2)} - \right. \\ \left. -i\tilde{C}_{\lambda 2} e^{\lambda(x_1+ix_2)} - i\tilde{C}_{\lambda 3} e^{-i\lambda(x_1+ix_2)} \right\} = i\tilde{F}(-x_1 + ix_2) - i\tilde{G}(x_1 + ix_2), \quad (3.47)$$

$$\tilde{H}_2(x_1, x_2) = \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \left\{ \tilde{C}_{\lambda 1} e^{\lambda(-x_1+ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 4} e^{-\lambda(-x_1+ix_2)} + \right. \\ \left. +\tilde{C}_{\lambda 2} e^{\lambda(x_1+ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 3} e^{-\lambda(x_1+ix_2)} \right\} = \tilde{F}(-x_1 + ix_2) - \tilde{G}(x_1 + ix_2), \quad (3.48)$$

где

$$\tilde{F}(-x_1 + ix_2) = \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \left\{ \tilde{C}_{\lambda 1} e^{\lambda(-x_1+ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 4} e^{-\lambda(-x_1+ix_2)} \right\}, \quad (3.49)$$

$$\tilde{G}(x_1 + ix_2) = \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \left\{ \tilde{C}_{\lambda 2} e^{\lambda(x_1+ix_2)} + \tilde{C}_{\lambda 3} e^{-\lambda(x_1+ix_2)} \right\}. \quad (3.50)$$

**Исследование топографии магнитного поля решением системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты.** В соответствии с законом Био-Савара-Лапласа и принципом суперпозиции, заключающимся в том, что магнитное поле, созданное несколькими движущимися зарядами или токами, равно векторной сумме магнитных полей, существует возможность определения магнитной индукции [109].

Для одного проводника его величина составит:

$$B = \frac{\mu_a}{4\pi} \cdot \frac{2I}{r} = \frac{c}{r}. \quad (3.51)$$

Таким образом,  $B_i = c/r_i$ . Например, если  $r_0 = 1$ ,  $r_1 = 1,4$ ,  $r_2 = 2,33$ ,  $r_3 = 7$ , то топография ЭМП для одного проводника с током представлена на рис. 3.36, *a*. В случае наличия двух проводников, расстояние между которыми равно  $h$  (рис. 3.36), вектор магнитной индукции определяется следующим образом:

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

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

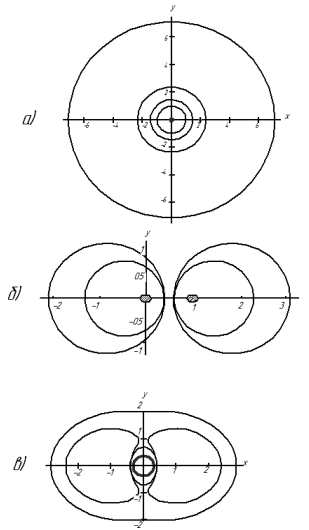


Рис. 3.36. Картина электромагнитного поля при наличии одного (*a*), двух (*б*) и трех (*в*) проводников с током

Чтобы определить топографию ЭМП путем установления линий  $B$ , необходимо решить систему дифференциальных

уравнений с использованием метода Рунге-Кутты и учетом компоненты результирующего вектора магнитной индукции:

$$x = \dot{B}_x; \quad y = \dot{B}_y;$$

На рис. 3.36 (а, б, в) представлена топография ЭМП. Следует отметить, что периметры сечения проводников не совпадают с линиями магнитной индукции.

Эти линии стягиваются к некоторой точке, которая характеризуется значением магнитной индукции, равным 0.

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

$$x_{hh} = - \frac{y_h \left( -1 + 4x_h^2 + x_h^4 + 2x_h^2 y_h^2 + y_h^4 \right)}{\left[ \left( x_h^2 + y_h^2 \right) \left( 1 - 2x_h + x_h^2 + y_h^2 \right) \left( 1 + 2x_h + x_h^2 + y_h^2 \right) \right]}, \quad (3.52)$$

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

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

$$b_x = y(t) \frac{\left[ -1 + 4x(t)^2 + x(t)^4 + 2x(t)^2 y(t)^2 + y(t)^4 \right]}{\left[ x(t)^2 + y(t)^2 \right] \cdot \left[ 1 - 2x(t) + x(t)^2 + y(t)^2 \right] \cdot \left[ 1 + 2x(t) + x(t)^2 + y(t)^2 \right]}. \quad (3.53)$$

$$b_y = y(t) \frac{\left[ -1 + x(t)^4 - 4y(t)^2 + 2x(t)^2 y(t)^2 + y(t)^4 \right]}{\left[ x(t)^2 + y(t)^2 \right] \cdot \left[ 1 - 2x(t) + x(t)^2 + y(t)^2 \right] \cdot \left[ 1 + 2x(t) + x(t)^2 + y(t)^2 \right]}. \quad (3.54)$$

Таким образом представлена картина ЭМП для трех проводников (т. е. МАО отверстий). На рис. 3.37 показана картина

ЭМП для уровня величины магнитной индукции в области  $0 \leq x \leq 1$ ,  $-1 \leq y \leq 1$

Распределение магнитной индукции в рабочей зоне представлено на рис. 3.37, на основании чего можно выявить наиболее эффективную форму этой зоны и предельные размеры обрабатываемого изделия.

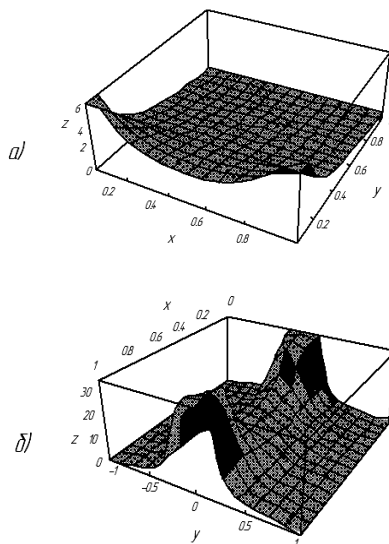


Рис. 3.37. Схема линий уровня абсолютной величины магнитной индукции при наличии двух (а) и трех (б) проводников с током

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

### 3.4.2. Компьютерное моделирование топографии магнитного поля при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей тел вращения

Рассмотренные методы расчета топографии магнитного поля требуют решения системы дифференциальных уравнений с использованием дополнительных программ расчета, что сопряжено с трудностями обработки информации переменных параметров. Более простым и наглядным является графическое построение топографии магнитного поля с использованием программного пакета *FEMM*, в котором расчет координат точек производится методом конечных элементов. Например, при MAO пазов зубчатых колес в расчете учитывается переменное значение величин диаметра окружностей их выступов и впадин, обусловленное как вращательным, так и осциллирующим движением детали относительно полюсных наконечников электромагнитов.

На рис. 3.38, 3.39, 3.40 представлена топография магнитного поля в рабочем зазоре при MAO зубчатых колес в их различном положении в зоне двухполюсной магнитной системы.

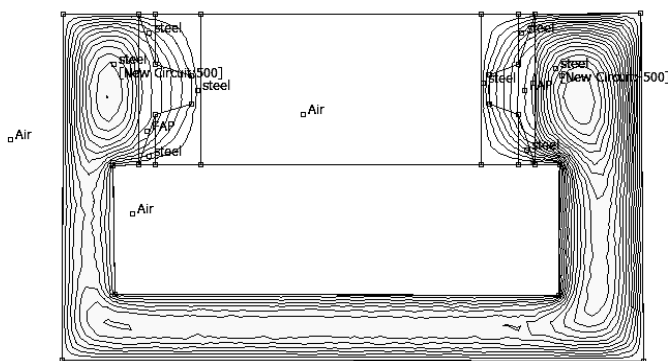


Рис. 3.38. Топография магнитного поля при среднем положении в рабочем зазоре для зубчатого колеса

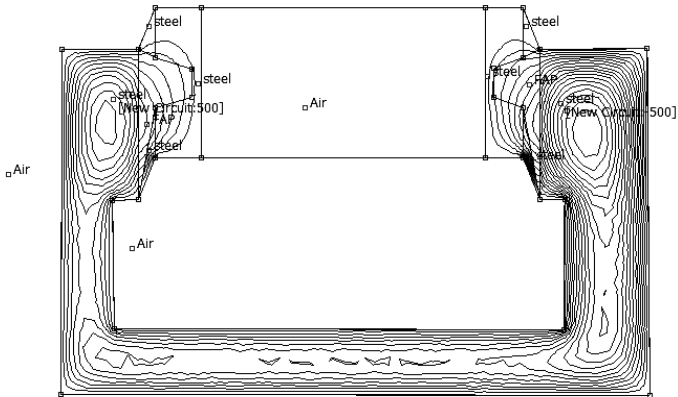


Рис. 3.39. Топография магнитного поля в левом крайнем положении в рабочем зазоре при осцилляции для зубчатого колеса

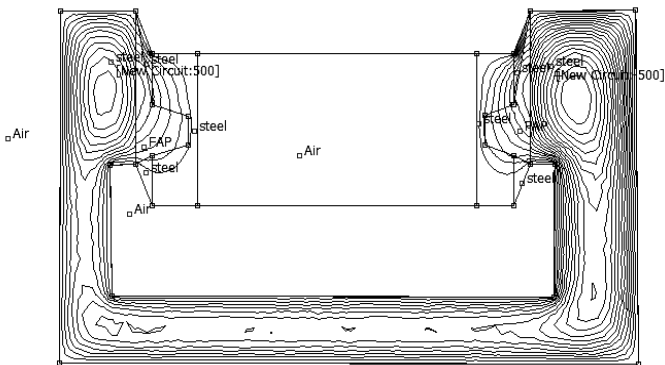


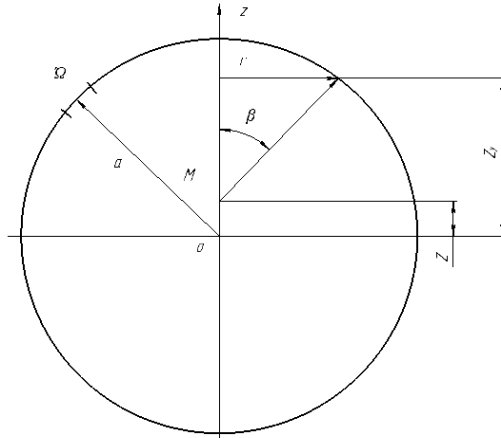
Рис. 3.40. Топография магнитного поля в правом крайнем положении в рабочем зазоре при осцилляции для зубчатого колеса

### 3.4.3. Компьютерное моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке деталей сферической формы

Образцом для моделирования является сфера, вращающаяся с частотой  $n$  и находящаяся в магнитном поле. Задача заключается в

определении путем непосредственного интегрирования напряженности магнитного поля на оси вращения вне шариков, считая известным поле на оси кругового тока.

Напряженность магнитного поля на оси вращения в точке М (рис. 3.41)



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

Рис. 3.41. Схема для определения напряженности магнитного поля на сферической поверхности при МАО

Обусловленная током  $di$ , равняется:

$$dH = dH_z = dI \frac{\sin^3 \beta}{2r}. \quad (3.55)$$

Интегрируя это выражение по  $\rho$ , получаем:

$$H = -\frac{I}{16az^3} \cdot \left[ \frac{\rho^3}{3} - 2(z^2 + a^2)\rho - (a^2 - z^2)\frac{1}{\rho} \right]. \quad (3.56)$$

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

$$H = -\frac{Ia^2}{3z^3}. \quad (3.57)$$



Таким образом, анализируя полученное выражение, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным диапазоном обрабатываемых размеров шариков являются диаметры  $2 \div 10$  мм. Это связано с тем, что требуемую величину напряженности магнитного поля при МАО представляет численное значение, равное  $100 \div 500$  А/м. Максимально теоретически возможным для обработки методом МАО является размер шарика  $d = 15$  мм. На рис. 3.42–3.44 представлена топография магнитного поля в рабочем зазоре при обработке сферических поверхностей при их различном положении в зоне ЭМС.

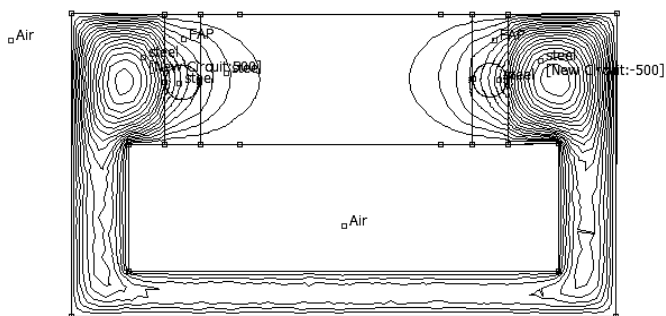


Рис. 3.42. Топография магнитного поля при среднем положении сферической поверхности в рабочем зазоре

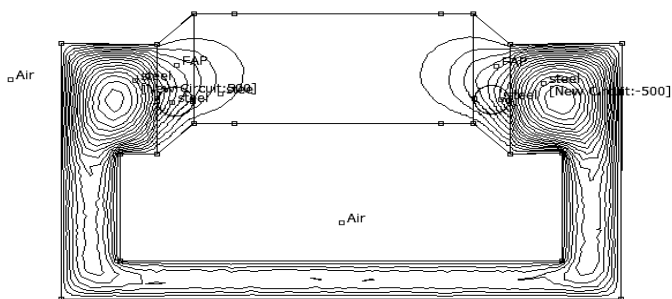


Рис. 3.43. Топография магнитного поля в левом крайнем положении в рабочем зазоре при осцилляции сферической поверхности

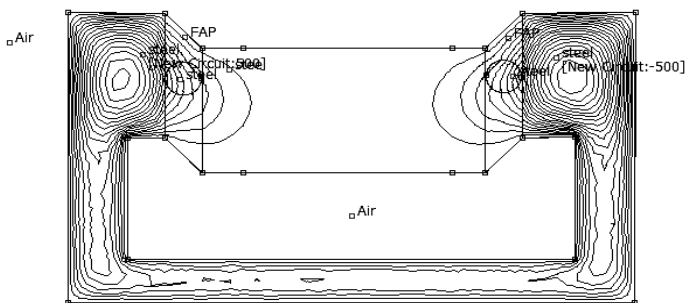


Рис. 3.44. Топография магнитного поля в правом крайнем положении в рабочем зазоре при осцилляции сферической поверхности

### 3.4.4. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке мелкозубчатых колес

Как указывалось выше, именно наличие модуля  $m \leq 2,5$  мм практически ограничивает финишную обработку зубчатых колес методом зубохонингования, а, по данным [30], магнитное поле, проникающее в паз, затухает на глубине, примерно равной его ширине. Следовательно, чем меньше модуль зубчатого колеса, тем эффективнее происходит процесс съема материала обрабатываемого изделия, несмотря на переменность величин диаметров выступов и впадин при использовании МАО.

Тогда интеграл Кристоффеля – Шварца приобретет вид:

$$\text{при } a^2 = 1/2: \quad Z = c \int_{\xi_0}^{\xi} \frac{1}{\xi} \sqrt{\frac{\xi + a}{\xi + 1}} d\xi + c_1, \quad (3.58)$$

$$\text{при } a^2 = 2/3: \quad Z = c \int_{\xi_0}^{\xi} \frac{1}{\xi} \sqrt{\left(\frac{\xi + a}{\xi + 1}\right)^3} d\xi + c_1, \quad (3.59)$$

где  $Z$  – плоскость;

$\zeta$  – полуплоскость;

$c$  – произвольная постоянная;

$a$  – углы при вершинах, в долях  $\pi$ ;

Интегралы типа (3.58), (3.59), (при  $a^2 = 1/2, 2/3$ ) выражаются в элементарных функциях. В дальнейшем целесообразно рассмотреть выражение (3.59) для трапецеидального зуба с углом наклона  $120^\circ$ , т. к. именно этот вариант схож с геометрией эвольвентного зуба колеса.

Используя это выражение после некоторых преобразований, получим:

$$\frac{x}{\delta} = \frac{1}{\pi} \left\{ \begin{aligned} & \ln(1 - \beta) - \alpha \ln(\alpha\beta - 1) + \\ & + \frac{1}{2} \left[ \alpha \ln(1 + \alpha\beta + \alpha^2\beta^2) - \ln(1 + \beta + \beta^2) \right] + \\ & + \sqrt{3} \left( \alpha \operatorname{arctg} \frac{2 + \alpha\beta}{\sqrt{3\alpha\beta}} - \operatorname{arctg} \frac{2 + \beta}{\sqrt{3\beta}} \right) \end{aligned} \right\} + \frac{\sqrt{3}}{2}(1 - \alpha) \quad (3.60)$$

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

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

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

Назначение полюсных наконечников заключается в создании эквидистантной по отношению к форме детали зоны обработки с рабочим зазором, заполненным ФАП. Поэтому следует использовать полюсной наконечник с определенной конусностью для обработки методом MAO некоторой группы типоразмеров

деталей с коническими поверхностями, а в ряде случаев – применять полусные наконечники и без профилирования при небольшой конусности детали.

Расчетная схема для определения ЭМП с учетом принятых допущений показана на рис. 3.45.

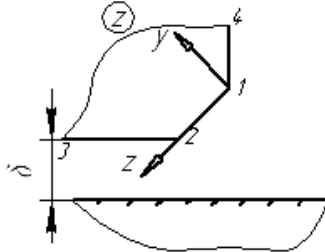


Рис. 3.45. Расчетная схема для определения ЭМП

Многоугольник [170] (см. рис. 3.45), в плоскости  $z$  отображается на верхнюю полуплоскость  $\xi$  при помощи следующего интеграла Кристоффеля-Шварца:

$$z = D_1 \int_0^{\xi} \xi^{\alpha_1-1} (1-\xi)^{\alpha_2-1} (1-k\xi)^{\alpha_3-1} d\xi + D_2, \quad (3.61)$$

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

Анализ уравнения (3.61) показывает, что даже частные случаи с углами  $30^\circ, 45^\circ$  или  $60^\circ$ , считая от горизонтали, имеют сложные подынтегральные выражения.

Для этого множитель представим в виде биномиального ряда:

$$\begin{aligned} (1-k\xi)^{\alpha_3-1} &= 1 - \frac{\alpha_3-1}{1!} k\xi + \frac{(\alpha_3-1)(\alpha_3-2)}{2!} k^2 \xi^2 - \dots = \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_m^{(3)} k^m \xi^m, \end{aligned} \quad (3.62)$$

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

Для определения постоянной  $k$  из уравнения (3.62) используем интерактивный метод Ньютона:

$$k_{n+1} = k_n - \frac{f(k_n)}{f'(k_n)}, \quad (3.63)$$

$$\text{где } f'(k_n) = \frac{\pi l_1 \Gamma(1 + l_2)}{\delta \Gamma(l_1) \Gamma(l_2)} - k_n^{\alpha_1 + \alpha_2 - 1} \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n k_n}{(1 - k)^{1 - \alpha_2}}, \quad (3.64)$$

$$f'(k_n) = -k_n^{\alpha_1 + \alpha_2 - 1} \left[ (\alpha_1 + \alpha_2 - 1) \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n k_n}{(1 - k)^{1 - \alpha_2}} - \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n k_n}{(1 - k)^{\alpha_2 - 1}} - \frac{k_n \sum_{n=0}^{\infty} A_n k_n}{(1 - k)^{1 - \alpha_2}} \right]; \quad (3.65)$$

$$k_0 = \left[ \frac{\pi l_1 \Gamma(1 + l_2)}{\delta \Gamma(l_1) \Gamma(l_2)} \right]^{\frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2 - 1}} \text{ и } k_1 = \frac{k_0}{1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} - k_0} - \text{соответственно}$$

начальное и первое приближения.

Равномерный уклон на всю высоту сегмента (рис. 3.45):

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

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

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

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

Установлено, что во многих случаях, представляющих практический интерес, такого рода решение может быть найдено путем сведения задачи к двухмерной. Например, требуется обработать рефлектор карманного фонаря, представляющий собой полый усеченный конус, внутреннюю поверхность которого следует довести до высокой светоотражательной способности (рис. 3.46).



Рис. 3.46. Фотографии рефлектора до MAO (слева) и после MAO (справа)

В таких случаях предлагается схема MAO с продольным расположением магнитного поля, поскольку конструктивное оформление оборудования, реализующего способ с поперечным МП, более сложное.

Расчет магнитного поля заключается в определении векторного потенциала магнитного поля, а посредством его – и магнитной индукции, являющейся одной из основных характеристик этого поля.

В цилиндрической системе координат:

$$B_r = -\frac{\partial A_\theta}{\partial z} = \frac{3a^2 \cdot \mu_a \cdot I \cdot r \cdot z}{4R^5}, \quad (3.66)$$

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

$$B_z = \frac{a^2 \cdot \mu_a \cdot I}{2R^3}. \quad (3.67)$$

Основное значение для MAO конусных внутренних поверхностей в продольном магнитном поле имеет составляющая остаточной магнитной индукции  $B_r$  (рис. 3.47).

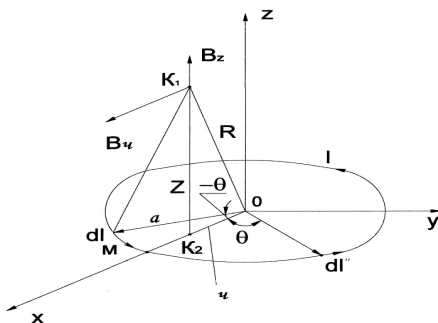


Рис. 3.47. Схема определения векторного потенциала при MAO рефлектора

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

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

### **3.5. Экспериментальные исследования магнитно-абразивной обработки беговых дорожек внутренних колец подшипников качения**

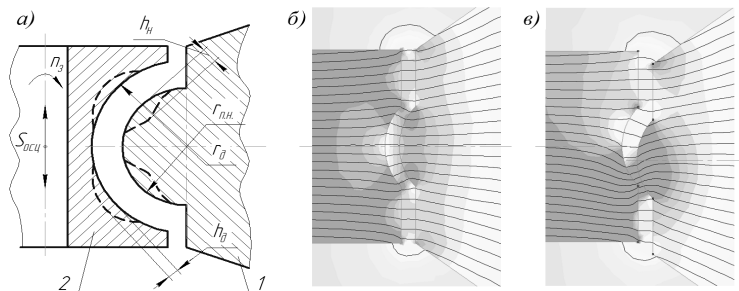
При финишной обработке, как и при других видах механической обработки, выявление взаимного влияния технологических режимов приходится проводить опытным путем и устанавливать его количественное значение посредством поиска эмпирических формул. Анализ полученных эмпирических зависимостей – один из наиболее широко используемых методов исследования способов финишной обработки резанием, в том числе и магнитно-абразивной обработки [111]. Исследования по методу многофакторного планирования экспериментов [112] проводятся путем изучения функции отклика при изменении ряда варьируемых факторов и фиксации остальных факторов, статистической проверки адекватности аппроксимирующих функций, их последующего анализа, построения графиков, таблиц и т.п. Математические методы планирования экспериментов представляют собой надежное средство рациональной организации научно-исследовательских и опытно-технологических работ [113], так как сокращают сроки экспериментальных исследований и повышают эффективность поиска функциональных зависимостей.

#### **3.5.1. Топография магнитного поля при MAO беговых дорожек внутренних колец подшипников качения**

Силовой характеристикой магнитного поля (величиной магнитной индукции  $B$ ), определяющей эффективность воздействия на частицы ФАП по длине образующей детали, можно управлять изменением формы рабочего зазора за счет профилирования полюсного наконечника. Установлено, с чем меньшими рабочими зазорами ведется обработка, тем эффективнее влияние величины зазора на геометрическую точность обработанной поверхности. Например, в работе [115] предложена и исследована схема MAO с прямолинейным вдоль оси детали 2 движением осцилляции при обработке внутренних колец подшипников (рис. 3.48). При этом были использованы полюсные наконечники  $I$  с профилем рабочих поверхностей, эквидистантным обрабатываемой поверхности.



Исследования топографии магнитного поля в рабочем зазоре при MAO беговой дорожки шарикоподшипника с относительным осциллирующим движением полюсных наконечников электромагнитов показывают, что формируемое магнитное поле в среднем и крайних положениях рабочего зазора (рис. 3.48, б и в)



1 – полюсный наконечник, 2 – внутреннее кольцо подшипника,  
 $r_d$  – радиус дорожки,  $r_{п.н}$  – радиус полюсного наконечника,  
 $h_n, h_d$  – локальные отклонения геометрических форм полюсного наконечника  
и беговой дорожки соответственно

Рис. 3.48. Схема MAO беговой дорожки кольца подшипника (а);  
топография магнитного поля в среднем (б) и крайнем (в) положениях  
рабочего зазора при осцилляции

Однако различным участкам дуги профиля соответствует разная интенсивность миграции частиц и, следовательно, различное режущее воздействие частиц ФАП на обрабатываемую поверхность. При сближении полюсного наконечника и обрабатываемой поверхности при осцилляции (см. рис. 3.48, б, в) происходит периодическое уплотнение порошка на боковых участках профиля. Это приводит к интенсификации процесса резания на этих участках и, как следствие, к локальным отклонениям (глубиной до  $0,5 \div 1$  мкм) геометрических форм как беговой дорожки  $h_d$  внутреннего кольца подшипника, так и полюсного наконечника  $h_n$ .

Для обеспечения равномерности съема металла с различных участков профиля беговой дорожки подшипника были проведены исследования по влиянию формы полюсного наконечника на однородность магнитного поля в рабочей зоне при MAO беговой дорожки. Были проведены исследования четырех видов формы

полюсного наконечника путем компьютерного моделирования топографии магнитного поля в рабочем зазоре, основанного на расчете величин магнитной индукции по методу конечных элементов, с использованием программы *FEMM*. Топография магнитного поля в рабочем зазоре представлена на рис. 3.48, а результаты моделирования – в табл. 3.17.

Моделированием магнитного поля установлено, что эквидистантные полюсные наконечники (табл. 3.17, вид 1), которые использовались в работе Л. К. Минаина при обработке дорожки подшипника, обеспечивают неравномерную обработку по периметру дорожки из-за наличия концентраторов магнитной индукции по краям беговой дорожки. Величина магнитной индукции по краям беговой дорожки имеет максимальное значение, а к центру уменьшается. Для равномерной обработки беговой дорожки необходимо обеспечить равномерную величину индукции магнитного поля по периметру беговой дорожки подшипника.

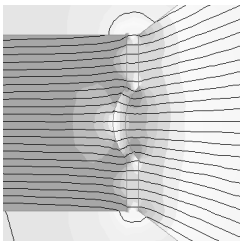
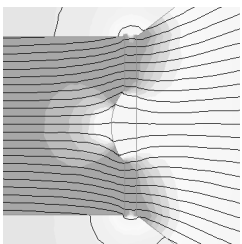
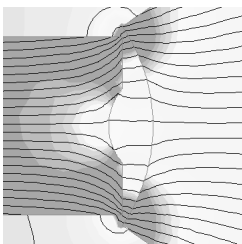
Исследование топографии магнитного поля в рабочем зазоре с плоскими полюсными (табл. 3.17, вид 2) наконечниками показало, что величина магнитной индукции в беговой дорожке будет иметь наименьшее значение, т. к. концентраторами выступают цилиндрические поверхности кольца подшипника и при этом величина магнитной индукции от центра беговой дорожки к ее краям является неравномерной.

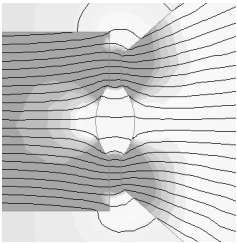
В рабочем зазоре с радиусными полюсными наконечниками с охватом ширины кольца (табл. 3.17, вид 3) величина магнитной индукции равномерна по периметру беговой дорожки, но не достигает требуемой величины для удержания ферроабразивного порошка, весь порошок концентрируется в зоне цилиндрических поверхностей.

Исполнение радиусных полюсных наконечников с охватом ширины дорожки (табл. 3.17, вид 4), позволило получить требуемую величину магнитной индукции по периметру беговой дорожки с сохранением ее равномерности. В зонах, где форма полюсного наконечника эквидистантна форме обрабатываемого кольца подшипника, величина магнитной индукции имеет наибольшее значение, что создает «запирающие» зоны и не дает ФАП выйти из зоны обработки беговой дорожки. В зоне обработки беговой дорожки величина магнитной индукции в 2 раза меньше, чем в «запирающих» зонах.

Таблица 3.17

## Формы профиля полюсных наконечников

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

Профиль наконечника		Топография магнитного поля в рабочем зазоре	Величина магнитной индукции в зоне беговой дорожки $B, \text{Tл}$	Распределение магнитной индукции по контуру беговой дорожки подшипника $B, \text{Tл}$	
№	вид			по краям дорожки	в центре
4	Радиусный с охватом ширины дорожки		0,5÷0,6	0,6	0,5

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

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

Экспериментальное исследование проведено при MAO колец шарикоподшипников из стали ШХ-15. Технологические режимы MAO и диапазоны их варьирования представлены в табл. 3.18.

Технологические режимы МАО варьировали согласно матрице ротатабельного плана из 77 опытов с 4-кратным дублированием в центральной точке, то есть получено 80 образцов для анализа, на которых измерены следующие параметры, характеризующие качество обработанной поверхности и съём обрабатываемого материала:  $\Delta g$ , мг/(см<sup>2</sup>·мин) – скорость съёма массы металла с единицы площади обработанной поверхности детали (далее – удельный съём);  $\Delta D_1$ , мкм – размерный съём по дну беговой дорожки;  $\Delta D_2$ , мкм – размерный съём по стенке беговой дорожки;  $Ra$ , мкм – параметр шероховатости после обработки;  $\beta_1$ , нм – размер блоков когерентного рассеяния в поверхностном слое до МАО;  $\beta_1'$ , нм – размер блоков когерентного рассеяния в поверхностном слое после МАО;  $\Delta\beta_1$ , нм – изменение размера блоков когерентного рассеяния в поверхностном слое;  $\beta_2$ , МПа – напряжение 2-го рода в поверхностном слое до МАО;  $\beta_2'$ , МПа – напряжение 2-го рода в поверхностном слое после МАО;  $\Delta\beta_2$ , МПа – изменение напряжения 2-го рода в поверхностном слое;  $P$ , МПа – напряжение 2-го рода в поверхностном слое до МАО;  $P'$ , МПа – напряжение 2-го рода в поверхностном слое после МАО;  $\Delta P$ , МПа – изменение напряжения 1-го рода;  $A$ , % – содержание аустенита в поверхностном слое до МАО;  $A'$ , % – содержание аустенита в поверхностном слое после МАО;  $\Delta A$ , % – содержание аустенита в поверхностном слое.

Измеренные значения параметров представляют собой случайные величины, подчиняющиеся определенным законам распределения. Для поиска взаимосвязи случайных величин широко применяется метод парного корреляционного анализа [116], для корректного применения которого распределение случайных величин должно удовлетворительно описываться нормальным законом вероятностей. Для оценки распределений значений параметров, оцениваемых в нашем эксперименте, построены гистограммы и выполнены расчеты критерия Колмогорова-Смирнова для предварительной оценки вероятности принадлежности распределения к нормальному.

Выполненный анализ показывает, что нормальному закону распределения с вероятностью  $p > 0,2$  не противоречат распределения параметров  $\Delta D_1$ ,  $\Delta D_2$ ,  $\beta_1'$ ,  $\beta_2'$ ,  $\Delta\beta_2$ ,  $P$ ,  $P'$ ,  $\Delta P$ ,  $A$ ,  $\Delta A$ .

При этом ряд важных для дальнейшего анализа параметров не может быть удовлетворительно описан нормальным законом распределения.

Таблица 3.18

Технологические режимы MAO

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

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

Для дальнейшего исследования взаимосвязей явлений при MAO построены графики попарной взаимозависимости основных измеренных параметров. Для пары параметров графики отображают картину, характеризующую тесноту их взаимозависимости: если точки на графике группируются около некоторой линии, это указывает на существование взаимосвязи; если точки образуют рассеянное «облако», это говорит о взаимной независимости рассматриваемых параметров. Однако при возрастании удельного съема  $\Delta g$  параметры размерного съема  $\Delta D_1$  и  $\Delta D_2$  уменьшаются. Это вызвано влиянием времени обработки: его возрастание снижает съем в единицу времени, но общий размерный съем возрастает пропорционально времени обработки.

Для количественной оценки уровня взаимосвязи всех параметров проведен линейный корреляционный анализ, результаты которого приведены в табл. 3.19, содержащие доверительные уровни вероятности статистической значимости корреляции. Корреляционный анализ выявил еще одну группу взаимосвязанных параметров с достаточно высокой вероятностью  $\geq 0,90$  %:  $\Delta P$ ,  $\Delta D_1$ ,  $\Delta D_2$ . Прямо пропорциональная их взаимозависимость связана с возрастанием деформирующего воздействия на обработанную поверхность при увеличении размерного съема материала при МАО.

Таблица 3.19

Доверительная вероятность существования корреляционной связи между параметрами при МАО

	$\ln(\Delta g)$						
$\Delta D_1$	100 %	$\Delta D_1$					
$\Delta D_2$	100 %	100 %	$\Delta D_2$				
$\ln(Ra)$	100 %	100 %	100 %	$\ln(Ra)$			
$f(\Delta\beta_1)$	8 %	16 %	47 %	19 %	$f(\Delta\beta_1)$		
$\Delta\beta_2$	44 %	53 %	78 %	84 %	100 %	$\Delta\beta_2$	
$\Delta P$	78 %	99 %	93 %	83 %	47 %	4 %	$\Delta P$
$\Delta A$	19 %	65 %	47 %	30 %	45 %	71 %	79 %

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

Анализ по методу главных компонент подтверждает, что для характеристики процесса МАО может быть выбрано 3 главных обобщенных параметра ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ), взаимосвязь которых с первичными определяется факторными нагрузками, приведенными в табл. 3.20. Данные табл. 3.20 подтверждают, что параметры

процесса MAO могут быть сгруппированы в три обобщенных, объединяющих те первичные параметры, формирование которых обусловлено одними и теми же физико-механическими процессами, сопровождающими MAO. Тем самым будет сокращено число уравнений регрессии для описания процесса, а главное, оптимизация процесса будет возможна в системе взаимонезависимых параметров. Выполненный статистический анализ результатов измерений параметров производительности и качества поверхности, получаемых в процессе MAO, показывает, что распределение большинства исследованных параметров может быть описано нормальным законом вероятностей.

Таблица 3.20

Факторные нагрузки для обобщенных и первичных параметров

	Обобщенные параметры		
	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$\ln(\Delta g)$	0,916	0,002	0,057
$\Delta D_1$	-0,893	-0,012	0,218
$\Delta D_2$	-0,887	0,086	0,134
$\ln(Ra)$	0,902	-0,070	-0,015
$f(\Delta 1) \beta_1$	0,005	-0,861	0,141
$\Delta 2\beta_2$	-0,086	0,871	0,121
$\Delta P$	-0,203	-0,109	0,681
$\Delta A$	0,049	0,089	0,823

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

### 3.5.3. Исследование технологических режимов магнитно-абразивной обработки

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



Рассматриваемая техническая система (процесс MAO) по своей физической природе относится к классу стохастических (вероятностных) систем, так как основной режущий инструмент представляет собой совокупность абразивных частиц, параметры которых имеют некоторое статистическое распределение, а на их взаимодействие с обрабатываемой поверхностью влияет множество случайных факторов [173, 174]. Проведенные исследования при использовании локально-интегральной модели процесса MAO отверстий (в игольчатых подшипниках 4074912 ГОСТ 4657–82, сталь ШХ15ГОСТ 801–78, 61÷65 HRC,  $D \times d \times B = 85 \times 60 \times 25$  мм) и его описание в виде квадратичного полинома позволили выявить наиболее значимые факторы и определить интервалы их варьирования. Применение данного квадратичного полинома позволило получить функцию отклика. Однако исследования MAO, например, цилиндрических радиусных поверхностей беговых дорожек шариковых подшипников 1000812 ГОСТ 8338–75, геометрические параметры которых имеют более сложную зависимость от технологических режимов MAO, выявили неадекватность регрессионных моделей второго порядка в выбранном диапазоне варьирования факторов. Поэтому для описания процесса в качестве регрессионных моделей взяты полиномы третьего порядка.

В качестве параметров оптимизации выбраны шероховатость обработанной поверхности  $Y_1 = Ra$ , мкм и производительность процесса, оцениваемая параметром  $Y_2 = Q$ , мг/(см<sup>2</sup>·мин) – скорость съема массы металла с единицы площади обработанной поверхности детали в единицу времени (далее – удельный массовый съем). Исследовано влияние следующих факторов технологии MAO:  $X_1 = V_p$ , м/с – скорость резания (скорость вращения заготовки);  $X_2 = V_o$ , м/с – скорость осцилляции (скорость возвратно-поступательного движения полюсных наконечников относительно обрабатываемой поверхности);  $X_3 = B$ , Тл – величина магнитной индукции;  $X_4 = A$ , мм – амплитуда осцилляции полюсных наконечников;  $X_5 = Ra_0$ , мкм – исходная шероховатость поверхности детали;  $X_6 = t$ , с – время обработки. Для проведения эксперимента выбран композиционный ротатбельный равномерный план. Для оценки воспроизводимости эксперимента в каждой точке плана выполнено трехкратное дублирование опытов. Уровни

варьирования факторов в натуральных и нормированных координатах представлены в табл. 3.21.

Таблица 3.21

Уровни варьирования факторов

Технологический фактор	$V_p$ , м/с	$V_o$ , м/с	$B$ , Тл	$A_2$ , $\times 10^{-3}$ м	$Ra_0$ , мкм	$t$ , с
Нормированное обозначение	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
Основной уровень (0)	3,50	0,220	0,70	1,40	0,800	60,0
Верхний уровень (+1)	4,33	0,255	0,80	1,70	0,975	75,0
Нижний уровень (-1)	2,67	0,185	0,60	1,10	0,625	45,0
Звездная точка (+ $\alpha$ ) +2,828	5,85	0,319	0,98	2,25	1,295	102,4
Звездная точка (- $\alpha$ ) -2,828	1,15	0,121	0,42	0,55	0,305	17,6

Анализ функций распределения полученных экспериментальных значений шероховатости и производительности показал их существенное отклонение от нормального закона вследствие сильной левосторонней асимметрии. Для приближения полученных распределений к нормальному закону выполнено логарифмическое преобразование экспериментальных значений исследуемых параметров, т. е. искомые коэффициенты  $b_i$  рассчитывались для уравнения 3.68, представленного в экспоненциальной форме. В результате статистического анализа значимости коэффициентов регрессии и адекватности полученного уравнения установлена зависимость параметра  $Ra$  от факторов MAO вида:

$$R_a = \exp \left( \begin{array}{l} -2,4217 + 0,0941X_1 + 0,1337X_2 - 0,1814X_3 + 0,2772X_4 + 0,2788X_5 + 0,0497X_6 - \\ -0,0678X_1X_6 + 0,1431X_2X_3 - 0,2166X_2X_4 - 0,0731X_4X_5 - 0,0617X_4X_6 + \\ + 0,0688X_1X_2X_3 + 0,0643X_1X_2X_4 - 0,1218X_2X_3X_4 - 0,0484X_2X_3X_5 + \\ + 0,1507X_1^2 + 0,0884X_2^2 + 0,1390X_3^2 + 0,0426X_4^2 + 0,0695X_5^2 + 0,0862X_6^2 - \\ - 0,0425X_1^3 - 0,0213X_2^3 - 0,0130X_3^3 - 0,03086X_4^3 - 0,0265X_5^3 - 0,0214X_6^3 \end{array} \right). \quad (3.68)$$

Уравнение (3.68) представляет собой полином 3-й степени от 6 варьируемых факторов в полупологарифмических нормированных координатах. Кроме главных факторов и их степеней статистически значимыми оказались некоторые парные и тройные взаимодействия, что говорит о сложном взаимовлиянии технологических режимов MAO на получаемую шероховатость поверхности. Поэтому аналитическая интерпретация полученной

зависимости затруднительна и выполнен поиск минимума функции численным методом.

Оптимальные значения трех факторов находятся на границе исследованных интервалов. Можно получить дальнейшее снижение шероховатости, согласно полученному уравнению регрессии, если уменьшить значения скорости и амплитуды осцилляции и увеличивать величину магнитной индукции.

Аналогично выполнен анализ зависимости значения  $\Delta Q$  от факторов MAO, описываемой полученным уравнением регрессии:

$$\Delta Q = \exp \left( \begin{array}{l} -0,9973 + 0,0571X_1 + 0,0982X_2 - 0,1791X_3 + 0,2862X_4 + 0,2529X_5 - 0,2412X_6 - \\ -0,0735X_1X_6 + 0,1138X_2X_3 - 0,1961X_2X_4 - 0,0641X_4X_5 + \\ +0,0551X_1X_2X_3 + 0,0597X_1X_2X_4 - 0,0774X_2X_3X_4 + \\ +0,1388X_1^2 + 0,0883X_2^2 + 0,1201X_3^2 + 0,0437X_4^2 + 0,0873X_5^2 + 0,1438X_6^2 - \\ -0,0335X_1^3 - 0,0167X_2^3 - 0,0193X_3^3 - 0,0319X_4^3 - 0,0175X_5^3 - 0,0152X_6^3 \end{array} \right) \quad (3.69)$$

Численное решение с использованием регрессионной зависимости (3.69) позволило определить технологические режимы, обеспечивающие максимальное значение  $\Delta Q$ .

При сравнении полученных регрессионных уравнений двух исследованных режимов процесса MAO прослеживается подобие в направлении влияния его факторов и их взаимодействий. Поскольку выполнить оптимизацию процесса возможно только по одному критерию оптимизации, то второе требование необходимо задавать в виде граничного значения, руководствуясь техническими ограничениями (табл. 3.22).

Таблица 3.22

Значения технологических режимов в точке с максимальным  $\Delta Q$

Технологический фактор	$V_p$ , м/с	$V_o$ , м/с	$B$ , Тл	$A_z$ , $\times 10^{-3}$ м	$Ra_0$ , мкм	$t$ , с
Нормированное обозначение	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
Нормированное значение	min	max	min	max	max	1,376
Натуральное значение	1,15	0,319	0,42	2,25	1,295	40

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

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

$$\begin{aligned} \Delta Q(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) &\rightarrow \max, \\ R_a(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) &\leq [R_a], \\ -2,0 \leq (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) &\leq 2,0. \end{aligned} \quad (3.70)$$

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

Полученные в результате экспериментов значения шероховатости лежат в диапазоне  $Ra = 0,64 \div 0,032$  мкм. Используемые в качестве ограничений (3.70) предельно допустимые значения  $Ra$  выберем из ряда предпочтительных значений шероховатости 0,63; 0,50; 0,32; 0,25; 0,160; 0,125; 0,080; 0,063; 0,040; 0,032.

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

Расчетные оптимальные значения факторов и режимов приведены в табл. 3.23.

Таблица 3.23

Расчетные оптимальные значения факторов и режимов

$V_p$ , м/с	5,16	4,94	4,76	4,35	4,03	2,75	1,84	1,84	1,84
$V_o$ , м/с	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,21	0,21
$B$ , Тл	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,832	1,018
$A_s \times 10^{-3}$ , м	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$Ra_o$ , мкм	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
$t$ , с	90	90	90	90	90	90	87,8	90	90
$Ra$	0,452	0,320	0,250	0,160	0,125	0,080	0,063	0,040	0,032
$\Delta Q$	9,198	6,846	5,537	3,767	3,042	2,104	1,648	0,771	0,669

Установлено, что для достижения высоких показателей  $\Delta Q$  при учете таких режимов, как скорость резания и скорость осцилляции, необходимо гарантировать повышение значений второго параметра (рис. 3.49, *а*). При учете таких параметров, как амплитуда осцилляции  $A$  и магнитная индукция  $B$ , высокие показатели производительности (рис. 3.49, *б*) определяются ростом значений обоих режимных факторов. Достижение минимальной шероховатости при варьировании скорости резания и времени обработки определяется областью минимума, расположенной в центре координатной плоскости (рис. 3.50, *а*).

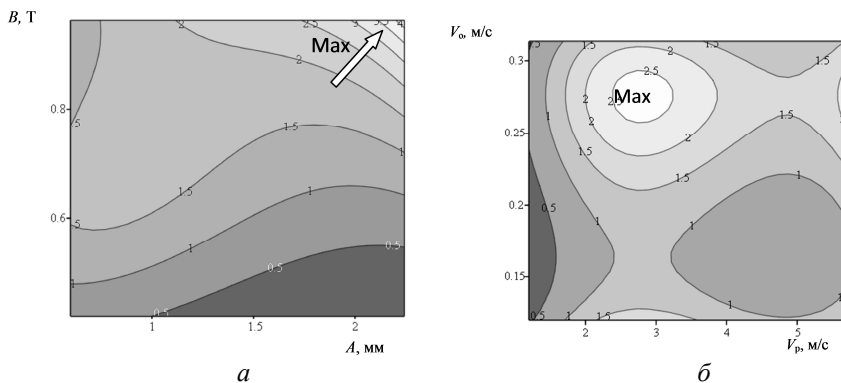


Рис. 3.49. Зависимости удельного массового съема  $\Delta Q$  от скоростей резания и осцилляции (*а*), амплитуды осцилляции и магнитной индукции (*б*)

На рис. 3.50, *б* представлена область минимума величины шероховатости после МАО в осях магнитной индукции и исходной шероховатости поверхности беговой дорожки шарикоподшипника. На рис. 3.50, *в* представлены две области минимума при разных сочетаниях факторов скорости и амплитуды осцилляции, которые расположены противоположно друг другу и определяются тем, что первая область характеризуется снижением значений обоих факторов, вторая – их ростом. По результатам оптимизации можно заключить, что для повышения удельного массового съема  $\Delta Q$  при учете скоростей резания и осцилляции, амплитуды осцилляции и магнитной индукции необходимо обеспечить следующие значения технологических режимов:  $B > 0,8$  Тл,  $A > 2$  мм,  $V_o > 0,25$  м/с,  $V_p = 2 \div 4$  м/с; для снижения шероховатости обработанной

поверхности  $Ra$  при учете скоростей резания и осцилляции, времени обработки и исходной шероховатости необходимо обеспечить следующие величины технологических режимов:  $V_0 = 0,6 \div 1,0$  м/с,  $V_p = 2 \div 4$  м/с,  $t = 40 \div 70$  с,  $Ra_0 = 0,4 \div 0,8$  мкм.

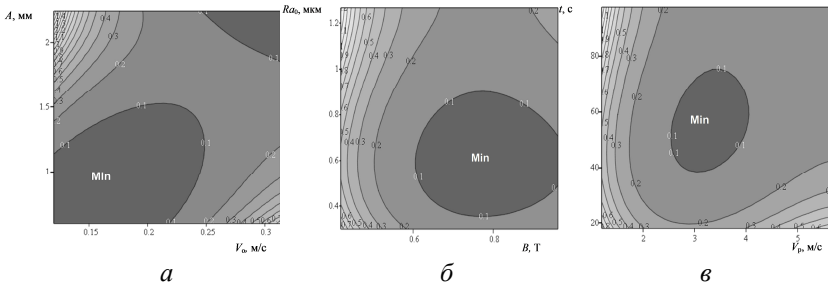


Рис. 3.50. Зависимости шероховатости обработанной поверхности  $Ra$  от скорости резания и времени обработки (а), магнитной индукции и начальной шероховатости (б), скорости осцилляции и амплитуды (в)

Таким образом, используя полученные математические зависимости, можно оценить влияние остаточных напряжений на усталостную прочность при любом напряженном состоянии, возникающем в процессе эксплуатации изделия.

### 3.5.4. Влияние смазочно-охлаждающих технологических средств на сьем металла при магнитно-абразивной обработке

Природным прототипом композиций смазочно-охлаждающих технологических средств для МАО служит белково-фосфолипидный комплекс, из которого состоят все биологические мембраны и оболочки естественных эмульсий [117]. Однако наибольшее влияние на выбор СОТС при МАО оказывают экономические и производственные факторы, включающие сырьевую базу, технологию изготовления, энергетические ресурсы. Одним из важных проявлений свойств СОТС служит их моющее действие. Ранее для МАО в качестве СОТС применялись эмульсии на основе эмульсов ЭТ, ЭГТ, Э-2. Однако наличие грубодисперсной ( $10^{-1} \div 10^{-2}$  мм) фазы таких эмульсий приводило к прекращению фильтрации СОТС ферроабразивной «щеткой» [32].

Следующий этап исследования [118] показал, что наиболее приемлемой заменой такого рода СОТС являются ПАВ на базе гликолей. Однако необходимость обработки методом MAO вязких и пластичных материалов, в том числе и цветных, требует создания нового типа СОТС. Это обусловлено тем, что синтетические жирные кислоты, на основе которых разработаны широко применяемые СОТС СинМА-1 и 2 ТУ 38.5901176–91, имеют низкую ( $70 \div 80$  °С) термостойкость, вследствие чего происходит падение эффективности моющего действия [119]. Интенсивность накопления субстрата обработки после MAO зависит от соотношения частиц субстрата и поровых сужений (горло поры). В случае если характерный размер частиц субстрата больше характерного размера порового сужения, то частицы оседают на поверхности РТС, образуя внешнюю фильтрационную корку с отсутствием проницаемости. Такими свойствами обладают представители полусинтетических СОТС, которые в своем составе имеют некоторое количество нефтяных масел. Примером эффективного использования полусинтетических СОТС является применение Аквапол-1 ТУ 38.1011061–86 при MAO цветных сплавов. На рис. 3.51–3.54 представлены результаты исследования прохождения различных видов СОТС при наложении магнитного поля и в его отсутствие в поровом пространстве ФАП, что указывает на воздействие фактора энергетического воздействия магнитного поля.

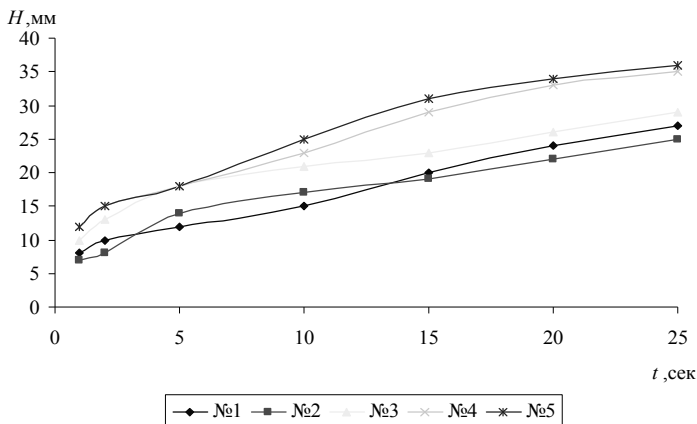


Рис. 3.51. Зависимость высоты  $H$  столба от времени протекания  $t$  жидкости через ФАП без магнитного поля (1 – СОЖ 1; 2 – СОЖ 2; 3 – NaCl; 4 – техническая вода; 5 – дистиллированная вода)

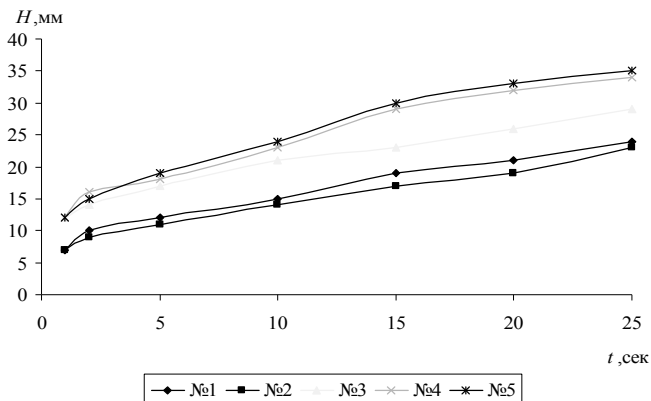


Рис. 3.52. Зависимость высоты  $H$  столба от времени протекания  $t$  жидкости через ФАП в магнитном поле (1 –СОЖ 1; 2 – СОЖ 2; 3 – NaCl; 4 – техническая вода; 5 – дистиллированная вода)

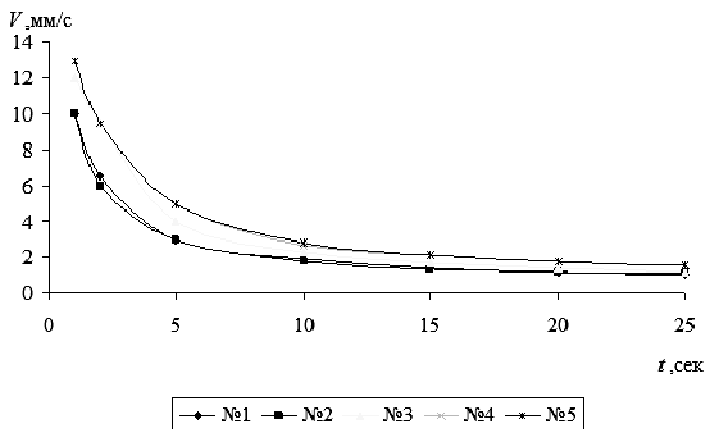


Рис. 3.53. Зависимость скорости  $V$  от времени протекания  $t$  жидкости через ФАП без магнитного поля (1 –СОЖ 1; 2 – СОЖ 2; 3 – NaCl; 4 – техническая вода; 5 – дистиллированная вода)



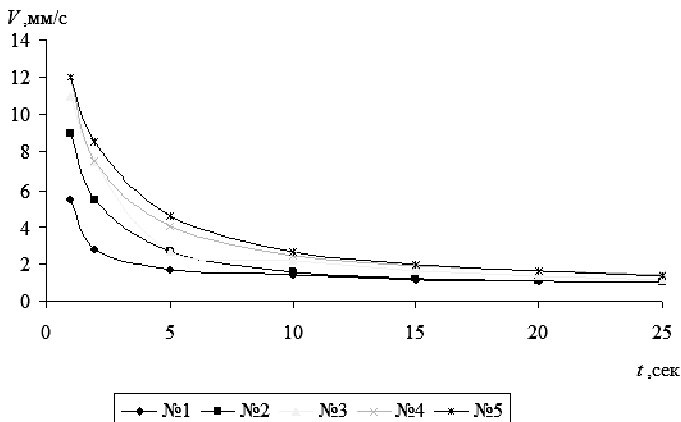


Рис. 3.54. Зависимость скорости  $V$  от времени протекания  $t$  жидкости через ФАП с магнитным полем (1 – СОЖ 1; 2 – СОЖ 2; 3 – NaCl; 4 – техническая вода; 5 – дистиллированная вода)

Однако наличие доли нефтяного масла в СОТС приводит к сводовой кольматации порового пространства РТС. С целью образования механизма мобилизации частиц в поток СОТС, совпадения их физических скоростей и создания ситуации, когда данные частицы полностью увлекаются несущей фазой, были применены СОТС с высокой пенообразующей способностью типа Пенол-1 и Пенол-2 ТУ 38-5901218–90 [120]. Пена и пористая среда в виде РТС вместе создают физический объект, который обладает рядом особых свойств. Кинетика трансформации и динамики течения газожидкостной системы при циклической подаче пенообразующего раствора СОТС Пенол-1 и Пенол-2 в насыщенную субстратами отходов РТС обеспечивается механизмом гидродинамической неустойчивости течения многофазной системы при наличии в данной системе волн давления, создаваемых вибрацией «щеток» ФАП. Пена в пористой среде представляет собой систему, эффект которой заключается в образовании аномально высокого сопротивления движению (на  $1\div 3$  порядка выше, чем у материальной жидкости), что является возможным инженерным решением задачи удаления субстрата

отходов из РТС в процессе МАО. Большим достоинством использования пенного столба служит то, что для его получения требуется до 1 % пенообразующих ПАВ в СОТС, достаточно доступных и дешевых. Это гарантирует рост эффективности процесса МАО, так как подобные структуры субстрата снижает диспергирование обрабатываемого материала.

Проблемой для процесса МАО является обработка алюминиевых сплавов из-за потемнения обработанной поверхности при обработке железосодержащими ФАП. Для устранения данного эффекта необходимо применять СОТС на основе сульфогрупп и их производных, которые обеспечивают образование избыточной фазы  $FeS$  и ее укрупнение. Это объясняется тем, что любое количество серы или ее соединений образует сульфид железа, инертный по отношению к алюминию, и поэтому данный сульфид железа практически в нем не растворим. Это позволяет эффективно выводить сульфид железа из рабочей зоны в виде шлама, что обеспечивает высокую светоотражательную способность обработанной поверхности. Механизм действия МП на РТС представляется следующим образом: в СОТС происходит разрушение агрегатов, состоящих из субмикронных ферромагнитных частиц  $Fe$ , находящихся в определенной концентрации, которая по мере увеличения продолжительности процесса МАО возрастает, так как зерна ФАП обладают ферромагнитной матрицей. Подобное разрушение агрегатов приводит к резкому повышению центров кристаллизации масляных глобулей и формированию на поверхности ферроабразивных частиц пузырьков газов микронных размеров, обеспечивая газлифтный эффект. В результате разрушения агрегатов парафинированные масляные глобулы выпадают в виде тонкодисперсной и объемной взвеси, осаживаемой на микрорельефе частиц ФАП. Известную роль при этом играет повышение температуры, но решающим фактором столь быстрого засаливания РТС в отличие от шлифования выступает значительное ускорение коагуляции и коалесценции масляных глобулей под действием МП.

В качестве оборудования применялись установки СФТ 2.150.00.00.000 для МАО и СФТ 10.125.00.00.000 для производства СОТС методом эжекционно-волновой технологии. Образцы – прутки диаметром 45 мм. Материал – бронза Бр-ОФ 10-5 ГОСТ

18175–78, латунь Л63 ГОСТ 15527–70 и медь М3 ГОСТ 859–81. СОТС – 5 %-е водные растворы СинМА-1 и -2 и Э-2 ГОСТ 4244–75, ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-483–81, размер зерна,  $\Delta\delta = 100/160$  мкм. Производительность обработки определялась по величине удельного массового съема материала.

В работе [54] выявлено, что использование СОТС Аквапол-1 ТУ 38.1011061–86 обеспечивало интенсификацию процесса MAO цветных металлов в сравнении с СинМА-1 и СинМА-2. Анализ представленного состава СОТС Аквапол-1 позволил сделать вывод, что наличие в нем нефтяного масла приводит к увеличению дисперсности системы и оптимизации физико-химических показателей для производительного протекания процесса MAO. Требуемый результат достигается применением эжекционно-волновой технологии для получения эмульсии с дисперсностью  $10^{-3}$  или близкой к этому показателю. Данная технология обеспечивает средний диаметр частиц  $1\div 5$  мкм. Однородность эмульсии достигается  $3\div 5$  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 показало, что производительность и качество MAO цветных материалов этой эмульсии превышают аналогичные показатели СОТС СинМА-1 и СинМА-2 в среднем на 20 % (табл. 3.24).

Таблица 3.24

Производительность и качество обработки методом MAO при использовании различных составов СОТС

Вид материала	СинМА-1 $Ra_2$		СинМА-2 $Ra_2$		Э-2	
	$\Delta Q$ , мг/см <sup>2</sup> . мин	$Ra_2$ , мкм	$\Delta Q$ , мг/см <sup>2</sup> . мин	$Ra_2$ , 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 М3	11,52	0,08	10,37	0,11	12,11	0,09

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

Например, согласно формуле Ньютона, удельный тепловой поток  $q$  от твердого тела с температурой  $t_{\tau}$  к жидкости определяется:

$$q = a(t_{\tau} - t_{ж}), \quad (3.71)$$

где  $a$  – коэффициент теплоотдачи, Дж/(м<sup>2</sup>·К);

$t_{ж}$  – температура жидкости, К.

Наиболее очевидной причиной насыщения остаточным углеродом поверхностного слоя обрабатываемых изделий является снижение моющих свойств, традиционно применяемых при MAO СОТС СинМА-1 и СинМА-2 ТУ 38.5901176–91. Вместе с тем существенный недостаток производной гликоля заключается в высокой склонности к окислению с образованием кислотных, коррозионно-активных агентов в процессе эксплуатации. Кроме того, гликоли не обладают достаточной огнестойкостью, имеют низкую температуру вспышки, что затрудняет их хранение и консервацию. Установлено [122], что жидкости с молекулами большой длины, содержащие растворы ПАВ, образуют над монослоем полярных молекул граничный слой, в котором молекулы правильно ориентированы (рис. 3.55).

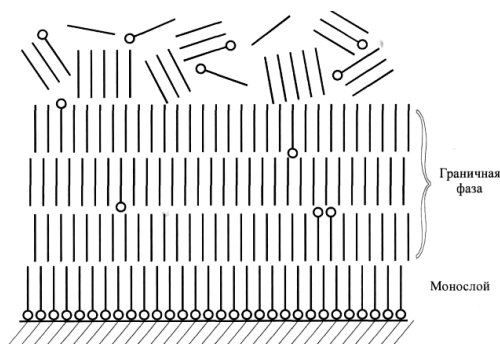


Рис. 3.55. Схема адсорбированного монослоя полярных и ориентации неполярных молекул

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 ( $70\text{ }^{\circ}\text{C}\div 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а квазикристаллическая структура граничных фаз распадается. 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 ( $50\text{ }^{\circ}\text{C}\div 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в зоне резания даже на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\div 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  уже является критическим. Следовательно, падает способность растворов к адсорбции, а отсюда резко снижается моющее действие СОТС, чем и объясняется невозможность устранения остаточного углерода с поверхности обрабатываемых деталей.

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

$$\mu = \nu\rho, \quad (3.72)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\text{сСт}$ ;

$\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ .

Установлено, что число Нуссельта уменьшается при увеличении этого показателя [121]. Это приводит к росту рабочей температуры в пограничном слое между жидкостью и поверхностью твердого тела. Как указывалось выше, в таком случае применение СОТС Аквапол-1 в сравнении с СинМА-1 обеспечило рост эффективности и качества обработки цветных

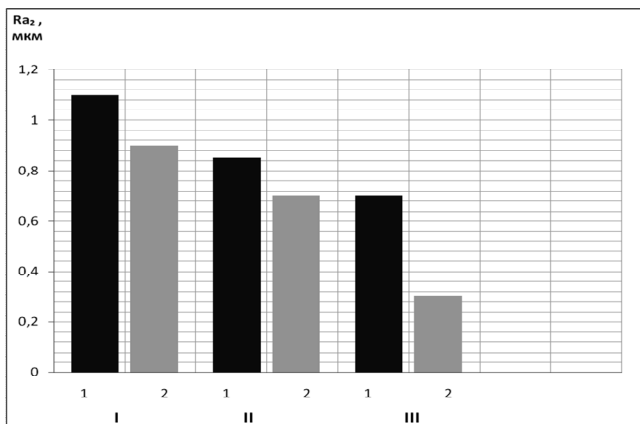
материалов при прочих равных условиях протекания процесса МАО. Следовательно, в результате сопоставления этих показателей можно прогнозировать степень влияния СОТС на интенсивность обработки методом МАО (в данном случае моющего действия) цветных материалов. Например,  $\mu$  СОТС Аквапол-1 равен  $1200 \cdot 30 = 3,6 \cdot 10^4$ , а  $\mu$  СинМА-1 и -2 –  $900 \cdot 100 = 9 \cdot 10^4$ . Таким образом, зная представленные физико-химические характеристики различных СОТС, производится прогноз эффективности финишной обработки различных цветных сплавов и металлов.

**Влияние смазочно-охлаждающих технологических средств на интенсивность съема металла.** Моющий эффект является многопараметрическим и обусловлен ее физико-химическими свойствами. СОЖ должны обеспечивать смачивание поверхности, абсорбцию ПАВ, проникать в микронеровности рельефа, удалять из зоны обработки и с поверхности деталей шлам, состоящий из продуктов диспергирования материала и частиц износа и разрушения ферроабразивных зерен.

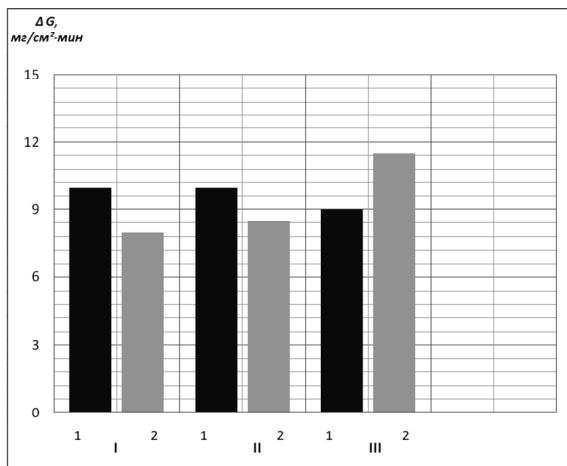
Применялся способ свободной подачи СОТС в зону резания, поскольку при резании для МАО повышение давления СОТС выше 5 МПа возникает нарушение сплошности «щетки» ферроабразивного инструмента. Параметры МАО и шлифования, традиционно применяемого для обработки указанных выше деталей, стабилизировались на уровнях, обеспечивающих оптимальные условия процесса, приняты следующими: МАО – магнитная индукция,  $B = 1$  Тл; скорость резания,  $V_p = 1,5$  м/с; скорость осцилляции,  $V_o = 0,2$  м/с; амплитуда осцилляции,  $A = 1$  мм; величина рабочего зазора,  $\delta = 1$  мм; зернистость ФАП,  $\Delta = 0,16/0,20$  мм; время обработки,  $t = 60$  с. ФАП – ФАПД-ФТИ-25 паспорт-сертификат БАТУ от 15.12.1998 г. Шлифование – скорость круга,  $V_k = 30$  м/с; подача,  $s = 1,5$  м/мин; глубина резания,  $t = 0,01$  мм; инструмент – круг алмазный АСМ зернистостью № 25 твердостью СМ1 на связке Б1. Исходная шероховатость поверхности образцов (количество 10 шт.) составляла  $Ra_1 = 2,2 \div 2,6$  мкм. Выходными показателями являются производительность обработки по величине удельного массового съема, мг/см<sup>2</sup>·мин и достигаемая шероховатость поверхности,  $Ra_2$ , мкм.

На рис. 3.56 и 3.57 приведены сравнительные исследования по определению совместного влияния на процесс обработки методом

МАО и шлифования. Установлено, что лучшие результаты по удельному съему материала показывает шлифование, но по качеству поверхности таковым является МАО, что служит решающим условием для того, чтобы этот метод был предпочтительно принят для финишной обработки головок делителя теста ШЗ-ХДУ-33.



I – ЭТ-2, II – Укринол-1, III – СинМА-1; 1 – шлифование; 2 – МАО  
 Рис. 3.56. Влияние различных СОТС на шероховатость обработки при МАО



I – ЭТ-2, II – Укринол-1, III – СинМА-1; 1 – шлифование; 2 – МАО  
 Рис. 3.57. Влияние различных СОТС на производительность процесса при МАО

В табл. 3.25 приведены интервалы варьирования параметрами и удельный массовый съем металла при MAO с использованием трех указанных выше составов СОТС. Для оценки коэффициентов регрессии была реализована дробная ортогональная реплика  $2^{4-1}$ . При расчете точности экспериментов и оценки дисперсии ошибок наблюдений ставились дополнительные опыты в центре плана. По результатам первой серии опытов было принято решение стабилизировать фактор скорости резания на нулевом уровне, а амплитуду осцилляции на 1,5 мм. Реализация центрального рототабельного композиционного плана второго порядка относительно магнитной индукции и скорости осцилляции позволила получить математические модели процесса для трех видов СОТС.

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

Результаты исследований представлены на рис. 3.58–3.61.

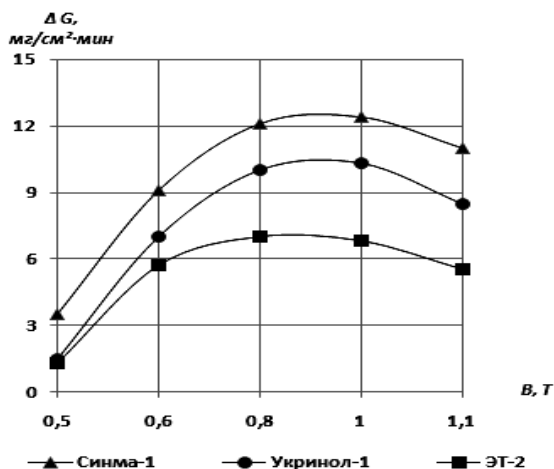


Рис. 3.58. Зависимость производительности процесса MAO от величины магнитной индукции при различных видах СОТС



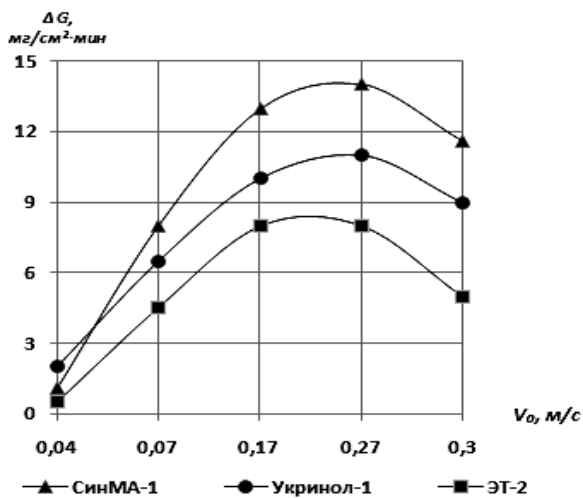


Рис. 3.59. Зависимость производительности процесса МАО от скорости резания при различных видах СОТС

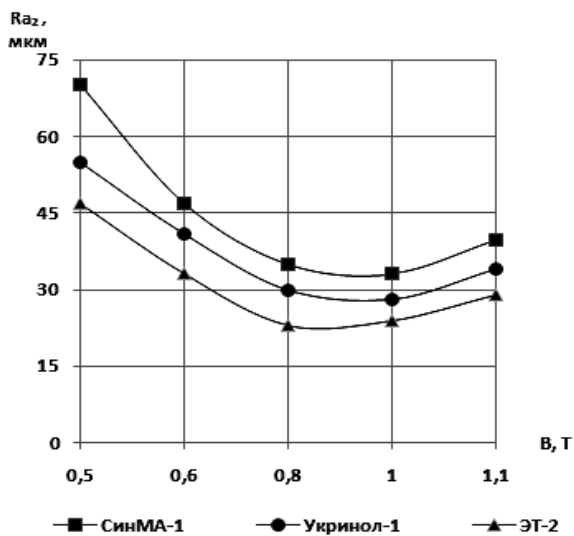


Рис. 3.60. Зависимость шероховатости поверхности от величины магнитной индукции при различных видах СОТС

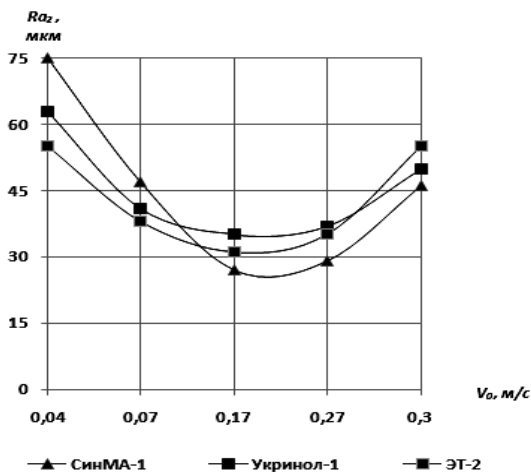


Рис. 3.61. Зависимость шероховатости поверхности от скорости резания при различных видах СОТС

Таблица 3.25

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

Обозначения	Факторы					Удельный массовый сьем металла, $Q$ , мг/см <sup>2</sup> мин			
	$A$	$V_0$	$B$	$V_p$					
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_0$				
Интервал варьирования	0,5	0,1	0,2	1		СОТС			
Основной уровень (0)	1	0,17	0,8	2					
Верхний уровень (+1)	1,5	0,27	1,0	3					
Нижний уровень (-1)	0,5	0,07	0,6	1		ЭТ-2	Укринол -1	СинМА-1	
Номер опыта	1	-	-	-	-	+	7,52	8,49	9,16
	2	+	-	-	+	+	6,98	7,44	8,47
	3	-	+	-	+	+	7,01	8,07	9,05
	4	+	+	-	-	+	4,32	6,37	11,5
	5	-	-	+	+	+	5,44	6,15	10,7
	6	+	-	+	-	+	3,77	7,34	9,36
	7	-	+	+	-	+	5,74	7,06	10,16
	8	+	+	+	+	+	7,01	8,56	10,9

$$Y_1 = 12,41 + 9,1 X_1 + 6,71 X_2 - 4,68 X_{12} - 9,82 X_{22} - 5,07 X_1 X_2 \quad (3.73)$$

$$Y_2 = 10,5 + 6,79 X_1 + 8,34 X_2 - 2,48 X_{12} - 9,62 X_{22} - 0,9 X_1 X_2 \quad (3.74)$$

$$Y_3 = 14,1 + 8,7 X_1 + 9,12 X_2 + 3,63 X_{12} - 8,4 X_{22} - 1,1 X_1 X_2 \quad (3.75)$$

$$Y_1 = 39,6 \cdot 10^{-3} - 5,3 X_1 - 0,7 X_2 + 4,13 X_{12} - 4,1 X_{22} + 2,2 X_1 X_2 \quad (3.76)$$

$$Y_2 = 31,7 \cdot 10^{-3} - 5,54 X_1 - 3,2 X_2 + 2,95 \quad (3.77)$$

$$Y_3 = 32,4 \cdot 10^{-3} - 4,13 X_1 + 0,91 X_2 + 1,2 X_1 X_2 \quad (3.78)$$

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

Исследование эффективности магнитно-абразивной обработки с использованием смазочно-охлаждающих технологических средств СинХО-2М.

В настоящее время наиболее широко применяемыми СОТС для MAO являются синтетические СинМА-1 и СинМА-2 ТУ 38-5901176-91, разработанные в ФТИ НАН Беларуси и УкрНИИ НП «МАСМА» (г. Киев). Поскольку рабочая температура в зоне обработки при MAO с соблюдением оптимальных параметров не превышает  $50 \text{ }^\circ\text{C} \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$ , 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. Физико-химические характеристики СОТС СинМА-1 и СинМА-2, СинХО-2М приведены в [123].

Были проведены сравнительные исследования указанных выше видов СОТС. Режимы процесса MAO приняты следующими: скорость вращения детали,  $V_{вр} = 2,5$  м/с; скорость осцилляции,  $V_o = 0,12$  м/с; величина магнитной индукции  $B = 1$  Тл; амплитуда осцилляции,  $A = 2$  мм; величина рабочего зазора,  $\delta = 1$  мм при его концентричности; время обработки  $t = 60$  с. В качестве образцов представлены втулки  $D \times d \times l = 36 \times 30 \times 32$  мм, материал – сталь ШХ15 ГОСТ 801–78, 58-62 HRC и дюралюминий Д16 ГОСТ 4785–74. Исходная шероховатость их поверхности составляла в среднем  $Ra_1 = 1,2$  мкм. В качестве ФАП применялся Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81, зернистость которого  $\Delta = 0,2 \div 0,315$  мм. Оборудование – экспериментальная установка ЭУ-1.

Выходными параметрами процесса служили:

а) величина удельного массового съема  $Q$ , мг/(см<sup>2</sup>·мин), показатель, наиболее полно отражающий эффективность процесса диспергирования;

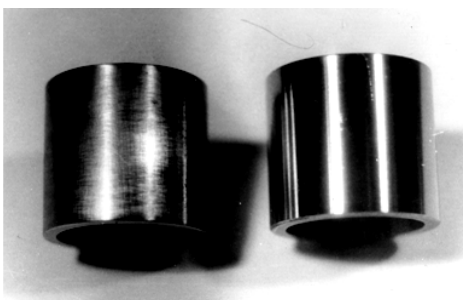
б) достигаемая шероховатость после обработки  $Ra_2$ . Образцы перед обработкой промывались в керосине и просушивались сжатым воздухом для уменьшения количества микропримесей на их поверхности. Результаты исследований представлены в табл. 3.26.

Таблица 3.26

Производительность и качество обработки материалов после использования видов СОТС

Вид СОТС	Обрабатываемый материал			
	ШХ15		Д16	
	$Q$ мг/ см <sup>2</sup> ·мин	$Ra_2$ , мкм	$Q$ 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 рис. 3.62.



*Рис. 3.62.* Фотография деталей до (слева) и после (справа) МАО с использованием СОТС СинХО-2М

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

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

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

Таким образом, применение СОТС СинХО-2М способствует повышению удельного массового съема материала по сравнению с

СинМА-1 и СинМА-2 на 20 %÷40 % при высоком качестве очистки деталей от 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.

**Исследование эффективности магнитно-абразивной обработки с использованием смазочно-охлаждающих технологических средств Пенол-1 и Пенол-2.** В настоящее время в результате работы УкрНИИ НП «МАСМА», г. Киев, создан ряд составов, позволяющих осуществлять высокоэффективную обработку методом МАО различных материалов, среди которых могут быть представлены СОТС Пенол-1 и Пенол-2 ТУ 38.591218–90. Они применяются в виде 0,1 %÷1 % водных или водносолевых растворов для получения пенных промывочных систем [120].

Качественно новый состав концентрата данных СОТС представляет собой смесь на основе некоторых видов ПАВ, ингибиторов коррозии черных и цветных металлов и воды с определенным соотношением между указанными выше компонентами. Технология изготовления составов заключается в компаундировании исходного сырья при температуре не выше 50 °С. Их некоторые физико-химические характеристики представлены в табл. 3.27.

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

## Физико-химические характеристики рабочих поверхностей

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

Исходная шероховатость представленных образцов составляла  $Ra_1=1,2\div1,4$  мкм. Выходными показателями эффективности обработки являлись: а) достигаемая шероховатость поверхности деталей,  $Ra_2$ , мкм; б) величина удельного съема материала,  $Q$ , мг/см<sup>2</sup>·мин.

Результаты сравнительных исследований представлены в табл. 3.27.

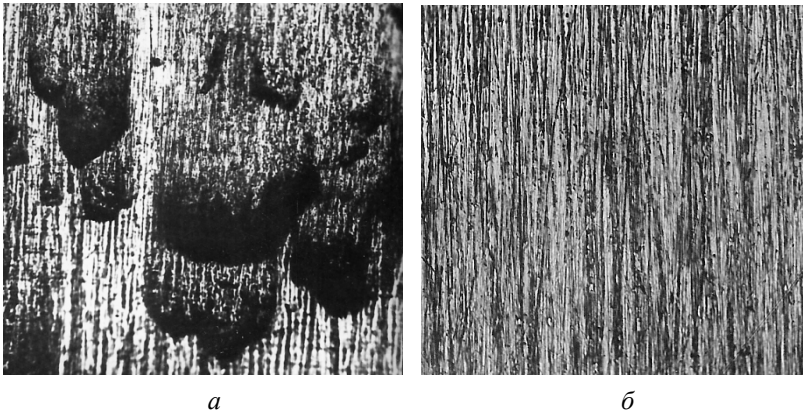


Рис. 3.63. Топография поверхности стали ШХ15 после шлифования (а) и МАО (б) (x100)

На рис. 3.63 показаны: а – топография поверхности стали ШХ15, образованная предшествующей операцией шлифования с

отчетливо наблюдаемыми прижогами, и  $\delta$  – та же поверхность, подвергнутая магнитно-абразивной обработке, использование которой привело к устранению указанного выше дефектного поверхностного слоя.

Таблица 3.28

Сравнительные исследования производительности и качества поверхности при использовании различных технологических сред

Рабочая технологическая среда	Обрабатываемый материал			
	ШХ15		Д16	
	$Q$ , мг/см <sup>2</sup> ·мин	$Ra_2$ , мкм	$Q$ , мг/см <sup>2</sup> ·мин	$Ra_2$ , мкм
ФАП 100Ф5+СинМА-1	6,55	0,05	4,09	0,11
ФАП 100Ф5+СинМА-2	5,69	0,06	4,31	0,13
ФАП 100Ф5+Пенол-1	10,12	0,04	5,22	0,17
ФАП 100Ф5+Пенол-2	7,63	0,05	3,26	0,19

Применение СОТС Пенол-1 и Пенол-2 позволяет повысить производительность магнитно-абразивной обработки стали ШХ15 в 1,5 раза с образованием равных показателей шероховатости поверхности деталей в сравнении с базовыми составами СинМА-1 и СинМА-2. При обработке дюралюминия Д16 рабочие жидкости Пенол-1 и Пенол-2 могут быть полноценной заменой указанных выше базовых составов (табл. 3.28).

Проведено исследование эффективности магнитно-абразивной обработки с использованием смазочно-охлаждающих технологических средств на основе сульфэтоксилатов. Однако необходимость получения более дешевого вида СОТС, изготовленного из продуктов местной сырьевой базы, требует решений данной задачи. Проведенные исследования показали, что эффективным аналогом СОТС на основе производных гликоля могут быть ПАВ типа сульфэтоксилатов. Одним из них является эмпикол, или натрий лаурилсульфат оксиэтилированный, формула которого  $RO(C_2H_4O)_3CO_3$ , где  $R=C_{12}\div C_{14}$ . Он представляет собой вязкую, прозрачную, бесцветную массу,  $\mu$  составляет 442. Однако для создания композиции ПАВ как концентратора СОТС необходимо



знание составных элементов. Установлено, что данное СОТС смешивается с водой, как технического назначения, так и с водопроводной при достаточно низких температурах ( $10\text{ }^{\circ}\text{C} \div 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в отличие от эмульсолов, для которых этот диапазон составляет  $95\text{ }^{\circ}\text{C} \div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Известно, что чем больше интервал  $pH$  дисперсной системы, тем выше допуск наличия в этой системе различного рода загрязнений при условии сохранения ее свойств. Если у СОТС СинМА-1 и СинМА-2 диапазон показателя  $pH$  составляет  $7 \div 8$ , то у эмпикола он равен  $6 \div 8$ , что указывает на стабильность его режущих, моющих, смазывающих свойств в ходе протекания процесса съема материала [123].

Рецептура концентрата СОТС указана в табл. 3.29.

Таблица 3.29

Рецептура концентрата СОТС

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

*Примечание* – Остальное – вода.

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

В качестве образцов использовались кольца подшипников № 984905  $D \times d \times L = 36 \times 29 \times 32$  мм, материал – сталь ШХ15 ГОСТ 801–78,  $58 \div 62$  HRC. Шероховатость поверхности образцов до обработки составляла  $Ra_1 = 2 \div 2,5$  мкм. Учет результатов осуществлялся как средний по 5 образцам. Базовые СОТС – СинМА-1 и СинМА-2 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор. На основании приведенных исследований установлено, что производительность и качество обработки методом MAO указанных выше деталей находятся в требуемых пределах и удовлетворяют условиям производства.

Производительность и качество обработки при использовании различных видов СОТС

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

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

**Исследование эффективности магнитно-абразивной обработки с использованием смазочно-охлаждающих технологических средств на основе лигносульфонатов.** Высокой диспергирующей способностью обладают СОТС, содержащие в своем составе полимерные соединения типа солей и эфиров сульфонатов. Усложненная структура макромолекулы и наличие различных функциональных групп позволяют использовать такое химическое соединение как лигносульфонаты в реакциях синтеза и комплексообразования. Лигносульфонаты технические жидкие марки А, ТУ 2455–028–00279580–2004 представляют собой однородную густую жидкость темно-коричневого цвета.

Лигносульфонаты являются побочным продуктом переработки древесины и представляют смесь натриевых и магниевых солей лигносульфоновых кислот (с примесью редуцирующих и минеральных веществ), получаемых из щелоков бисульфитной варки целлюлозы. Будучи водорастворимыми в любых соотношениях, технические лигносульфонаты обладают универсальными свойствами ПАВ. Молекулярная масса от 200 до 200000 и выше. Лигносульфонаты – анионные ПАВ, которые незначительно понижают поверхностное натяжение воды и образуют стойкие эмульсии и пены. Установлено, что вязкость растворов лигносульфонатов зависит от природы катиона и температуры [242].

Для исключения подобного поведения требуется создание достаточно узкого коридора зоны показателя  $pH$  равного 7,5÷8,5.

Это обеспечивается использованием при подготовке концентрата СОТС операции этерификации и модифицирования за счет присутствия триэтаноламиновых эфиров синтетических жирных кислот (СЖК) фракции  $C_7\div C_9$ . Поскольку лигносульфонаты по причине возможностей изменения молекулярно-массового распределения фракций обладают высокой функциональной зависимостью вязкости, то в роли стабилизатора композиции выступают триэтаноламиновые эфиры СЖК фракции  $C_7\div C_9$ .

Были проведены соответствующие исследования. Образцами являются заготовки  $D \times d \times l = 32 \times 28 \times 30$  мм, материалы образцов – сталь ШХ15 ГОСТ 801–78, 20 ГОСТ 1050–88, дюралюминий Д16 ГОСТ 4785–74. Оборудование – станок магнитно-абразивный модели ЭУ-1. Режимы и параметры процесса МАО приняты следующими: величина магнитной индукции,  $B = 0,9$  Тл; скорость резания,  $V_p = 2,1\div 2,4$  м/с; скорость осцилляции,  $V_o = 0,2$  м/с; амплитуда осцилляции  $A = 1\div 3$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора,  $K_z = 1$ ; величина рабочего зазора,  $\delta = 1$  мм при его концентричности; время обработки  $t = 180$  с. Исходная шероховатость образцов,  $Ra_1 = 1,6\div 2$  мкм. В качестве ферроабразивного порошка применялся ФТ-2.

Физико-механические свойства различных составов СОТС представлены в табл. 3.31.

Таблица 3.31

Физико-механические свойства различных составов СОТС

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

Производительность процесса оценивалась по величине удельного массового съема, мг/см<sup>2</sup>-мин. В качестве базового представлен состав СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор. Результаты испытаний представлены в табл. 3.32.

Таблица 3.32

Зависимость производительности процесса MAO при различных видах СОТС

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

Стабильное сложное образование в виде гексааква-алюминиевых гидратов также вызывает понижение  $pH$  при росте сорбирующего алюминиевого шлама и сохранении водорастворимости [243].

Вместе с тем, во-первых, сохранение в зоне обработки требуемого узкого диапазона  $pH$  носит стохастический характер, во-вторых, наличие раствора  $NaOH$  вызывает появление интенсивных пятен и очагов коррозии на оборудовании, что требует повышенного содержания в СОТС ингибиторов коррозии типа нитрита натрия ГОСТ 199906–74, для производства которого требуется только высший сорт нитрата натрия ГОСТ 828–77, а сам нитрит натрия является токсичным продуктом с экологической точки зрения.

На рис. 3.64 представлены результаты исследований процесса MAO в зависимости от продолжительности обработки при расходе СОТС: 60 мл/мин и 100 мл/мин. Анализ полученных результатов показывает, что увеличение расхода СОТС в среднем в 1,5 раза не оказывает существенного приращения производительности удельного съема материала для стали ШХ15, в то время как для дюралюминия Д16 и особенно для стали 20 – это увеличение обеспечивает прирост вышеуказанного съема материала в среднем на 20 % и 30 % соответственно. В результате проведенных исследований предложен новый состав СОТС для финишной обработки деталей машин из сталей: 20 и ШХ15, и дюралюминия Д16 на основе триэтаноламиновых эфиров СЖК фракции С7÷С9 и лигносульфонатов технических, которые характеризуется доступностью исходных материалов, простотой технологического процесса изготовления и эффективностью использования. Товарная стоимость концентрата нового вида СОТС в 2÷3 раза ниже по

отношению к стоимости СинМА-1. Шероховатость образцов по параметру  $Ra$  после МАО в среднем для состава СОТС 2 и СинМА-1 составляет: ШХ15:  $0,05 \div 0,1$  и  $0,07 \div 0,09$  мкм; сталь 20:  $0,2 \div 0,3$  и  $0,1 \div 0,2$  мкм.

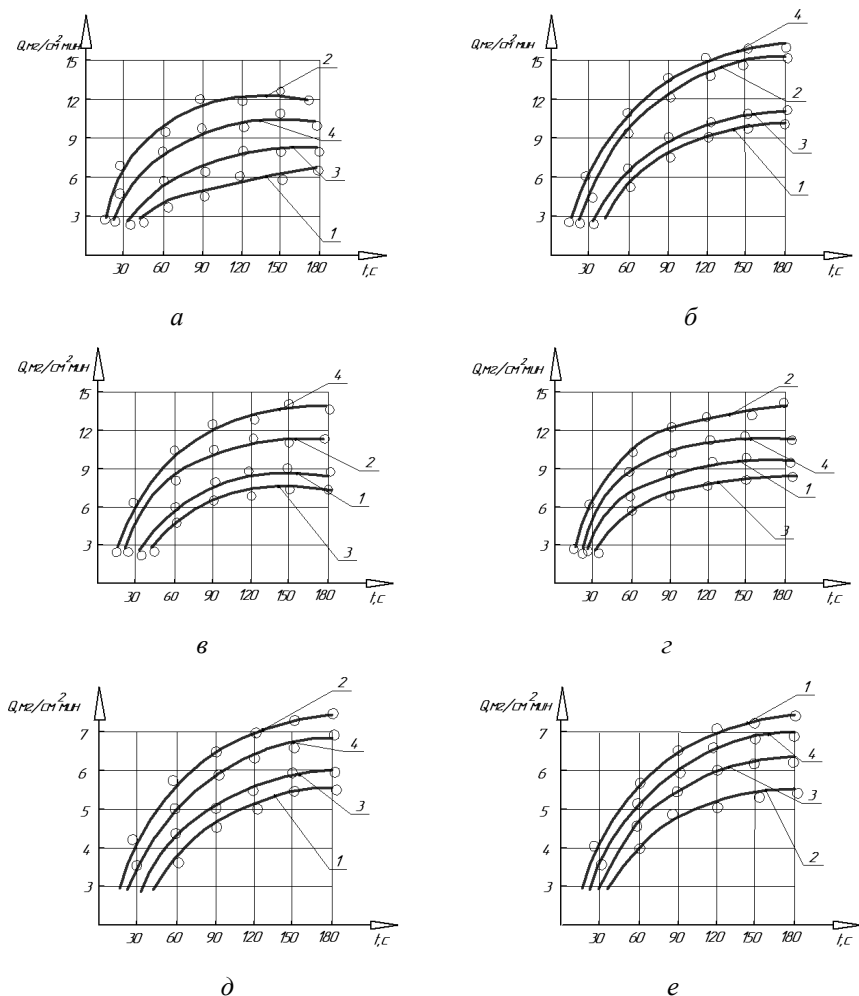


Рис. 3.64. Зависимость производительности процесса МАО от времени обработки при различных показателях расхода СОТС (1 – состав 1; 2 – состав 2; 3 – состав 3; 4 – СинМА – 1); для стали ШХ15 (*а*, *б*); для стали 20 (*в*, *г*); для дюралюминия Д16 (*д*, *е*); *а*, *в*, *д* – 60 мл/мин, *б*, *г*, *е* – 100 мл/мин

## **4. КОМБИНИРОВАННЫЕ И СОВМЕЩЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

### **4.1. Упрочняющая финишная магнитно-абразивная обработка поверхностей деталей машин**

Абразивный инструмент в виде абразивной «щетки» формируется в процессе МАО магнитным полем из разрозненных ферроабразивных зерен. При этом магнитное поле выполняет роль связующего вещества, которое не является дискретным, а распределено непрерывно, диссипацировано в пространстве рабочего зазора, отличается быстротой создания и легкостью управления [30, 53].

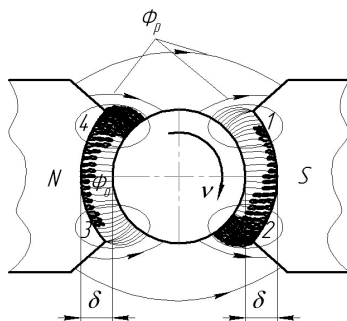
Интенсивность МАО и качество обработанной поверхности зависят от параметров контура режущего инструмента из ферроабразивного порошка, обеспечивающих ориентированное абразивное резание [124]. Существуют различные схемы реализации процесса МАО. Однако общими для них являются следующие условия: роль режущего инструмента выполняет порция ФАП; заготовку размещают с зазором между полюсами магнитов; зазор частично или полностью заполняют ферроабразивным порошком. Порция ФАП прижимается к обрабатываемой поверхности силами магнитного поля. При движении заготовки относительно полюсов индуктора (или наоборот) осуществляется обработка. При этом удаляются микронеровности и формируется поверхность с новым микрорельефом и измененными физико-механическими свойствами поверхностного слоя [52].

#### **4.1.1. Формирование в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке абразивной «щетки» и ее режущая способность**

Рассмотрим формирование абразивной «щетки» при МАО цилиндрической поверхности. При попадании в рабочий зазор ферроабразивные зерна (ФАЗ) стремятся сориентироваться наибольшей осью параллельно силовым линиям магнитного поля и образуют цепочку из абразивных зерен. При вращении заготовки

под действием сил трения с обрабатываемой поверхностью ФАЗ перемещается в направлении выхода из рабочего зазора (рис. 4.1) до тех пор, пока не достигнет границы выхода из рабочего зазора. Там цепочка, закрепившись на кромке магнитного наконечника (положения 2 и 4), начинает совершать колебательные движения под действием ослабленных сил трения с заготовкой и тангенциальных сил, стремящихся вернуть цепочку в рабочий зазор. Если постепенно увеличивать число цепочек зерен, они проделывают тот же путь, уплотняясь у выхода из рабочего зазора и мешая друг другу совершать там колебательные движения [30].

При подаче порции ФАЗ в рабочем зазоре формируется в зонах 1 и 4 режущий инструмент в виде абразивной «щетки». При вращении заготовки в рабочем зазоре между поверхностью заготовки и абразивной «щеткой» возникает сила трения, под действием которой происходит перемещение цепочек ферроабразивного порошка из зон 1 и 3 в зоны 2 и 4 соответственно. Под воздействием силы трения, между ФАЗ и обрабатываемой поверхностью, из-за послабления градиента магнитной индукции на границе раздела порошковой и воздушной среды, наблюдается разрушение крайних цепочек и переброс ФАЗ из зоны 2 в зону 3 и, аналогично, из зоны 4 в зону 1. Таким образом, во время установившегося процесса магнитно-абразивной обработки ферроабразивный порошок заполняет пространство рабочего зазора, начиная из зон 2 и 4 (см. рис. 4.1), образуя при этом режущий инструмент в виде абразивной «щетки».



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

Рис 4.1. Схема формирования режущего инструмента при МАО

При МАО основное абразивное воздействие на поверхность детали происходит на дуге контакта с абразивной «щеткой». Дуга контакта определяется ее предельно возможной жесткостью при конкретных технологических параметрах процесса. Основное воздействие производит упругодеформируемый ферроабразивный слой, форма которого определяется профилем поверхности детали [10].

Критерием режущей способности абразивной «щеткой» является ее возможность удалять неровности на обрабатываемой поверхности. Количественным параметром оценки режущей способности принята [124] производительность МАО по массовому съему материала с заготовки в единицу времени  $\Delta m$  – мг/с

$$\Delta m = \frac{m_n - m_k}{\tau},$$

где  $m_n$  и  $m_k$  – масса заготовки до МАО и после, мг;  
 $\tau$  – время обработки, с.

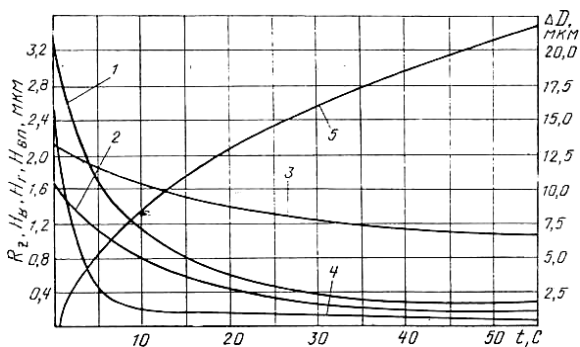
Стойкость порции порошка – это время работы одной порции порошка до ее замены по причине снижения режущих свойств ниже допустимого предела. Стойкость порции порошка зависит не только от его магнитных и механических свойств, но также и от условий обработки. При работе по некоторым схемам МАО не происходит перемешивание порошка в рабочем зазоре и разрушению подвергаются одни и те же ФАЗ, граничащие с заготовкой, которые сравнительно быстро исчерпывают свои режущие свойства [125]. В других схемах МАО порция порошка перемешивается и длительно сохраняет режущие свойства. Высокие скорости перемешивания порошка могут приводить к отрицательному результату. Существенное значение для сохранения режущих свойств имеет объем порции порошка, одновременно участвующей в обработке. В связи с этим, стойкость нужно определять в конкретных условиях обработки.

Причинами низкой стойкости порошка могут быть плохое удерживание порошка в рабочем зазоре, изнашивание абразивных включений у зерен, измельчение ФАЗ, насыщение порошковой массы срезаемым с заготовки материалом, увеличение вязкости порошковой массы из-за ее насыщения вязкими составляющими



СОЖ и т. д. Как правило, перечисленные факторы, снижающие стойкость порошка, действуют одновременно с преобладанием того или иного из них в конкретных условиях обработки. Стойкость порции порошка предлагается оценивать с учетом комплексного воздействия указанных факторов [30, 126]. Количественную оценку момента времени, когда режущие свойства порции порошка достигнут нижнего допустимого предела, в производственных условиях целесообразно осуществлять с помощью величин, характеризующих цель магнитно-абразивной обработки. Например, если целью обработки является получение высокой чистоты поверхностей, то критериями стойкости должны служить максимальный допустимый параметр шероховатости или минимальный съем по истечении заданного времени обработки. Если целью обработки является удаление микронеровностей, то критерий стойкости – производительность MAO [8].

Наиболее полную оценку стойкости абразивной «щетки» при магнитно-абразивной обработке удобно проводить на основе зависимостей, отражающих общую картину изменения геометрических параметров качества в процессе обработки (рис. 4.2) [127].



1 – шероховатость  $R_z$ ; 2 – волнистость  $H_b$ ; 3 – гранность  $H_{Г}$ ;  
4 – продольная волнистость  $H_{ВП}$ ; 5 – уменьшение диаметра  $\Delta D$

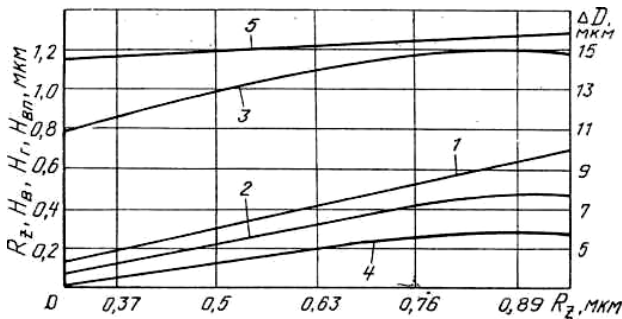
Рис. 4.2. Изменение размера образца и геометрических характеристик поверхности во время обработки

В приведенных зависимостях, характеризующих процесс MAO, все факторы, кроме изучаемого, были стабилизированы на нулевых уровнях. Из рисунка видно, что сходные неровности всех типов,

кроме гранности, наиболее интенсивно удаляются в начальный период обработки, а после достижения съема  $12 \div 15$  мкм дальнейшее снижение высоты рельефа, формируемого МАО, затухает.

Из анализа представленных зависимостей следует, что обобщенным показателем изменения геометрических параметров качества обрабатываемой поверхности, характеризующим стойкость абразивной «щетки» при магнитно-абразивной обработке, является величина удаляемого слоя в единицу времени.

На величину удаляемого слоя в единицу времени (интенсивность резания) оказывает влияние высота микронеровностей, полученных на предшествующей операции шлифования (рис. 4.3) [127].



- 1 – шероховатость  $R_z$ ; 2 – волнистость  $H_B$ ; 3 – гранность  $H_G$ ;  
4 – продольная волнистость  $H_{ВП}$ ; 5 – уменьшение диаметра  $\Delta D$

Рис. 4.3. Влияние величины исходной шероховатости на изменение размера образца и геометрические характеристики поверхности

Интенсивность удаления металла увеличивается с увеличением исходных микронеровностей. Это объясняется пониженной прочностью и плотностью деформированного шлифованием слоя. Относительное снижение геометрических параметров качества при этом объясняется проявлением технологической наследственности [127].

Проведенный анализ стойкости абразивной «щетки» аргументирует необходимость исследования методов повышения производительности магнитно-абразивной обработки.

#### 4.1.2. Методы повышения производительности магнитно-абразивной обработки и качества обработанных поверхностей

Анализ существующих методов интенсификации процесса резания при МАО, позволяет разделить их на следующие основные направления [128]:

– фокусирование магнитного поля, обеспечивающее изменение величины и направления градиента магнитной индукции, путем расположения на рабочих поверхностях полюсных наконечников концентраторов магнитного поля;

– изменение величины и направления магнитного потока в импульсном режиме (абразивно-ударное воздействие ФАЗ на обрабатываемую поверхность) [30, 129];

– увеличение давления абразивной «щетки» на обрабатываемую поверхность путем динамического воздействия на зерна ферроабразивного порошка в процессе обработки (механическое заклинивание ферроабразивного порошка в рабочем зазоре) [130, 131];

– создание композиционных ферроабразивных порошков, обладающих повышенной режущей способностью [94, 132];

– использование смазочно-охлаждающих технологических средств с поверхностно-активными веществами [102].

***Изменение градиента магнитного поля.*** Исходное однородное (при плоском зазоре) или обусловленное только радиальным градиентом (в средней части кольцевого и сферического зазоров) макрополе, при создании пазов на полюсном наконечнике приобретает вид, подобный изображенному на рис. 4.4, а.

Здесь на расстоянии  $\delta = \pm 1$  мм по обе стороны от края паза поле неоднородно, и, судя по его градиенту, на находящиеся в этом пространстве ФАЗ действуют нормальные (направленные в сторону полюсного наконечника) и тангенциальные (направленные в сторону выступа) силы, т. е. концентраторы поля, наносимые на полюсный наконечник, вызывают уменьшение нормальных, направленных в сторону детали сил макрополя с одновременным увеличением тангенциальных сил.

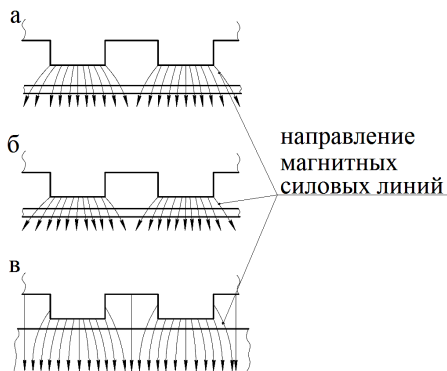


Рис. 4.4. Схема концентраторов магнитного поля, расположенных на полюсных наконечниках электромагнитов

Если в кольцевом зазоре результирующие тангенциальные силы, производные от нормальных, меньше противоположных им собственно тангенциальных сил запирающей зоны, то часть рабочей зоны освобождается от порошка. Создание в этом месте концентратора поля можно рассматривать, как введение дополнительной запирающей зоны (рис. 4.4, а). Не вдаваясь в конкретное конструктивное решение этого вопроса, можно сказать, что оптимальными местом расположения, шириной, формой и количеством пазов следует считать такие, которые позволяют удерживать в контакте с деталью максимальное количество порошка, обладающего наибольшими нормальными силами воздействия на ее поверхность.

Из принципа подобия полей следует, что указанное выше оптимальное решение, найденное для одного зазора  $\delta = const$ , не будет таковым для другого. Тангенциальные силы макрополя при уменьшении зазора будут больше, и здесь пазы могут быть уже и наоборот – узкие пазы при большом зазоре вызовут незначительное увеличение тангенциальных сил (рис. 4.4, б) [128].

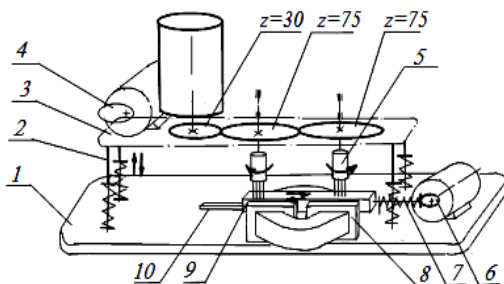
Влияние концентраторов на силы локальных полей близости проявляется в той степени, в которой они способны изменять намагниченность тел, образующих зазор. В отношении полюсных наконечников это влияние очевидно: зерна, контактирующие с ферромагнитными выступами, кроме увеличения нормальных сил близости, испытывают одноименные тангенциальные силы. Последнее вызывает сдвиг зоны вероятного разрыва отдельных цепочек в сторону детали, однако, если концентраторы оказывают слабое влияние на из-

менение ее намагниченности (рис. 4.4, в) и соответствующих сил, то сплошная «щетка» зерен, покрывающая обрабатываемую поверхность, будет двигаться вместе с последней, не реагируя на слабые запирающие зоны у ферромагнитных выступов наконечника [128].

*Недостатком* данного способа является то, что эффективность концентраторов обусловлена в основном их влиянием на силы локальных полей близости, поэтому их рациональное использование появляется при обработке деталей средних и крупных габаритов, когда силы макрополя по сравнению с вышеуказанными малы.

**Использование переменных и импульсных магнитных полей в рабочей зоне.** Некоторые исследователи [30, 128, 129] для магнитно-абразивной обработки предлагают использовать пульсирующие, знакопеременные, а также бегущие и вращающиеся магнитные поля. При этом цели применения переменных полей различны: сообщение движений ФАЗ порошка в виде пульсаций для интенсификации процесса MAO, сообщение всей порошковой массе рабочих движений резания, сообщение рабочих движений заготовке, автоматизация станков для MAO.

В работе [129] автор использует импульсное магнитное поле для сообщения движения ферроабразивным зернам порошка в кювете (рис. 4.5).



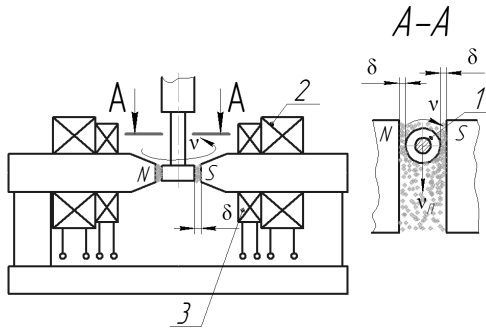
- 1 – основание; 2 – пружинная стойка; 3 – платформа; 4 – неуравновешенная масса;  
 5 – патрон с иглами; 6 – эксцентрик; 7 – тяга с пружиной;  
 8 – полюсные наконечники электромагнитов; 9 – кювета с порошком;  
 10 – направляющая; z – зубчатые колеса

Рис. 4.5. Схема устройства для MAO швейных игл

Устройство для обработки швейных игл работает следующим образом. Патрон с иглами совершает вращательное движение в магнитно-абразивной смеси кюветы, которая движется возвратно-

поступательно по направляющей. Одновременно включаются электромагнитные катушки, полярность полюсов которых попеременно изменяется. Под действием силового магнитного поля и направленного сложного движения ферроабразивных зерен происходит их скольжение по поверхностям игл, срезая все имеющиеся микронеровности, и полирование их поверхностей [129].

В схеме обработки, описанной в работе [30], изображенной на рис. 4.6, периодически снижающееся до нуля поле в рабочих зазорах  $\delta$  должно было по замыслу привести к синхронным вертикальным перемещениям порошковой массы. При снижении напряженности поля порошок под действием сил тяжести должен опускаться, а при нарастании поля – подниматься вверх, втягиваясь в рабочий зазор. Действительно, при низких частотах пульсаций поля (до 2 Гц) такие движения порошковой массы наблюдались визуально.



1 – заготовка; 2 – основные катушки; 3 – дополнительные катушки;

$v$  – скорость главного движения;  $\delta$  – рабочий зазор

Рис. 4.6. Схема устройства для МАО тел вращения

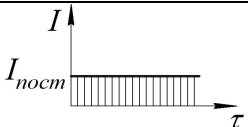
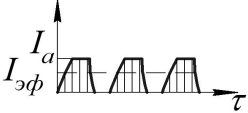
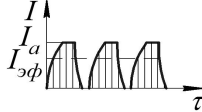
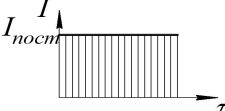
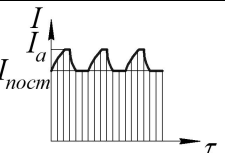
с пульсирующим магнитным полем

Рабочая зона, заполняемая магнитно-абразивным порошком, в описываемом устройстве имела прямоугольную форму, а заготовке 1, закрепленной на вертикальном шпинделе, сообщали два рабочих движения: скорость главного движения  $v$  и возвратно-поступательное движение вдоль зоны со скоростью  $v_{п}$ . С помощью двух пар намагничивающих катушек – основных 2 и дополнительных 3 – в рабочей зоне создавали магнитное поле с переменными амплитудой и эффективным значением  $B$ , частотой и скважностью пульсаций поля. При этом фиксировали соответствующие характеристики питающего тока:  $I_a$ ,  $I_{эф}$ , и  $t_{ск} = kT$ , где  $T = 1/f$  – период пульсаций [30].

В табл. 4.1 приведены отдельные результаты этих исследований [30]. При равных значениях постоянного тока и эффективного значения пульсирующего тока 2-й режим питания намагничивающих катушек обеспечивает значительное повышение производительности процесса МАО. Еще больший эффект достигается, если пульсации тока осуществляются не от нулевого уровня, а от некоторого положительного значения постоянного тока. Увеличение частоты пульсаций  $f$  от 1 до 10 Гц привело к увеличению удельного съема металла  $q_1$ . Более высокие значения  $f$  сопровождаются снижением производительности. Скважность пульсаций  $t_{ск}$  тоже влияет на удельный съем металла, обеспечивая его максимум при  $t_{ск} = 0,5$  Тл [30].

Таблица 4.1

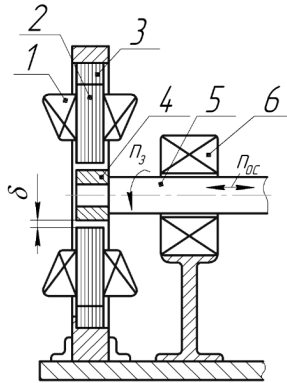
Удельный съем металла при обработке с постоянным и импульсным магнитным полем в рабочей зоне

Характеристика тока		Характеристика изменения тока	Удельный съем металла $q_1$ , мг/см <sup>2</sup> ·мин
в основных катушках	в дополнительных катушках		
Постоянный ( $I = 0,1$ А)	—		0,36
Импульсный ( $I_{эф} = 0,1$ А; $f = 10$ Гц; $t_{ск} = 0,5$ Тл)	—		1,87
Импульсный ( $I_{эф} = 0,2$ А; $f = 10$ Гц; $t_{ск} = 0,5$ Тл)	—		2,62
Постоянный ( $I = 0,4$ А)	Постоянный ( $I = 0,4$ А)		3,90
Постоянный ( $I = 0,5$ А)	Импульсный ( $I_{эф} = 0,1$ А; $f = 10$ Гц; $t_{ск} = 0,5$ Тл)		8,53

*Недостатком* данного способа является то, что для достижения наибольшей производительности требуется значительное усложнение оборудования для МАО, что ведет за собой большие энергозатраты. Также следует отметить, что возвратно-поступательное движение обрабатываемой детали в рабочем зазоре приводит к ускоренному износу абразивных зерен.

**МАО с динамическим воздействием на зерна ферроабразивного порошка.** По мере затухания процесса резания при МАО, в результате износа абразивных зерен, засаливания абразивной «щетки» возникает необходимость встряхнуть ФАЗ порошка в рабочем зазоре для обновления режущей способности. В работах [131, 133] авторы предлагают различные способы динамического воздействия на ФАЗ: «бегущее» магнитное поле, механическое встряхивание, уплотнение ФАП в рабочем зазоре и др.

Исследование процесса МАО с «бегущим» магнитным полем, выполнено в работе [133]. В созданном устройстве обработка наружных поверхностей вращения осуществляется с помощью индуктора, у которого шесть намагничивающих катушек  $I$  ( $W_i = 580$  витков, провод диаметром 1,3 мм) размещены на радиальных сердечниках  $2$ , замкнутых круговым магнитопроводом  $3$  (рис. 4.7) [133].



$1$  – катушки;  $2$  – сердечники;  $3$  – магнитопровод;  $4$  – заготовка;  $5$  – шпиндель;  
 $6$  – дополнительная катушка

Рис. 4.7. Схема устройства для МАО тел вращения с применением вращающегося магнитного поля



Сердечники и магнитопровод выполнены из пакетов листовой электротехнической стали. Заготовка 4 закрепляется на шпинделе 5. Сердечники 2 имеют возможность радиального перемещения для регулирования рабочих зазоров  $\delta$  и возможности обработки заготовок с разными диаметрами. Рабочие зазоры охватывают 3/4 окружности обрабатываемой поверхности и при включенном магнитном поле заполнены ферромагнитным абразивным порошком. На шпинделе размещена дополнительная катушка 6 позволяющая подмагничивать заготовку переменным или постоянным полем. Заготовку при обработке вращают с частотой  $n_3$ , предусмотрена также возможность ее осцилляции вдоль оси  $n_{oc}$  [133].

При отсутствии движения заготовки (или индуктора) обработка невозможна. Вращающееся магнитное поле в рассматриваемой схеме не может перемещать порошковую массу вдоль рабочих зазоров. При малых значениях  $n_3$  производительность магнитно-абразивной обработки оказывается низкой из-за малых значений скорости главного движения  $v$  и малых сил  $F_m$ . По мере увеличения  $n_3$  производительность растет, благодаря увеличению скорости  $v$  и сил  $F_m$  (кривая 1 на рис. 4.8) [133]. Снижение производительности при  $n_3 > 3000 \text{ мин}^{-1}$  объясняется выбрасыванием порошка центробежными силами из рабочих зазоров на боковые поверхности полюсов индуктора.

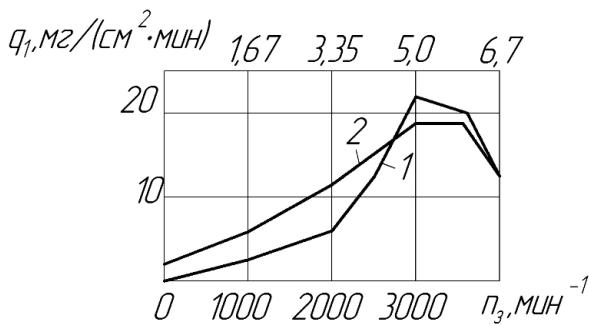


Рис. 4.8. Зависимость съема металла  $q_1$  от скорости главного движения при обработке стали марки ШХ15 ( $62 \pm 64 \text{ HRC}_3$ ) с вращающимся магнитным полем

Сообщение заготовке дополнительной осцилляции вдоль оси с частотой 24 Гц позволяет обрабатывать при  $n_3 = 0$  и вдвое повышает прирост производительности при  $n_3 < 2000 \text{ мин}^{-1}$  (кривая 2). При более высокой частоте вращения заготовки положительная роль осцилляций уменьшается и даже становится отрицательной при  $n_3 > 3000 \text{ мин}^{-1}$ , когда это движение помогает ферроабразивным зернам переходить на торцовые нерабочие плоскости полюсов индуктора [49].

При одинаковой высоте рабочих зазоров  $\delta = 1 \text{ мм}$  и при меньшем эффективном значении магнитной индукции в рабочих зазорах ( $B = 0,7 \text{ Тл}$ ) применение вращающихся полей позволяет обеспечивать в 6 раз более интенсивный съем металла по сравнению со схемой магнитно-абразивной обработки, использующей для этих же целей электромагнитные индукторы постоянного тока. Столь высокая производительность схемы объясняется большей (в 1,5 раза) площадью рабочих зазоров, более высокой (в 6 раз) скоростью резания и увеличенными магнитными силами, действующими на ФАЗ. Влияние химических и поверхностно-активных СОЖ здесь менее заметно, чем в случае применения постоянного магнитного поля, поскольку высокая частота вращения заготовки и короткие промежутки времени прохождения обрабатываемой поверхности от одного рабочего зазора к другому не позволяют в полной мере проявиться химическому и пластифицирующему действию СОЖ [133].

Интересные результаты наблюдения за поведением ФАЗ в рабочих зазорах в присутствии вращающегося (пульсирующего) магнитного поля, выполненные Б. Г. Македонски с помощью скоростной киносъемки. При неподвижной заготовке ФАЗ в рабочем зазоре хаотично вибрируют. Амплитуда вибраций больше у крупных ФАЗ. Ее величина снижается по мере увеличения степени заполнения зазора порошком и по мере приближения к поверхности заготовки и в присутствии СОЖ. У поверхности полюса амплитуды вибраций достигают величин, равных  $(0,4 \pm 1,0) b$ , где  $b$  – размер зерна [30].

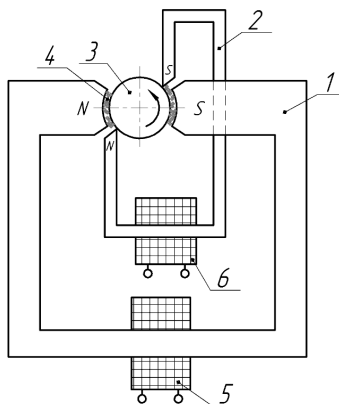
В процессе вибраций отдельные ферроабразивные зерна и цепочки ФАЗ медленно перемещаются вдоль дуги рабочего зазора в направлении вращения поля и у выхода из зазора уплотняются. В результате даже без вращения заготовки до 1/4 зазора у входа ока-

зывается свободной от порошка. Из-за несимметричной формы ФАЗ одновременно с вибрациями происходят их повороты. Вибрации и повороты ФАЗ под действием пульсирующего поля способствуют перемешиванию порошка и выполняют здесь такую же функцию «самозатачивания» порошковой массы, как осцилляция заготовки в схемах МАО с постоянным магнитным полем [30].

При включении вращения заготовки даже с небольшой частотой  $n_3$  у выходов из рабочих зазоров появляется интенсивное вихревое движение зерен порошка, значительно увеличивающее действительные скорости резания в контакте ФАЗ с обрабатываемой поверхностью. Наблюдается переход части ФАЗ из одного рабочего зазора в другой в направлении вращения заготовки. Ферроабразивные зерна, переходящие в соседний зазор, комплектуются из слоев порошка, близких к полюсу. С увеличением  $n_3$  описываемые явления интенсифицируются, ФАЗ выбрасываются центробежными силами. При  $n_3 > 400 \text{ мин}^{-1}$  в результате такого выбрасывания зазоры быстро освобождаются от порошка [30].

*Недостатком* данного способа является то, что постоянно движущееся магнитное поле создает непрерывное перемешивание ферроабразивного порошка, в результате чего происходит быстрый износ ферроабразивных зерен за счет трения друг о друга. Также к недостаткам можно отнести то, что обработка должна производиться на малых скоростях, т. к. при  $n_3 > 400 \text{ мин}^{-1}$  наблюдается интенсивный выброс ферроабразивного порошка из рабочей зоны.

*Управление тангенциальной силой резания.* Обработка деталей, перемещаемых в магнитном поле, создаваемом магнитной системой с полюсами, образующими рабочие зоны, заполненные магнитно-абразивным порошком, согласно которому у выхода из каждой рабочей зоны на порошок воздействуют магнитным полем, создаваемым дополнительной магнитной системой, с целью интенсификации процесса обработки и повышения качества обрабатываемой поверхности, градиент магнитного поля дополнительной магнитной системы направляют тангенциально по отношению к поверхности детали при одинаковой полярности полюсов основной и дополнительной магнитных систем в каждой рабочей зоне (рис. 4.9) [134].



- 1 – основная магнитная система; 2 – дополнительная магнитная система;  
 3 – обрабатываемая деталь; 4 – ферроабразивный порошок;  
 5 – электромагнитная катушка основной системы;  
 6 – электромагнитная катушка дополнительной системы

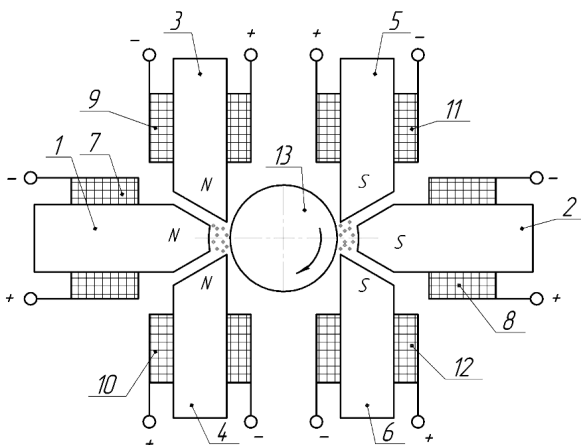
Рис. 4.9. Схема устройства для MAO

Устройство работает следующим образом: магнитно-абразивный порошок прижимается к обрабатываемой поверхности нормальной силой резания, обусловленной магнитным полем основной магнитной системы. Магнитное поле дополнительной магнитной системы усиливает тангенциальную составляющую градиента, создавая тангенциальные силы резания на выходах из рабочих зазоров, которые передаются магнитно-абразивной массой всему магнитно-абразивному порошку, расположенному в зазоре.

Таким образом, дополнительная магнитная система создает своеобразные магнитные пробки, удерживающие порошок в рабочих зазорах. Благодаря близкому расположению одноименных полюсов их магнитные поля отталкиваются, что ведет к искривлению линий магнитного поля основной магнитной системы, независимо от того, из магнитного или немагнитного материала изготовлена обрабатываемая деталь. Такое искривление поля увеличивает его тангенциальный градиент, что также повышает тангенциальную силу резания. Варьируя величину электрического тока в катушках 5 и 6, можно плавно изменять нормальную и тангенциальную силы резания и их отношение, уменьшая или увеличивая коэффициент эластичности абразивного инструмента.

*Недостатком* данного способа является то, что уплотнение ферроабразивного порошка в рабочей зоне затрудняет процесс регенерации абразивной «щетки», а также приводит к увеличению температуры, что негативно сказывается на физико-механических свойствах поверхности обрабатываемой заготовки.

**Увеличение давления ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность.** Повышение производительности происходит за счет увеличения давления ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность путем изменения конфигурации магнитного поля в рабочей зоне [135]. На рис. 4.10 схематично представлена магнитная система устройства для МАО.



1, 2 – основные полюсные наконечники; 3–6 – дополнительные полюсные наконечники; 7, 8 – основные электромагнитные катушки; 9–12 – дополнительные электромагнитные катушки; 13 – заготовка  
 Рис. 4.10. Схема магнитной системы для МАО

Устройство содержит основную магнитную систему с полюсными наконечниками 1 и 2 и дополнительные магнитные системы с полюсными наконечниками 3 и 4, 5 и 6. Основная и дополнительные магнитные системы содержат электромагнитные катушки 7–12.

Каждая рабочая зона образована одним полюсным наконечником основной магнитной системы, например, полюсным наконечником 1, и двумя одинаковыми полюсными наконечниками 3 и 4 дополнительных магнитных систем, установленных симметрично

относительно плоскости симметрии полюсного наконечника *1* и тангенциально по отношению к обрабатываемой поверхности заготовки *13*.

Способ реализуют следующим образом. На электромагнитные катушки подают питание так, чтобы полюсные наконечники основной и дополнительных магнитных систем, образующих одну рабочую зону, имели одинаковую полярность. Заготовку *13* устанавливают между полюсными наконечниками *1* и *2* противоположной полярности и задают ей вращение. Ферроабразивные зерна, подаваемые в рабочие зазоры, удерживаются силами магнитного поля. При этом созданное в рабочей зоне магнитное поле обеспечивает равномерное распределение ФАЗ вдоль зазора и значительное увеличение его давления на обрабатываемую поверхность, что приводит к увеличению производительности обработки.

*Недостатком* данного способа является то, что уплотнение ферроабразивного порошка в рабочей зоне затрудняет процесс саморегенерации абразивной «щетки», а также приводит к увеличению температуры, что негативно сказывается на физико-механических свойствах поверхности обрабатываемой детали. Также применение данной схемы возможно лишь на крупногабаритных деталях.

***Применение композиционных ферроабразивных порошков, обладающих повышенной режущей способностью.*** Эффективность процесса МАО в значительной степени зависит от магнитных и абразивных свойств, микротвердости и прочности соединения ферромагнитной и абразивной составляющих материалов порошка. Существенное значение имеют также гранулометрический состав, форма ФАЗ, химическая активность в окружающей среде, технологичность в изготовлении и стоимость порошка [94]. В работах [94, 132] авторы исследуют влияние состава ФАП, способа его получения, формы ФАЗ на производительность МАО и качества получаемых поверхностей деталей.

Однако при разработке новых композиционных ФАП требует увеличение твердости зерен порошка, что приводит к использованию все более дорогих материалов и применению дорогостоящего оборудования для производства порошков.

***Применение СОЖ с поверхностно-активными веществами.*** В работе [94] установлено, что наличие поверхностно-активных

веществ в составе СОЖ приводит к адсорбционному снижению прочности металлов. Это способствует образованию дефектов и пластических сдвигов при меньших напряжениях. Эффективность влияния СОЖ на производительность МАО зависит от поверхностно-активных веществ, входящих в состав. Составы СОЖ на основе эмульсий показали наилучший результат.

Анализ достигнутого уровня развития процесса магнитно-абразивной обработки позволяет сделать следующий вывод:

1. МАО, являясь эффективным методом финишной обработки, не получила широкого применения в машиностроении. Ограничивающим фактором является недостаточная производительность МАО, обусловленная затуханием во времени интенсивности съема металла с обрабатываемой поверхности. Так, с увеличением длительности магнитно-абразивной обработки более 15÷30 секунд интенсивность съема металла снижается в 2 и более раз, шероховатость поверхности интенсивно уменьшается в течение первых 30÷40 секунд обработки, а микротвердость после 40 секунд обработки практически не увеличивается.

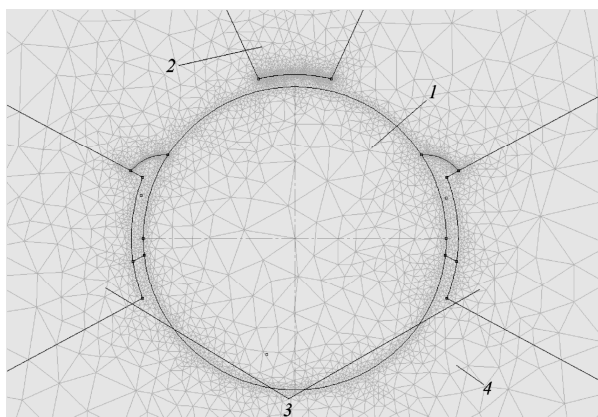
2. Применение импульсных магнитных полей и больших рабочих зазоров в виде «кольцевых ванн» используется при МАО сложнопрофильных поверхностей (швейные иглы, лопадки газотурбинного двигателя, осевой инструмент и т. д.) когда другими способами обработка затруднена, либо невозможна. Для МАО цилиндрических поверхностей такой подход экономически не оправдан из-за снижения интенсивности съема металла (величина магнитной индукции  $B \approx 0,3$  Тл вместо 1,0 Тл) и повышенного расхода дорогостоящего ФАП, обусловленного большим объемом рабочего зазора и ускоренным износом абразивных зерен, поскольку процесс МАО фактически преобразуется в процесс ударно-абразивной обработки.

3. Ранее проведенные исследования не содержат информации о целенаправленном изменении угла резания и управлении ориентацией абразивных зерен при магнитно-абразивной обработке.

Исходя из этого, целью исследований явилась разработка метода управляемой ориентации ФАЗ и регенерации абразивной «щетки» импульсным магнитным полем, обеспечивающей повышение производительности процесса резания.

### 4.1.3. Методы исследования топографии магнитного поля

При исследовании топографии магнитного поля использовалась компьютерная программа *FEMM* 4.2, в которой реализовано автоматическое построение оптимальной сетки для расчета магнитных полей при помощи конечных элементов. Пространство вокруг магнитной системы разбивается с помощью прямых и кривых линий на отдельные части, имеющие достаточно малые, но конечные размеры. Эти части называются конечными элементами. При решении задачи конечные элементы чаще всего имеют форму треугольников (рис. 4.11).



1 – обрабатываемая деталь; 2 – полюсный наконечник дополнительной МС;  
3 – полюсные наконечники основной МС; 4 – конечные элементы  
Рис. 4.11. Расчетная область, разбитая на конечные элементы

Конечные элементы не перекрывают друг друга. Особые точки конечных элементов (в этих точках рассчитываются значения искомых параметров) называются узлами. Узлы совпадают с вершинами конечных элементов первого порядка. Каждый такой элемент имеет три вершины-узла. Скалярный магнитный потенциал каждого конечного элемента представляется в виде полинома с постоянными в пределах этого элемента коэффициентами. Для треугольного ( $i$ )-го элемента потенциал в декартовой



системе координат представляется полиномом первого порядка (линейным) [136]

$$\varphi_{m(i)} = a_{(i)} + b_{(i)} + c_{(i)}y,$$

где  $a_{(i)}$ ,  $b_{(i)}$ ,  $c_{(i)}$  – постоянные коэффициенты.

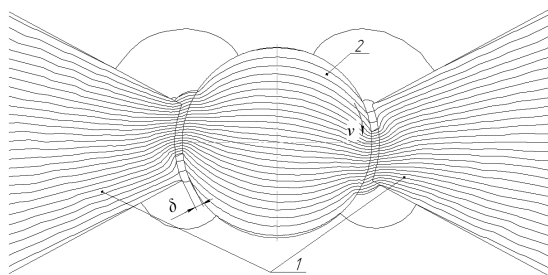
Определив коэффициенты для всех конечных элементов, можно рассчитать скалярный магнитный потенциал в любой точке поля.

Исходные данные, дополненные граничными условиями, и энергетические зависимости приводят к системе алгебраических уравнений, которая позволяет рассчитать искомые коэффициенты полиномов всех конечных элементов. После определения  $\varphi_m$  в любом узле поля можно определить напряженность магнитного поля, магнитную индукцию и другие параметры.

В ходе проводимых исследований в качестве образцов были выбраны полые цилиндрические детали (поршневой палец). Построение картины магнитного поля в рабочем зазоре осуществлялось в программе *FEMM 4.2*.

Среди конечно-элементных программ расчета магнитных систем *FEMM 4.2* является общедоступной.

Топография магнитного поля в рабочем зазоре при MAO по классической схеме обработки, полученная с помощью программы *FEMM 4.2*, представлена на рис. 4.12.



*1* – полюсные наконечники; *2* – заготовка;  $\delta$  – рабочий зазор;  
 $v$  – скорость главного движения

Рис. 4.12. Топография магнитного поля в рабочем зазоре

Программа *Finite Element Method Magnetics* (Магнитные расчеты методом конечных элементов) – это пакет программ для решения низкочастотных электромагнитных задач для плоских двумерных и осесимметричных объектов методом конечных элементов. В настоящее время программа может использоваться для решения как линейных, так нелинейных задач постоянного и переменного магнитного поля, а также для решения линейных задач электростатического поля и задач стационарного теплового потока [136].

При создании модели магнитной системы с помощью программы *FEMM 4.2* необходимо построить схему магнитной системы и ограничивающий контур вокруг нее, а также указать: материал магнитопровода (сталь 10), заготовки (сталь 12ХН3А), ФАП (*FeTiC* 50 %), намоточной проволоки (медь) и окружающей среды (воздух); намоточные данные катушек (диаметр проволоки 2,65 мм, катушки основной магнитной системы – 260 витков, катушка дополнительной магнитной системы – 450 витков); величину тока в катушке (0,1÷30 А).

## **4.2. Механизм ориентации ферроабразивных зерен в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке**

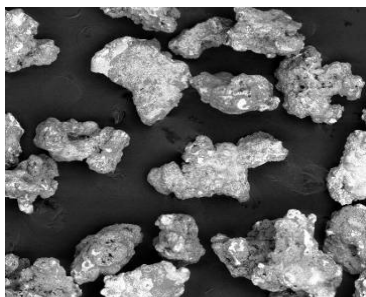
На процесс резания при МАО оказывает влияние форма ФАЗ [94]. Геометрические параметры ферроабразивных зерен определяют ее режущую способность, которая зависит от количества режущих кромок, от углов при вершинах и радиусов скругления вершин.

### **4.2.1. Обобщенная модель формы ферроабразивного зерна**

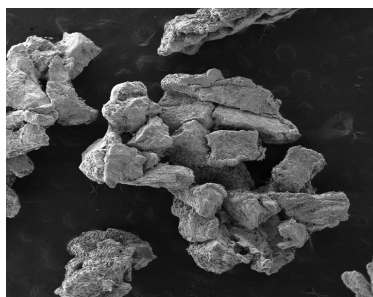
Форма ферроабразивных зерен зависит от технологии изготовления порошка, материалов магнитной и абразивной составляющих и имеет, как правило, неправильную геометрическую форму. В зависимости от способа изготовления порошков можно выделить две типовые формы ФАЗ:

– осколочная (рис. 4.13), получаемая после размола гранулированных материалов на основе аморфного железа

(порошки типа ПОЛИМАМ-Т) [11];



*a*

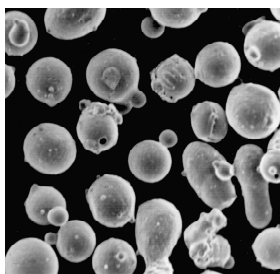


*б*

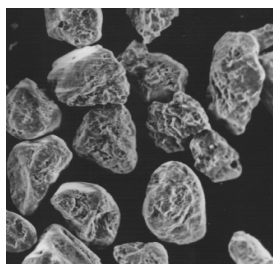
*a* –  $FeTiC$ ; *б* – порошок на основе алмазов

Рис. 4.13. Фотографии ФАП осколочной формы ( $\times 500$ )

– округлая (рис. 4.14), получаемая из расплава без последующего размола (порошки типа Р6М5, ПОЛИМАМ-М) [94].



*a*



*б*

*a* – порошок Р6М5; *б* – порошок ЦАРАМАМ

Рис. 4.14. Фотографии ФАП округлой формы ( $\times 400$ )

ФАП одного и того же состава могут иметь различную геометрическую форму, что обусловлено способом их изготовления, видом дополнительной обработки, размером фракции и другими факторами [94].

От формы ФАЗ зависит способность ФАП к уплотнению в рабочем зазоре при MAO. Форма ферроабразивных зерен также влияет на их возможность поворачиваться относительно обрабатываемой поверхности под действием магнитного поля в процессе MAO.

По данным [90], предпочтительно, чтобы форма ферроабразивных зерен приближалась к форме правильных геометрических фигур. Это обуславливается тем, что частички округлой формы обеспечивают повышенную полирующую способность за счет выхаживания обрабатываемой поверхности деталей, в отличие от форм осколочных зерен и зерен-конгломератов.

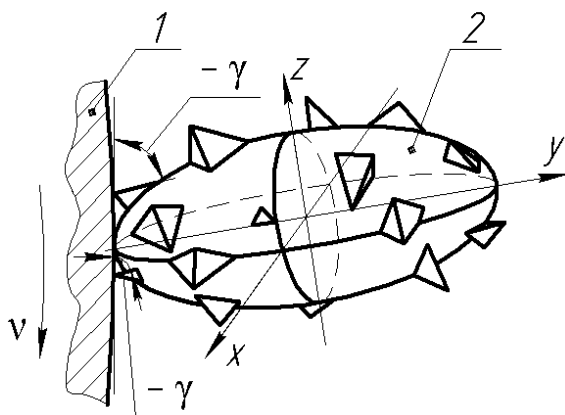
Каждое ферроабразивное зерно имеет, как правило, несколько вершин, образованных гранями (сколами) с определенными радиусами их скругления. Количество вершин в абразивном зерне, углы при вершинах и радиусы скругления зависят от марки ФАП, его зернистости и способа изготовления. По данным [95], величина углов при вершинах находится в диапазоне от  $30^\circ$  до  $130^\circ$ .

Эффективность МАО зависит от формы и размеров ФАЗ, их гранулометрического состава, химической активности к обрабатываемому материалу, микротвердости абразивной составляющей. Поскольку при попадании зерна в магнитное поле происходит ориентация ее наибольшей оси в направлении силовых линий поля, то предпочтительно использовать форму зерен вытянутой или осколочной, что облегчает процесс их переориентации в процессе обработки.

Из анализа геометрии ФАЗ следует, что они представляют собой гранулы неправильной угловатой формы с множеством выступов и впадин. Морфология ФАЗ определяет варианты их упорядоченной упаковки, агрегатирования в колонии при формировании абразивной щетки.

При моделировании контура режущего инструмента при МАО поверхностей различного профиля удобно представлять форму ФАЗ в виде правильной геометрической фигуры, приближающейся к овальной, эллиптической, веретенообразной, пластинчатой.

Поэтому в качестве обобщенной модели ФАЗ указанных форм целесообразно принять форму трехосного эллипсоида, на поверхности которого расположены микрочастицы абразивной составляющей. Форма такой модели аналогична геоиду, на поверхности которого расположены частицы абразивной составляющей (рис. 4.15) [128].



1 – обрабатываемая поверхность; 2 – ферроабразивное зерно;  
 $v$  – скорость главного движения;  $\gamma$  – передний угол  
 Рис. 4.15. Модель формы ферроабразивного зерна его расположения  
 в процессе MAO

При классической схеме MAO передний угол  $\gamma$  режущих элементов ферроабразивного зерна имеет отрицательные значения.

При выборе обобщенной модели формы ферроабразивного зерна были введены следующие допущения:

1) ферроабразивное зерно представляет собой трехосный эллипсоид, уравнение которого имеет вид

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (4.1)$$

где  $a$  – малая полуось эллипсоида, мм;

$b$  – большая полуось эллипсоида, мм;

$c$  – средняя полуось эллипсоида, мм.

2) зависимость величины полуосей трехосного эллипсоида от размера зерен ФАП описывается выражением

$$c = (a + b) / 2. \quad (4.2)$$

#### 4.2.2. Теоретическое исследование ориентации единичного ферроабразивного зерна в процессе резания

Рассмотрим общую схему резания единичным ферроабразивным зерном, расположение которого относительно обрабатываемой поверхности показано на рис. 4.16 [128].

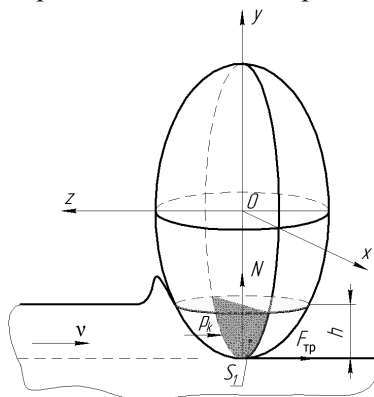


Рис. 4.16. Схема резания единичным ферроабразивным зерном при МАО

На ФАЗ действуют следующие силы:

- сила реакции обрабатываемой поверхности  $N$ , равная величине нормальной составляющей силы магнитного поля  $F_m(\Delta B_1)$ ;
- сила трения  $F_{тр}$  между ФАЗ и обрабатываемой поверхностью, которая задается соотношением:

$$F_{тр} = \mu N = \mu F_m(\Delta B_1), \quad (4.3)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения на поверхности контакта;

- суммарное нормальное давление по контактной поверхности  $p_k$ , действующее на площадь, находящуюся в нормальном сечении ФАЗ и заключенную между пятном контакта ферроабразивного зерна с обрабатываемой поверхностью и плоскостью, определяющей величину снимаемого слоя  $h$  единичным зерном ФАП в данный момент времени.

В отношении параметров, действующих на единичное ФАЗ, сделаны следующие допущения:

1. Распределение напряжений по поверхности ФАЗ в зоне резания является равномерным.

2. Напряжения по поверхности зоны резания пропорциональны твердости обрабатываемого материала.

3. Коэффициент трения  $\mu$  не изменяется по всей поверхности контакта между ФАЗ и заготовкой.

Таким образом, проекционные составляющие силы резания, действующие на ФАЗ при МАО в направлении осей  $z$  и  $y$ , могут быть выражены зависимостями [128]:

$$P_z = p_k S_1 + F_{\text{тр}}, \quad (4.4)$$

где  $S_1$  – величина площади сечения, на которое действует суммарное напряжение по контактной поверхности,  $\text{мм}^2$ .

$$P_y = N. \quad (4.5)$$

Величина площади сечения может быть рассчитана по формуле [128]

$$S_1 = \int_{-b}^{-b+h} dy \int_{-\sqrt{1-\frac{y^2}{b^2}}}^{\sqrt{1-\frac{y^2}{b^2}}} dx, \quad (4.6)$$

где  $b$  и  $a$  – большая и малая полуоси трехосного эллипсоида,  $\text{мм}$ .

Учитывая симметричность эллипса относительно обеих осей, можно записать:

$$\begin{aligned} S_1 &= \int_{-b}^{-b+h} dy \int_{-a\sqrt{1-\frac{y^2}{b^2}}}^{a\sqrt{1-\frac{y^2}{b^2}}} dx = 2 \int_{b-h}^b dy \int_0^{a\sqrt{1-\frac{y^2}{b^2}}} dx = 2 \int_{b-h}^b dy (x) \Big|_0^{a\sqrt{1-\frac{y^2}{b^2}}} = \\ &= 2 \int_{b-h}^b a \sqrt{1-\frac{y^2}{b^2}} dy = 2 \int_{b-h}^b \frac{a}{b} \sqrt{b^2 - y^2} dy = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left| \begin{array}{l} y = b \sin t \\ dy = b \cos t dt \\ y = b \Rightarrow t = \frac{\pi}{2} \\ y = b - h \Rightarrow t = \arcsin \frac{b-h}{b} \end{array} \right| = \\
& = 2 \int_{\arcsin \frac{b-h}{b}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{a}{b} \sqrt{b^2 - b^2 \sin^2 t} b \cos t dt = \\
& = 2 \int_{\arcsin \frac{b-h}{b}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{a}{b} b^2 \cos^2 t dt = 2ab \int_{\arcsin \frac{b-h}{b}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 t dt = \\
& = 2ab \int_{\arcsin \frac{b-h}{b}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1 + \cos 2t}{2} dt = ab \left( t + \frac{1}{2} \sin 2t \right) \Big|_{\arcsin \frac{b-h}{b}}^{\frac{\pi}{2}} = \\
& = ab \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{b-h}{b} - \frac{1}{2} \sin \left( 2 \arcsin \frac{b-h}{b} \right) \right) = \\
& = ab \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{b-h}{b} - \frac{b-h}{b} \sqrt{1 - \left( \frac{b-h}{b} \right)^2} \right) = \\
& = ab \left( \arccos \frac{b-h}{b} - \frac{b-h}{b} \sqrt{1 - \left( \frac{b-h}{b} \right)^2} \right). \tag{4.7}
\end{aligned}$$

В (4.7) толщину срезаемого слоя  $h$  можно определить из закона Кика [137], если феррообразивное зерно уподобить индентору

$$h = \sqrt{\frac{P_3}{c_3}}, \tag{4.8}$$

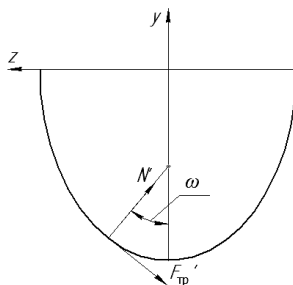
где  $P_3$  – усилие внедрения, оно будет равно силе магнитного поля  $F_M, H$ ;



$c_3$  – коэффициент, зависящий от угла внедрения ФАЗ и упругопластических свойств материала, в который вдавливаются зерно.

Угол внедрения ФАЗ зависит также от угла наклона оси ферроабразивного зерна относительно обрабатываемой поверхности. Из (4.8) следует, что на толщину срезаемого слоя оказывает влияние угол наклона оси ферроабразивного зерна. Рассмотрим это влияние.

В средней части рабочего зазора магнитные силовые линии направлены перпендикулярно обрабатываемой поверхности (см. рис. 4.16). Соответственно этому направлена и наибольшая ось ферроабразивного зерна. При изменении направления магнитных силовых линий на угол  $\omega$  ферроабразивные зерна также поворачиваются своей наибольшей осью на такой же угол (рис. 4.17).



$N'$  – нормальная сила реакции, действующая на ферроабразивное зерно со стороны обрабатываемого материала;  $F'_{тр}$  – сила трения

Рис. 4.17. Схема сил, действующих на боковую поверхность ФАЗ

Рассмотрим действие сил резания на ферроабразивное зерно при изменении его угла наклона  $\omega$ .

Проекция сил на ось  $Z$

$$N'_z = N' \sin \omega, \quad (4.9)$$

$$F'_{тр z} = F'_{тр} \cos \omega. \quad (4.10)$$

Суммируя векторы  $N'$  и  $F'_{тр}$  на полупериметре, с учетом изменения угла  $\omega$ , получаем сумму их интегральных абсолютных значений [138]:

$$\left| \int_{90^\circ}^{0^\circ} N' \sin \omega d\omega \right| + \left| \int_{90^\circ}^{0^\circ} F'_{\text{тр}} \cos \omega d\omega \right| = N' + F'_{\text{тр}}. \quad (4.11)$$

Нормальные силы можно определить через нормальное давление  $p_{N_z}$ , а силу трения – через касательное напряжение  $p_{F'_{\text{тр}}}$ . В свою очередь, нормальное давление пропорционально твердости обрабатываемого материала, как показано в выражении [138]:

$$p_{N'_z} \approx \beta \cdot H_V, \quad (4.12)$$

где  $H_V$  – твердость обрабатываемой поверхности по шкале Виккерса, МПа;

$\beta$  – константа, выражающая отношение величин  $p_{N'_z}$  и  $H_V$ .

Например, по литературному источнику [102] величина  $\beta = 1 \div 1,23$ . Принимаем меньшее значение предела, тогда  $\beta = 1$ , т. е. нормальное давление на поверхности зерна равно твердости обрабатываемого материала.

Касательное напряжение выражается через нормальное напряжение и коэффициент трения по формуле

$$p_{F'_{\text{тр}}} = \mu p_{N'_z}. \quad (4.13)$$

С учетом выражений (4.4), (4.5), (4.11), (4.12) составляющая силы резания  $P_z$ , действующая на единичное зерно, может быть описана зависимостью:

$$P_z = H_V \cdot (1 + \mu) S_1 + \mu F_M (\Delta B_1), \quad (4.14)$$

$$P_y = F_M (\Delta B_1) \quad (4.15)$$

С другой стороны, суммируя проекции сил  $N'$   $F'_{\text{тр}}$  на ось  $z$  и учитывая (4.3), получим силу резания

$$P'_z = N'_z + F'_{\text{тр}} = N' (\sin \omega + \mu \cos \omega), \quad (4.16)$$

Величина  $P'_y$  при MAO всегда равна величине силы магнитного поля. При постоянстве силы магнитного поля, согласно

(4.12), ферроабразивное зерно будет внедряться в обрабатываемую поверхность на глубину, определяемую упругопластическими свойствами обрабатываемого материала.

Таким образом, теоретически обоснована целесообразность ориентированного резания и управления углом наклона ферроабразивных зерен для интенсификации срезания припуска при МАО.

Рассмотрим влияние угла наклона ферроабразивных зерен на процесс резания с позиций основных положений теории резания. Увеличение угла наклона зерен  $\omega$  приводит к увеличению угла сдвига  $\beta_1$  и уменьшению угла резания (рис. 4.18).

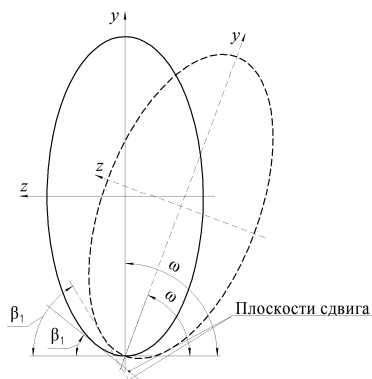


Рис. 4.18. Направления плоскости сдвига стружки при изменении угла наклона ферроабразивного зерна

Уменьшение угла резания облегчает процесс снятия стружки и уменьшает силу резания  $P_z$ . Однако при этом необходимо учитывать радиус скругления режущей кромки.

Форма ферроабразивного зерна в виде трехосного эллипсоида имеет различную кривизну по контуру. Наименьшее значение радиус скругления имеет в точке пересечения эллипса с наибольшей полуосью  $b$ . Возможные зоны контакта зерна ФАП с обрабатываемой поверхностью находятся в пределах половины периметра зоны контакта, что соответствует изменению граничных значений угла  $\omega$  от  $90^\circ$  до  $0^\circ$ . Поэтому необходимо ввести техническое ограничение на угол наклона зерна  $\omega$ . Поставленную задачу можно решить теоретически или графически, используя метод построения эллипса.

При первом варианте необходимо определить координаты  $(y_0z_0)$  точки  $M_0$  пересечения большой и малой окружностей, аппроксимирующих кривую эллипса, путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} (z + z_1)^2 + y^2 = R_1^2; \\ z^2 + (y - y_2)^2 = R_2^2, \end{cases} \quad (4.17)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы большой и малой окружностей, мкм.

Затем определить уравнение касательной к малой окружности в точке  $M_0$  (4.18) и угол ее наклона к оси  $oy$

$$\begin{aligned} y y_0 + z z_0 &= R_1. \\ y y_0 + z z_0 &= R_1. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Анализ приведенных зависимостей (4.17 и 4.18) показывает, что граничное значение величины угла поворота зависит от соотношения полуосей эллипсоида  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Принятая форма трехосного эллипсоида является обобщенной. При равенстве полуосей ферроабразивное зерно будет иметь сферическую форму, а при равенстве 2-х осей – эллипсоида вращения. Поэтому усредненную форму ферроабразивного зерна целесообразно принять в виде трехосного эллипсоида с соотношением полуосей  $b = 1 : c = (b+a)/2 : a = 0,25$ . При таком допущении с использованием графического метода определено граничное значение величины угла наклона ферроабразивного зерна, равное  $58^\circ$ .

Таким образом, составляющие силы зависят от наклона оси ферроабразивного зерна относительно обрабатываемой поверхности, а также от коэффициента трения в контакте ФАЗ с обрабатываемой поверхностью, от твердости обрабатываемого материала и величины снимаемого слоя единичным зерном.

На основании полученных зависимостей можно сделать следующие выводы:

– управлять величиной сил резания путем изменения коэффициента трения в контакте ферроабразивного зерна с обрабатываемой поверхностью технологически затруднено либо невозможно;

- твердость обрабатываемого материала является неизменной величиной (задана в конструкторской документации);
- величина снимаемого припуска определяется составляющей силы резания  $P_y$ , зависящей от величины магнитной индукции;
- изменение сил резания доступно и технологически просто реализуемо путем управления величиной магнитной индукции и углом ориентации ферроабразивного зерна относительно обрабатываемой поверхности, который оказывает влияние на величину переднего угла режущей кромки.

Наиболее простым методом изменения направления магнитных силовых линий является использование источника дополнительного магнитного поля.

#### **4.2.3. Экспериментальные исследования влияния угла наклона оси ферроабразивных зерен на производительность и шероховатость поверхности**

Размещение источника дополнительного магнитного поля изменяет направление магнитных силовых линий в зоне входа в рабочий зазор, в результате чего ФАЗ поворачиваются на угол наклона  $\omega$ , что создает условия осуществления резания микро-частицами абразивной составляющей, расположенными на боковой поверхности ФАП.

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

Условия проведения эксперимента: магнитная индукция основной магнитной системы,  $B_0 = 0,9$  Тл; магнитная индукция дополнительной магнитной системы,  $B_d = 0,1$  Тл; рабочий зазор основной магнитной системы,  $\delta_0 = 1$  мм; рабочий зазор дополнительной магнитной системы,  $\delta_d = 1,5$  мм; зернистость ферроабразивного порошка FeTiC,  $\Delta = 100 \div 160$  мкм; скорость главного движения  $v = 0,9$  м/с. Образцами служили поршневые пальцы  $\varnothing 25$  мм, материал сталь 12ХНЗА, твердость поверхностного слоя  $58 \div 62$  HRC. Выходные показатели: достигаемая шероховатость поверхности деталей  $Ra$ , мкм; производительность  $Q$ , мг/(см<sup>2</sup>·мин). Измерение шероховатости поверхности производилось на профилографе-профилометре *Mitutoyo SJ-201P*. Масса деталей взвешивалась на весах *Massa-K BK-600* с точностью до 0,01 г.

Были обработаны две партии образцов. Исходная шероховатость образцов  $Ra$   $1,14 \div 0,97$  мкм. Первую партию обрабатывали без дополнительной магнитной системы, а вторую – с воздействием дополнительного магнитного поля. Все образцы обрабатывались новой порцией порошка. Результаты экспериментов приведены в табл. 4.2.

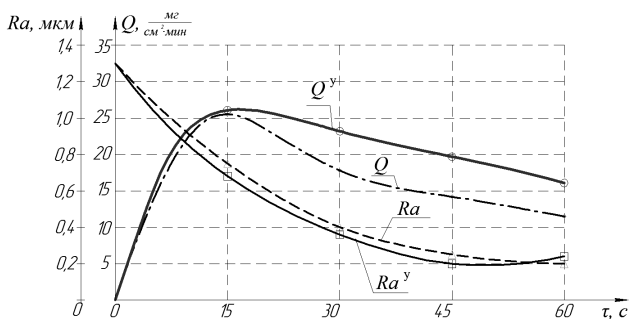
Таблица 4.2

Показатели производительности и шероховатости поверхности при управлении углом наклона ферроабразивных зерен и без управления

Время обработки т, сек.	$Ra$ после MAO, мкм		Производительность MAO $Q$ , мг/(см <sup>2</sup> ·мин)	
	без дополнительной МС	с дополнительной МС	без дополнительной МС	с дополнительной МС
15	0,75	0,68	25,5	26,2
30	0,4	0,36	17,8	23,3
45	0,25	0,20	14,2	19,7
60	0,2	0,24	11,5	16,1

Схема MAO с дополнительной магнитной системой сохраняет начальную производительность порции ФАП на протяжении длительного времени за счет ориентированного резания (рис. 4.19).

Анализ экспериментальных данных (см. рис. 4.19) показывает, что после 15 секунд обработки производительность MAO по классической схеме резко падает, а после 30 секунд производительность снижается на 30 %÷40 % по сравнению с производительностью в первые 15 секунд обработки. При MAO с управляемым углом наклона ФАЗ в рабочем зазоре, падение производительности более плавное и составляет 10 %÷14 % от производительности в первые 15 секунд обработки. Наименьшая шероховатость, при управлении углом наклона ферроабразивных зерен, достигается после 45 секунд обработки, а по классической схеме обработки – после 60 секунд (см. рис. 4.19).



$Q$  и  $Ra$  – производительность МАО и шероховатость поверхности соответственно при классической схеме;  $Q^y$  и  $Ra^y$  – производительность МАО и шероховатость поверхности соответственно при управлении углом ориентации ФАЗ  
 Рис. 4.19. График зависимости шероховатости  $Ra$  и производительности  $Q$  от времени обработки  $\tau$

Результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретические положения влияния управления углом ориентации ферроабразивных зерен относительно обрабатываемой поверхности на повышение производительности МАО.

Для определения формы и размеров полюсных наконечников необходимо знать распределение магнитных силовых линий в рабочем зазоре при различных формах рабочего зазора.

С увеличением количества подаваемого ферроабразивного порошка растет число зерен, контактирующих с обрабатываемой поверхностью и тормозящих вращение образца. Вместе с тем, по мере наполнения зазора ферромагнитным порошком, его магнитная проницаемость увеличивается, вследствие чего происходит перераспределение магнитного потока по сечению зазора и градиент магнитной индукции уменьшается [81].

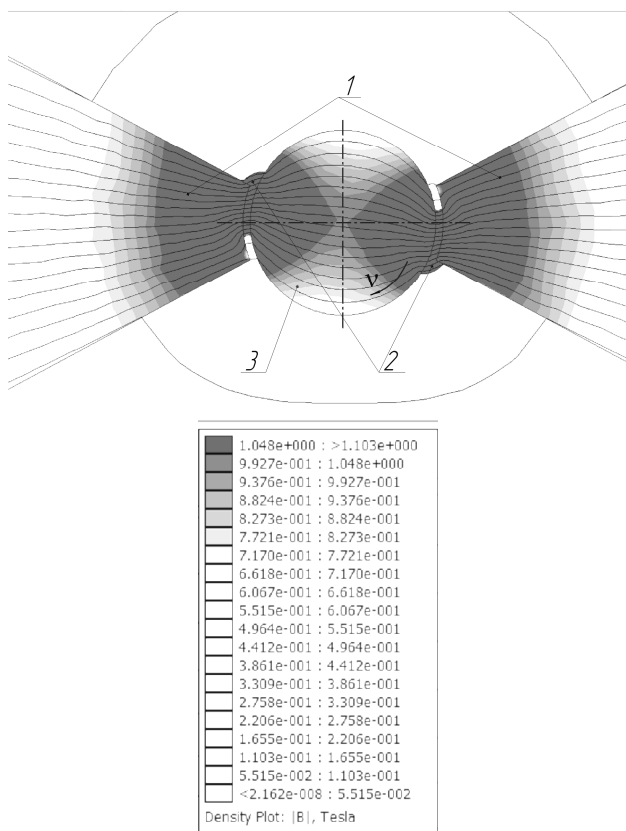
Рассмотрим влияние фокусирования магнитного поля в рабочем зазоре на величину градиента магнитной индукции. Для этого произведем моделирование работы магнитной системы при помощи программы *FEMM 4.2*.

#### 4.2.4. Методы изменения направления магнитных силовых линий для реализации управляемого ориентированного резания

Ферроабразивные зерна, контактирующие абразивной составляющей с обрабатываемой поверхностью, разворачиваются

средней осью перпендикулярно к обрабатываемой поверхности детали. Этот разворот вызван крутящим моментом, возникающим от силы трения при контакте абразивной составляющей ФАЗ с обрабатываемой поверхностью, которые смещены с оси ориентации зерен.

В результате все большего уплотнения ферроабразивных зерен в зонах 2 и 4 (см. рис. 4.1) наблюдается выпучивание абразивной «щеточки» в зоне выхода из рабочего зазора и изменение топографии магнитного поля (рис. 4.20).

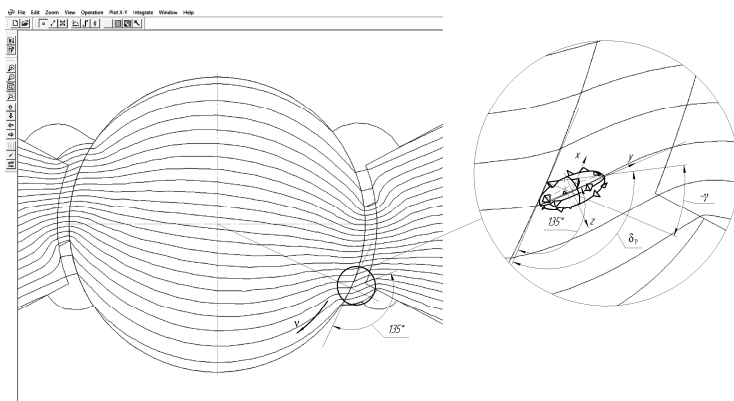


1 – полюсные наконечники; 2 – абразивная «щетка»; 3 – заготовка;  
v – скорость главного движения

Рис. 4.20. Компьютерная модель положения абразивной «щеточки» при классической схеме реализации MAO



При этом ФАЗ занимают положение, в котором передние углы являются отрицательными (рис. 4.21).

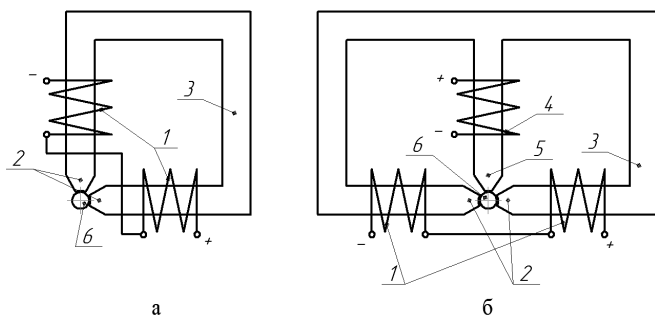


$v$  – скорость главного движения;  $\delta_p$  – угол резания;  $\gamma$  – передний угол  
 Рис. 4.21. Компьютерная модель наклона силовых линий магнитного поля  
 и положения ферроабразивного зерна

В результате MAO происходит при углах резания, превышающих  $90^\circ$ .

Известно, что при увеличении угла резания процесс снятия стружки ухудшается, а по мере затупления режущих кромок ФАЗ переходит в процесс выхаживания обрабатываемой поверхности, что снижает производительность обработки. Таким образом, для повышения производительности MAO необходимо изменить угол наклона оси ферроабразивных зерен к обрабатываемой поверхности.

Для уменьшения угла резания ферроабразивными зернами путем изменения направления магнитных силовых линий предложены технические решения по асимметричному расположению полюсных наконечников основного магнитного поля относительно обрабатываемой поверхности (рис. 4.22, а) либо в промежутке между полюсными наконечниками основного магнитного поля устанавливать источник дополнительного магнитного поля (рис. 4.22, б) [128].



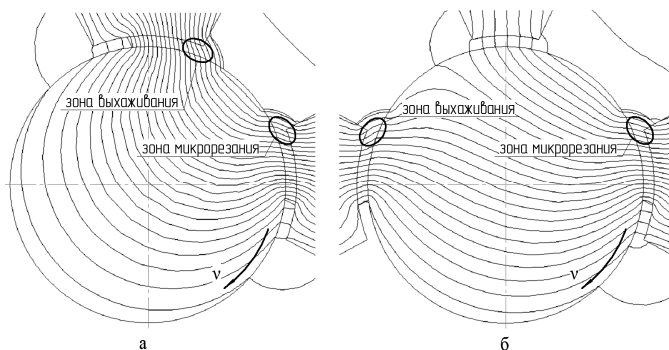
1, 4 – катушки электромагнитов; 2, 5 – полюсные наконечники;  
3 – магнитопрод; 6 – заготовка

Рис. 4.22. Схемы MAO с ассиметрично расположенными полюсными наконечниками (а) и с дополнительной магнитной системой (б)

Наличие нескольких электромагнитных катушек приводит к суперпозиции в рабочем зазоре основного и дополнительного магнитных полей и его влиянию на изменение угла резания.

Применение ассиметрично расположенных полюсных наконечников позволяет при MAO получить две зоны, в одной из которых будет происходить процесс микрорезания, а в другой – выхаживания (рис. 4.22, а) [128]. Эта схема целесообразна при снятии небольшого припуска, когда время обработки не выходит за пределы 15 с.

Схема MAO с источником дополнительного магнитного поля аналогично изменяет топографию магнитного поля в рабочем зазоре (рис. 4.23, б), при которой происходит концентрация магнитных силовых линий в зоне входа в рабочий зазор, создавая условия изменения в ней градиента магнитной индукции [128]. Расположение дополнительного полюсного наконечника, под углом  $90^\circ$  к основному магнитопроду, позволяет изменять величину и градиент магнитной индукции в рабочем зазоре, т. е. изменяет направление силовых линий магнитного поля основной магнитной системы. Исследование топографии магнитного поля в рабочем зазоре с использованием компьютерного моделирования позволило установить, что дополнительная магнитная система позволяет изменять угол наклона силовых линий магнитного поля в зоне входа в рабочий зазор в пределах от  $43^\circ$  до  $50^\circ$  (рис. 4.24).



$v$  – скорость главного движения

Рис. 4.23. Топография магнитного поля в рабочем зазоре с асимметричным расположением полюсных наконечников (а) и с дополнительной магнитной системой (б)

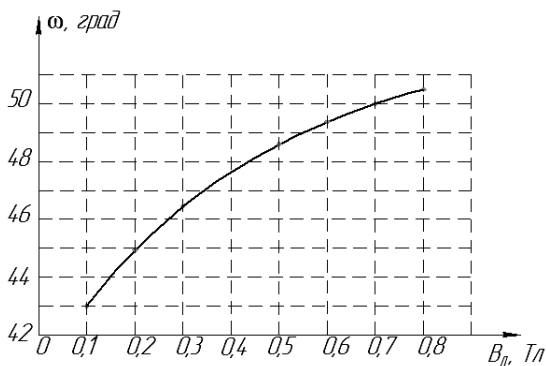


Рис. 4.24. Зависимость угла наклона силовых линий магнитного поля в зоне входа в рабочий зазор от величины магнитной индукции дополнительной магнитной системы

Изменение величины угла наклона  $\omega$  силовых линий в рабочем зазоре описывается уравнением

$$\omega = -9,8214B_d^2 + 18,804B_d + 41,615, \quad (4.19)$$

где  $B_d$  – величина индукции магнитного поля в рабочем зазоре дополнительной магнитной системы, Тл.

Угол наклона силовых линий магнитного поля изменяется по периметру рабочего зазора: от входа в него к центру зазора – от  $43^\circ$  до  $85^\circ$  (рис. 4.25, 4.26).

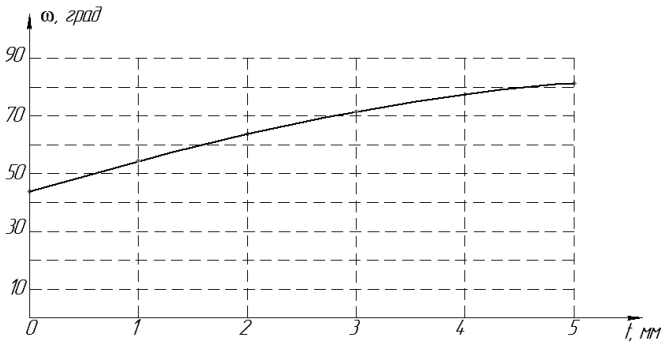
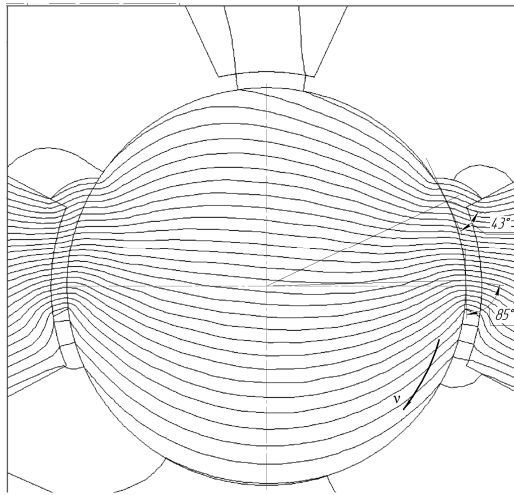


Рис. 4.25. Зависимость угла наклона силовых линий по мере удаления от точки входа в рабочий зазор



$v$  – скорость вращения заготовки

Рис. 4.26. Компьютерная модель изменения угла наклона силовых линий магнитного поля по периметру рабочего зазора

Согласно принципу суперпозиции магнитных полей, суммарное изменение угла наклона силовых линий по сечению

рабочего зазора по мере приближения к центру полюсного наконечника описывается уравнением

$$\omega = -0,95t^2 + 12,387t + 42,857, \quad (4.20)$$

где  $t$  – расстояние от края полюсного наконечника, мм.

Магнитное поле в заданной точке рабочего зазора, создаваемое несколькими источниками, равно сумме векторов каждого из них.

Компьютерным моделированием установлено, что величина индукции дополнительного магнитного поля ограничена предельной величиной индукции основного магнитного поля, поскольку при ее преодолении у одноименных полюсов происходит отсечение ветви магнитопровода и суммарный магнитный поток замыкается по ветви с разноименными полюсами (рис. 4.27). Таким образом, граничными условиями для величины магнитной индукции, генерируемой дополнительной магнитной системой, является величина магнитной индукции основной магнитной системы и может быть записана следующим образом:

$$B_d < B_o, \quad (4.21)$$

где  $B_d$  и  $B_o$  – величина магнитной индукции дополнительной и основной магнитных систем, Тл.

Граничным значением величины наклона ферромагнитного зерна является угол, равный  $58^\circ$  (раздел 4.2.2).

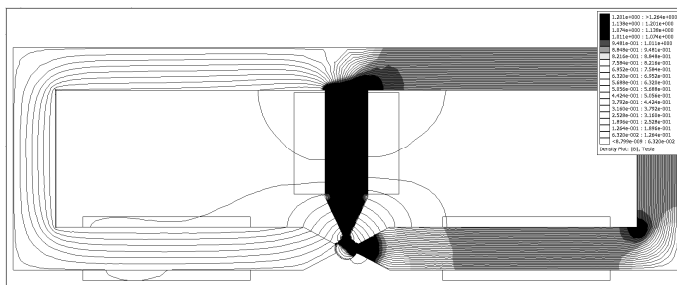
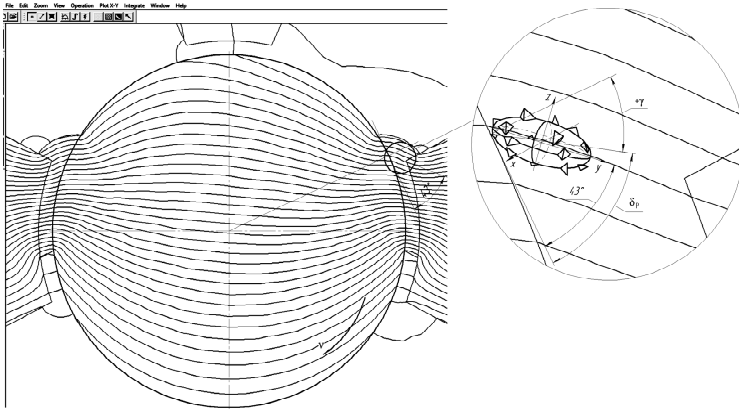


Рис. 4.27. Компьютерная модель работы двух магнитных систем при превышении величины индукции дополнительного магнитного поля над основным

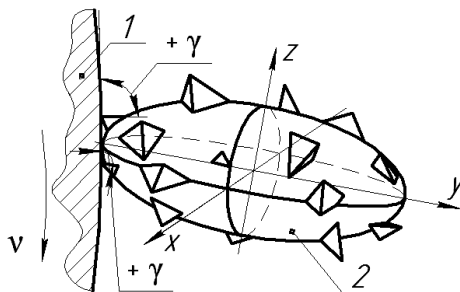
Применение дополнительной магнитной системы для управления наклоном силовых магнитных линий основной магнитной системы позволяет переместить абразивную «щетку» к входу в рабочий зазор и сориентировать ФАЗ таким образом, чтобы получить у них положительные углы наклона передних поверхностей ( $+\gamma$ ) (рис. 4.28).



$v$  – скорость главного движения;  $\delta_p$  – угол резания;  $\gamma$  – передний угол  
 Рис. 4.28. Компьютерная модель наклона силовых линий магнитного поля и положения ферроабразивного зерна

Такое расположение ФАЗ формирует зону резания у входа в рабочий зазор у одного полюсного наконечника и зону выхаживания у другого полюсного наконечника основной магнитной системы. Плавная регулировка угла наклона силовых линий путем изменения величины магнитной индукции, генерируемой дополнительной магнитной системой, позволяет управлять интенсивностью резания и шероховатостью поверхности.

Таким образом, изменение топографии магнитного поля в рабочем зазоре позволяет получить при MAO цилиндрической поверхности положительные значения переднего угла режущих кромок ФАЗ (рис. 4.29) [128].



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

Рис. 4.29. Схема микрорезания единичным ферроабразивным зерном

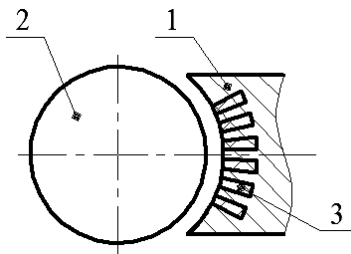
Таким образом, исследованием топографии магнитного поля установлено, что с образованием абразивной «щетки» происходит перераспределение магнитного потока по сечению зазора. Разработанная математическая модель распределения магнитного потока по объему ферроабразивных зерен позволяет констатировать, что ФАЗ являются концентраторами магнитной индукции, наибольшая величина которой находится на участках, граничащих с обрабатываемой поверхностью. В результате этого зона резания располагается у выхода из рабочего зазора, а тангенциальная составляющая силы резания увлекает ФАЗ в направлении вектора скорости главного движения, увеличивая передний угол в сторону отрицательных значений, что усиливает выхаживающее воздействие ферроабразивных зерен на обрабатываемую поверхность и снижает интенсивность процесса резания. На основании моделирования топографии магнитного поля предложено переместить абразивную «щетку» в зону входа в рабочий зазор путем создания в этой зоне дополнительного магнитного поля, что позволяет резко изменить передний угол в сторону положительных значений и повысить интенсивность съема металла на 30 %÷40 %.

### 4.3. Метод регенерации абразивной «щетки» в процессе магнитно-абразивной обработки

Процесс магнитно-абразивной обработки представляет собой ориентированное и избирательное абразивное микрорезание и вы-

хаживание. Ферроабразивные зерна контактируют преимущественно с вершинами гребешков на обрабатываемой поверхности, являющихся концентраторами магнитных силовых линий. Каждое ферроабразивное зерно, находясь в магнитном поле, располагается наибольшей осью по направлению к обрабатываемой поверхности. По мере износа режущей кромки ферроабразивного зерна путем выкрашивания абразивной составляющей, изменяется геометрическая форма зерна, смещается центр ее тяжести и увеличивается коэффициент трения из-за того, что в контакт с обрабатываемой поверхностью вступает «ферромагнитная матрица» зерна.

Это, в свою очередь, приводит к увеличению силы трения, что вызывает смещение свободно ориентированных ФАЗ и переориентацию их наибольшей оси в направлении магнитных силовых линий. При этом происходит явление регенерации абразивной щетки путем самоорганизации массы ферроабразивных зерен в процессе их периодического перемещения в пределах рабочей зоны, что обеспечивает расположение ФАЗ к обрабатываемой поверхности наиболее острой режущей кромкой. Применение полюсных наконечников с немагнитными вставками (рис. 4.30) позволяет увеличить количество зон рабочего зазора с повышенным градиентом магнитной индукции, что способствует протеканию процесса самоорганизации ФАЗ в рабочем зазоре.



*1* – полюсный наконечник; *2* – заготовка; *3* – вставка из немагнитного материала  
 Рис. 4.30. Схема конструктивного исполнения полюсного наконечника с концентраторами магнитного поля

В результате явлений самоорганизации массы ферроабразивных зерен обработка поверхности заготовки производится постоянно обновляющимися острыми кромками, т. е. на протяжении все-



го цикла обработки имеет место процесс ориентированного абразивного резания, что, в свою очередь, увеличивает производительность обработки.

Применение полюсных наконечников с немагнитными вставками делает процесс регенерации режущей способности абразивной «щетки» неуправляемым, что ограничивает получение высокого качества обработанных поверхностей.

**Таким образом, процесс регенерации режущей способности абразивной щетки не должен носить постоянный характер, а быть периодическим и управляемым.**

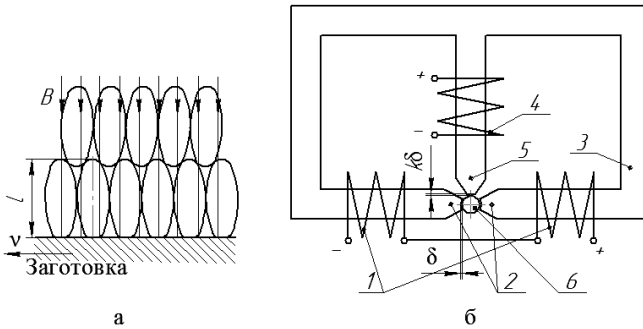
#### **4.3.1. Разработка схемы магнитной системы для регенерации абразивной «щетки»**

При магнитно-абразивной обработке неоднородность магнитного поля в рабочем зазоре оказывает положительный эффект на процесс самоорганизации абразивной «щетки». В результате явлений самоорганизации ФАЗ обработка поверхностей деталей производится постоянно обновляющимися острыми кромками, т. е. на протяжении всего цикла имеет место процесс ориентированного абразивного резания, что, в свою очередь, увеличивает производительность обработки и качество обработанного поверхностного слоя.

Анализ известных технологических схем и конструкций устройств для реализации MAO показал, что наибольшая производительность процесса достигается за счет сообщения осциллирующих движений ферроабразивным зернам в рабочем зазоре. Однако по мере засаливания продуктами микрорезания и в результате уплотнения цепочек ФАП (рис. 4.31, а) процесс самоорганизации абразивной «щетки» становится невозможным.

Возникает необходимость регенерации абразивной «щетки» с целью интенсификации MAO [128].

Поэтому стоит задача принудительной переориентации с регенерацией контура режущего инструмента. Одним из вариантов решения поставленной задачи является использование направленных магнитных потоков от двух систем, расположенных под углом  $90^\circ$  друг к другу и работающих в импульсном режиме (рис. 4.31, б) [128].



$v$  – скорость главного движения;  
 $l$  – длина наибольшей оси ферромагнитного зерна  
 Рис. 4.31. Картина уплотнения абразивной «щетки» (а)  
 и схема установки МАО с дополнительной магнитной системой (б)

Дополнительная магнитная система включается кратковременно и периодически, что позволяет восстанавливать режущую способность абразивной «щетки» за счет периодического перемешивания ФАП в рабочем зазоре.

Установка для МАО содержит основную магнитную систему, состоящую из катушек индуктивности 1, магнитопровода 3, полюсных наконечников 2 и источника питания (на рис. 4.31, б не показан). Дополнительная магнитная система состоит из катушки индуктивности 4, полюсного наконечника 5 и источника питания (на рис. 4.31, б не показан). Магнитопровод у основной и дополнительной систем общий. Обрабатываемая заготовка б находится между полюсами основной магнитной системы. Полюсный наконечник дополнительной магнитной системы установлен под углом  $90^\circ$  к полюсным наконечникам основной магнитной системы.

Рабочие зазоры  $\delta$  между полюсами основной магнитной системы и обрабатываемой заготовкой заполняются порцией ферромагнитного порошка.

Установка работает следующим образом: порция ферромагнитного порошка прижимается к обрабатываемой поверхности нормальной силой резания, обусловленной магнитным полем ( $B_0 = 0,9$  Тл) основной магнитной системы, производится обработка поверхности детали на протяжении времени  $\tau$ . Затем производится отключение подачи напряжения на

катушки основной магнитной системы и включение на катушку дополнительной на время  $\tau_d$ , при этом наблюдается перемещение порции порошка из рабочего зазора основной магнитной системы в зазор  $k_3\delta$  ( $k_3$  – коэффициент  $k_3 = 1,5\div 2,0$ ) дополнительной магнитной системы [128].

При работе дополнительной катушки в рабочем зазоре  $k\delta$  наводится электромагнитная индукция, равная  $B_d = 1,9$  Тл, и обрабатываемая заготовка подвергается кратковременному воздействию мощного магнитного поля. Затем дополнительная система отключается и включается основная. Во время переключения систем происходит перемещение порции ФАП из одного рабочего зазора в другой и его перемешивание. В результате чего осуществляется процесс переориентирования ферроабразивных зерен большей осью вдоль силовых линий магнитного поля, что является затруднительным во время постоянной работы магнитов из-за высокой плотности ферро-абразивных зерен в рабочем зазоре.

Регенерация режущей способности абразивной «щетки» поочередным включением основной и дополнительной магнитных систем позволяет интенсифицировать процесс МАО за счет замены и оборота ферроабразивных зерен, контактирующих с обрабатываемой заготовкой. Такое поочередное переключение основной и дополнительной магнитных систем позволяет производить обработку всегда острыми кромками ферроабразивных зерен.

Предложена модель разветвленного магнитопровода, содержащего катушку, возбуждающую дополнительное (по отношению к полю в области обработки) магнитное поле. Магнитопровод с дополнительной катушкой представлен на рис. 4.32 [128].

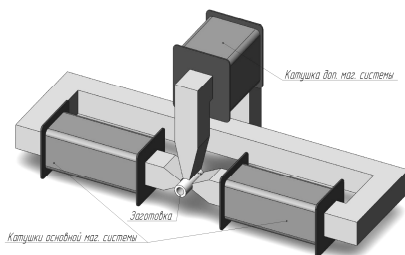
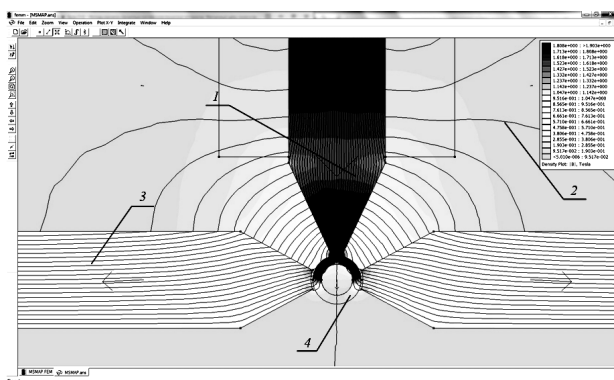


Рис. 4.32. Модель магнитопровода с дополнительной магнитной системой

Регенерация режущего контура абразивной «щетки» осуществляется периодическим включением дополнительной катушки. При включении дополнительной магнитной системы катушки основной магнитной системы отключаются. Время работы дополнительной катушки составляет 2÷6 секунд. При включении дополнительной катушки изменяется характер распределения силовых линий магнитного поля. Распределение силовых линий магнитного поля, возникающих при возбуждении дополнительной катушки, представлено на рис. 4.33. Распределение получено в рамках численных расчетов методом конечных элементов при помощи программы *FEMM 4.2*.



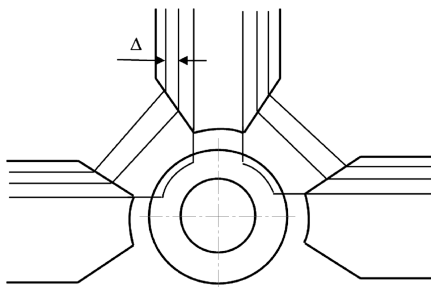
1 – основной поток; 2 – поток рассеивания; 3 – магнитопровод; 4 – заготовка  
 Рис. 4.33. Распределение силовых линий магнитного поля при работе дополнительной катушки, рассчитанное в программе *FEMM 4.2*

Как видно из рис. 4.33, при включении дополнительной катушки ферроабразивные зерна будут ориентироваться вдоль силовых линий магнитного поля. Возникающие магнитные силы стремятся сместить ФАЗ в область поля с большим значением индукции магнитного поля, то есть в сторону полюсного наконечника, на котором находится дополнительная катушка.

Для расчета магнитной силы необходимо определить значение магнитной индукции и градиент магнитной индукции в области сужения наконечников магнитопровода. При расчете используется

численное решение уравнений, соответствующих закону полного тока и закону постоянства потока магнитной индукции.

Разобьем пространственную область вблизи полюсного наконечника на малые элементы, как показано на рис. 4.34.

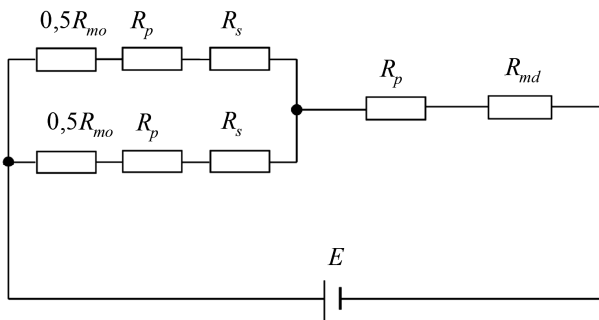


$\Delta$  – элементарный магнитопровод

Рис. 4.34. Элементарные области вблизи полюсного наконечника

Введем следующие упрощения. Силовые линии, проходящие через центральные части магнитопровода и выходящие из участков эквидистантных наконечников, замыкаются через соответствующий объем заготовки. Поле в центральной области магнитопровода, в эквидистантном зазоре и в заготовке считается однородным. Силовые линии, выходящие из участков полюсных наконечников, расположенных под углом к оси магнитопровода, замыкаются через воздух. Соответствующие силовые линии могут быть представлены прямолинейными отрезками. Коэффициент расширения области магнитного поля при переходе из магнитопровода в окружающую среду (воздух) выбирается равным 1,05. Тогда неоднородность поля, обусловленная скосами полюсных наконечников, будет обусловлена изменением магнитного сопротивления контура, соответствующего выбранному магнитному контуру.

Магнитная цепь, соответствующая центральной части дополнительного магнитопровода, сегментам эквидистантных зазоров, участкам заготовки, участкам основного магнитопровода, может быть представлена схемой, изображенной на рис. 4.35.



$R_{md}$  – магнитное сопротивление дополнительного магнитопровода;  
 $R_{mo}$  – магнитное сопротивление основного магнитопровода;  $R_s$  – магнитное сопротивление участков заготовки;  $R_p$  – магнитное сопротивление воздушного зазора;  $E$  – магнитодвижущая сила дополнительной катушки

Рис. 4.35. Схема магнитной цепи, соответствующая центральной части дополнительного магнитопровода

Используя симметрию установки, магнитную цепь, изображенную на рис. 4.35, можно представить следующим образом (рис. 4.36)

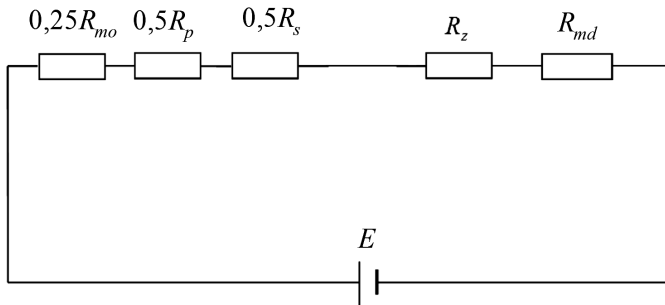


Рис. 4.36. Схема симметричной части магнитной цепи, соответствующая центральной части дополнительного магнитопровода

Из рис. 4.36 следует, что формулы для расчета магнитной цепи, соответствующей центральной части магнитопровода, имеют вид:

$$\begin{aligned}
E &= H_{1d}l_{1d} + H_{2d}l_{2d} + H_{3o}0,5l_{3o} + H_{4p}l_{4p} + H_{5s}l_{5s} + H_{6p}l_{7p}, \\
B_{1d}S_{1d} &= B_{2d}S_{2d} = B_{3o}2S_{3o} = B_{4p}S_{4p} = 2B_{5s}S_{5s} = 2B_{6p}S_{6p}, \\
B_1 &= \mu_{i2}\mu_0H_1, \quad B_2 = \mu_{i2}\mu_0H_2, \quad B_3 = \mu_{i2}\mu_0H_3, \\
B_4 &= \mu_0H_4, \quad B_5 = \mu_{i1}\mu_0H_5, \quad B_6 = \mu_0H_6, \\
S_{2d} &= 2S_{1d}, \quad S_{1d} = S_{3o}, \quad S_{4p} = S_{6p} = 1,05S_{1d},
\end{aligned} \tag{4.22}$$

где  $l_{1d} = 0,5$  м – суммарная длина верхней и передней частей дополнительного магнитопровода;

$H_{1d}$  – напряженность магнитного поля в центральной части дополнительного магнитопровода в верхней и передней частях, А/м;

$l_{2d} = 0,25$  м – длина задней части дополнительного магнитопровода;

$H_{2d}$  – напряженность магнитного поля в центральной части дополнительного магнитопровода, А/м;

$l_{3o} = 1,851$  м – полная длина средней линии основного магнитопровода;

$H_{3o}$  – напряженность магнитного поля в центральной части основного магнитопровода, А/м;

$l_{4p} = l_{6p} = 8 \cdot 10^{-4}$  м – толщина воздушного кольцевого зазора;

$H_{4p}$  – напряженность магнитного поля в зазоре между полюсным наконечником дополнительного магнитопровода и заготовкой, А/м;

$H_{6p}$  – напряженность магнитного поля в зазоре между полюсными наконечниками основного магнитопровода и заготовкой, А/м;

$l_{5s} = 0,25\pi(a_c + b_c)$  м – длина средней линии сегмента ( $\beta = \pi/4$ ) цилиндрической заготовки внутреннего радиуса  $a_c$  и внешнего радиуса  $b_c$ ,  $l_{5s} = 1,6 \cdot 10^{-2}$  м;

$H_{5p}$  – напряженность магнитного поля в заготовке, А/м;

$S_1 = d \cdot h = 5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> – площадь поперечного сечения эквидистантной части полюсного наконечника,  $d = 10$  мм,  $h = 50$  мм длина обрабатываемой части заготовки и полюсного наконечника вдоль оси Z;

$S_1 = h (a_c - b_c) = 2,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  – площадь поперечного сечения заготовки.

Магнитные проницаемости материала магнитопровода  $\mu_{i2}$  и заготовки  $\mu_{i1}$  определены графиком [128] (рис. 4.37).

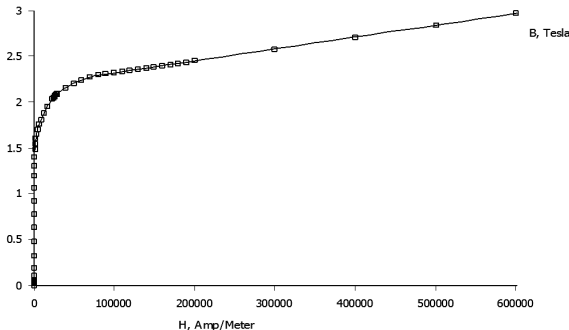


Рис. 4.37. Зависимость магнитной индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$

При расчете магнитной индукции вблизи наклонных участков полюсных наконечников магнитопровода учитывается то, что силовые линии магнитного поля замыкаются через воздушный промежуток. При этом эквивалентная схема для каждого магнитопровода малой толщины  $\Delta$  (элементарного магнитопровода) (см. рис. 4.34), представляется в виде, изображенном на рис. 4.38.

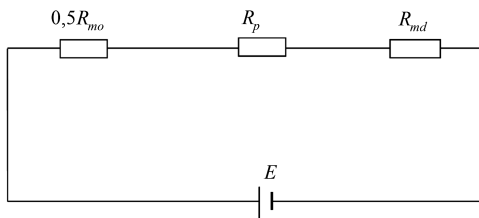


Рис. 4.38. Эквивалентная схема для магнитопровода малой толщины  $\Delta$

При переходе от одного элементарного магнитопровода к следующему изменяется длина средней линии как в основном, так и в дополнительном магнитопроводе. Но основной вклад в изменение магнитного сопротивления вносит увеличение длины воздушного промежутка при переходе от элементарных



магнитопроводов, расположенных вблизи центральной части к элементарным магнитопроводам, расположенным на периферии.

На основе анализа схемы МАО с дополнительной магнитной системой (рис. 4.31, б) предложен алгоритм расчета магнитной индукции и градиента магнитной индукции, создаваемой дополнительной катушкой:

1. Выбрать первый магнитный контур толщиной  $\Delta$ , который непосредственно прилегает к центральной части.

2. Определить длину его центральной линии в металле и в окружающем пространстве (воздухе).

3. Используя геометрию полюсных наконечников, определить площадь, которую пересекают силовые линии магнитного поля в воздушном зазоре, соответствующем элементарному магнитопроводу.

4. Построить зависимость индукции магнитного поля в воздушном зазоре от величины магнитодвижущей силы, используя следующие формулы для расчета:

$$\begin{aligned}
 E &= H_{1d}l_{1d} + H_{2d}l_{2d} + H_{3o}0,5l_{3o} + H_{4p}l_{4p}, \\
 B_{1d}S_{1d} &= B_{2d}S_{2d} = B_{3o}S_{3o} = B_{4p}S_{4p}, \\
 B_1 &= \mu_{i2}\mu_0H_1, \quad B_2 = \mu_{i2}\mu_0H_2, \quad B_3 = \mu_{i2}\mu_0H_3, \quad B_4 = \mu_0H_4, \quad (4.23) \\
 S_{2d} &= 2S_{1d}, \quad S_{1d} = S_{3o} = \Delta \cdot h, \quad S_{4p} = \frac{\Delta}{\sin \gamma} h.
 \end{aligned}$$

5. Рассчитать градиент магнитной индукции. Для этого из значения магнитной индукции, рассчитанной для центральной части дополнительного магнитопровода отнять значение, полученное для первого элементарного магнитопровода и результат разделить на величину  $\Delta$ .

6. Рассчитать силу, действующую на ферромагнитное зерно в воздушном зазоре по формуле

$$\vec{F}_1 = -\overrightarrow{\text{grad}W} = -\left( \frac{\partial W}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial W}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial W}{\partial z} \vec{k} \right), \quad (4.24)$$

где  $W$  – потенциальная энергия намагниченного ферромагнитного зерна в магнитном поле, Дж.

Магнитный момент зерна в магнитном поле рассчитывать исходя из значения магнитного поля, рассчитанного для центральной части дополнительного магнитопровода.

7. Перейти к соседнему элементарному магнитопроводу путем смещения на расстояние  $\Delta$  от оси симметрии системы к периферии. Повторить действия п. 2÷6 данного алгоритма.

#### **4.3.2. Влияние параметров импульсного магнитного поля на производительность обработки и шероховатость поверхности**

Для установления влияния импульсного магнитного поля на производительность и качество МАО была создана экспериментальная установка с дополнительной магнитной системой, полюсный наконечник которой установлен под углом  $90^\circ$  к полюсным наконечникам основной магнитной системы.

Статистическая модель магнитно-абразивной обработки –  $k = 5$ .

Параметры оптимизации:

- производительность,  $Y_1 - \Delta m$ , мг/с;
- шероховатость поверхности,  $Y_2 - Ra$ , мкм.

Постоянные факторы:

- порция порошка на обработку одного образца,  $m_n = 4$  г;
- магнитная индукция основной магнитной системы,  $B_0 = 0,9$  Тл;
- рабочий зазор основной магнитной системы,  $\delta_0 = 1$  мм;
- зернистость ферроабразивного порошка FeTiC,  $\Delta = 100 \div 160$  мкм;
- рабочий зазор дополнительной магнитной системы,  $\delta_d = 2$  мм.

Независимые переменные:

- $\tau$  – время обработки, с;
- $B_d$  – магнитная индукция дополнительной магнитной системы, Тл;
- $v$  – скорость главного движения, м/с;
- $u$  – интервал включения дополнительной магнитной системы, с;
- $\tau_d$  – продолжительность цикла работы дополнительной магнитной системы, с.

Уровни и интервалы варьирования факторов приведены в табл. 4.3.

Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровни факторов $X_i$	Значения факторов				
	$\tau$ , с	$B_d$ , Тл	$v$ , м/с	$u$ , с	$\tau_d$ , с
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
-1	30	1,1	0,1	5	2
0	60	1,5	0,5	15	4
+1	90	1,9	0,9	25	6

**Производительность.** Уравнение регрессии искали в виде полиномиальной модели 2-го порядка в нормированных координатах. Расчеты выполнены с помощью программы STATISTICA, процедура GRM (*General Regression Model* – общая регрессионная модель).

Несмотря на то, что дисперсии по точкам плана однородны, среди экспериментальных значений, включающих по 5 дублей в каждой точке плана, могут присутствовать «выбросы» – экспериментальные точки, имеющие большие отклонения относительно соответствующих расчетных значений согласно полученному уравнению регрессии. Такие точки существенно снижают точность оценки параметров регрессионного уравнения и вызывают их смещения. Для выявления таких опытов применяются различные процедуры оценки остатков – разности между экспериментальным и расчетным значением параметра в точке плана. Мы использовали оценки студентизированных удаленных остатков S.DRes [104]. Результат наблюдения исключался из расчетов, если для него  $|S.DRes| > 2,5$ . На основании этих данных рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии, статистическая значимость которых оценивалась по критерию Стьюдента. Незначимые коэффициенты исключались из уравнения методом обратного пошагового исключения, так как план эксперимента неортогонален.

В результате получено уравнение

$$\begin{aligned} \Delta m = & 4,45 - 0,71\tau + 0,43B_d + 1,88v - 0,52\tau v + 0,25\tau u + \\ & + 0,36B_d v + 0,18B_d \tau_d + 0,39B_d^2 - 0,73v^2. \end{aligned} \quad (4.25)$$

**Шероховатость поверхности.** Формирование микропрофиля поверхности при МАО происходит в результате одновременно протекающих 2-х механизмов воздействия абразива: 1 – срезание вершин исходного профиля; 2 – прорезание новых углублений на поверхности. Исходная поверхность, которая была получена после чистового точения, имеет более шероховатый профиль по сравнению с абразивной обработкой. При этом проблематично получать точное значение исходной шероховатости на всех заготовках, которые в дальнейшем подверглись МАО, так как формирование микропрофиля при обработке подвержено воздействию большого числа случайных факторов. В результате распределение параметра шероховатости  $Ra$  в исходном состоянии имел рассеивание, показанное на гистограмме (рис. 4.39).

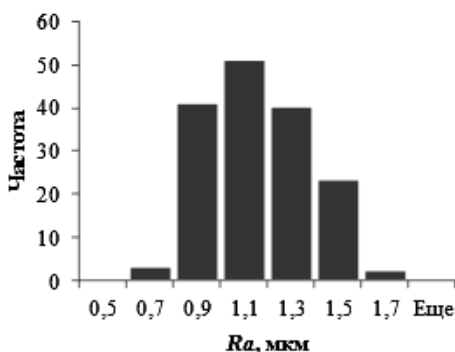


Рис. 4.39. Гистограмма распределения исходной шероховатости поверхности

Распределение исходной шероховатости близко к нормальному и имеет значительную дисперсию (среднеквадратичное отклонение  $Ra$  равно 0,21 мкм). Поэтому нельзя допустить, что в исходном состоянии все заготовки были равноценны. Очевидно, что при МАО заготовки с большей исходной шероховатостью будут в большей степени подвержены первому механизму формирования микропрофиля, и изменение параметра  $Ra$  для них может быть более значительным, чем для заготовок с малой исходной шероховатостью. Следовательно, фактор «исходная шероховатость» должен быть включен в уравнение регрессии, описывающее изменение шероховатости в результате МАО на различных режимах.

В этом случае каждый дубль, выполненный при одинаковых режимах МАО, строго говоря, не является повторением, так как отличается исходной шероховатостью. Поэтому предварительная обработка данных, включающая вычисление средних значений и дисперсий в каждой точке плана эксперимента не имеет смысла.

Уравнение регрессии искали в виде полиномиальной модели 2-го порядка в нормированных координатах, в которое включен также фактор  $Ra_{исх}$ . Расчеты выполнены с помощью программы STATISTICA, процедура GRM (*General Regression Model* – общая регрессионная модель).

Для выявления «выбросов» – аномально больших разностей между экспериментальным и расчетным значением параметра в точке плана использовали оценки студентизированных удаленных остатков  $S. DRes$  [104]. Результат наблюдения исключался из расчетов, если для него  $|S. DRes| > 3$ .

На основе полученных данных рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии, статистическая значимость которых оценивалась по критерию Стьюдента на основе дисперсии, базирующейся на остаточной сумме квадратов. Незначимые коэффициенты исключались из уравнения методом обратного пошагового исключения, так как план эксперимента не ортогональный.

В результате получено уравнение которое описывает результаты эксперимента с коэффициентом множественной корреляции  $r = 0,9$  [128].

$$\begin{aligned} \Delta Ra = & 0,866Ra_{исх} - 0,265 + 0,033B_d + 0,019B_d u - \\ & - 0,025B_d \tau_d - 0,018\nu\tau_d - 0,041\tau^2, \end{aligned} \quad (4.26)$$

#### **4.3.3. Определение рациональных технологических режимов магнитно-абразивной обработки с регенерацией абразивной «щетки»**

В результате выполненных экспериментов установлено, что по степени влияния на производительность МАО параметры можно расположить в ряд:  $\nu \rightarrow \tau \rightarrow \nu \times u \rightarrow B_d \rightarrow B_d \times \tau_d$ . При анализе величин коэффициентов регрессии видно, что наиболее влияющим на удельный съем металла с обрабатываемой поверхности

(производительность) фактором является скорость главного движения  $v$  ( $X_3$ ) (рис. 4.40) [128].

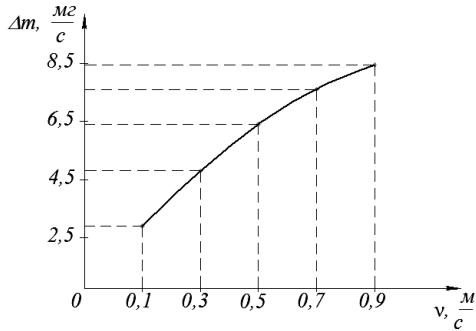


Рис. 4.40. График зависимости производительности от скорости главного движения  $v$

Причем эта зависимость не линейна и отрицательный коэффициент при квадратичном эффекте этого же фактора указывает, что прирост производительности замедляется по мере роста скорости. Вторым по значимости фактором является время обработки  $\tau$  ( $X_1$ ). Интенсивность съема металла с поверхности обрабатываемой детали линейно уменьшается по ходу времени, однако эффект этого фактора взаимодействует с  $v$  ( $X_3$ ) (рис. 4.41, а) и  $u$  ( $X_4$ ) (рис. 4.41, б).

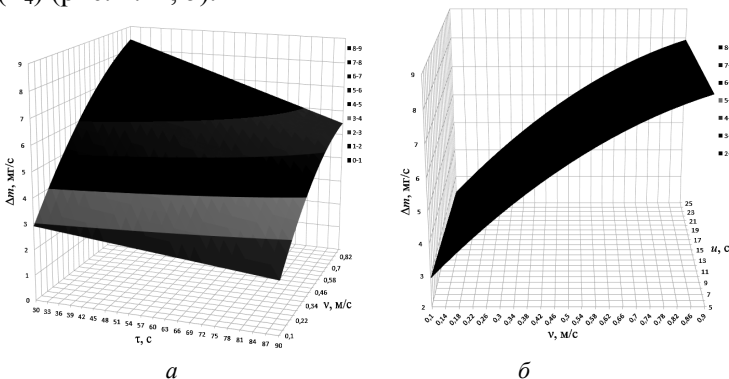


Рис. 4.41. Графики зависимости производительности при взаимодействии факторов: скорости главного движения  $v$  и времени обработки  $\tau$  (а); интервала включения дополнительной магнитной системы  $u$  и скорости главного движения  $v$  (б)

Уменьшение можно «затормозить», если при больших скоростях применять малые интервалы включения дополнительной магнитной системы [128]. Увеличение в рабочем зазоре магнитной индукции дополнительной магнитной системы  $B_{\text{д}}$  ( $X_2$ ) нелинейно повышает производительность, причем положительный квадратичный эффект указывает на интенсивный рост (рис. 4.42).

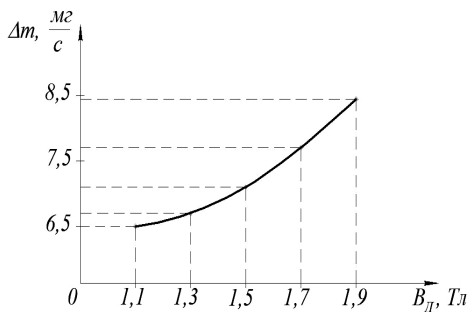


Рис. 4.42. График зависимости производительности от величины магнитной индукции генерируемой дополнительной катушкой  $B_{\text{д}}$

Интервал включения дополнительной магнитной системы  $u$  ( $X_4$ ) (рис. 4.43, а) и продолжительность цикла работы дополнительной магнитной системы  $\tau_{\text{д}}$  ( $X_5$ ) (рис. 4.43, б) не оказывают статистически значимого самостоятельного влияния и их роль проявляется только во взаимодействиях с другими факторами.

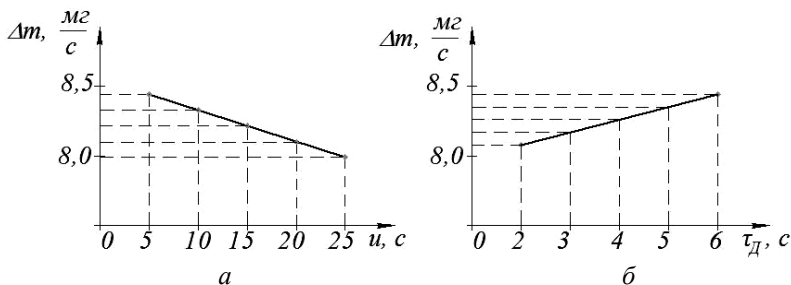


Рис. 4.43. Графики зависимости производительности от: интервала включения дополнительной магнитной системы  $u$  (а); продолжительности цикла работы дополнительной магнитной системы  $\tau_{\text{д}}$  (б)

Положительное влияние увеличения индукции  $B_d$  может быть усилено возрастанием длительности включения  $\tau_d$  дополнительной магнитной системы (рис. 4.44).

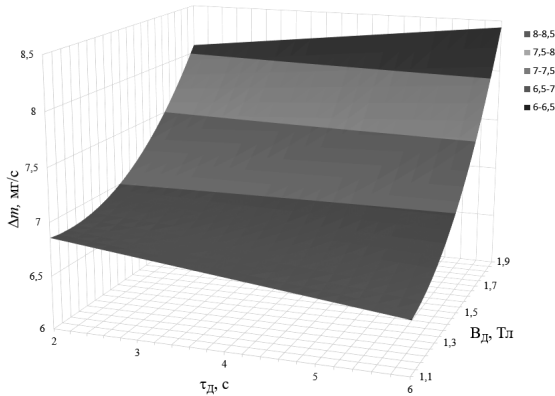


Рис. 4.44. График зависимости производительности при взаимодействии факторов длительности включения  $\tau_d$  и магнитной индукции дополнительной магнитной системы  $B_d$

Задача по поиску рациональных режимов, обеспечивающих максимальную производительность, решена в программе *MS Excel* методом ОПГ (обобщенный приведенный градиент). В результате получено, что рациональные режимы находятся на границе изученного факторного пространства (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Рациональные значения факторов

Рациональные значения факторов					Расчетное значение $\Delta m$
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	
-1	1	1	-1	1	8,44 мг/с
$\tau, c$	$B_d, Tл$	$v, м/с$	$u, c$	$\tau_d, c$	Экспериментальные значения $\Delta m$
30	1,9	0,9	5	6	9,33; 8,33; 7,67; 8,33

Пульсирующий характер дополнительного магнитного поля позволяет осуществлять регенерацию абразивной «щетки» путем перераспределения магнитного потока по сечению рабочего зазора



и кратковременного изменения величины и направления градиента магнитной индукции, что обеспечивает стабилизацию съема припуска с обрабатываемой заготовки на протяжении всего цикла обработки при среднем отклонении  $8\% \div 15\%$  по сравнению с ранее достигнутым  $30\% \div 50\%$ .

При анализе величины коэффициентов регрессии уравнения, описывающего влияние факторов на качество МАО видно, что фактором, наиболее влияющим на изменение шероховатости, является исходная шероховатость. Чем она больше, тем больше изменение шероховатости в результате МАО. В среднем шероховатость после МАО уменьшается на  $87\%$  от исходной величины.

Вторым по значимости является величина индукции дополнительного магнитного поля  $B_d$  ( $X_2$ ). Возрастание индукции наиболее значимо влияет на уменьшение шероховатости после МАО. Увеличение напряженности магнитного поля увеличивает воздействие дополнительной магнитной системы на регенерацию контура режущего инструмента, вызывая значительное изменение шероховатости (рис. 4.45).

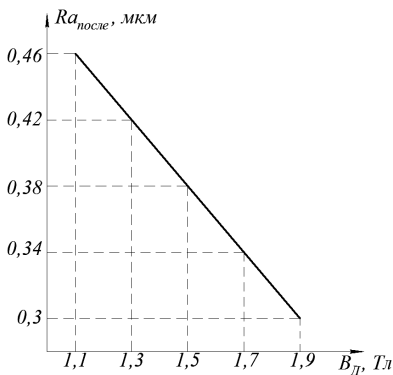


Рис. 4.45. График зависимости шероховатости после МАО от величины магнитной индукции генерируемой дополнительной катушкой  $B_d$

В числе главных эффектов присутствует время обработки, влияние которого нелинейно ( $X_1^2$ ) (рис. 4.46).

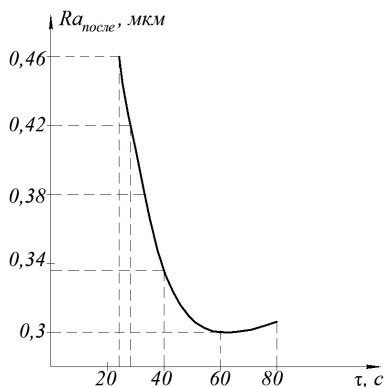


Рис. 4.46. График зависимости шероховатости после МАО от времени обработки  $\tau$

При этом оптимальным является среднее значение времени в варьируемом интервале. Это можно объяснить тем, что при малом времени обработки не успевают удалиться исходные микронеровности, а при большом формируется больше новых.

Факторы  $X_4$  и  $X_5$  (рис. 4.47, а, б) не оказывают статистически значимого самостоятельного влияния и их роль проявляется только во взаимодействиях с другими факторами.

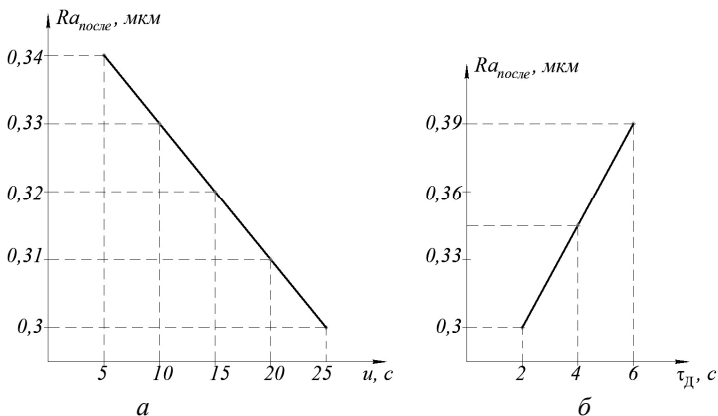


Рис. 4.47. График зависимости шероховатости после МАО от: интервала включения дополнительной магнитной системы  $u$  (а); продолжительности цикла работы дополнительной магнитной системы  $\tau_{\text{Д}}$  (б)

Взаимодействие  $X_2X_4$  (рис. 4.48, а) указывает на то, что изменение шероховатости при увеличении индуктивности можно увеличить одновременным увеличением числа включений дополнительного магнитного поля. Но при этом, как показывает взаимодействие факторов  $X_2X_5$  (рис. 4.48, б), периоды включения дополнительного магнитного поля целесообразно принять минимальными.

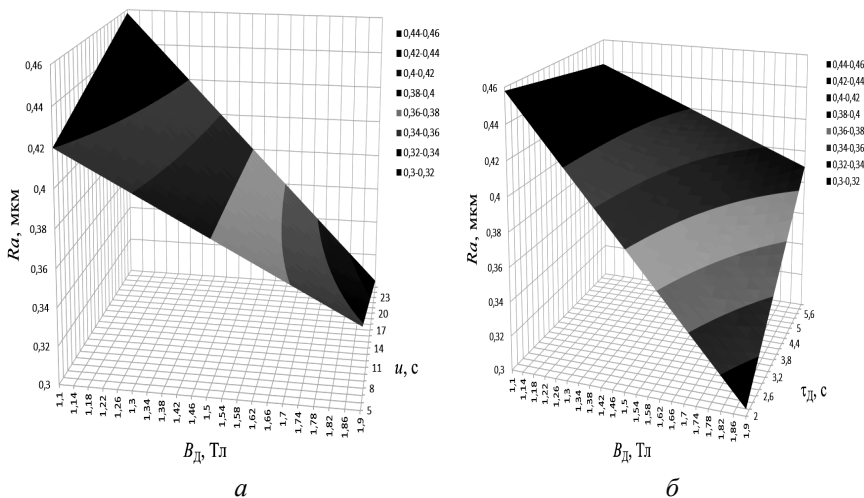


Рис. 4.48. Графики зависимости шероховатости при взаимодействии факторов: интервала включения дополнительной магнитной системы  $u$  и магнитной индукции дополнительной магнитной системы  $B_d$  (а); продолжительности цикла работы дополнительной магнитной системы  $\tau_d$  и магнитной индукции дополнительной магнитной системы  $B_d$  (б)

Взаимодействие факторов  $X_3X_5$  (рис. 4.49) указывает на то, что дополнительное уменьшение шероховатости после MAO может быть достигнуто при большой скорости резания.

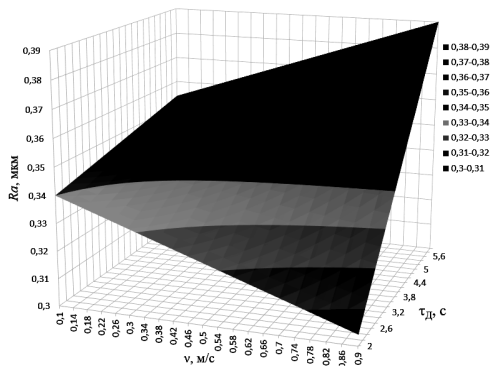


Рис. 4.49. График зависимости шероховатости при взаимодействии факторов продолжительности цикла работы дополнительной магнитной системы  $\tau_d$  и скорости главного движения  $v$

Таким образом, максимальное снижение шероховатости после MAO может быть получено в режиме обработки приведенном в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Рациональные значения факторов

Рациональные значения факторов					Расчетное значение $\Delta Ra$ , мкм
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	
0	1	1	1	-1	0,87 $Ra_{исх}$ ÷ 0,17
$\tau$ , с	$B_d$ , Тл	$v$ , м/с	$u$ , с	$\tau_d$ , с	
60	1,9	0,9	25	2	

#### 4.3.4. Экспериментальное исследование влияния импульсного магнитного поля на производительность обработки при суперпозиции основного и дополнительного магнитных полей

Для исследования влияния импульсного магнитного поля на производительность обработки при суперпозиции основного и дополнительного магнитных полей в процессе MAO был проведен ряд экспериментов. Для этого были подготовлены две партии образцов по 40 штук с исходной шероховатостью  $Ra$   $0,85 \div 0,79$  мкм. Образцы первой партии обрабатывались по

классической схеме реализации МАО, без регенерации контура режущего инструмента и управления углом наклона ферроабразивных зерен в рабочем зазоре. Вторая партия обрабатывалась с регенерацией каждые 5 секунд обработки и при суперпозиции основного и дополнительного магнитных полей.

Условия проведения эксперимента: магнитная индукция основной магнитной системы,  $B_0 = 0,9$  Тл; магнитная индукция дополнительной магнитной системы,  $B_{д\text{ пост.}}/B_{д\text{ импульс.}} = 0,8$  Тл/1,9 Тл; рабочий зазор основной магнитной системы,  $\delta_0 = 1$  мм; рабочий зазор дополнительной магнитной системы,  $\delta_{д} = 1,5$  мм; зернистость ферроабразивного порошка FeTiC,  $\Delta = 100\div 160$  мкм; скорость главного движения,  $v = 0,9$  м/с. Образцами служили поршневые пальцы  $\varnothing 25$  мм, материал сталь 12ХНЗА, твердость поверхностного слоя  $58\div 62$  HRC. Выходной показатель производительность  $Q$ , мг/(см<sup>2</sup>·мин). Измерение шероховатости поверхности производилось на профилографе-профилометре *Mitutoyo SJ-201P*. Масса деталей взвешивалась на весах *Massa-K BK-600* с точностью до 10 мг. Результаты эксперимента приведены в табл. 4.6.

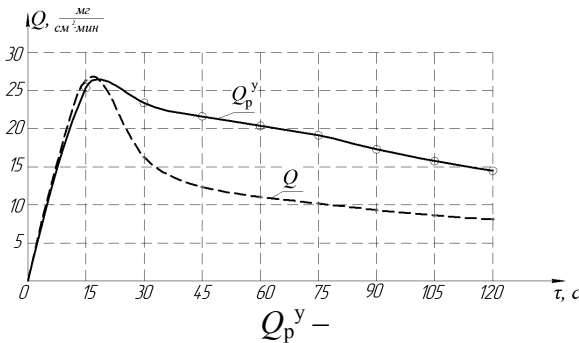
Таблица 4.6

Производительность МАО при воздействии дополнительного магнитного поля на абразивную «щетку» и без воздействия

Время обработки $\tau$ , сек.	Производительность МАО $Q$ , мг/(см <sup>2</sup> ·мин)	
	без дополнительной МС	с дополнительной МС
15	26,5	25,48
30	16,3	23,44
45	13,6	21,74
60	11,2	20,38
75	9,8	19,16
90	8,8	17,32
105	8,7	16,01
120	8,2	14,52

На рис. 4.50 представлено графическое отображение изменения производительности обработки образцов по классической схеме MAO и с воздействием дополнительным магнитным полем на абразивную «щетку».

Из рис. 4.50 видно, что производительность MAO при классической схеме MAO резко снижается после 15 секунд обработки, а после 45 секунд наблюдается падение производительности в 2 раза по сравнению с производительностью при 15 секундах. MAO с регенерацией абразивной «щетки» и управлением углом наклона ФАЗ обеспечивает стабилизацию интенсивности съема металла на протяжении всего цикла обработки.



Производительность MAO с воздействием дополнительным магнитным полем на абразивную «щетку»;  $Q$  – производительности при классической схеме MAO  
Рис. 4.50. График зависимости производительности  $Q$  от времени обработки  $\tau$

Таким образом, экспериментально установлено, что дополнительное магнитное поле позволяет осуществлять управление ориентацией ферроабразивных зерен в рабочем зазоре и миграцию зерен абразивной «щетки» к полюсному наконечнику дополнительного магнитного поля. Предложен метод обновления режущих кромок абразивной «щетки», основанный на ее переформировании под воздействием импульсов дополнительного магнитного поля в процессе магнитно-абразивной обработки. Это позволяет расположить абразивную «щетку» на входе в рабочий зазор, а в момент подачи импульса ферроабразивным зернам переориентироваться в процессе формирования в рабочем зазоре

новой абразивной «щетки» и обеспечить стабилизацию интенсивности съема металла на протяжении всего цикла обработки, при среднем отклонении  $5\% \div 12\%$  по сравнению с ранее достигнутым  $30\% \div 60\%$ , и повышение производительности до 1,8 раза.

Таким образом, пульсирующий характер дополнительного магнитного поля позволяет осуществлять регенерацию абразивной щетки путем перераспределения магнитного потока по сечению рабочего зазора и кратковременного изменения величины и направления градиента магнитной индукции, что обеспечило стабилизацию съема металла на протяжении всего цикла обработки при среднем отклонении  $8\% \div 15\%$  по сравнению с ранее достигнутым  $30\% \div 50\%$ .

Экспериментально установлены параметры дополнительного магнитного поля (магнитная индукция для управления ориентацией ферроабразивных зерен,  $B_d = 0,8$  Тл, магнитная индукция импульсов для регенерации,  $B_d = 1,9$  Тл, интервал включения импульсов дополнительной магнитной системы,  $u = 5$  с, продолжительность импульса дополнительной магнитной системы  $\tau_d = 6$  с, угол расположения источника импульсного магнитного поля  $90^\circ$ ), осуществляющего управление ориентированным резанием, а при подаче импульса магнитного поля – переориентацию ферроабразивных зерен и формирование в зоне входа в рабочий зазор обновленной абразивной «щетки», что позволяет стабилизировать интенсивность съема металла на протяжении всего цикла обработки в интервале  $5\% \div 12\%$  по сравнению с ранее достигнутым  $30\% \div 60\%$  и повысить производительность обработки до 1,8 раза [128].

#### **4.4. Синтез комбинированных способов упрочнения поверхностей деталей в магнитном поле**

##### **4.4.1. Методика синтеза комбинированных способов упрочняющей обработки поверхностей деталей машин в магнитном поле**

Концептуальный подход синтеза комбинированных способов упрочняющей обработки поверхностей деталей машин в магнитном поле основывается на системной модели технологии, пред-

ставляемой [20, 139] как воздействие на заготовку сочетанием трех входных потоков: энергии, материала, технологических режимов. Энергии магнитного поля отводится доминирующая роль.

В комбинированных способах упрочняющей обработки поверхностей известные технологии реализуются путем как параллельного (одновременного), так и последовательного энергетического воздействия различного вида, вызывающего соответствующие физико-химические эффекты. В методике синтеза используются обобщенные критерии совместимости, отражающие близость основных параметров или подобие физико-химических механизмов, происходящих в каждом из совмещаемых способов. При этом существует вероятность проявления синергетических эффектов, обусловленных как результат явлений самоорганизации при одновременном сочетании нескольких механизмов энергетического воздействия.

Близость основных технологических параметров совмещаемых способов, в общем случае, можно оценивать путем сравнительного анализа видов энергетического и материального воздействия на упрочняемую поверхность, а также технологических режимов. К ним относятся:

- виды применяемой энергии и параметры ее источников;
- химический состав материалов, наносимых на упрочняемую поверхность;
- кинематика процессов и величины основных технологических режимов.

Оценку подобия физико-химических механизмов в совмещаемых способах упрочнения можно проводить на основе положения теории подобия [140] по термодинамическим и тепловым процессам, а также по массопереносу. Совмещаемые процессы должны быть реализованы в близких геометрических и временных условиях (например, скорость, время, масса, плотность или сочетание единиц измерения), а математические модели, отражающие их состояние или функционирование, иметь одинаковую физическую природу и описываться одинаковыми по форме и существу уравнениями. Степень подобия совмещаемых способов определяет вид комбинированной технологии: параллельная (обработка каждым способом совмещена во



времени), последовательная (обработка каждым из совмещаемых способов производится последовательно) и последовательно-параллельная.

Предложенная методика содержит следующую последовательность синтеза способов комбинированного упрочнения в магнитном поле:

- анализ существующих способов упрочнения в магнитном поле поверхностей деталей, включающий вид и источник энергетического воздействия, вид материального воздействия, особенности реализации технологии и используемое оборудование, оценку их возможностей;

- выбор из анализируемых способов упрочнения основного (базового) способа упрочнения в зависимости от поставленных задач, анализ его недостатков;

- проработка вариантов совмещения с основным способом существующих методов упрочняющей обработки и определение дополнительного способа по виду технологического воздействия;

- экспериментальные исследования совместимости способов на основе подобия физико-химических механизмов и полученных результатов.

#### **4.4.2. Совмещенные способы упрочняющей обработки в магнитном поле поверхностей вращения**

Применительно к способам упрочняющей обработки поверхностей в магнитном поле, когда природа физических полей уже известна, использован более простой метод оценки их подобия (табл. 4.7).

В зависимости от поставленной задачи основным способом упрочняющей обработки может быть МЭУ – для черновой обработки или МАО – для отделочно-чистовой. Оба эти способа можно реализовать последовательно на одном оборудовании [141] после его переналадки.

Из табл. 4.7 следует, что МЭУ, шлифование и поверхностное пластическое деформирование (ППД) могут выполняться параллельно, а МИУ не совмещается с МЭУ по времени.

Таблица 4.7

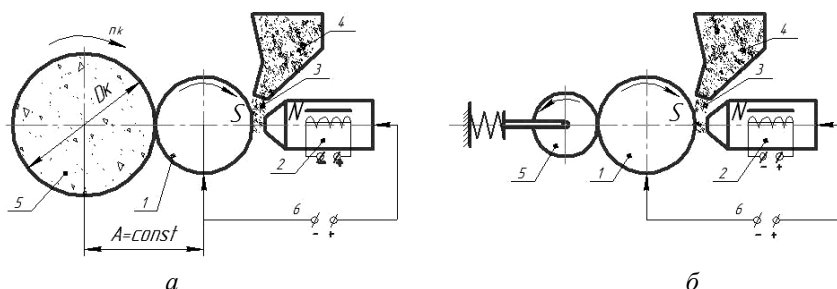
Оценка возможности совмещения способов упрочняющей обработки  
в магнитном поле поверхностей вращения

Дополнительные способы обработки	Основной способ упрочняющей обработки				Вид совместимости
	Виды воздействий на поверхность				
	энергетическое		технологическое		
	общее	автоно- мное	близ- кая	разная	
Магнитно-электрическое упрочнение					
Шлифование		+	+		Параллельный
Поверхностное пластическое деформирование		+	+		Параллельный
МИУ	+		+		Параллельно- последовательный
Лазерное упрочнение		+		+	Последовательный
МАО	+		+		Последовательный
Магнитно-абразивная обработка					
Шлифование		+	+		Параллельный
МИУ		+	+		Параллельный
Электрохимическое полирование		+	+		Параллельный

При МЭУ (рис. 1.6) формирование покрытия происходит в виде множества точечных вкраплений округлой формы. Микроструктура упрочненного слоя, обеспечивающая его физико-механические свойства, зависит от химического состава ФМП и материала основы. Толщина покрытий составляет до 0,2 мм, а шероховатость поверхности –  $Ra \geq 12,5$  мкм. Вместе с тем для процесса МЭУ присуща неравномерность распределения по упрочняемой поверхности отдельных вкраплений материала ФМП, вызванная спонтанным формированием токопроводящих цепочек из зерен ФМП и, как следствие, местом возникновения электрических разрядов. Это приводит как к снижению сплошности наносимого покрытия.

Уменьшить шероховатость поверхности можно шлифованием, которое совмещается с МЭУ на шлифовальном станке (рис. 4.51, а). При наладке шлифовальный круг устанавливают на требуемый

размер диаметра обрабатываемой поверхности и межосевое расстояние  $A$  выдерживается постоянным на протяжении всего цикла обработки. По мере нанесения покрытия диаметральный размер будет увеличиваться только до достижения расстояния  $A$ , так как лишний слой будет срезаться шлифовальным кругом. Такая комбинированная обработка совмещает во времени нанесение покрытия и чистовую обработку его поверхности до шероховатости  $Ra \leq 1,25$  мкм, а также экономит расход ФМП, поскольку наносится только заданная толщина покрытия. Наибольший эффект получен при совмещении МЭУ с ППД (рис. 4.51, б).



- $N, S$  – полюсы магнитного поля; 1 – заготовка;  
 2 – полюсный наконечник магнита; 3 – ФМП; 4 – бункер-дозатор;  
 5 – шлифовальный круг (а); деформирующий ролик или шарик (б);  
 6 – источник технологического тока

Рис. 4.51. Схема комбинированной упрочняющей обработки наружных цилиндрических поверхностей: а – МЭУ со шлифованием; б – МЭУ с ППД

В этом случае происходит дополнительно термомеханическое упрочнение. На упрочняемую поверхность одновременно воздействуют электромагнитные и термдеформационные потоки энергии. Для разогрева поверхностного слоя используется технологическое тепло, образовавшееся энергией электрических разрядов. При таком комбинированном воздействии происходит формирование покрытия, нагрев образовавшихся неровностей, их деформирование и сглаживание. Происходящие структурные и фазовые превращения определяют физико-механические свойства покрытий. Шероховатость поверхности уменьшается до  $Ra 1,25 \div 0,63$  мкм (рис. 4.52).

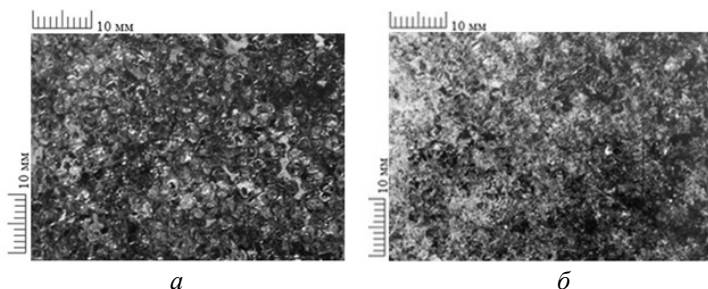
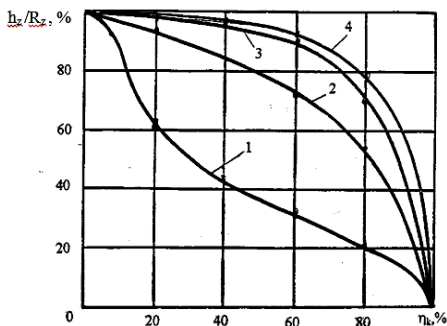


Рис. 4.52. Фотография поверхности после МЭУ: а – после МЭУ; б – МЭУ с ППД

Важнейшей характеристикой топографии поверхности с точки зрения эксплуатационных свойств деталей является опорная кривая, характеризующая распределение металла по высоте в шероховатом поверхностном слое. Экспериментально установлено, что комбинированное упрочнение значительно увеличивает опорную поверхность. До половины высоты профиля опорная поверхность после ППД, совмещенной с МЭУ, увеличивается в 2÷3 раза (рис. 4.53).



1 – МЭУ; 2 – МЭУ+ППД; 3 – МЭУ+шлифование; 4 – МЭУ+шлифование+МАО;  
 $h_z$  – высота уровня;  $R_z$  – высота неровностей;  $\eta_k$  – отношение отрезков  
 внутри контура ко всей длине

Рис. 4.53. Опорные кривые упрочненных поверхностей

После шлифования и магнитно-абразивной обработки величина опорной поверхности еще более увеличивается. Однако для сохранения толщины нанесенного покрытия предпочтительно

применять бесстружковые методы последующей обработки упрочненных поверхностей. Поэтому, где это возможно, при механической обработке упрочненных и восстановленных деталей следует обходиться без операций шлифования.

Вторым основным способом упрочнения деталей в магнитном поле путем улучшения топографии их поверхностей (см. табл. 4.7) является MAO, которую можно совмещать с МИУ путем конструирования магнитных систем в соответствии со схемой, приведенной на рис. 4.31, б. При этом MAO формирует топографию поверхности, а МИУ – модификацию поверхностного слоя. То есть, кроме регенерации ферроабразивной «щетки» и управления углом ориентации абразивных зерен дополнительная магнитная система позволяет осуществлять МИУ поверхностного слоя детали. Для этого в зазор  $k\delta$  дополнительной магнитной системы (см. рис. 4.31, б) необходимо направлять импульсы магнитного поля, величина магнитной индукции которых определена экспериментально  $B_d > 2$  Тл. Периодичность импульсов  $3 \div 5$  с, а длительность каждого импульса  $2 \div 6$  с.

Известно [25], что поверхностный слой металла, подвергшегося воздействию переменного магнитного поля, изменяет свои эксплуатационные свойства. Улучшение свойств ферромагнитных деталей при МИУ импульсной магнитной обработке объясняется направленной ориентацией свободных электронов металла во внешнем магнитном поле, вследствие чего увеличивается тепло- и электропроводимость металла. Перемещение в магнитном поле заготовки из ферромагнитного материала сопровождается появлением в ней индукционных токов переменного направления. При многократном перемещении возникают электромагнитные и пластические эффекты, снижающие прочностные характеристики материала поверхностного слоя. Из-за скин-эффекта вся тепловая энергия концентрируется в поверхностных слоях. Это способствует пластическому деформированию стружки при абразивном резании и «выглаживанию» поверхности, что увеличивает ее опорную площадь и снижает шероховатость.

В процессе обработки поверхностей деталей машин при изготовлении в их материале концентрируется некоторое количество избыточной энергии. Неравномерная концентрация избыточной энергии вызывает ее преобразование, что приводит к концентрации внутренних напряжений в материале и снижению его физико-

механических свойств. МИУ обеспечивает значительное уменьшение избыточной энергии материала, связанной с концентрацией внутренних и поверхностных напряжений в детали. Импульсное воздействие внешнего магнитного поля генерирует в поверхностном слое вихревые токи и локальные микровихри, которые нагревают участки вокруг кристаллитов напряженных блоков и неоднородностей структуры металла. При изменяющемся по величине и по направлению магнитном поле происходит переориентация спина с определенной цикличностью и с изменением его направления, что отражается на химической связи в соединениях поверхностного слоя. Взаимодействие импульсного магнитного поля с металлическими токопроводящими материалами происходит тем интенсивнее, чем выше структурная и энергетическая неоднородность этого материала. Поэтому, чем выше концентрации поверхностных и внутренних напряжений в металле, тем больше вероятность локальной концентрации в них микровихрей внешнего поля и возникающих вихревых токов, которые нагревают тонкий поверхностный слой.

Выделяющаяся теплота расходуется на процессы, связанные с фазовыми превращениями 1-го и 2-го рода и улучшением микроструктуры материала поверхностного слоя. В этих местах резко возрастает вероятность разрыва межатомных связей. В тех местах, где эти локальные перенапряжения превышают пределы упругости материала, формируются очаги пластической деформации, что свидетельствует об упрочнении металлической поверхности. Именно здесь интенсивно протекают процессы размножения и перемещения дислокаций. С увеличением плотности дислокации, сталь претерпевает своеобразный наклеп, что выражается в изменении параметра решетки мартенсита и снижении температуры обратного мартенситного превращения. Указанные явления могут проявляться как в процессе МЭУ, так и при МАО.

#### **4.4.3. Экспериментальные исследования влияния совмещенной магнитно-абразивной обработки и магнитно-импульсного упрочнения на производительность и качество поверхности**

Экспериментально установлено, что суперпозиция основного и дополнительного магнитных полей при совмещении МАО и МИУ повышает производительность обработки (рис. 4.50) до 1,8 раза, а топография поверхности не сопровождается заметным изменением

шага неровностей, образовавшихся на предшествующих операциях обработки.

Для установления влияния импульсного воздействия дополнительного магнитного поля на микротвердость поверхностей деталей проведены экспериментальные исследования.

Условия проведения эксперимента: магнитная индукция основной магнитной системы,  $B_0 = 0,9$  Тл; магнитная индукция дополнительной магнитной системы,  $B_d = 1,9$  Тл; рабочий зазор основной магнитной системы,  $\delta_0 = 1$  мм; рабочий зазор дополнительной магнитной системы,  $\delta_d = 1,5$  мм; зернистость ферроабразивного порошка FeTiC,  $\Delta = 100\text{--}160$  мкм; скорость главного движения  $v = 0,9$  м/с. Время обработки  $\tau = 60$  с, интервал включения дополнительной магнитной системы  $u = 25$  с, продолжительность цикла работы дополнительной магнитной системы  $\tau_d = 2$  с. Образцами служили поршневые пальцы  $\varnothing 25$  мм из стали 12ХН3А, исходная твердость поверхностного слоя 58–62 HRC. Выходной показатель – твердость поверхностного слоя деталей. Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере ПМТ-3м. Результаты эксперимента приведены в табл. 4.8 и на рис. 4.54.

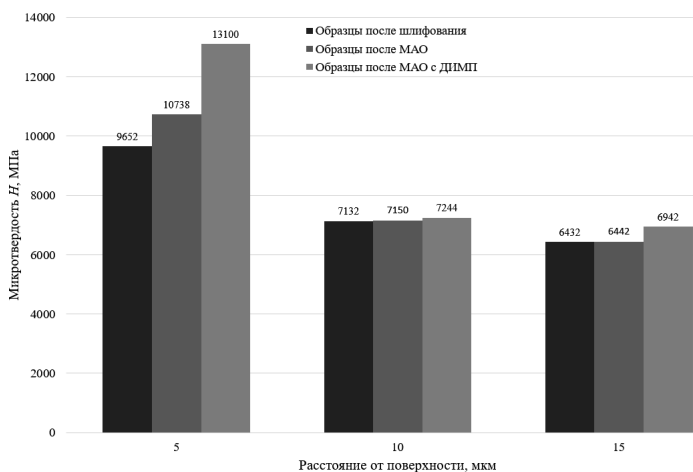


Рис. 4.54. Изменение микротвердости  $H$  на глубине от поверхности образцов

Анализ результатов изменения микротвердости показал, что после МАО с импульсным воздействием дополнительного магнитного поля микротвердость поверхностного слоя на глубине 5 мкм увеличивается в 1,35 раза по сравнению со шлифованной поверхностью и в 1,26 раза по сравнению с МАО. Это можно объяснить влиянием дополнительного импульсного магнитного поля (ДИМП) на структурные изменения в конструкционных материалах.

Таблица 4.8

Величина микротвердости после различных способов обработки

Вид обработки	Расстояние от поверхности, мкм	Микротвердость $H$ , МПа					
		в повторяющихся опытах					среднее значение
Шлифование	5	9650	9800	9630	9610	9570	9652
	10	7040	7240	7100	7200	7080	7132
	15	6480	6420	6400	6480	6380	6432
МАО	5	10710	10720	10740	10800	10720	10738
	10	7120	7220	7140	7210	7060	7150
	15	6450	6460	6380	6500	6420	6442
МАО+МИУ	5	12980	13140	13250	12950	13180	13100
	10	7250	7240	7230	7300	7200	7244
	15	7120	7100	6480	6910	7100	6942

Сравнивая разные способы финишной обработки, обеспечивающие одинаковую шероховатость поверхности, можно прогнозировать, что МАО и МАО с ДИМП обеспечивает повышение износостойкости.

На основании полученных результатов исследований разработан технологический процесс обработки наружных цилиндрических поверхностей деталей с регенерацией абразивной щетки и упрочнением поверхности.

Таким образом, синтез комбинированных способов упрочнения поверхностей деталей в магнитном поле, основанный на системной модели технологии и анализе известных способов обработки по обобщенным критериям совместимости, учитывает близость основных параметров кинематики процессов, а также подобие физико-химических механизмов совмещаемых способов нанесения покрытий, съема материала основы и модифицирования



поверхностного слоя. Процесс преобразования структуры поверхностного слоя или нанесения на поверхность материалов с другими свойствами происходит в результате протекания двух и более энергетических воздействий. Экспериментально установлено повышение производительности рассмотренных комбинированных способов упрочнения и отдельных показателей качества поверхностей, что объясняется проявлением синергетических эффектов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные технологии упрочняющей и финишной абразивной обработки поверхностей показывают широкие возможности использования энергии магнитного поля как по направленному формированию в поверхностном слое деталей состояния, требуемого по условиям эксплуатации, так и по формообразованию поверхностей с заданными свойствами при высокой производительности. Технология финишной МАО дополняет возможности технологии МЭУ по обеспечению качества поверхностного слоя деталей. При этом набор операций упрочняющей и финишной обработки обусловлен конкретными требованиями к обрабатываемой детали с учетом того, что параметры состояния поверхностного слоя, сформированные на предыдущей операции, являются для последующей операции такими же технологическими факторами, как и условия формообразования (магнитное воздействие, режимы резания, наличие технологической среды и т. п.).

Совершенствование технологий упрочняющей и финишной обработки деталей машин неразрывно связано с развитием представлений о закономерностях формообразования поверхностей при снятии припусков. Знание основных закономерностей процессов, имеющих место в зоне обработки, и принципов технологической наследственности позволяет при создании новых поверхностей формировать требуемое состояние поверхностных слоев деталей, обеспечивая тем самым их эксплуатационные свойства. Такие закономерности базируются на современных знаниях теории резания, поверхностной энергии твердого тела, упругой и пластической деформации, адгезионного и контактного взаимодействия материалов в зоне обработки. Известно, что поверхностную энергию металла понижает действие адсорбции, которая способствует зарождению пластических сдвигов и развитию дефектов при значительно меньших напряжениях. Высокой способностью к адсорбции при МАО обладают поверхностно-активные вещества (ПАВ). Поверхностные дефекты представляют собой микроскопические и субмикроскопические трещины и щели клиновидного сечения, в которых свободная поверхностная энергия может возрастать от нуля до максимального значения. Наличие микротрещин в поверхностном слое приводит к снижению прочностных характеристик изделия, существенно отличающихся от теоретических значений на поверхности тела.

Положительная роль микротрещин заключается в том, что проникшая в них ПАВ способствует снижению усилия деформаций. Физико-механические параметры и геометрические характеристики поверхностного слоя детали формируются в процессе MAO совместным действием абразивного резания, пластического деформирования микронеровностей, химических реакций активных веществ и электромагнитных явлений в зоне обработки.

Отличительной особенностью рассмотренных процессов МЭУ и MAO является то, что преобразование подводимой энергии осуществляется непосредственно в зоне обработки, а концентрация их потоков существенно интенсифицирует процессы тепло-массопереноса. Эта особенность является посылкой создания на базе процессов МЭУ и MAO комбинированных методов обработки. При этом следует учитывать, что взаимодействие технологических факторов, их пространственно-временная периодичность, определяющая свойства поверхностного слоя, характеризуется как неустойчивостью, так и стабилизацией.

Расширение степеней свободы потоков вещества и энергии в пределах технических ограничений приводит к самоорганизации процессов взаимо-действия технологических факторов, т. е. структуры упрочненных поверхностей и их геометрические характеристики являются диссипативными самоорганизующимися. Открытой производственной системой в процессах формирования поверхностей деталей можно управлять через взаимосвязанные граничные и начальные условия путем изменения положения и величины технологических барьеров. Целесообразно, чтобы структуры наследовались или реорганизовывались в новое состояние последовательно от операции к операции с использованием принципа суперпозиции, согласно которому каждый из технологических и эксплуатационных факторов действует независимо от других, а результат их совместного действия определяется суммой.

Управление процессами МЭУ и MAO, относящимися к нестационарным технологическим системам, направлено на повышение их устойчивости. Концепция управления базируется на поддержании оптимального диапазона режимов обработки, обеспечивающих диссипацию потоков энергии в процессах самоорганизации поверхностных явлений при воздействии магнитного поля. Комбинированные технологии упрочнения и обработки поверхностей деталей в магнитном поле, в силу их однородности, целесообразно реализовывать на одном оборудовании.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Организация технического сервиса в агропромышленном комплексе : учеб. пособие / В. П. Миклуш, А. С. Сайганов. – Минск : ИВЦ Минфина, 2014. – 607 с.

2. Лялякин, В. П. Восстановление и упрочнение деталей машин в агропромышленном комплексе России и Беларуси / В. П. Лялякин, В. П. Иванов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2004. – № 2. – С. 2–7.

3. Черноиванов, В. И. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы) / В. И. Черноиванов, И. Г. Голубев. – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.

4. Лялякин, В. П. Ресурсосберегающие технологии восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственных машин и оборудования / В. П. Лялякин // Технология машиностроения. – 2003. – № 3. – С. 33–38.

5. Сайфуллин, Р. Н. Технологии ремонта агрегатов сельскохозяйственной техники с использованием методов электроконтактной приварки порошковых материалов / Р. Н. Сайфуллин. – Уфа : Изд-во БашГАУ, 2009. – 40 с.

6. Технология ремонта машин / Е. А. Пучин [и др.] ; под ред. Е. А. Пучина. – М. : УМЦ «Триада», 2006. – 348 с.

7. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.] ; под общ. ред. М. Л. Хейфеца и С. А. Клименко. – Минск : Беларуская навука, 2013. – 463 с.

8. Научные основы упрочнения комплексным локальным деформированием / В. А. Голенков [и др.]. – М. : Машиностроение; Орел : Изд-во ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК, 2013. – 122 с. – Режим доступа: [http://elib.oreluniver.ru/media/attach/note/2013/nauchn\\_osn\\_uprochneniya.pdf](http://elib.oreluniver.ru/media/attach/note/2013/nauchn_osn_uprochneniya.pdf)

9. Зайдес, С. А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин / С. А. Зайдес // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова, 2018. – Т. 16. – № 3. – С. 129–137.

10. Финишная обработка поверхностей / С. А. Клименко [и др.] ; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск : Беларуская навука, 2017. – 377 с.

11. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : в 2 т. / Под ред. В. П. Смоленцева. – Т. 2. – М. : Высшая школа, 1983. – 208 с.

12. Смоленцев, Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. – М. : Машиностроение, 2005. – 511 с.

13. Umehara, N. Magnetic Fluid Grinding of Ceramic Rollers / N. Umehara, K. Kato, H. Nakano // *Electromagnetic Forces and Applications*, 1992. – P. 139–142.

14. Шульман, З. П. Магнитореологический эффект / З. П. Шульман, В. И. Кордонский. – Минск : Наука и техника, 1982. – 184 с.

15. Синькевич, Ю. В. Электроимпульсное полирование сплавов на основе железа, хрома и никеля / Ю. В. Синькевич [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – 324 с.

16. Савельев, И. В. Курс общей физики. Электричество и магнетизм / И. В. Савельев. – М., 2003. – 431 с.

17. Андреев, А. Д. Физика. Магнетизм : конспект лекций / А. Д. Андреев, Л. М. Черных; ГОУВПО СПбГУТ. – СПб., 2009. – 56 с.

18. Корицкий, Ю. В. Справочник по электротехническим материалам / Ю. В. Корицкий, В. В. Пасынкова, Б. М. Гареева. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.

19. Акулович, Л. М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л. М. Акулович. – Полоцк : ПГУ, 1999. – 240 с.

20. Подураев, В. Н. Технология физико-химических методов обработки В. Н. Подураев. – М. : Машиностроение, 1985. – 264 с.

21. Аверченков, В. И. Формализация методов технологического проектирования, обеспечивающих требуемое качество изделий / В. И. Аверченков // *Трение и износ*. – 1997. – Т. 18. – № 3. – С. 339–348.

22. Голоденко, Б. А. Организация целенаправленного формирования новых методов комбинированной обработки / Б. А. Голоденко, В. П. Смоленцев // *Вестник машиностроения*. – 1994. – № 4. – С. 25–28.

23. Акулович, Л. М. Самоорганизация процессов упрочняющей обработки / Л. М. Акулович, В. С. Ивашко, М. Л. Хейфец. – Минск : Народная книга, 2008. – 236 с.

24. Малыгин, Б. В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин / Б. В. Малыгин. – М. : Машиностроение, 1989. – 112 с.

25. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 3. – С. 77–82.

26. Использование постоянных магнитов в устройствах электромагнитной наплавки / Ж. А. Мрочек [и др.] // *Теория и практика машиностроения*. – 2004. – № 3. – С. 75–84.

27. Акулович, Л. М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л. М. Акулович, А. В. Миранович. – Минск : БГАТУ, 2016. – 236 с.

28. Акулович, Л. М. Управление обработкой поверхностей деталей машин в процессах магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки / Л. М. Акулович, А. В. Миранович, О. Н. Ворошухо // *Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*, 2016. – № 4. – С. 37–48.

29. Акулович, Л. М. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, В. Я. Лебедев. – Минск : БГАТУ, 2012. – 316 с.

30. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная обработка изделий и режущего инструмента / Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 176 с.

31. Иконников, А. М. Совершенствование технологии магнитно-абразивной обработки фасонных поверхностей : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / А. М. Иконников. – Барнаул, 2004. – 146 л.

32. Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 328 с.

33. Жданович, В. И. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / В. И. Жданович ; ФТИ АН БССР. – Минск, 1974. – 23 с.

34. Shinmura, T. Study on magnetic abrasive finishing / T. Shinmura [etc.] // *Annals of CIRP*. – 1990. – Vol. 39. – №. 1. – P. 325–328.

35. Люцко, В. А. Технология и установки магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей деталей машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Люцко ; ПГУ. – Новополоцк, 2004. – 24 с.

36. Электромагнитная наплавка плоских изношенных поверхностей деталей машин / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // *Ремонт, восстановление, модернизация*. – 2004. – № 1. – С. 2–6.

37. Горохова, М. Н. Повышение эффективности комбинированного способа восстановления деталей ферромагнитными порошками : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / М. Н. Горохова ; ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии. – М., 2013. – 32 с.

38. Иванов, Н. И. Интенсификация процесса ЭЭО постоянными и пульсирующими магнитными полями / Н. И. Иванов, В. В. Мартынов, Б. Н. Лукичев // Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов: сб. науч. трудов. – Тула : ТГТУ, 1991. – С. 94–100.

39. Invertec V270 (-S. -T pulse). Руководство по эксплуатации. – Cleveland, Ohio, 2005. – 23 с.

40. Яковлев, В. И. Классическая электродинамика : учеб. пособие / В. И. Яковлев. – Новосибирск : Новосиб. гос. ун-т, 2003. – Ч. 1. Электричество и магнетизм. – 267 с.

41. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособие для студентов вузов ; в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 2001. – Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. – 656 с.

42. Галанин, М. П. Квазистационарные электромагнитные поля в неоднородных средах : математическое моделирование / М. П. Галанин, Ю. П. Попов. – М. : Наука. Физматлит, 1995. – 320 с.

43. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. – М. : Гардарики, 2001. – 317 с.

44. Юдаев, Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача : учебник / Б. Н. Юдаев. – М. : Высшая школа, 1988. – 480 с.

45. Юнусбаев, Н. М. Восстановление автотракторных деталей электроконтактной приваркой порошковых материалов в магнитном поле : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. М. Юнусбаев ; ФГОУ БашГАУ. – Уфа, 2006. – 16 с.

46. Борисов, Ю.М. Электротехника : учеб. для вузов / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.

47. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.

48. Телегин, А. С. Тепломассоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. – М. : Металлургия, 1995. – 400 с.

49. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.

50. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1969. – 292 с.

51. Талантов, Н. В. Определение температуры контактных поверхностей инструментов с учетом объемности процесса тепловыделения / Н. В. Талантов, Т. В. Шитова // Теплофизика технологических процессов. – Куйбышев : КуПИ, 1970. – С. 16–22.

52. Ящерицын, П. И. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск: ФТИ, 1997. – 416 с.

53. Кожуро, Л. М. Обработка износостойких покрытий : учеб. пособие / Л. М. Кожуро [и др.] : под общей ред. Ж. А. Мрочека. – Минск : Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.

54. Дилигенский, Н. В. Асимптотические расчеты тепловых режимов технологических процессов механической обработки металлов и сварки: автореф. дис... докт. техн. наук: 01.04.14 / Н. В. Дилигенский. – Ин-т техн. теплофизики АН УССР. – Киев, 1973. – 41с.

55. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.

56. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва: Высшая школа, 1967. – 600 с.

57. Абрамов, В. И. Исследование технологического процесса упрочнения деталей ферропорошками в пульсирующем магнитном поле : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / В. И. Абрамов. – Минск, 1982. – 180 с.

58. Борисов, Б. П. Исследование и разработка процесса магнитоэлектрического упрочнения деталей машин в условиях фазового сдвига активирующих факторов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б. П. Борисов ; ФТИ АН БССР. – Минск, 1983. – 19 с.

59. Акулович, Л. М. Повышение качества покрытий при электромагнитной наплавке в постоянном магнитном поле / Л. М. Акулович, А. В. Миранович // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 58–65.

60. Акулович, Л. М. Повышение износостойкости поверхностей валов коробок перемены передач упрочнением и обработкой в электромагнитном поле / Л. М. Акулович, А. В. Миранович, О. Н. Ворошуха // Научное обозрение. – 2015. – № 4. – С. 151–163.



61. Юшин, А. А. Разработка критериев оценки сварочных свойств установок для дуговой сварки с управляемым каплепереносом : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Юшин ; МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2012. – 16 с.

62. Толстых, Л. Г. Инверторные источники питания для дуговой сварки / Л. Г. Толстых, А. Л. Толстых, А.А. Вопнерук // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2009. – № 9. – С. 29–31.

63. Солодский, С. А. Источники питания для дуговой сварки : учеб. пособие / С. А. Солодский, О. Г. Брунов, Д. П. Ильященко. – Томск : Изд-во Томского политех. ун-та, 2012. – 165 с.

64. Милютин, В. С. Источники питания для сварки : учеб. пособие / В. С. Милютин, М. П. Шалимов, С. М. Шанчуров. – М. : Изд-во Айрис Пресс, 2007. – 384 с.

65. Методы исследования материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л. И. Тушинский [и др.]. – М. : Мир, 2004. – 384 с.

66. Ланкин, Ю. Н. Показатели стабильности процесса дуговой сварки плавящимся электродом / Ю. Н. Ланкин // Автоматическая сварка. – 2011. – № 1. – С. 7–15.

67. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 2003. – 479 с.

68. Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 232 с.

69. Кингсеп, А. С. Основы физики. Курс общей физики : учебн. в 2 т. / А. С. Кингсеп, Г. Р. Локшин, О. А. Ольхов. – М. : Физматлит, 2001. – Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика. – 560 с.

70. Яковлев, В. И. Классическая электродинамика : учеб. пособие / В. И. Яковлев. – Новосибирск : Новосиб. гос. ун-т, 2003. – Электричество и магнетизм. – 267 с.

71. Электротехнический справочник : в 4 т. / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. – Т. 2. Электротехнические изделия и устройства. – 518 с.

72. Метрология и радиоизмерения : учебник для вузов / В. И. Нефедов [и др.] ; под ред. В. И. Нефедова. – 2-е изд., перераб. – М. : Высшая школа, 2006. – 526 с.

73. Постоянные магниты : справочник / А. Б. Альтман [и др.] ; под ред. Ю. М. Пятинина. – М. : Энергия, 1983. – 486 с.

74. Келин, Н. А. Методы и устройства для контроля магнитных свойств постоянных магнитов / Н. А. Келин. – М. : Энергоиздат, 1984. – 79 с.

75. Коген-Далин, В. В. Расчет и испытание систем с постоянными магнитами / В. В. Коген-Далин. – М. : Энергия, 1977. – 247 с.

76. Теплообмен: теория и практика / В. В. Карнаух [и др.] : М. : Инфа-Инженерия, 2021. – 332 с.

77. Лавров, В. В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / В. В. Лавров, Н. А. Спирин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – 2004. – 257 с.

78. Seber, George A. F. Linear Regression Analysis / George A. F. Seber, Alan J. Lee. – Hoboken, New Jersey: Wiley. – 2012. – 458 p.

79. Miller, Stephen H. Experimental design and statistics / Stephen H. Miller. – London : Routledge. – 2015. – 186 p.

80. Занга, К. Производительность и качество наплавки при коаксиальной подаче лазерного излучения и газопорошковой смеси (струи) / К. Занга и [др.] // Электронная обработка материалов. – 2015. – № 51(4). – С. 34–41.

81. Миранович, А. В. Технология упрочнения и восстановления деталей машин электромагнитной наплавкой в постоянном магнитном поле : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / А. В. Миранович. – Минск : БНТУ, 2015. – 163 с. (с. 55).

82. Современная прикладная теория управления: синергический подход в теории управления ; под ред. А. А. Колесникова. – Таганрог : Из-во ТРТУ, 2000. – 559 с.

83. Тушинский, Л. И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / Л. И. Тушинский, А. В. Плохов. – Новосибирск : Наука, 1986. – 196 с.

84. Механические испытания металлов и их неразъемных соединений : курс лекций / Л. Р. Дудецкая [и др.]. – Минск. : МИПК при БГПА, 2000. – 100 с.

85. Качанов, Н. Н. Рентгеноструктурный анализ. Практическое руководство / Н. Н. Качанов, Л. И. Миркин. – М. : Машгиз, 1980. – 214 с.

86. Акулович, Л. М. Исследование свойств покрытий, полученных наплавкой с использованием энергии постоянных магнитов / Л. М. Акулович, А. В. Миранович // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2009. – Вып. 24. – Т. 1. – С. 54–58.

87. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / В. Б. Альгин [и др.] ; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 109 с.

88. Технологическое управление наследованием эксплуатационных параметров качества деталей машин / М. Л. Хейфец [и др.] // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук, 2015. – № 3. – С. 10–22.

89. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении. Т. I. Стали и чугуны : учебное пособие / М. А. Филиппов [и др.]. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2013. – 231 с. – ISBN 978-5-7996-0928-3. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/66548.html> (дата обращения: 17.12.2021).

90. Порошковые магнитные материалы // под ред. И. Д. Радомысльского и Л. Н. Тучинского. – Киев : Наукова думка, 1984. – 142 с.

91. Крымский, М. Д. Влияние формы магнитно-абразивных зерен на их режущую способность / М. Д. Крымский // Порошковая металлургия. – 1983. – № 6. – С. 83–85.

92. 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.

93. Скворчевский, Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 215 с.

94. Ферроабразивные порошки для магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л. М. Акулович [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2015. – 284 с.

95. Чернавский, П. А. Новое в магнитных методах исследования металланесенных катализаторов / П. А. Чернавский // Российский химический журнал. – 2002. – Т. XLVI. – № 3. – С. 19–30.

96. Маслов, Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974. – 320 с.

97. Полосаткин, Г. Д. Исследование механизма образования микроцарапины на металлах в диапазоне скоростей от 0,02 до 120 м/с / Г. Д. Полосаткин, И. А. Соломеин // Склерометрия. – М. : Наука, 1976. – С. 238–245.

98. Рыжов, Э. В. Математические методы в технологических исследованиях / Э. В. Рыжов, О. А. Горленко. – Киев : Наукова думка, 1990. – 184 с.

99. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1988. – 272 с.

100. Богомолов, Н. И. О работе трения в абразивных процессах / Н. И. Богомолов // Труды ВНИИМАШ / – Л. : Машиностроение, 1965. – № 1. – С. 112–117.

101. Шаврин, О. И. Многокритериальный подход в технологии шлифования титановых сплавов / О. И. Шаврин, А. В. Репко. – Екатеринбург : Изд-во Ин-та экономики УРО РАН, 2007. – 199 с.

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

103. Акулович, Л. М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки поверхностей различного профиля / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2013. – 372 с.

104. Ящерицын, П. И. Теория резания / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн. – Минск : Новое знание, 2005. – 512 с.

105. Попов, С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко. – М. : Машиностроение, 1977. – 263 с.

106. Парселл, Э. Электричество и магнетизм / Э. Парселл. – М. : Наука, 1983. – 328 с.

107. Бинс, К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсен. – М. : Энергия, 1970. – 215 с.

108. Fushchych, W. I. О новых и старых симметриях уравнений Максвелла и Дирака / В. И. Фущич, А. Г. Никитин // Scientific Works. – 2000. – Vol. 2. – P. 233–278.

109. Андрушкевич, И. Е. Методы разделения переменных в волновых уравнениях / И. Е. Андрушкевич. – Новополоцк : ПГУ, 2010. – 239 с.

110. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А. В. Иванов-Смоленский [и др.] ; под ред. А. В. Иванова-Смоленского. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.

111. Jayswal, S. C. Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process / S. C. Jayswal, V. K. Jain, P. M. Dixit // Int. J. Adv. Manuf. Technology. – 2005. – № 26. – P. 477–490.

112. Ким, Дж. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 215 с.

113. Монтгомери, Д. К. Планирование эксперимента и анализа данных / Д. К. Монтгомери. – Л. : Судостроение, 1980. – 384 с.

114. Гайдышев, И. П. Моделирование стохастических и детерминированных систем : руководство пользователя программы AtteStat / И. П. Гайдышев. – Курган : КГУ, 2013. – 484 с.

115. 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.

116. Меледина, Т. В. Методы планирования и обработки результатов научных исследований / Т. В. Меледина, М. М. Данина. – СПб. : НИУ ИТМО ; ИХиБТ, 2015. – 110 с.

117. Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества : справочник / под ред. А. А. Абрамзона и Е. Д. Шукина. – Л. : Химия, 1984. – 392 с.

118. Скворчевский, Н. Я. Смазочно-охлаждающие жидкости для магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский // Технология машиностроения : науч.-техн. сб. Сер. 17. Вып. 124. – 1981. – С. 6–12.

119. Магнитно-абразивная обработка деталей машин : тез. докл. науч.-техн. конф. / спецред. Ф. Ю. Сакулевич, ред. А. С. Короткевич. – Минск : ЭППП БелНИИНТИ, 1979. – 55 с.

120. Бердичевский, Е. Г. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки материалов : справочник / Е. Г. Бердичевский. – М. : Машиностроение, 1984. – 224 с.

121. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение : справочное издание / под ред. В. М. Школьниковой. – М. : Машиностроение, 1989. – 432 с.

122. Гаркунов, Д. Н. Триботехника. / Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 1989. – 342 с.

123. Худобин, Л. В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием / Л. В. Худобин. – М. : Машиностроение, 2006. – 544 с.

124. Baron, Y. M. Characterization of the Magnetic Abrasive Finishing Method and Its Application to Deburring / Y. M. Baron, S. -L. Ko, J. I. Park // *Key Engineering Materials*. – 2005. – Vol. 291–292. – P. 291–296.

125. Хавин, Г. Л. Разрушение и изнашивание режущих кромок инструмента при механической обработке полимерных композиционных материалов / Г. Л. Хавин // *Вестник Нац. тех. ун-та «ХПИ»*. Серия : Технологии в машиностроении. – Х. : НТУ «ХПИ». – 2012. – № 53 (959). – С. 66–71.

126. Сакулевич, Ф. Ю. Объемная магнитно-абразивная обработка / Ф. Ю. Сакулевич, Л. М. Кожуро. – Минск : Наука и техника, 1978. – 168 с.

127. Сакулевич, Ф. Ю. Магнитно-абразивная обработка точных деталей / Ф. Ю. Сакулевич, Л. К. Минин, Л. А. Олендер. – Минск : Вышэйшая школа, 1977. – 287 с.

128. Ворошухо, О. Н. Технология магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей с управляемой ориентацией ферроабразивных зерен и регенерацией абразивной щетки импульсным магнитным полем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / О. Н. Ворошухо ; БНТУ. – Минск, 2019. – 27 с.

129. Благодарная, О. В. Технологическое обеспечение качества рабочих поверхностей швейных игл магнитно-абразивным полированием : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / О. В. Благодарная ; Белорусско-Российский университет. – Могилев, 2012. – 25 с.

130. Миронов, А. М. Повышение эффективности МАО зубчатых колес механическим уплотнением ферроабразивного порошка в рабочей зоне : автореф. ... дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / А. М. Миронов. – Минск, 2007. – 16 с.

131. Yin, S. Study of vibration-assisted magnetic abrasive finishing process (effects of vibration on cylindrical finishing characteristics and its mechanism) / S. Yin, T. Shinmura // *Annals of the JSME*. – 2002. – Vol. 67 (661). – P. 258–264.

132. Manna, A. Micro machining of nonconductive  $Al_2O_3$  ceramic on developed TW-ECSM setup / A. Manna, A. Kundal // *Dynamic Methods and Process Advancements in Mechanical, Manufacturing, and Materials Engineering*. – 2012. – P. 167–168.

133. Македонски, Б. Г. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса абразивной обработки с использованием пе-

ремещающегося магнитного поля : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.05 / Б. Г. Македонски ; Ленингр. политехн. ин-т им. М. И. Калинина. – Л., 1975. – 12 с.

134. 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.

135. Гридасова, Т. Я. Магнитно-абразивные материалы из расплавов и методика их испытаний / Т. Я. Гридасова [и др.] // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С. 45–59.

136. Буль, О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М. : Академия, 2005. – 336 с.

137. Федосов, С. А. Определение механических свойств материалов микроиндентированием: Современные зарубежные методики / С. А. Федосов, Л. Пешек. – М. : Физический факультет МГУ, 2004. – 100 с.

138. Шавва, М. А. Анализ взаимосвязи износа круга и сил резания при алмазном шлифовании / М. А. Шавва, С. В. Грубый // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. – 2014. – № 11. – С. 137–156.

139. Рыжов, Э. В. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Киев : Наукова думка. 1989. – 192 с.

140. Иванов, И. Е. Методы подбора физических процессов: учеб. пособие / И. Е. Иванов, В. Е. Ерещенко. – М. : МАДИ. 2015. – 144 с.

141. Кульгейко, М. П. Роль инверсионности способов магнитно-электрической обработки при создании технологических комплексов генерации поверхностей / М. П. Кульгейко, Г. В. Петришин, Н. М. Симанович // Вестник Белорусско-Российского ун-та. – 2020. – № 4 (69). – С. 21–30.

Научное издание

**Акулович** Леонид Михайлович,  
**Сергеев** Леонид Ефимович,  
**Миранович** Алексей Валерьевич и др.

УПРОЧНЯЮЩАЯ  
И ФИНИШНАЯ АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ДЕТАЛЕЙ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Ответственный за выпуск *И. С. Крук*  
Редактор *Г. В. Анисимова*  
Компьютерная верстка *Н. А. Тихонович*  
Дизайн обложки *А. А. Покало*

Подписано в печать 26.12.2022. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 20,92. Уч.-изд. л. 16,36. Тираж 100 экз. Заказ 796.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–1, 220023, Минск.