

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Л. М. Акулович, А. В. Миранович

**МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

Минск
БГАТУ
2016

Акулович, Л. М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л. М. Акулович, А. В. Миранович. – Минск : БГАТУ, 2016. – 236 с. : ил. – ISBN 978-985-519-817-9.

Приведены особенности технологии магнитно-электрического упрочнения поверхностей деталей, подверженных абразивному изнашиванию. Описан механизм формирования покрытий и упрочнения поверхностного слоя при совместных интенсивных воздействиях концентрированными потоками энергии магнитного поля и электрических разрядов. Показаны влияние в рабочем зазоре суперпозиции импульсов электрических разрядов и магнитного поля на стабилизацию процесса упрочнения, а также зависимость износостойкости покрытий от технологических параметров. Предлагается методика определения конструктивных параметров магнитной системы для устройств магнитно-электрического упрочнения.

Для научно-технических работников, занимающихся разработкой технологий упрочняющей обработки поверхностей деталей машин. Будет полезна студентам, аспирантам и магистрантам машиностроительных специальностей учреждений высшего образования.

Табл. 26. Ил. 77. Библиогр.: 186 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом Учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (протокол № 1 от 25 февраля 2016 г.)

Рецензенты:

заведующий НИИЛ «Лазерных и плазменных технологий»
НИЧ Белорусского национального технического университета,
доктор технических наук, профессор *О. Г. Девойно*;
ведущий научный сотрудник НИИ МЭСХ
Белорусского государственного аграрного технического университета,
кандидат технических наук, доцент *Г. Ф. Бетенья*

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. СПОСОБЫ И ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	10
1.1. Технологии нанесения материалов покрытий.....	10
1.2. Специальные способы упрочнения и восстановления поверхностей деталей.....	15
1.3. Использование энергии электромагнитного поля в процессах упрочнения и восстановления металлических поверхностей.....	18
1.4. Способы магнитно-электрического упрочнения.....	23
1.5. Источники тока и виды магнитных систем в устройствах магнитно-электрического упрочнения.....	35
1.6. Направления совершенствования технологии магнитно-электрического упрочнения.....	48
2. ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ.....	52
2.1. Физические основы нанесения покрытий при магнитно-электрическом упрочнении.....	52
2.1.1. Формирование рельефа поверхности в процессе магнитно-электрического упрочнения.....	52
2.1.2. Кинетика частиц ферромагнитного порошка.....	55
2.1.3. Тепловые процессы в рабочей зоне при воздействии энергии электромагнитного поля.....	70
2.1.4. Модели тепловых процессов в поверхностном слое упрочняемой детали.....	73
2.2. Влияние вида источника технологического тока на стабильность процесса магнитно- электрического упрочнения.....	78

2.3. Влияния внешнего магнитного поля на формирование в рабочем зазоре цепочек-микроэлектродов из частиц ферромагнитного порошка.....	86
2.3.1. Теоретические исследования влияния внешнего магнитного поля на формирование цепочек-микроэлектродов из частиц ферромагнитного порошка в рабочем зазоре.....	86
2.3.2. Экспериментальные исследования процесса магнитно-электрического упрочнения.....	99
2.4. Исследования магнитной системы из постоянных магнитов.....	107
2.4.1. Выбор материала для постоянных магнитов.....	108
2.4.2. Расчет параметров магнитной системы.....	109
2.4.3. Оптимизация конструктивных параметров магнитной системы.....	114
2.4.4. Определение вида конфигурации магнитопровода.....	116
2.5. Экспериментальное исследование стабильности характеристик постоянного магнитного поля.....	122
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	129
3.1. Моделирование процесса магнитно-электрического упрочнения.....	129
3.2. Влияние технологических факторов на параметры оптимизации.....	133
3.3. Оптимизация технологических режимов магнитно-электрического упрочнения.....	137
4. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ.....	140
4.1. Оборудование и материалы, применяемые для нанесения покрытий.....	140
4.2. Исследование физико-механических свойств покрытий.....	142
4.2.1. Методики проведения исследований физико-механических свойств покрытий.....	142

4.3. Микроструктура, фазовый состав и свойства покрытий.....	148
4.3.1. Микроструктура покрытий.....	148
4.3.2. Тонкие исследования покрытий.....	153
4.3.2.1. Рентгенофазовый анализ.....	153
4.3.2.2. Рентгеноструктурный анализ.....	154
4.3.3. Микрорентгеноспектральный анализ покрытий.....	155
4.3.4. Микротвердость поверхностного слоя.....	158
4.3.5. Сплошность, пористость и разнотолщинность покрытий, трещинообразование.....	160
4.4. Износостойкость упрочненных поверхностей.....	168
4.4.1. Методика проведения исследования износостойкости покрытий.....	170
4.4.2. Износостойкость покрытий в условиях трения скольжения.....	176
4.4.3. Износостойкость покрытий в условиях трения качения с проскальзыванием.....	179
4.5. Остаточные напряжения в упрочненном поверхностном слое.....	189
5. ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ.....	211
5.1. Технологический процесс магнитно-электрического упрочнения.....	212
5.2. Перспективы развития технологии магнитно-электрического упрочнения и восстановления цилиндрических поверхностей деталей.....	216
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	218
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	220

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИП	– источник питания;
ИТТ	– источник технологического тока;
МАО	– магнитно-абразивная обработка;
МП	– магнитное поле;
МРСА	– микрорентгеноспектральный анализ;
МС	– магнитная система;
МЭУ	– магнитно-электрическое упрочнение;
ОКР	– область когерентного рассеяния;
ППД	– поверхностное пластическое деформирование;
ПМ	– постоянный магнит;
ПН	– полюсный наконечник;
ПЭ	– процесс энергетического воздействия;
РЖ	– рабочая жидкость;
РЗ	– рабочий зазор;
СВС	– самораспространяющийся высокотемпературный синтез;
СОЖ	– смазочно-охлаждающая жидкость;
ТВЧ	– ток высокой частоты;
ФМП	– композиционный ферромагнитный порошок;
ФФУ	– функция физического уширения;
ЦКОП	– центральный композиционный ортогональный план;
ЦКРУП	– центральный композиционный ротатабельный униформ-план;
ЭМ	– электрический магнит;
ЭМК	– электромагнитная катушка;
ЭМО	– электромеханическая обработка;
ЭМП	– электромагнитное поле;
ЭМС	– электромагнитная система.

ВВЕДЕНИЕ

Основными причинами потери работоспособности узлов и механизмов сельскохозяйственной техники являются изнашивание и усталостные поломки деталей, их разрушение вследствие ползучести, коррозия, эрозия в различных средах, кавитационное разрушение и всевозможные сочетания этих причин [1, 2]. Свыше 80 % отказов обусловлено процессами изнашивания или комплексными причинами, в которых изнашивание играет доминирующую роль [3, 4].

Износы вышедших из строя различных групп деталей машин, используемых на транспорте, в производстве и в сельском хозяйстве, достигают значительных величин, однако около 90 % деталей имеют износ не более 0,6 мм [4, 5], в том числе до 0,1 мм – 52 %, до 0,2 мм – 12 %, до 0,3 мм – 10 %, до 0,4 мм – 7 %, до 0,5 мм – 5 % и до 0,6 мм – 3 %.

Износ деталей различных групп по элементам составляет [5]: 52 % – цилиндрические поверхности; 3 % – конические и сферические; 1 % – плоские; 1 % – профильные и фасонные; 2 % – зубья и шестерни; 3 % – шлицы; 5 % – пазы и лыски; 10 % – резьбы. Причем 13 % поверхностей имеют нарушение макрогеометрии и формы; трещины и изломы обнаружены у 9 % деталей.

Из приведенных данных следует, что наиболее часто встречаемая причина выхода из строя узлов и механизмов – износ цилиндрических поверхностей деталей до 0,6 мм, причем более 50 % этих деталей имеют износ до 0,1 мм.

Поступающие в ремонт машины содержат до 45 % деталей, пригодных для дальнейшего их использования, и около 50 %, которые могут быть восстановлены, и только 5–9 % подлежат выбраковке [1, 3, 4].

Известно [3, 5], что в процессе ремонта техники детали с изношенными поверхностями достаточно часто заменяются новыми, что приводит к увеличению себестоимости ремонта. При этом стоимость запасных частей в структуре затрат на ремонт составляет более 50 % [6].

Следует отметить, что экономическая целесообразность восстановления изношенных рабочих поверхностей деталей обусловлена их повторным использованием, в результате которого экономия может достигать 30–35 % от общей стоимости ремонта [5, 6]. Себестоимость восстановления большинства деталей составляет 30–50 % и, как правило, не превышает 60–70 % прейскурантных цен новых деталей, а расход металла по сравнению с изготовлением

в 20–30 раз ниже [3, 7]. Ресурс восстановленных деталей с использованием упрочняющих технологий увеличивается в 1,2–2,5 раза. При нанесении упрочняющих покрытий на новые детали машин несколько увеличивается стоимость изделий, однако существенно снижаются расходы на ремонтные работы [5, 7].

Зарубежный опыт упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственной и автотракторной техники также обосновывает экономическую целесообразность вторичного использования запасных частей [5]. Так, на специализированном предприятии фирмы «International Harvester» восстанавливают изношенные детали двигателей, водяных насосов, сцеплений. Стоимость восстановления коленчатых валов, валов приводных, осей, муфт и других деталей автотракторной техники составляет 20–25 % стоимости изготовления, а ресурс составляет 100 % нового. На специализированном участке фирмы «Caterpillar» восстанавливают наплавкой детали ходовой части гусеничных тракторов, полотна гусениц. На заводе фирмы «London Transport Chiswick» восстанавливают изношенные детали двигателей, коробок передач, задних мостов грузовых автомобилей и автобусов. Себестоимость восстановления деталей составляет 50–70 % цены новых, а ресурс составляет 80–90 %. Наиболее востребованными на вторичном рынке использования запасных частей являются крупные узлы, агрегаты и их детали: двигатели, турбины, гидropневмоагрегаты, коленчатые валы, валы карданных передач, коробки передач и др. [5, 6, 8].

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что упрочнение новых и восстановление изношенных деталей на предприятиях ремонтного производства является актуальной задачей. В первую очередь это относится к крупногабаритным деталям сложной сельскохозяйственной техники, крупнотоннажных автомобилей и энергонасыщенных тракторов, например, валов коробок перемены передач тракторов К-700А, К-701, К-744, «Беларус-1522», «Беларус-2522», автомобилей КамАЗ, МАЗ и плоских деталей почвообрабатывающих агрегатов (диски сошников сеялок СЗП, СПУ и др.).

Разнообразие условий работы машин и видов изнашивания деталей обусловило появление множества способов восстановления и упрочнения изношенных поверхностей, каждый из которых имеет свою рациональную область применения и не может претендовать на универсальность.

Одним из прогрессивных способов является магнитно-электрическое упрочнение композиционными ферромагнитными

порошками, который обладает такими достоинствами, как отсутствие специальной предварительной подготовки поверхности детали, незначительная зона термического влияния и высокая прочность сцепления покрытия с основным материалом детали. Это обусловило целесообразность применения МЭУ для упрочнения и восстановления пустотелых и нежестких деталей, а также отдельных рабочих цилиндрических поверхностей деталей сельскохозяйственной техники.

В монографии приведены результаты исследований технологии упрочнения и восстановления наружных цилиндрических поверхностей деталей МЭУ в постоянном магнитном поле, выполненных в течение последних 5 лет в Белорусском государственном аграрном техническом университете под научным руководством авторов.

Участие авторов в написании монографии: Л. М. Акулович – введение, заключение, структура и общее редактирование, главы 2, 5; А. В. Миранович – главы 1, 3, 4.

Авторы выражают благодарность научным сотрудникам лабораторий, аспирантам и магистрантам БГАТУ, принимавшим участие в проведении экспериментальных исследований.

Авторы считают своим долгом выразить признательность доктору технических наук, профессору О. Г. Девойно и кандидату технических наук, доценту Г. Ф. Бетене за рецензирование рукописи и полезные замечания, которые способствовали улучшению качества монографии.

1. СПОСОБЫ И ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В ремонтном производстве получили распространение технологии нанесения материалов покрытий, обеспечивающие восстановление или улучшение свойств поверхностных слоев изношенных деталей, и специальные способы упрочнения поверхностей деталей посредством образования износостойких слоев или пластического деформирования материала [4, 6, 8, 9].

1.1. Технологии нанесения материалов покрытий

Системная модель технологии восстановления и упрочнения в общем виде может быть представлена сочетанием входных потоков вещества, энергии, информации, а способ обработки – в виде подсистем: энергетической и информационной. Первая доставляет и преобразует энергию, необходимую для воздействия на материал заготовки с целью изменения его физико-механических свойств. 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 энергетического воздействия 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 обрабатываемую поверхность. На третьем этапе энергия воздействия приводит к образованию физико-химических механизмов $M_{\text{ф.х}}$ обработки заготовки, являющихся главным элементом формирования параметров процесса обработки (производительность, энергозатраты, качество поверхности и т. п.):

$$ПЭ = \{ \mathcal{E}_{\text{раб}} \Rightarrow \mathcal{E}_{\text{возд}} \Rightarrow M_{\text{ф.х}} \}. \quad (1)$$

Подводимая $\mathcal{E}_{\text{раб}}$ характеризуется составляющими: способом подвода энергии в пространстве $R_{\text{с.п.э.}}$, видом распределения энергии во времени $R_{\text{р.э.}}$, кинематикой движений $R_{\text{к.}}$:

$$\mathcal{E}_{\text{раб}} = \{ R_{\text{с.п.э.}}, R_{\text{р.э.}}, R_{\text{к}} \}. \quad (2)$$

Признаки для $R_{\text{с.п.э.}}$ – 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.

Для упрочнения и восстановления деталей машин наибольшее применение получили наплавка и напыление из-за универсальности и гибкости процессов [3, 10, 11].

Наплавка применяется для восстановления деталей машин и создания на поверхности детали слоя, обладающего высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью и другими свойствами [7, 8, 12]. Существенными недостатками способов наплавки являются термическое воздействие на основной металл, в том числе на невосстанавливаемые поверхности, деформации деталей, значительные припуски на механическую обработку, невозможность нанесения покрытий на поверхность тонкостенных и пустотелых деталей [4, 12]. Основными используемыми в настоящее время технологиями являются: газовая наплавка, вибродуговая наплавка, наплавка под слоем флюса, плазменная наплавка порошковых материалов, электроконтактная приварка металлического слоя, индукционная наплавка [3, 6, 8].

Для восстановления малогабаритных деталей с локальным износом (вилки шестерен коробок передач, детали газораспределительного механизма) и упрочнения деталей почвообрабатывающих машин (дисковые ножи, диски сеялок и луцильников, лапы культиваторов) применяется газовая наплавка [6, 12, 13]. В данном процессе источником нагрева является ацетилено-кислородное пламя, в качестве присадочного материала используются прутки или порошки износостойких сплавов. Преимущества газовой наплавки – простота и доступность оборудования и технологии; возможность получения наплавленного металла практически любой системы легирования; незначительное проплавление основного металла и минимальное перемешивание основы с наплавленным присадочным материалом (около 8–10 %) [6, 13]. Недостатки способа – низкая производительность; непостоянство качества наплавленного металла, зависящее от квалификации рабочего.

Вибродуговая наплавка применяется для нанесения слоев толщиной 0,5–3,0 мм на наружных и внутренних поверхностях цилиндрических деталей [6, 8, 9]. Процесс наплавки осуществляется при вибрации электрода с подачей охлаждающей жидкости на наплавленную поверхность. Технология отличается простотой реализации и эксплуатации установок. Недостатки – разбрызгивание электродного материала и его повышенный расход; значительное термическое воздействие на деталь; повышенная вероятность возникновения в покрытиях раковин, пор, трещин [6, 9].

Восстановление деталей ходовой части тракторов, сельскохозяйственных машин осуществляется наплавкой под слоем флюса [7, 8, 14]. В данном процессе наплавочными материалами являются проволоки, ленты различного состава, и возможна подача присадочного материала в зону наплавки [6, 14]. Технология характеризуется большой производительностью процесса и простотой оборудования; возможностью управления составом и свойствами наплавленного покрытия дополнительным легированием; способностью получения толщины покрытия 0,8–10,0 мм. Недостатки – значительное перемешивание основного и присадочного металлов; повышенный нагрев детали; невозможность наплавки на детали диаметром менее 55 мм; необходимость удаления шлаковой корки [6, 7].

Для нанесения покрытий на изношенные поверхности ответственных деталей (коленчатые валы, валы турбокомпрессоров, штоки гидроцилиндров, пробки молочных кранов) и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин (диски ножей, лапы культиваторов, плоскорезы) применяется плазменная и газопламенная наплавка [15–18]. В качестве материалов для наплавки таких деталей используются порошки сплавов на железной основе и самофлюсующиеся сплавы на никелевой основе. Технология отличается малым проплавлением основы и высоким качеством наплавленного металла; возможностью наплавки тонких слоев с применением различных присадочных материалов [17]. Достоинства – универсальность оборудования; возможность нанесения покрытий из металлов, сплавов, оксидов, карбидов и их сочетаний; отсутствие процесса окисления напыляемого материала и основы; более высокая прочность сцепления с основой и пониженная пористость покрытий по сравнению с покрытиями, полученными другими спосо-

бами напыления. Недостатки – дорогостоящие специальные источники энергии; возможность использования установок только в стационарных условиях [15, 17].

Известна технология наплавки на рабочие органы сельскохозяйственных машин и изношенные поверхности деталей автотракторной техники с использованием электроконтактного нагрева [3, 13, 19]. При электроконтактной приварке в качестве присадочного материала применяются порошки, проволоки и ленты [5, 19, 20]. В зависимости от износа детали толщину привариваемого слоя можно регулировать в пределах 0,1–0,5 мм, что позволяет сократить припуски и снизить трудоемкость последующей обработки [6, 7]. Преимущества технологии – отсутствие проплавления основного металла; минимальные деформации наплавленных деталей; закалка слоя непосредственно в процессе приварки; отсутствие выгорания легирующих элементов; уменьшение расхода металла по сравнению с наплавкой в 3–4 раза [3, 18, 20]. Недостатки – низкие производительность процесса и качество наплавленного слоя; отсутствие серийного производства оборудования [13].

Для упрочнения тонких плоских деталей сельскохозяйственной техники применяется индукционный способ наплавки [6, 10, 14]. При индукционной наплавке смеси порошка износостойкого сплава и флюса толщина покрытия составляет 1,0–2,0 мм. Преимущества – высокая производительность; возможность наплавки тонких слоев; отсутствие выгорания углерода и легирующих элементов; возможность механизации и автоматизации процесса. Недостатки – высокая стоимость оборудования; перегрев основного металла; присадочный материал должен быть более легкоплавким, чем основной [6, 13].

Погружение в расплавленный металл (намораживание) применяется для восстановления и упрочнения деталей рабочих органов сельскохозяйственной и дорожной техники [21]. Основными недостатками процесса являются большая энергоемкость оборудования и невозможность нанесения износостойких покрытий из тугоплавких материалов.

Напыление применяется для повышения износостойкости, коррозионной стойкости, жаропрочности или восстановления изношенных деталей. В процессе напыления на поверхности изделия

формируются покрытия из нагретых до температуры плавления частиц присадочного материала в результате воздействия теплоты сжигания горючей смеси или дугового разряда. В качестве присадочного материала используются металлы, сплавы, неметаллические материалы, композиционные смеси, проволока [15, 22]. Большинство способов напыления имеют высокую производительность, минимальное температурное воздействие на материал основы и позволяют точно регулировать толщину покрытия и припуск на механическую обработку [10, 15, 18].

Основными недостатками являются расход дорогостоящих газов; невысокая сцепляемость покрытия с основой; невозможность нанесения тугоплавких материалов; интенсивные окислительные процессы [15]. Тем не менее, в последнее время для восстановления коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания транспортных средств и повышения долговечности узлов трения различного технологического оборудования применяется газопламенное нанесение проволочных и порошковых материалов на обрабатываемые поверхности с активизирующим воздействием на газопламенный факел. Технология позволяет повысить прочность сцепления покрытий на отрыв до 40–50 МПа, достичь значений плотности покрытий более 90 %, обеспечить пористость покрытий в пределах 5–7 % [18].

Наиболее распространенными технологиями в ремонтном производстве являются электродуговая металлизация и плазменное напыление [6, 13, 18]. Электродуговая металлизация применяется для восстановления стыковых плоскостей головок цилиндров и коленчатых валов двигателей, для нанесения антифрикционных покрытий, для защиты от коррозии рабочих органов машин для внесения удобрений и гербицидов, машин для кормопроизводства. Технология отличается высокой производительностью по массе наносимого материала (до 25 кг/ч) и площади покрываемой поверхности; простотой оборудования и технологии; возможностью нанесения покрытий на поверхности деталей из различных материалов [4, 12]. Недостатки – невысокое качество покрытий (большая пористость, пониженная прочность сцепления покрытий); выгорание легирующих элементов в электрической дуге в присутствии кислорода [12, 14].

1.2. Специальные способы упрочнения и восстановления поверхностей деталей

Для упрочнения рабочих органов сельскохозяйственной техники (лемеха культиваторов, зубья борон) и получения материалов с высокой коррозионной стойкостью используется способ плакирования взрывом [10–12]. Он обеспечивает образование прочной металлической связи материалов покрытия и основы в результате протекания процесса с высокой скоростью, не требует применения дорогостоящего и сложного оборудования. Недостатки – высокая энергоемкость процесса и большая длительность подготовительных операций [13, 15].

При наплавке самораспространяющимся высокотемпературным синтезом образуются композиционные износостойкие покрытия, включающие карбиды тугоплавких металлов, в результате чего обеспечивается прочное соединение наносимого покрытия с основой [3, 9, 15]. Недостатками способа СВС являются необходимость подбора материалов для образования в результате реакции вещества, обладающего большой энергией активации; низкая производительность процесса нанесения покрытий; сложное и дорогостоящее оборудование [10, 12].

Наплавка пропиткой обеспечивает получение композиционного покрытия посредством нагрева заготовки в печи до температуры, превышающей температуру плавления металлокерамического твердого сплава или литого карбида вольфрама [1, 9, 11]. Способ применяется с целью уменьшения пористости покрытий и придания им антифрикционных свойств. Недостатки – высокие энергоемкость и стоимость оборудования.

Электроискровая обработка применяется для упрочнения поверхностного слоя металла посредством нанесения тонкого слоя композиционного материала толщиной до 0,3 мм со свойствами, близкими к свойствам материала электрода [23, 24]. Преимущества электроискровой обработки – отсутствие нагрева детали в процессе обработки; высокая прочность сцепления нанесенного материала с основой; возможность локальной обработки поверхности; отсутствие необходимости специальной предварительной подготовки детали [23, 25]. Недостатки – повышенная шероховатость покрытий;

разнотолщинность формируемого слоя; сложность получения покрытий из неэлектродных материалов; необходимость применения компактных электродов [24, 26, 27].

Лазерная технология получения покрытий заключается в образовании на поверхности изделия защитных оболочек при нагреве лучом лазера, как с расплавлением присадочного и поверхностного слоев материала, так и за счет структурных изменений поверхности металла [6, 15, 28]. Способ позволяет в широких пределах изменять свойства поверхности изделий [29, 30]. Недостатками способа являются невысокая производительность и большая стоимость оборудования [6, 7].

Для улучшения физико-механических свойств изделий применяется термическая обработка [31]. Химико-термическая обработка применяется для повышения эксплуатационных свойств поверхностного слоя деталей за счет увеличения твердости. В процессе химико-термической обработки происходит модифицирование состава поверхностного слоя изделия на глубину до 0,3–2,0 мм. Недостатки – большая длительность и энергоемкость процесса; значительное термическое воздействие на материал; экологически небезопасный технологический процесс [30, 31].

Термическая обработка изделий в магнитном поле, основанная на использовании энергии внешнего магнитного поля (постоянного, переменного или импульсного), позволяет повысить статическую прочность, износостойкость, предел выносливости деталей машин в 1,2–1,5 раза [32]. Это обусловлено положительным влиянием термической обработки на процессы структурных и субструктурных изменений при фазовых переходах под воздействием внешнего магнитного поля. Недостаток способа – необходимость применения специального технологического оборудования, оснастки и контрольно-управляющей аппаратуры [32].

Упрочнение материала при его поверхностном пластическом деформировании основано на преднамеренном искажении кристаллической решетки металла в результате механического воздействия [33]. Обработка рабочих поверхностей деталей статическими способами ППД (обкатыванием, раскатыванием, дорнованием, выглаживанием и др.) позволяет увеличить долговечность резьбы на валах и гайках на 35–40 % и повысить предел усталости зубьев

звездочек не менее чем на 40 %. Динамические способы ППД (обработка дробью или специальными инструментами и др.) применяются для упрочнения пружин, рессор, винтов [3].

Для повышения результата упрочнения деталей используется комбинированная обработка, основанная на сочетании различных способов ППД с термическими, химическими или электрофизическими воздействиями [34, 35]. Так, для упрочнения наружных и внутренних цилиндрических поверхностей валов, резьб, шлицев, шпоночных пазов, зубьев звездочек и шестерен применяется электромеханическая обработка поверхностей деталей [35–37].

При электромеханической обработке в результате одновременного термического и силового воздействий электрического тока и деформирующего электрода-инструмента, а также интенсивного охлаждения металла образуется мелкая, однородная и плотная структура обрабатываемой поверхности со значительным повышением твердости и появлением «белого слоя» – бесструктурного мартенсита [38].

Комбинированное упрочнение нанесением покрытий и ППД позволяет повысить на 10–50 % микротвердость основы, снизить в 2–8 раз шероховатость поверхности и снизить припуск на последующую механическую обработку, сформировать сжимающие остаточные напряжения. Известен способ, сочетающий нанесение многослойных композиций электроэрозионным методом с алмазным выглаживанием (вибровыглаживанием), который обеспечивает параметр шероховатости $Ra = 0,1–0,4$ мкм, увеличивает ресурс работы сопряжений более чем в 3 раза [34].

В последнее время получил распространение комбинированный способ упрочнения ППД цилиндрических деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин в переменном электромагнитном поле [39–41]. Обработкой деталей типа тел вращения данным способом с напряженностью электромагнитного поля (ЭМП) 0,2–5,0 кА/м и усилием накатного устройства 1,0–5,0 кН обеспечивается снижение растягивающих напряжений, повышение твердости до 40–60 % на глубину упрочнения до 4,5 мм. При этом повышается износостойкость обработанной поверхности до 45–60 % [39].

1.3. Использование энергии электромагнитного поля в процессах упрочнения и восстановления металлических поверхностей

Большими потенциальными возможностями обладают технологии, основанные на использовании концентрированных потоков энергии, что практически исключает коробление деталей, вызванное температурными деформациями. Магнитно-электрическое упрочнение по сравнению с аналогами имеет ряд достоинств: не требуется специальной подготовки поверхности детали перед упрочнением; применяется простое в обслуживании металлообрабатывающее оборудование; легко поддается автоматизации, поскольку электрические и магнитные потоки энергии просты в реализации и удобны в управлении.

Известно [6, 8], что от общего количества используемых в ремонтно-обслуживающем производстве способов упрочнения и восстановления деталей 75–80 % занимают сварочно-наплавочные. Их основным недостатком является возникновение на стадии кристаллизации жидкого металла дефектов сварных швов (непровары, трещины) и наплавленных покрытий (поры, микротрещины, разнотолщинность и др.). Для стабилизации горения дуги и исключения этих дефектов применяются такие технологические приемы, как регулирование погонной энергии, вибрация электрода или сварочной проволоки и др. [6, 7]. В некоторых случаях они не приемлемы из-за многочисленных конструктивных недостатков и сложности их практического применения.

Наиболее распространенный способ стабилизации процессов сварки-наплавки основан на управляющем воздействии внешнего электромагнитного поля на источник нагрева – дугу, ванну расплава или покрытие [40]. Этот способ используется в процессах: дуговой сварки-наплавки плавящимся и неплавящимся электродами в среде защитных газов [42] и под слоем флюса [43]; индукционной наплавки [44]; плазменном напылении [45]; закалки сжатой электрической дугой [46]; электроконтактной приварки порошков [47]; электроискровом легировании [48]; электроэрозионной обработке [49]; комбинированного способа восстановления деталей [41].

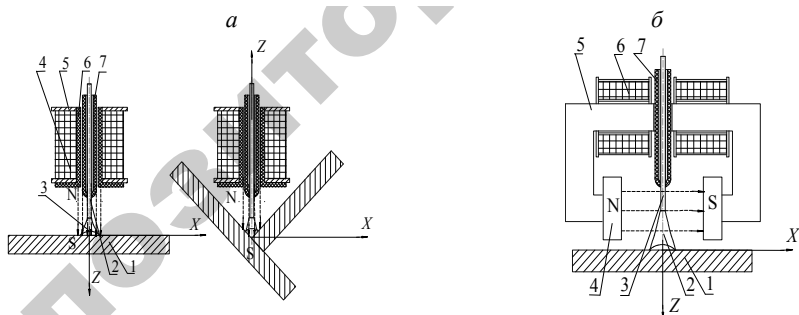
В работе [43] показано, что при сварке неплавящимся электродом сплава Д16 в среде защитных газов дугой, колеблющейся синхронно с изменением напряженности магнитного поля, изменяется форма сварочной ванны, снижается пористость металла, измельчается зерно металла шва. Выявлено, что при сварке плавящимся и неплавящимся

электродами в среде аргона проплавливающая способность дуги возрастает из-за ее сжатия, когда поперечная составляющая индукции меньше 2–4 % общей индукции управляющего МП. Если поперечная составляющая поля менее 3 % общей индукции, глубина проплавления возрастает пропорционально ей и при индукции 0,3 Тл увеличивается более чем в 2 раза.

Для стабилизации горения дуги при сварке под слоем флюса в работе [43] предложено использовать сильные продольные знакопеременные магнитные поля промышленной частоты. Применение постоянного магнитного поля невозможно из-за перемещения ванны расплава в одну сторону и образования сварочного валика с гребнями и подрезами.

При сварке (наплавке) низкоуглеродистых сталей током обратной полярности сварочной проволокой Св-08ГА диаметром 2 мм под слоем флюса АН-348А в результате регулирования частоты и величины индукции поперечного или продольного переменного МП (рисунок 1.1 *а, б*) изменяется ширина валика, уменьшаются пористость и трещинообразование на поверхности металла [43].

Для устранения неравномерности распределения электромагнитного поля и мощности в зоне наплавки тонких стальных дисков зубчатой формы авторами предложено экранирование ЭМП, создаваемого одновитковым индуктором с магнитопроводом (рисунок 1.2 *а*) [44].



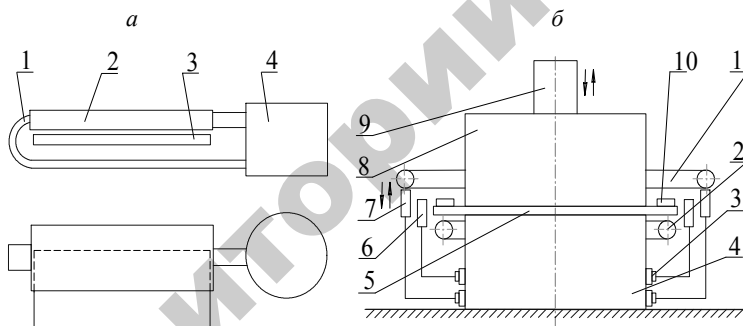
а – схема подвода продольного магнитного поля: 1 – изделие; 2 – сварочная проволока; 3 – дуга; 4 – обмотка электромагнита; 5 – корпус; 6 – сердечник; 7 – мундштук; *б* – схема подвода поперечного магнитного поля: 1 – изделие; 2 – дуга; 3 – наплавочная проволока; 4 – полюсный наконечник; 5 – магнитопровод; 6 – обмотка электромагнита; 7 – мундштук

Рисунок 1.1. – Схемы конструкций устройств подвода внешнего магнитного поля в рабочую зону при сварке-наплавке под слоем флюса

Для этого разработано устройство с электромагнитным и тепловым экранами (рисунок 1.2, б), позволяющее регулировать мощность в зоне наплавки и обеспечивающее равномерность толщины наплавленного слоя [13, 44].

В работе [45] повышение энергоэффективности плазменного напыления и качества покрытий обеспечивается дополнительным источником напряженности импульсного электрического поля. Образованный на поверхности детали распределенный электрический потенциал относительно плазматрона позволяет создать равномерное по всей площади покрытие с высокой адгезией, а также снизить потребляемую оборудованием мощность в 3,5 раза.

Для повышения твердости и износостойкости промышленного инструментария применяется ВЧ-плазменное напыление, в процессе которого происходит индукционный разогрев плазмы электромагнитным полем высокой частоты [15].

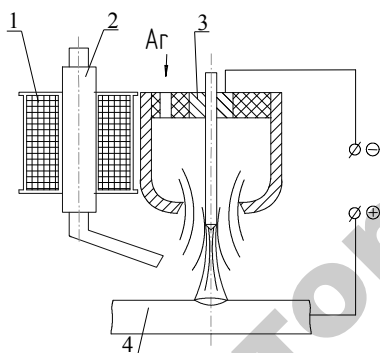


- а** – схема индуктора с магнитопроводом: 1 – петля индуктора;
 2 – магнитопровод; 3 – деталь; 4 – высокочастотный генератор);
б – устройство для индукционной наплавки: 1, 2 – верхний и нижний
 виток индуктора; 3 – механизм перемещения индукторов; 4 – нижняя плита;
 5 – изделие; 6, 7 – соответственно тепловой и электромагнитный экраны;
 8 – верхняя плита; 9 – пневмоцилиндр; 10 – шихта

Рисунок 1.2. – Схемы конструкций индуктора и устройства для индукционной наплавки тонких стальных дисков с одновременным экранированием электромагнитных и тепловых полей

Износостойкость модифицированного покрытия в 2,5 раза превышает износостойкость детали после традиционной термообработки [15].

В процессе термического упрочнения рабочих поверхностей деталей плазменной закалкой с магнитным сканированием дуги (рисунок 1.3) обеспечивается равномерность распределения твердости по глубине упрочненного слоя, а глубина и ширина закалки увеличиваются до 1,5 и 2,0 мм соответственно, вместо 0,5 и 0,1 мм при закалке прямой дугой без оплавления поверхности [35, 46]. Сканирование электрической дуги магнитной системой позволяет достичь оптимальной скорости обработки от 0,06 до 0,09 м/с, при которой возможна максимальная микротвердость. Результаты исследования показали, что износостойкость термообработанных деталей увеличилась в 4 раза по сравнению с необработанным материалом [46].



1 – электромагнитная катушка переменного тока; 2 – водоохлаждаемый магнитопровод; 3 – аргодуговая горелка; 4 – изделие

Рисунок 1.3. – Схема конструкции устройства для поверхностной плазменной закалки деталей с магнитным сканированием дуги

Создаваемое магнитное поле П-образной электромагнитной системой при электроконтактной приварке порошковых материалов (рисунок 1.4) повышает технологичность процесса посредством удержания материалов в зоне приварки и позволяет уменьшить потери его до 20 % [47]. Испытания на усталостную прочность показали, что покрытия, полученные приваркой порошка с применением ЭМП в рабочей зоне, обладают более высокой прочностью по сравнению с покрытиями, образованными приваркой стальной ленты [47].

Для исключения синхронизации искровых импульсов и

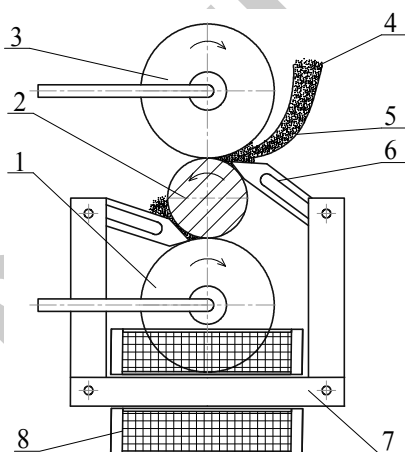
вибрации рабочего электрода в процессе электроискрового легирования используются разобщенные источники импульсов электрического тока генератора и вибросистемы. Авторами установлено, что при безвибрационном способе контактирования электрода и детали по сравнению с вибрационным повышается чистота леги-

рованной поверхности на 3–4 класса, а привес материала покрытия увеличивается почти в 2 раза [48].

В работе [49] определено, что применение внешнего магнитного поля с индукцией 0,02–0,1 Тл в рабочей зоне при электроэрозионной обработке обеспечивает повышение производительности процесса на 30–50 % и уменьшение относительного износа электрода-инструмента. Воздействие внешнего МП в процессе обработки способствует увеличению количества электрических разрядов, улучшению условий удаления шлама из межэлектродного промежутка, уменьшению электрической прочности рабочей жидкости в промежутке [49].

Разработанный авторами для комбинированного способа восстановления деталей инструмент в форме скобы-двухполюсника, между полюсами которого образуется переменное магнитное поле высокой напряженности (до 144 А/м), позволяет увеличивать содержание углерода в поверхностном слое до 0,15 % и повысить износостойкость обрабатываемых поверхностей в 1,4–1,5 раза [41].

Проведенный анализ способов упрочнения и восстановления показывает целесообразность применения внешнего электромагнитного поля в рабочей зоне. Это обусловлено тем, что стабилизация процессов осуществляется без контакта устройств ввода внешнего магнитного поля с рабочей зоной. Применение таких устройств не требует существенного изменения стандартного оборудования, а управление внешним ЭМП в рабочей зоне может автоматизироваться [40, 43].

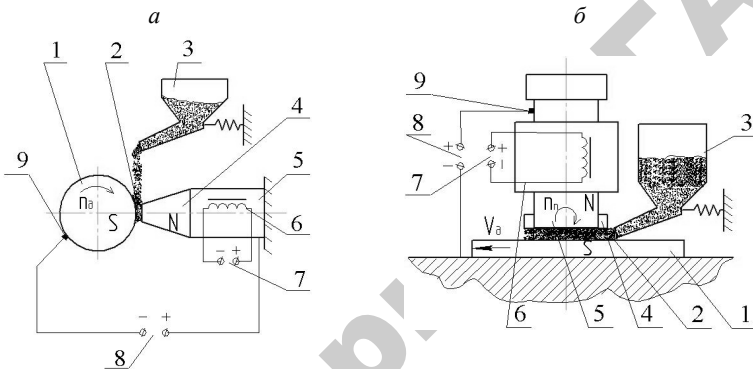


1, 3 – электрод; 2 – заготовка детали;
4 – порошок; 5 – порошокпровод;
6 – полюс; 7 – магнитопровод;
8 – электромагнитная катушка

Рисунок 1.4. – Схема конструкции устройства для электроконтактной приварки порошковых материалов

1.4. Способы магнитно-электрического упрочнения

Одним из технологических способов, использующих в рабочей зоне внешнее электромагнитное поле, является магнитно-электрическое упрочнение [50–52]. МЭУ обеспечивает повышение износостойкости металлических поверхностей деталей машин путем нанесения тонких слоев покрытий, не превышающих 0,2 мм. Принципиальные схемы МЭУ на наружные поверхности деталей типа тела вращения и плоские поверхности приведены на рисунке 1.5.

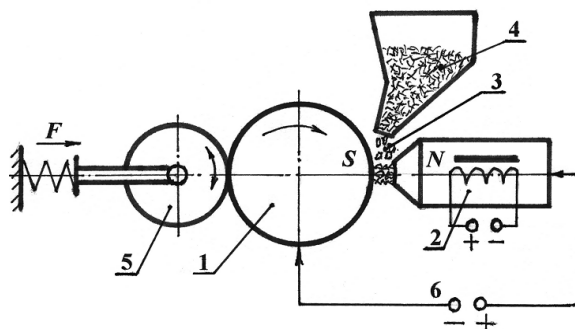


- 1 – заготовка детали; 2 – ферромагнитный порошок;
3 – бункер-дозатор; 4 – полюсный наконечник; 5 – сердечник электромагнита;
6 – электромагнитная катушка; 7 – источник питания электромагнитной катушки; 8 – источник технологического тока;
9 – скользящий контакт

Рисунок 1.5. – Принципиальная схема магнитно-электрического упрочнения поверхности деталей типа тела вращения (а), на плоские поверхности (б)

Схема магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) изображена на рисунке 1.5. Заготовку 1 и полюсный наконечник 4 электромагнита располагают с определенным зазором между собой и подключают их к источнику импульсного технологического тока 8 с помощью скользящего контакта 9. В зазор из бункера-дозатора 3 подают ферромагнитный порошок (ФМП), частицы которого выстраиваются в токопроводящие «цепочки». Частицы ФМП, которые находятся в контакте с поверхностью детали, под действием электрических разрядов расплавляются и расплав наносится на упрочняемую поверхность. Наибольший эффект получен при совме-

щении МЭУ с поверхностным пластическим деформированием (рисунок 1.6). В этом случае происходит электроконтактное термомеханическое упрочнение. Для разогрева поверхностного слоя используется технологическое тепло, образовавшееся от прохождения энергии электрических разрядов через пятно контакта частиц порошка. В результате такого комбинированного воздействия осуществляется нагрев неровностей поверхности, их деформирование и сглаживание.



- 1 – заготовка; 2 – электромагнит; 3 – композиционный ферромагнитный порошок; 4 – бункер-дозатор; 5 – деформирующий инструмент; 6 – источник разрядного тока

Рисунок 1.6. – Схема комбинированного магнитно-электрического упрочнения и поверхностного пластического деформирования

На упрочняемую поверхность одновременно воздействуют электромагнитные и термомеханические потоки энергии, а также потоки вещества. Процессы формирования упрочненных поверхностей деталей носят, в основном, термомеханический характер, а электромагнитные потоки вследствие простоты их формирования и удобства в управлении наиболее технологичны. При этом происходят диффузионные процессы легирования поверхностного слоя материала основы, как элементами материала ФМП, так и элементами присадок в транспортирующей среде [52].

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при термомеханическом формировании поверхностного слоя при восстановлении и упрочнении цилиндрических поверхностей деталей с износом 0,1–0,6 мм обеспечивается высокая прочность сцепления покрытия с основным металлом без предварительной подготовки поверхности, что способствует повышению износостойкости

упрочненных поверхностей. Вместе с тем, известно, что на триботехнические свойства износостойких покрытий большое влияние оказывают финишные технологические операции.

Особенностью МЭУ является одновременное воздействие в рабочей зоне электрического тока, внешнего магнитного поля, магнитного поля электрического тока на ферромагнитный порошок и поверхностные слои детали, в результате которого происходят нагрев и плавление материала ФМП, генерация и развитие электрических разрядов, полярный перенос и распределение части расплава ФМП по подплавленной поверхности. В поверхностных слоях детали протекают химические и структурные превращения, вследствие которых на поверхности ее образуется монокристаллическое соединение покрытия с основой [51, 52].

В работе [51] определено, что на процесс формообразования обрабатываемой поверхности по степени значимости в порядке убывания оказывают влияние следующие виды энергии: электрическая, магнитная и механическая. По функциональному назначению основную роль – генерацию, развитие электрических разрядов, нагрев и плавление цепочек-микроэлектродов из частиц ФМП в рабочем зазоре выполняет энергия электрического тока. Вспомогательную – удержание частиц ФМП и формирование многоэлектродной системы в РЗ, взаимодействие наплавленного материала с основой выполняют магнитная и механическая энергии [51, 52].

В зависимости от реализации различных сочетаний характеристик и параметров электромагнитных и механических воздействий, условий проведения, свойств ФМП, рабочей жидкости и обрабатываемых материалов, МЭУ используется как для упрочнения рабочих, так и для восстановления изношенных поверхностей деталей машин [50, 52].

Известная классификация технологических способов и схем упрочнения и восстановления цилиндрических и плоских поверхностей в электромагнитном поле [53] основана на векторном взаимодействии и способе подачи энергий в зону обработки. Тем не менее, она недостаточно полно отражает возможности обработки МЭУ различных по форме поверхностей, характер распределения энергий во времени в рабочей зоне в зависимости от функционального назначения и рода тока источников питания технологического тока и электромагнитной катушки. С учетом особенностей процесса МЭУ ее разновидности можно классифицировать по признакам, указанным в таблице 1.1.

Таблица 1.1. – Классификация магнитно-электрического упрочнения по признакам

Форма обрабатываемых поверхностей		Шифр группы
1. Наружные тела вращения		А 1
2. Внутренние тела вращения		А 2
3. Плоские		А 3
4. Сложные		А 4
Характер распределения электрической энергии во времени в РЗ	Род технологического тока ИП	Шифр подгруппы
1. Постоянный	1. Выпрямленный постоянный	Б 1
2. Переменный	2. Переменный	Б 2
3. Импульсный	3. Выпрямленный импульсный	Б 3
Характер распределения магнитной энергии во времени в РЗ	Род электрического тока ИП ЭМК	Шифр подгруппы
1. Постоянный	1. Выпрямленный	В 1
2. Переменный	2. Переменный	В 2
3. Импульсный	3. Выпрямленный импульсный	В 3
Характер распределения механической энергии во времени в РЗ	Функциональное назначение механической энергии подводимой в РЗ	Шифр подгруппы
1. Постоянный	Сообщение движения детали:	Г 1 Г 2
	1. Вращательное 2. Поступательное (линейное)	
1. Постоянный	Сообщение движения устройству МЭУ:	Г 3 Г 4
	1. Вращательное 2. Поступательное (линейное)	
1. Постоянный 2. Переменный	Сообщение движения ПН:	Г 5 Г 6 Г 7
	1. Вращательное	
	2. Вращательное 3. Осциллирующее	

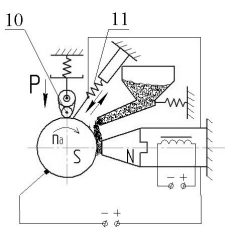
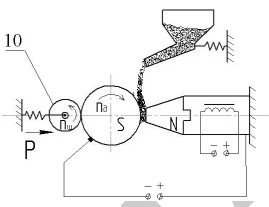
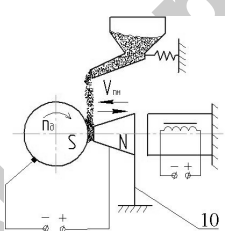
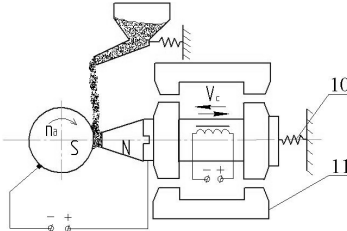
Анализ существующих технологических схем МЭУ (таблица 1.2) показывает, что наибольшее распространение получили

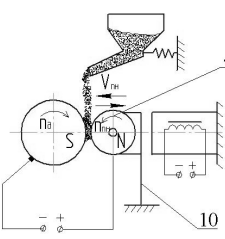
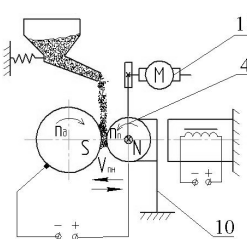
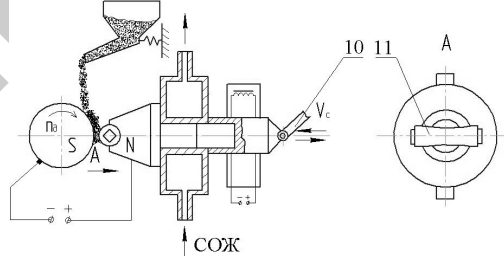
устройства для упрочнения и восстановления наружных поверхностей тел вращения. Просты и универсальны в применении однополюсные установки МЭУ (рисунок 1.5 *а*) [50]. Более стабильный характер нанесения покрытий обеспечивается двухполюсной установкой [51, 53]. Применение азота в качестве защитного газа в РЗ [54] или насыщение им поверхности частиц ФМП [55, 56] практически не изменяет физико-механические свойства покрытий.

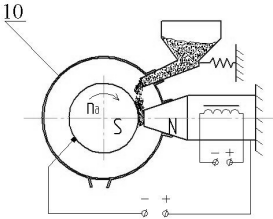
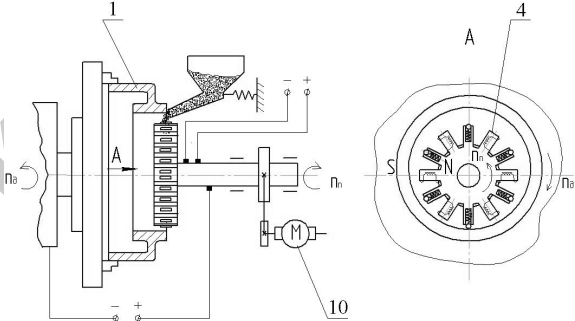
Таблица 1.2. – Классификация схем магнитно-электрического упрочнения

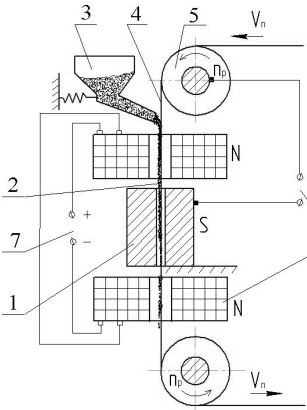
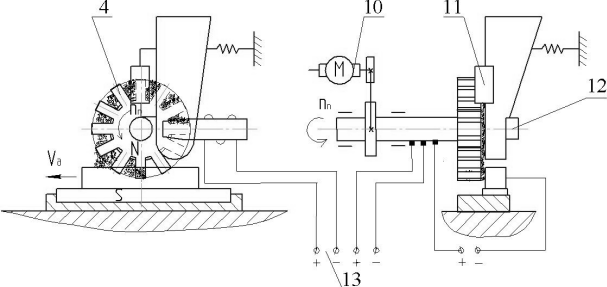
Назначение и шифр	Схема способа МЭУ
<p>1. Нанесение защитных металлических покрытий на наружные поверхности деталей типа тела вращения.</p> <p>А1-Б1(Б3)-В1-Г1-Г4 (<i>а, б</i>)</p>	<p><i>а</i> – с постоянным рабочим зазором [62]; <i>б</i> – с автоматическим поддержанием рабочего зазора (10 – пружина; 11 – ролик опорный) [68]</p>
<p>2. Комбинированная обработка наружных металлических поверхностей деталей типа тела вращения (<i>а, б</i>) – упрочнение с ППД;</p> <p>А1-Б1(Б3)-В1-Г1-Г4 (<i>а, б</i>)</p>	<p><i>а</i> – жестко закрепленным накатным устройством (10 – шариковый накатник) [61]; <i>б</i> – без базирования деталей (10 – направляющий ролик; 11 – редуктор; 12, 13 – прижимной ролик) [74]</p>

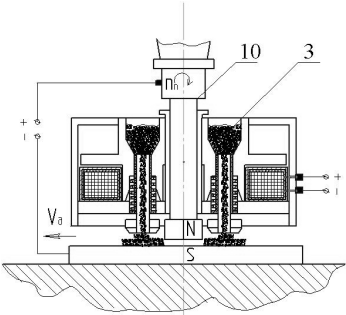
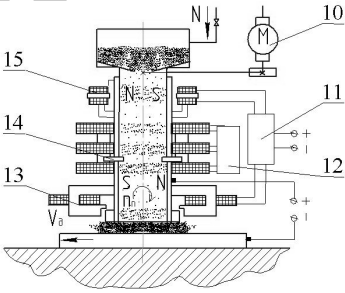
Продолжение таблицы 1.2

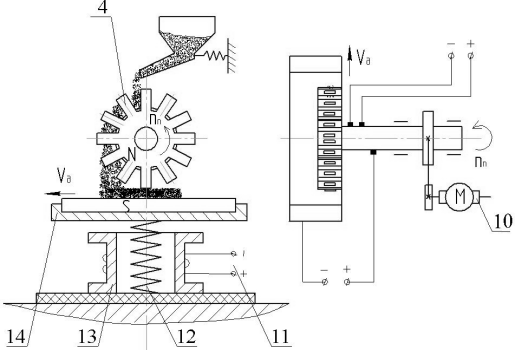
Назначение и шифр	Схема способа МЭУ
<p><i>в</i> – упрочнение с термомеханической обработкой; <i>з</i> – упрочнение с обработкой абразивным кругом).</p> <p>А1-Б1(Б3)-В1-Г1-Г4 (<i>в, з</i>)</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><i>в</i></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><i>з</i></p>  </div> </div> <p><i>в</i> – с дополнительным термическим воздействием электрода (10 – калибрующий ролик; 11 – угольный электрод) [68]; <i>з</i> – со шлифованием покрытий (10 – абразивный круг) [70]</p>
<p>3. Нанесение упрочняющих металлических покрытий на поверхности деталей типа тела вращения в условиях фазового сдвига импульсов электрического тока и магнитного поля.</p> <p>А1-Б3(Б2)-В3-Г1-Г7 (<i>а, б</i>)</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><i>а</i></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><i>б</i></p>  </div> </div> <p><i>а</i> – с вибрацией полюсного наконечника (10 – пластинчатая пружина) [71]; <i>б</i> – с вибрацией магнитной системы (10 – пружина; 11 – магнитопровод) [72]</p>

Назначение и шифр	Схема способа МЭУ
<p>А1-Б3-В3-Г1-Г5(Г6)-Г7 (в, з)</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>в</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>з</p> </div> </div> <p>в – с осцилляцией и самовращением полюсного наконечника (4 – дисковый полюсный наконечник; 10 – пластинчатая пружина) [73]; з – с осцилляцией и принудительным вращением полюсного наконечника (4 – дисковый полюсный наконечник; 10 – пластинчатая пружина; 11 – электродвигатель) [87]</p>
<p>4. Нанесение упрочняющих металлических покрытий на поверхности деталей типа тела вращения.</p> <p>А1-Б3-В1-Г1-Г4-Г7</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p>с осцилляцией полюсного наконечника посредством электромеханического привода (10 – рычаг механизма привода; 11 – роликовый полюсный наконечник) [88]</p>

Назначение и шифр	Схема способа МЭУ
<p>5. Нанесение защитных металлических покрытий в среде инертных газов на наружные поверхности деталей типа тела вращения.</p> <p>A1-БЗ(Б2)-ВЗ-Г1-Г7</p>	 <p>10 – защитная диамagnetная диэлектрическая камера [65]</p>
<p>6. Нанесение защитных металлических покрытий на внутренние цилиндрические поверхности деталей.</p> <p>A2-БЗ-В1-Г1-Г4-Г5</p>	 <p>1 – деталь; 4 – полюсный наконечник; 10 – электродвигатель [75]</p>

Назначение и шифр	Схема способа МЭУ
<p>7. Нанесение защитных металлических покрытий на внутренние цилиндрические поверхности деталей.</p> <p>А2-Б3(Б2)-В3-Г1-Г5</p>	 <p>1 – деталь; 2 – ферромагнитный порошок; 3 – бункер-дозатор; 4 – электрод-инструмент; 5 – направляющий ролик; 6 – электромагнитная катушка; 7, 8 – источники питания ЭМК и ИТТ [78]</p>
<p>8. Нанесение упрочняющих металлических покрытий на наружные плоские, сложные профильные поверхности деталей.</p> <p>А3(А4)-Б3-В3-Г2-Г4-Г5</p>	 <p>с автоматическим регулированием подачи ФМП в рабочую зону (4 – полюсный наконечник; 10 – электродвигатель; 11 – калибрующий ролик; 12 – постоянный магнит; 13 – источник питания ЭМК заслонки) [77]</p>

Назначение и шифр	Схема способа МЭУ
<p>9. Нанесение упрочняющих металлических покрытий на наружные плоские поверхности деталей.</p> <p>А3-Б3(Б2)-В3-Г2-Г3(Г4)-Г5 (а, б)</p>	<p style="text-align: center;"><i>a</i></p>  <p style="text-align: center;">с вибрацией полюсных наконечников (3 – дозирующая втулка; 10 – оправка) [79];</p> <p style="text-align: center;"><i>б</i></p>  <p style="text-align: center;">с подачей азота в рабочую зону (10 – электродвигатель; 11 – фазовый генератор; 12 – блок управления; 13 – электромагнит; 14 – электрод; 15 – постоянный магнит) [66]</p>

Назначение и шифр	Схема способа МЭУ
А3-Б3(Б2)-В3-Г2-Г3(Г4)-Г5 (в)	<p style="text-align: center;">в</p>  <p>с автоматическим регулированием рабочего зазора (4 – полюсный наконечник; 10 – электродвигатель; 11 – блок управления рабочим зазором; 12 – пружина; 13 – сердечник; 14 – опорный стол) [89]</p>

Дополнительное термическое воздействие угольным электродом обрабатываемой поверхности в РЗ приводит к накоплению теплоты в материале детали, что приводит к ее последующей формации. Для устранения перегрева детали процесс МЭУ ведут в потоке охлаждающей жидкости – водных растворов эмульсолов Э-2, «Аквол» различной концентрации [51, 57]. Способ, сочетающий МЭУ и шлифование [58], не в полной мере обеспечивает необходимую толщину наплавляемого слоя и шероховатость поверхности из-за температурного разупрочнения покрытия в РЗ и повышенного изнашивания абразивного круга.

Для стабилизации МЭУ реализован способ упрочнения деталей, основанный на импульсном механическом воздействии на формируемый участок поверхностного слоя полюсным наконечником [59–61]. В процессе силового контактирования полюсного наконечника с покрытием в РЗ происходит разогрев поверхностей наконечника и детали, частичное выгорание нанесенного слоя и, соответственно, уменьшается его толщина.

Для получения в покрытиях сжимающих остаточных напряжений, повышающих усталостную прочность деталей, используются устройства комбинированной обработки, обеспечивающие совмещение МЭУ с поверхностным пластическим деформированием по различным схемам – с одним, двумя или тремя накатными устройствами [50, 51]. С целью повышения производительности процесса комбинированной обработки предложена технологическая схема, позволяющая создавать большие усилия ППД без базирования обрабатываемой детали [62]. Из-за сложности реализации данной схемы эти устройства не нашли достаточно широкого применения в производстве.

Устройства для упрочнения различных поверхностей деталей, у которых полусный наконечник – зубчатое колесо или диск с радиальными пазми [63–65], инструмент-электрод – проволока [66], не обеспечивают требуемого качества покрытий из-за неравномерного распределения ФМП на торцах пазов или на проволоке в РЗ и используются ограниченно.

Для упрочнения плоских поверхностей деталей предлагается устройство [67], которое позволяет повысить качество покрытий, уменьшить потери ферромагнитного порошка (ФМП) посредством его дозированной подачи через электроды – полусные наконечники. Опыт применения установок показывает, что они менее производительны, чем одно- и двухполусные установки МЭУ.

В результате выполненного анализа установлено, что существенной проблемой для способов и устройств, реализующих процесс МЭУ, остается обеспечение требуемого качества покрытий с максимальной производительностью. Выявлено, что основное влияние на физические процессы в рабочей зоне оказывают электрические и магнитные потоки энергии, распределение которых во времени преимущественно имеет переменный характер (таблицы 1.1 и 1.2). При этом стабильность процесса нанесения покрытий зависит от рода тока применяемых источников технологического тока и источников питания электрических магнитов, конструктивных параметров исполнительных элементов электромагнитных систем устройств МЭУ. В связи с этим наибольший интерес представляет изучение разновидностей и конструктивных особенностей ЭМС, представляющих собой сочетание контуров внешнего магнитного поля (источника магнитного поля с магнитопроводами) и наплавки (источника технологического тока с токопроводами) [68, 69].

1.5. Источники тока и виды магнитных систем в устройствах магнитно-электрического упрочнения

Учитывая, что в процессе нанесения покрытий преобладающим воздействием в РЗ на ФМП и обрабатываемую поверхность является энергия электрического тока, на первом этапе сравнительного анализа ЭМС рассмотрим используемые источники технологического тока для устройств МЭУ.

Анализ работ [50–53, 59, 60, 70, 71] показывает, что в устройствах МЭУ в качестве ИТТ применяются аппараты генераторного и трансформаторного типов (рисунк 1.7). К аппаратам первого типа относятся машинные генераторы импульсов МГИ-2М [52], широкодиапазонные транзисторные генераторы импульсов ШГИ-125-100 [71] и тиристорные генераторы импульсов с двухполупериодным выпрямлением тока промышленной частоты УРМ 3.219.000 [64]. К аппаратам второго типа относятся сварочные трансформаторы ТД-500 с однополупериодным выпрямлением напряжения в его вторичной цепи [59] и ТС-500 с однополупериодным выпрямлением пониженного напряжения промышленной частоты с плавной регулировкой полусинусоид по углу в пределах $30\text{--}180^\circ$ и $210\text{--}360^\circ$ [60], сварочные выпрямители ВД-306 и ВД-401 [50]. Преобразование электрической энергии в генераторах импульсов происходит на частотах в пределах до 100 кГц [72], в сварочных трансформаторах – на промышленной частоте питающей сети (50 Гц) [59, 60] и в сварочных выпрямителях – на частотах до 300 Гц [50, 51, 57, 73–75].



Рисунок 1.7. – Классификация источников технологического тока устройств МЭУ

Автором работы [73] установлено, что производительность процесса нанесения покрытий в большей степени зависит от параметров электрических импульсов ИТТ. Показано, что оптимальный характер распределения материала ФМП по массе и площади РЗ обеспечивается машинным генератором униполярных импульсов МГИ-2М [52]. При использовании генератора ШГИ-125-100, позволяющего регулировать скважность электрических импульсов в широких пределах, приращение массы образцов в 1,5 раза больше, чем это имеет место при применении машинного генератора МГИ-2М [71]. Установлено, что на производительность процесса упрочнения ФМП оказывает основное влияние частота следования электрических импульсов. Известно применение в установке УРМ 3.219.000 для поверхностного упрочнения в качестве ИТТ тиристорного генератора импульсов, обеспечивающего однополупериодное или двухполупериодное выпрямление пониженного напряжения промышленной частоты с плавной регулировкой отсечки полусинусоид по углу [59]. Все вышеуказанные типы генераторов импульсов имеют узкую направленность и широкого распространения как ИТТ устройств упрочнения в электромагнитном поле не получили.

В работах [59, 60] исследователями выявлено, что использование в качестве ИТТ аппаратов трансформаторного типа с выпрямляющими устройствами в сравнении с генераторами импульсов обеспечивает наибольший перенос материала ФМП на обрабатываемую поверхность в каждом единичном разряде и увеличивает толщину нанесенного слоя. Автор работы [59] объясняет это тем, что частота следования электрических импульсов, получаемых от сварочного трансформатора с выпрямительным вентилем, меньше чем частота импульсов, выработанных генераторами, а величина энергии, выделяемая в единичном разряде за один импульс напряжения значительно больше. Так, при МЭУ со сварочным трансформатором ТД-500 и вентилем перенос материала ФМП на поверхность детали в 2,6–6,7 раза и в 1,7 раза больше, чем при упрочнении с генераторами импульсов МГИ-2М и ШГИ-125-100 соответственно. Установлено, что при фазовом сдвиге между магнитной индукцией и технологическим напряжением трансформатора ТС-500

в $+30^\circ$, увеличивается производительность нанесения покрытий в 1,25–1,35 раза по сравнению с наплавкой устройством МЭУ с трансформатором ТД-500 и выпрямительным вентилем [60].

Следует отметить, что в качестве источника питания постоянного технологического тока в устройствах МЭУ наибольшее распространение получили сварочные выпрямители [50, 51]. Так, в работах [50, 51, 57, 74, 75] использовались сварочные выпрямители ВД-306 и ВД-401, в которых изменение силы разрядного тока осуществлялось в пределах 30–315 А и 64–415 А соответственно.

Выявлено [50, 51], что при пропуске через РЗ постоянного технологического тока процесс МЭУ осуществляется в импульсном режиме. Длительность и период возникновения импульсов непостоянны, форма импульсов трапецеидальная. Возникновение импульсов на одной из цепочек частиц ФМП по времени не совпадает с моментом возникновения на других. Установлено [50, 57], что взаимное влияние дуговых разрядов в РЗ обеспечивает групповое перекрываемое горение цепочек микроэлектродов и интенсифицирует процесс нагрева и плавления ФМП. Однако при этом возникает вероятность стационарных дуговых разрядов, особенно при форсировании режимов [53]. Стационарная дуга выжигает ранее наплавленный слой и, тем самым, снижает качество наплавки, резко повышает нагрев детали, что приводит к ее температурной деформации. При этом опыт использования устройств МЭУ с аппаратами трансформаторного типа показывает, что достаточно сложно добиться стабилизации процесса нанесения покрытий из-за их инерционности и отсутствия устойчивой обратной связи разрядного тока и напряжения с изменяемыми технологическими параметрами в рабочей зоне.

Известно [50, 52], что энергии технологического тока сопутствующее воздействие на процесс упрочнения оказывает энергия внешнего магнитного поля, обеспечивающая связку частиц ФМП и поддержание их в подвижно-связанном и скоординированном состоянии в рабочей зоне. Анализ работ, посвященных исследованию процесса МЭУ, показал, что данные о характере и величине используемого внешнего магнитного поля в РЗ

носят разрозненный и противоречивый характер, не систематизированы. В связи с этим на втором этапе исследований ЭМС устройств МЭУ возникла необходимость в изучении разновидностей и конструктивных особенностей магнитных систем.

В устройствах МЭУ различный характер внешнего магнитного поля в РЗ создается с помощью МС, которая состоит из следующих элементов: источника внешнего магнитного поля – электромагнитной катушки, магнитопровода, полюсного наконечника, механизма регулирования размеров рабочего зазора, источника питания ЭМК. Разновидности, конструктивные особенности и классификация основных элементов МС известных устройств МЭУ представлена на рисунке 1.8.

Питание ЭМК осуществляется от ИП, которые реализуют следующие схемы выпрямления переменного тока промышленной частоты: однофазная однополупериодная [59, 60], однофазная двухполупериодная мостовая [50, 52, 57, 74,75]. На основании этого применяемые МС в устройствах МЭУ позволяют получить в РЗ пульсирующее (импульсное) [59, 60] и постоянное [50, 52, 57, 74, 75] внешнее МП. При этом характер изменения магнитного потока в рабочей зоне является периодически изменяемым по величине [68, 69].

В работах [55, 56] разработана конструкция комбинированной МС устройства для легирования поверхности, у которой на корпусе цилиндрического дозатора установлены основные электромагниты с обмотками, подключенными к различным фазам генератора импульсов.

В результате подачи импульсного тока от ИП на электромагнитные катушки в зоне обработки возникает импульсное магнитное поле. Для дополнительного воздействия электрических разрядов на ФМП используются электромагниты с полюсными наконечниками, выполненными из магнитотвердых материалов. Следует отметить сложность данной конструкции и схемы управления МС вследствие большого количества ЭМК и исполнительных механизмов устройства. При этом не обеспечивается равномерность распределения ФМП в РЗ в результате переноса части расплава порошка при обработке на торцовые поверхности электродов.

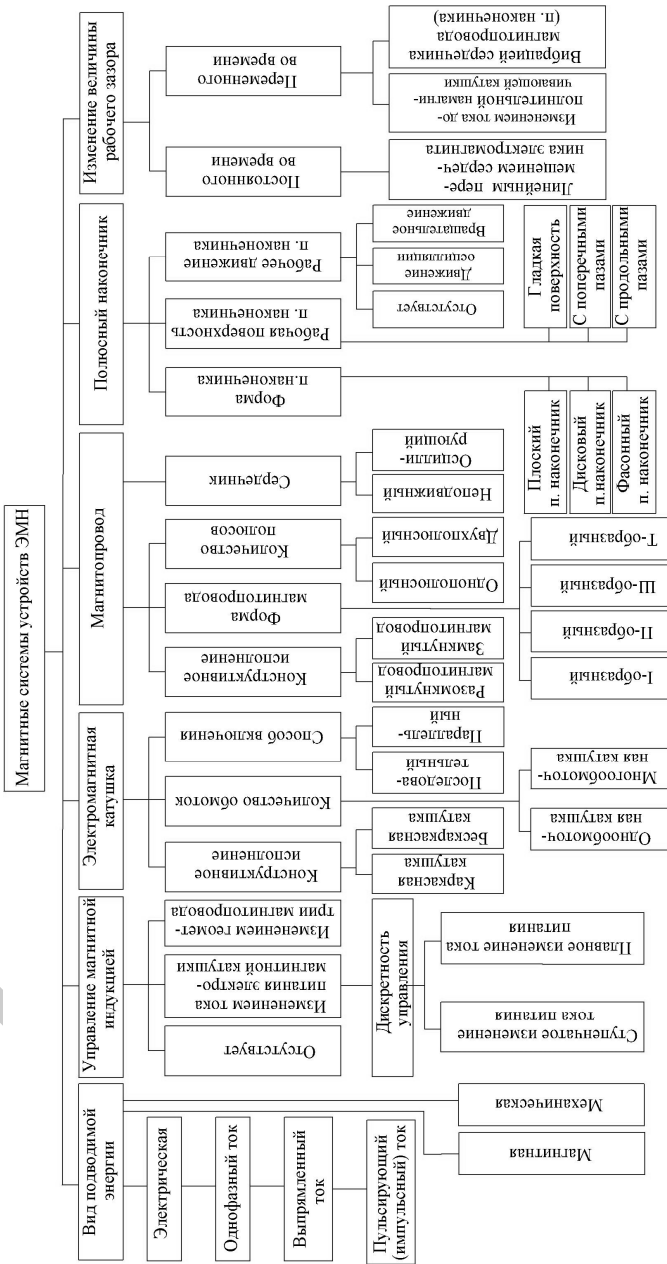


Рисунок 1.8. — Классификация магнитных систем устройств магнитно-электрического управления

В работе [59] полюсный наконечник закреплен на пластинчатой пружине и находится на некотором расстоянии от сердечника электромагнита. При питании обмоток ЭМК выпрямленным током по однополупериодной схеме МС устройства для упрочнения деталей обеспечивает синхронизацию изменения пульсирующего магнитного потока и виброперемещения полюсного наконечника в РЗ. Вместо плоского полюсного наконечника возможно использование вращающегося цилиндрического с гладкой рабочей поверхностью или с пазами [61, 76]. Отличительной особенностью конструкции МС устройства упрочнения деталей [60] является то, что сердечник электромагнита, объединенный с полюсным наконечником, соединен плоскими пружинами с корпусом, а магнитопровод состоит из двух П-образных частей. В результате питания обмоток ЭМК импульсным электрическим током МС создает в РЗ пульсирующее магнитное поле. Под воздействием импульсных магнитных сил полюсный наконечник с сердечником совершают поступательное движение к детали и возврат их в исходное положение в момент паузы тока в обмотке катушки электромагнита. Следует отметить, что разработанными МС достаточно сложно обеспечить синхронизацию частоты следования импульсов напряжений ЭМК и осциллирующего движения полюсного наконечника из-за постоянно изменяемой величины рабочего зазора и инерционности пластинчатых пружин. Для устранения этого недостатка авторами разработан рабочий орган устройства для упрочнения [77], содержащий цилиндрический сердечник, кинематически связанный с полюсным наконечником и размещенный в электромагните. На практике синхронизация возвратно-поступательного движения рабочего органа и частоты импульсов магнитного поля в РЗ не полностью реализуется вследствие сложной системы управления приводом рычажного механизма.

Известны МС, у которых электромагнит является полюсным наконечником и выполнен в виде зубчатого колеса или диска с радиальными прорезями, снабженными обмотками. Такая конструкция электромагнита позволяет удерживать постоянным магнитным полем возле зубцов или пазов ФМП и при попадании его в рабочий зазор упрочнять поверхности [63, 65, 78, 79]. Недостатком конструкции МС является неравномерное распределение на рабочих торцах зубьев или пазов ФМП в результате воздействия на него нескольких факторов: центробежных сил, возникающих во время вращения полюсного наконечника, и внешнего магнитного поля. Под действием первого фактора часть

ФМП перемещается к периферии зубьев или пазов, а под влиянием второго – стремится концентрироваться в центральной части торцов.

Для дозированной подачи ФМП в РЗ питание обмотки электромагнита осуществляется импульсным током, в результате чего бункер-дозатор с ФМП и электродами вибрирует синхронно с изменением импульсного магнитного потока [67]. В используемой конструкции МС значительно снижается пропускная способность направляющих втулок для дозированной подачи ФМП в результате воздействия на него магнитного поля, генерируемого ЭМК.

Магнитная система наиболее распространенных однополюсных установок МЭУ на наружные поверхности деталей типа тела вращения представляет собой электромагнит, в состав которого входят следующие элементы: электромагнитная катушка; источник питания ЭМК; магнитопровод, состоящий из ферромагнитного сердечника прямоугольного или круглого сечения и сменного полюсного наконечника; электроконтактные устройства [50, 51]. Полюсный наконечник жестко соединяется с сердечником ЭМ [50, 52, 57] или крепится на пластинчатой пружине и располагается с зазором относительно сердечника [56, 59]. Питание ЭМК осуществляется выпрямленным пульсирующим [59, 60] и выпрямленным постоянным электрическим током [50, 52, 57, 74, 75]. Импульсный характер напряжений позволяет получить магнитной системой в РЗ периодически изменяющуюся во времени величину магнитной индукции [80, 68, 69]. Наиболее распространенный способ управления средним значением величины магнитной индукции в РЗ устройств МЭУ – регулированием силы тока, питающего электромагнитные катушки [50, 53]. При этом электромагниты позволяют генерировать в рабочем зазоре 0,5–2,0 мм магнитное поле со средним значением величины индукции в пределах 0,1–1,4 Тл.

В научных источниках приводятся различные сведения, в которых авторы работ [50, 52] рекомендуют оптимальные значения величины магнитной индукции в рабочем зазоре в пределах 0,5–1,1 Тл, другие авторы – 0,18–0,42 Тл [59, 60, 78]. Так, в работе [52] определено оптимальное значение величины магнитной индукции 0,86 Тл. Показано, что уменьшение ее величины приводит к худшему удержанию и снижению количества цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре, а увеличение – к выбросу из РЗ частиц ФМП под влиянием центробежных сил, возникающих в результате взаимодействия радиальных составляющих разрядного тока с внешним магнитным полем. В работе [50] выявлено, что увеличение магнитной индукции приводит к уменьшению электри-

ческого контактного сопротивления ФМП в РЗ и повышению тока наплавки. При этом оптимальные значения величины магнитной индукции находятся в пределах 0,9–1,1 Тл. Вместе с тем экспериментальными исследованиями [59] установлено, что при величине магнитной индукции 0,8 Тл перенос материала ФМП и толщина упрочненного слоя значительно меньше, чем при величине магнитной индукции 0,2 Тл. Это обстоятельство автор объясняет взаимным влиянием силы тока короткого замыкания сварочного трансформатора и величины индукции, их направленностью и характером магнитного поля в РЗ. Он рекомендует оптимальные значения величины магнитной индукции, находящиеся в пределах 0,18–0,30 Тл. В работе [78] исследователем доказано, что при значениях величины магнитной индукции от 0,24 до 0,42 Тл в рабочем зазоре обеспечивается оптимальное сочетание электродинамических сил и сил Лоренца, в результате которого большая часть расплава ФМП наносится на обрабатываемую поверхность. Различие оптимальных значений магнитной индукции, по нашему мнению, вызвано тем, что исследования проводились на установках, реализующих технологические схемы упрочнения с постоянным [50, 52] и с изменяемым во времени рабочим зазором [59, 60, 78]. Характер изменения магнитного потока в РЗ относительно импульсов напряжения в цепи технологического тока в первом случае носил переменный, во втором – синхронизированный пульсирующий. В обоих случаях распределение частиц ФМП по рабочему зазору неравномерное, и градиент магнитной индукции на отдельных участках рабочего зазора меняется с частотой образования разрядных цепочек-микроэлектродов из частиц ФМП [52, 68, 69].

Выполненный анализ разновидностей и конструктивных особенностей магнитных систем в устройствах МЭУ позволил выявить их общие недостатки:

- сложность конструкций МС, большие размеры и масса электромагнитов увеличенные габариты рабочей зоны;
- необходимость в потреблении электроэнергии и, соответственно, в отдельном ИП и пульте управления ЭМ;
- затрудненный доступ к исполнительным механизмам в рабочей зоне;
- необходимость в герметизации ЭМК для предотвращения выхода из строя последних в результате попадания рабочих жидкостей;
- повышенный износ электроконтактных устройств.

Из курса современной электротехнологии [81, 82] известно, что производительность технологического процесса и качество конечного

продукта существенно зависят от свойств среды, которая определяется характеристиками преобразователя электроэнергии и дополнительного оборудования, в задачу которых входит обеспечение стабильности процесса посредством согласования их электрических параметров. Учитывая, что ранее проведенные исследования авторами работ [50, 52, 59, 60, 76] показывают, что производительность нанесения покрытия Q (масса покрытия Δm на единицу площади поверхности) и качество формируемого поверхностного слоя (сплошность G , пористость Π и разнотолщинность покрытия P_i) существенно зависят от параметров электрических импульсов, характера магнитной индукции, стабильности их согласованного воздействия во времени в рабочем зазоре на ФМП и обрабатываемую поверхность, на третьем этапе исследований ЭМС проведен сравнительный анализ известных компоновочных схем источников технологического тока с магнитными системами (таблица 1.3).

Таблица 1.3. – Компоновочные схемы электромагнитных систем устройств магнитно-электрического упрочнения

№ схе- мы	Тип источника		Временные диаграммы напряжения, тока и магнитной индукции источников питания ЭМС ($U - 10$ В/дел., $I - 10$ А/дел., $B - 0,2$ Тл/дел., $t - 5$ мс/дел.)
	технологического тока (модель, род тока питания)	магнитного поля (род тока питания)	
	Генератор импульсов (ШГИ-125-100, трехфазный импульсный ток)	Электромагнит (однофазный выпрямленный ток по однополупериодной схеме)	
	Технические характеристики источников		
	$I_i = 5-125$ А, $U_i = 2,0-100,0$ В, $f_i = 0,4-100$ кГц	$I_k = 5$ А, $U_k = 12-36$ В, $f_k = 50$ Гц, $B_{3в} = 0,82$ Тл, $B_c = 0,08$ Тл	

Продолжение таблицы 1.3.

№ схе- мы	Тип источника		Временные диаграммы напряжения, тока и магнитной индукции источников питания ЭМС ($U - 10$ В/дел., $I - 10$ А/дел., $B - 0,2$ Тл/дел., $t - 5$ мс/дел.)
	технологиче- ского тока (модель, род тока питания)	магнитного поля (род тока питания)	
2	Генератор импульсов (МГИ-2М, трехфазный импульсный ток)	Электромагнит (однофазный выпрямленный ток по двухполупериодной мостовой схеме)	
	Технические характеристики источников		
	$I_r=5-100$ А, $U_r=25,0$ В, $f_r=400$ Гц	$I_k=5$ А, $U_k=12-36$ В, $f_k=100$ Гц, $B_{zv}=0,82$ Тл, $B_c=0,08$ Тл	
3	Сварочный трансформатор (ТД-500 с вентильным выпрямителем, трехфазный переменный ток)	Электромагнит (однофазный выпрямленный ток по однополупериодной схеме)	
	Технические характеристики источников		
	$I_r=90-560$ А, $U_r=32,0$ В, $f_r=150$ Гц	$I_k=3,5$ А, $U_k=12-20$ В, $f_k=50$ Гц, $B_{zv}=0,24$ Тл, $B_c=0,05$ Тл	

Окончание таблицы 1.3

№ схе- мы	Тип источника		Временные диаграммы напряжения, тока и магнитной индукции источников питания ЭМС ($U - 10$ В/дел., $I - 10$ А/дел., $B - 0,2$ Тл/дел., $t - 5$ мс/дел.)
	технологиче- ского тока (модель, род тока питания)	магнитного поля (род тока питания)	
4	Сварочный трансформатор (ТД-205М, однофазный переменный ток)	Электромагнит (однофазный выпрямленный ток по однополупериодной схеме)	
	Технические характеристики источников		
	$I_r=40-200$ А, $U_r=32,0$ В, $f_r=50$ Гц	$I_k=3,5$ А, $U_k=12-20$ В, $f_k=50$ Гц, $B_{зв}=0,6$ Тл, $B_{зс}=0,05$ Тл	
5	Сварочный выпрямитель (ВД-306, ВД-401, трехфазный выпрямленный ток)	Электромагнит (однофазный выпрямленный ток по двухполупериодной мостовой схеме)	
	Технические характеристики источников		
	$I_r=30-315$ А, $I_r=64-415$ А, $U_r=32,0$ В, $f_r=300$ Гц	$I_k=5$ А, $U_k=12-36$ В, $f_k=100$ Гц, $B_{зв}=0,92$ Тл, $B_{зс}=0,08$ Тл	

Примечание – где I_r, I_k – сила технологического тока и сила тока питания электромагнита соответственно, А; U_r, U_k – рабочее напряжение источников технологического тока и питания электромагнита соответственно, В; f_r, f_k – частота следования импульсов источников технологического тока и магнитного поля соответственно, Гц; $B_{зв}, B_{зс}$ – магнитная индукция в рабочем зазоре и остаточная магнитная индукция ЭМС соответственно, Тл.

Анализ работ [52, 71] показывает, что устройства МЭУ с ЭМС по схемам 1 и 2 (таблица 1.3) обеспечивают небольшую производительность процесса упрочнения поверхностей (не более $16,0 \text{ мг/см}^2$) и невысокую сплошность покрытий (в пределах 61–72 %). Объясняется это управляющим воздействием на частицы и расплав ФМП в РЗ внешнего ЭМП, характер которого определяется источниками технологического тока и электромагнита. Так, для вариантов ЭМС по схемам 1 и 2 практически невозможно синхронизировать частоту следования электрических импульсов напряжений ИТТ, которая находится в пределах 0,4–100 кГц, и частоту следования импульсов напряжений ИП электромагнита (50 или 100 Гц соответственно). В результате постоянно изменяется величина индукции внешнего магнитного поля и происходит хаотичное распределение ФМП в РЗ, уменьшение интенсивности расплава, увеличение количества частиц ФМП, не участвующих в разрядах [68, 69].

Результаты исследований [87] показывают, что устройства МЭУ с ЭМС по схеме 3 (таблица 1.3) не могут обеспечить совпадения частоты и фазы следования импульсов напряжений и индукции из-за питания сварочных трансформаторов трехфазным током, а электромагнитных катушек – однофазным. Сплошность покрытий находится в пределах 69–81 % [59, 60]. Для осуществления согласованной во времени частоты и фазы следования импульсов напряжений и индукции в рабочем зазоре авторами работы [76] предложен вариант ЭМС по схеме 4 (таблица 1.3), в которой сварочный трансформатор ТДМ 205 и электромагнитная катушка питаются однофазным током. При этом ИТТ и источник питания электромагнита обеспечивают однополупериодное напряжение питания с частотой 50 Гц. Сплошность полученных покрытий на устройствах МЭУ с ЭМС по схеме 4 (таблица 1.3) обеспечивается в пределах 83–92 %. Производительность процесса нанесения покрытий на устройствах МЭУ с ЭМС по схемам 3 и 4 находится в пределах $15,8\text{--}33,0 \text{ мг/см}^2$. Это объясняется тем, что вследствие импульсного механического воздействия полюсного наконечника происходит подплавление его торца, увеличение рабочего зазора и, соответственно, снижение количества ФМП, переносимого на поверхность заготовки детали.

Авторами работ [50, 51, 57] показано, что устройства МЭУ с ЭМС по схеме 5 (таблица 1.3) позволяют наносить покрытия сплошностью

до 91 %. В этом случае происходит частичное совпадение частоты следования электрических импульсов напряжений ИТТ и ИП электромагнита. Установлено, что качество формируемых покрытий на устройствах МЭУ с ЭМС по схеме 5 зависит от инерционности сварочных выпрямителей, которое оказывает значительное влияние на синхронность образования цепочек-микроэлектродов ФМП и возникновения разрядных импульсов в рабочем зазоре [53]. При несовпадении импульсов напряжения от источников внешнего МП и технологического тока уменьшается количество цепочек-микроэлектродов в РЗ, участвующих в разрядах [68, 69].

Анализ опубликованных работ показывает, что влиянию параметров процесса МЭУ на толщину формируемых покрытий посвящено большое количество исследований [50–52, 59, 60, 70, 78]. Тогда как проблема обеспечения равномерности наплавленных по толщине слоев покрытий изучена недостаточно. Разнотолщинность (разница между максимальной и минимальной локальными толщинами формируемых слоев) покрытий из различных материалов ФМП может составлять до 50 % их общей толщины [52, 70].

Исследователями [51, 70] доказано, что толщина формируемых слоев пропорциональна производительности МЭУ с учетом дефектов покрытий – сплошности и пористости. Сплошность покрытий наиболее полно характеризуется сквозной пористостью, исследование которой в анализируемых работах не проводилось. Исследования объемной пористости покрытий показывают, что при МЭУ наибольшее влияние на нее оказывают параметры электромагнитных потоков в рабочем зазоре и размеры частиц ферромагнитного порошка [50, 52]. В работе [51] установлено, что объемная пористость нанесенных покрытий на устройствах МЭУ с ЭМС по схеме 5 (таблица 1.3) изменяется в пределах 6–15 %.

Выполненный сравнительный анализ ЭМС показывает, что они достаточно сложны в управлении и не в полной мере обеспечивают синхронную во времени работу ИТТ и ИП внешнего магнитного поля. Следует отметить, что при реализации процесса МЭУ ни одно используемое на практике устройство МЭУ с ЭМС по схемам 1–5 (таблица 1.3) не обеспечивает одновременно наибольшую производительность и качество формируемых покрытий. В соответствии с этим устройства МЭУ с ЭМС по схемам 1 и 2 (см. таблицу 1.3) рекомендуются для упрочнения цилиндрических или плоских

поверхностей деталей с последующей механической обработкой до первоначального размера [52, 53, 59, 60, 76]. Устройства МЭУ с ЭМС по схемам 3–5 (таблица 1.3) используются для упрочнения и восстановления изношенных до 0,1 мм поверхностей деталей машин или для комбинированной обработки поверхностей с износом более 0,3 мм (например, с последующей электродуговой наплавкой) [50, 51, 57, 76].

1.6. Направления совершенствования технологии магнитно-электрического упрочнения

Использование энергии электромагнитного поля для упрочнения и восстановления деталей предложено рядом исследователей, работавшим под научным руководством академиков Е. Г. Коновалова, П. И. Ящерицына: Б. П. Чемисовым, Г. С. Шулевым, И. Ф. Марченко, Л. М. Акуловичем, В. И. Абрамовым, Б. П. Борисовым. Дальнейшее развитие процесс обработки в электромагнитном поле получил в исследованиях Л. М. Кожуро, В. И. Гальго, М. Л. Хейфеца, Т. К. Романовой и был назван электромагнитной наплавкой, так как, по их утверждению, энергия электромагнитного поля и пути ее преобразования при термомеханическом воздействии на упрочняемую поверхность являются доминирующими факторами, определяющими физико-химический характер нанесения покрытия. Однако в дальнейших исследованиях авторов Л. М. Акуловича, Ф. И. Пантелеенко, В. А. Люцко, М. П. Кульгейко, А. В. Мирановича установлено, что процесс формирования упрочненного поверхностного слоя в электромагнитном поле имеет ограничения по толщине покрытия, а по механизму физических явлений относится к упрочняющим методам. Поэтому рассматриваемая технология вернулась к прежнему названию – магнитно-электрическое упрочнение.

Устройства для реализации процесса МЭУ могут быть выполнены как по однополюсной, так и по двухполюсной схеме. Двухполюсная схема при прочих равных условиях обеспечивает более высокую стабильность процесса и его производительность, а однополюсная – более универсальна. Стабильность процесса повышается, если подачу ферропорошка в рабочую зону осуществ-

лять в потоке рабочей жидкости. МЭУ в пульсирующем магнитном поле с вибрацией полюсного наконечника исключает возникновение короткого замыкания в цепи разрядного тока, что позволяет использовать неимпульсные источники и гарантирует стабильность процесса нанесения покрытий.

Для улучшения геометрических и физико-механических параметров качества упрочненных и восстановленных поверхностей предложено [83, 84] МЭУ совмещать с поверхностным пластическим деформированием, что позволяет изменять остаточные напряжения растяжения и обеспечивать получение сжимающих напряжений, повышающих усталостную прочность деталей машин. Комбинированный метод МЭУ с ППД может осуществляться по различным схемам, с использованием одного, двух или трех накатных элементов [85, 86].

Анализ научных данных показывает, что обеспечение сплошности и минимальной разнотолщинности и пористости покрытий, высокой производительности упрочнения и восстановления деталей возможно за счет стабилизации МЭУ посредством управляющих воздействий на электромагнитные и (или) конструктивные параметры устройств МЭУ. Наибольшее применение нашли следующие способы стабилизации процесса МЭУ: в пульсирующем магнитном поле с фазовым сдвигом между напряжениями ИТТ и ЭМ [60, 76]; с автоматическим регулированием рабочего зазора изменением электрического сопротивления в нем [78, 79]. Первый способ используется для нанесения высокопрочных покрытий на детали типа тела вращения, второй – для наплавки на плоские и сложнопрофильные поверхности.

Следует отметить, что для первого способа стабилизации процесса нанесения покрытий на устройствах МЭУ с ЭМС по схеме 3 (таблица 1.3) условие синхронизации воздействий импульсами электрического тока и магнитного поля посредством фазового сдвига проблематично из-за различия в питании напряжения сварочных трансформаторов и электромагнитных катушек [76]. По данным авторов работы [54], устройства МЭУ с ЭМС по схеме 4 (таблица 1.3) обеспечивают более высокую стабильность наплавки и качество покрытий. Однако производительность их меньше, чем у двухполюсных устройств МЭУ с ЭМС по схеме 5 (таблица 1.3).

В работе [78] показано, что оснащение устройств МЭУ дополнительными блоками стабилизации обеспечивает повышение сплошности покрытий на 25–30 % и микротвердости на 500–1000 МПа по сравнению с устройствами без блоков стабилизации. Снижение количества микропор и раковин в покрытии объясняется стабилизацией МЭУ за счет автоматизации управлением электрическим сопротивлением, изменение которого обусловлено непостоянством величин силы технологического тока и магнитной индукции в РЗ.

Вместе с тем, обеспечить устойчивую связь силы разрядного тока ИТТ и сопротивления в РЗ достаточно сложно из-за инерционности исполнительных элементов блока стабилизации.

Несмотря на результативность используемых способов стабилизации МЭУ в известных устройствах выступают основные ограничивающие факторы – сложность синхронизации импульсов электрического тока и магнитного поля в условиях фазового сдвига; проблематичность обеспечения стабильности во времени величин силы технологического тока и магнитной индукции в РЗ; сложность конструкций ЭМС и их высокое энергопотребление; невысокий уровень электробезопасности. При этом на устойчивость цепочек-микроэлектродов из частиц ФМП в РЗ, вероятнее всего, основное влияние оказывает внешнее электромагнитное поле, генерируемое магнитной системой с ЭМ.

Решить проблему стабилизации процесса нанесения покрытий предполагается за счет обеспечения в рабочей зоне устройств МЭУ постоянной во времени величины магнитной индукции, а также устойчивой обратной связи разрядного тока и напряжения с изменяемыми технологическими параметрами. Это возможно путем применения магнитной системы с постоянными магнитами и инверторного источника регулируемого импульсного сварочного тока и напряжения [69, 87]. В результате появляется возможность создания малогабаритных мобильных устройств упрочнения и восстановления, устанавливаемых на универсальное металлообрабатывающее оборудование, которым располагают ремонтно-обслуживающие предприятия АПК, в том числе и ремонтные мастерские.

В связи с этим возникла необходимость в совершенствовании процесса МЭУ посредством:

- изучения влияния переменных и постоянных внешних МП на формирование в рабочей зоне цепочек-микроэлектродов из частиц ФМП;
- обоснования выбора технологических схем обработки деталей типа тела вращения и источника технологического тока;
- разработки методики расчета конструктивных параметров МС и установлении зависимости величин магнитной индукции в рабочей зоне от размеров ПМ;
- разработки на основе экспериментальных исследований математико-статистических моделей, устанавливающих зависимости производительности процесса упрочнения и износостойкости формируемых покрытий от технологических режимов МЭУ в постоянном магнитном поле;
- проведения исследований физико-механических свойств и износостойкости поверхностей деталей машин после МЭУ в постоянном магнитном поле.

Анализ современных технологий упрочнения и восстановления показал, что актуальной задачей в ремонтном производстве является повышение надежности и долговечности быстроизнашивающихся деталей машин и механизмов. С учетом того, что для процесса МЭУ характерны отсутствие термической деформации и специальной предварительной подготовки обрабатываемых поверхностей деталей, способ наиболее рационально применять для упрочнения и восстановления крупногабаритных сплошных и полых деталей типа тела вращения. Однако соответствие требованиям отечественных ремонтных предприятий и целесообразность реализации способа с этой целью не подтверждена ни экспериментально, ни его внедрением. Таким образом, возникает необходимость в разработке, экспериментальном исследовании, внедрении и технико-экономической оценке применимости технологии упрочнения и восстановления наружных цилиндрических поверхностей деталей магнитно-электрическим упрочнением в постоянном магнитном поле.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ

2.1. Физические основы нанесения покрытий при магнитно-электрическом упрочнении

2.1.1. Формирование рельефа поверхности в процессе магнитно-электрического упрочнения

При МЭУ упрочненный слой формируется путем образования на поверхности детали множества точечных вкраплений [88, 89] в результате нанесения расплавленного материала частиц порошка (рисунок 2.1).

При подаче порошка в рабочий зазор частицы порошка, смещаясь относительно друг друга, уплотняются (рисунок 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 пробоем оксидных пленок на их поверхностях, в результате чего образуются каналы проводимости технологического тока. Места контакта частиц порошка с поверхностью детали оплавляются (рисунок 2.1 *б*), тем самым создаются условия для возникновения кратковременного дугового разряда (рисунок 2.1 *в*). Электрическая дуга расплавляет частицы порошка (рисунок 2.1 *г*) и приваривает их к поверхности детали (рисунок 2.1 *д*).

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 $q_{\text{п}}$ и удельной длительности упрочне-

ния τ . Для обеспечения высокой производительности технологический процесс следует вести при больших значениях $q_{\text{п}}$ и меньших τ . В соответствии с зависимостью изменения массы детали от подачи порошка (рисунок 2.2 а) масса нанесенного покрытия m пропорциональна изменению $q_{\text{п}}$. Отсюда следует, что при МЭУ необходимо выбирать максимально допустимую источником питания подачу порошка.

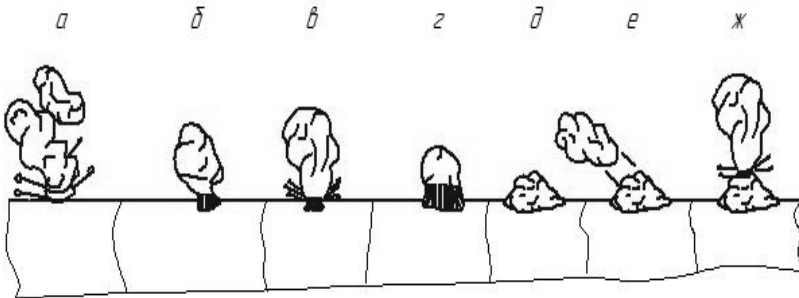
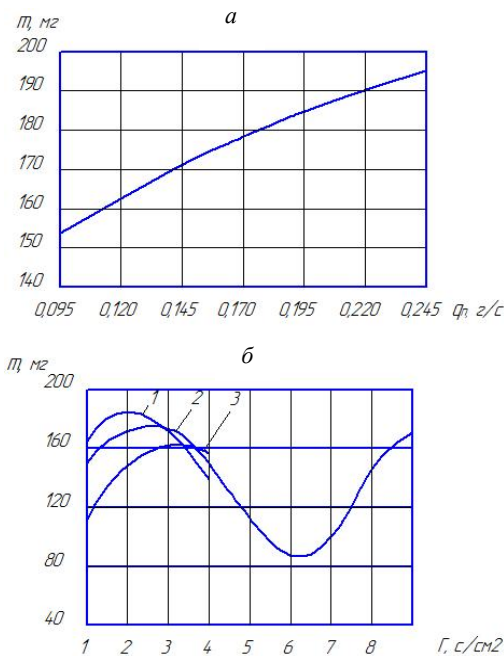


Рисунок 2.1 – Стадии процесса формирования точечного вкрапления при магнитно-электрическом упрочнении

В начале МЭУ перенос материала порошка происходит наиболее интенсивно (рисунок 2.2 б), затем этот процесс замедляется, прекращается и начинает частично сниматься нанесенный слой [89, 90]. Длительная наплавка не приводит к непрерывному увеличению толщины покрытия.

Покрyтия, получаемые при $\tau > 4 \text{ с/см}^2$ (рисунок 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 [88].

При увеличении напряжения в рабочем зазоре возрастает переносимая в единицу времени масса материала порошка (рисунок 2.2 б). Это объясняется тем [60, 88], 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 [59, 88], что наибольший перенос мате-



а – от подачи порошка;
б – от удельной длительности упрочнения

Рисунок 2.2. – Зависимость массы наносимого покрытия от режимов МЭУ

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 превалировал 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

риала порошка достигается при использовании более мощных источников питания.

Образовавшиеся после первых разрядов точечные вкрапления материала порошка выступают над поверхностью детали (рисунок 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 (рисунок 2.1 ж).

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.

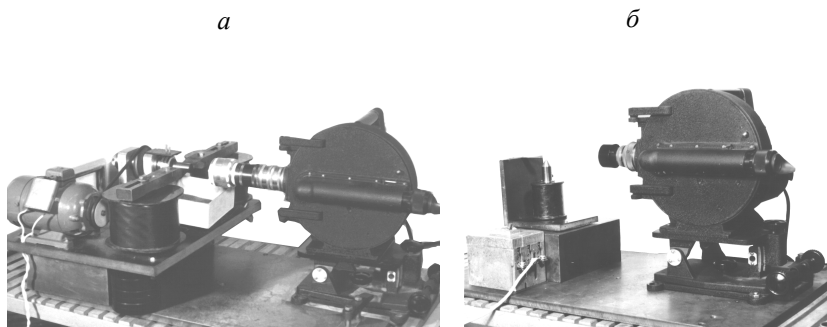
Изучение процесса переноса ферромагнитного порошка на упрочняемую поверхность детали и поиск путей повышения интенсивности и качества магнитно-электрического упрочнения обусловили необходимость исследования кинематики частиц порошка в электромагнитном поле и анализа сил, действующих на ферромагнитные частицы в рабочей зоне.

2.1.2. Кинетика частиц ферромагнитного порошка

Кинематика частиц порошка. Кинематика образования токопроводящих цепочек из частиц ферромагнитного порошка, расплавления частиц и разрыва токопроводящего канала изучалась путем скоростной киносъемки [88, 91].

Образование токопроводящих цепочек из частиц ферромагнитного порошка в электромагнитном поле рабочего зазора при отсутствии разрядного напряжения между полюсным наконечником электромагнита и деталью исследовалось на специальной установке (рисунок 2.3 а) при упрочнении наружной цилиндрической поверхности. Опыты проводились на консольно закрепленных в шпинделе установки образцах диаметром 20 мм, на торцах которых было нанесено по 60 радиальных рисок с равномерным шагом. Окружная скорость вращения образцов составляла 0,3 м/с, рабочий зазор – 1,2 мм, размер частиц порошка ферробора марки ФБ-1 0,25–0,32 мм, величина магнитной индукции в рабочем зазоре – 0,6 Тл.

Изучение кинематики и расплавления частиц порошка при электрическом разряде проводилось на установке (рисунок 2.3 б), обеспечивающей киносъемку во взаимно перпендикулярных направлениях. Перед началом киносъемки рабочий зазор заполняли частицами ферропорошка так, чтобы в нем образовывались три токопроводящие цепочки по четыре или пять частиц.



a – образование цепочек порошка; *б* – расплавление частиц при электрическом разряде

Рисунок 2.3 – Фотографии установки для исследования кинематики процесса МЭУ

В магнитном поле рабочего зазора частица ферромагнитного порошка испытывает действие вращающего момента

$$M = P_m H \sin \varphi,$$

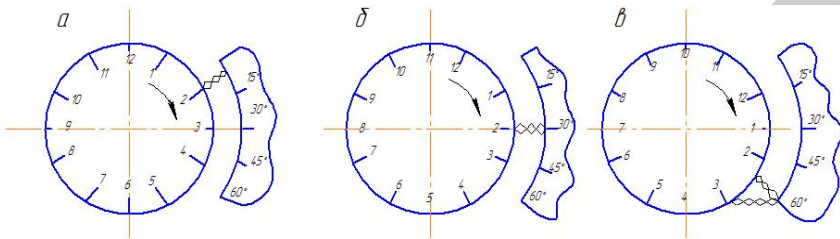
где P_m – магнитный момент частицы;

H – напряженность магнитного поля;

φ – угол между направлением магнитных силовых линий и наибольшей осью частицы.

Под действием этого момента ферромагнитные частицы уже на входе в рабочий зазор ориентируются и выстраиваются в цепочки вдоль силовых линий магнитного поля. Образовавшиеся цепочки, сохраняя радиальные направления, при вращении образца перемещаются вместе с упрочняемой поверхностью (рисунок 2.4). При этом частицы, граничащие с поверхностью полюсного наконечника электромагнита, скользят по ней с угловой скоростью, равной скорости самой цепочки. У выхода из рабочего зазора каждая из цепочек останавливается и начинает совершать колебательные движения вокруг точки контакта с поверхностью полюсного наконечника. По мере дальнейшей подачи частиц порошка в рабочий зазор количество цепочек в нем увеличивается, и они образуют у выхода из зазора плотную «щетку», которая уже не совершает колебательных движений. Частицы, граничащие с упрочняемой

поверхностью, смещаются от радиального направления цепочки в сторону вращения образца. В результате у выхода из рабочего зазора происходит «выпучивание» крайних цепочек. Некоторые частицы, граничащие с поверхностью детали, «увлекаются» ею и отделяются от общей массы, а затем под действием центробежных сил отрываются от упрочняемой поверхности.



а – у входа в рабочий зазор; **б** – в середине; **в** – у выхода из рабочего зазора

Рисунок 2.4. – Последовательные положения цепочки ферропорошка в рабочем зазоре при вращении образца

Так как величина рабочего зазора во много раз меньше радиуса упрочняемых поверхностей и соизмерима с размерами частиц, то радиальным перемещением последних можно пренебречь. Тогда при расчете скорости перемещения частиц порошка в рабочем зазоре в качестве обобщенных координат можно принять расстояние от геометрического центра частицы до оси вращения образца и угловое положение частицы относительно оси вращения.

Исходя из этого, линейную скорость w_{zi} перемещения i -й ферромагнитной частицы цепочки, с учетом равенства угловых скоростей вращения детали ω_d и частиц, можно выразить как функцию угловой скорости детали

$$w_{zi} = \omega_d [R_d + (i - 0,5)\Delta],$$

где R_d – радиус упрочняемой детали;

Δ – наибольший размер частицы.

При наличии разрядного напряжения между полюсным накопечником и деталью кинематика частиц ферропорошка в рабочем

зазоре сохраняется. Электрическая проводимость образовавшихся цепочек неодинакова, и максимальный ток проходит по цепочке или группе цепочек с наибольшей проводимостью. В результате контактирующие с поверхностью детали частицы этой цепочки расплавляются, а сама цепочка разрывается. За это время оставшиеся цепочки перемещаются к выходу из рабочего зазора, а на их месте образуются новые за счет подачи в рабочий зазор ферромагнитного порошка. Затем все повторяется.

Так, в процессе МЭУ вся масса порошка смещается к выходу из рабочего зазора, где и образуется участок с наибольшей проводимостью. Эрозия полюсных наконечников электромагнита происходит, в основном, на выходе из рабочего зазора, поэтому концентрическая форма зазора становится серповидной.

При прохождении электрического разрядного тока по цепочке из частиц порошка происходит взрыв перемычки из расплавленного металла. При этом образовавшиеся микрообъемы жидкого металла выбрасываются ударной волной из зоны разряда. На кинограммах (рисунок 2.5) отчетливо просматриваются траектории движения частиц металла, выброшенных из рабочей зоны ударной волной. В зоне действия магнитного поля траектории большинства частиц представляют собой винтовую линию. Причина такого движения объясняется [88, 92] наличием электрического заряда у частиц расплавленного материала порошка. Поэтому поведение в рабочей зоне таких частиц можно описать уравнениями, известными из теории электромагнетизма [93].

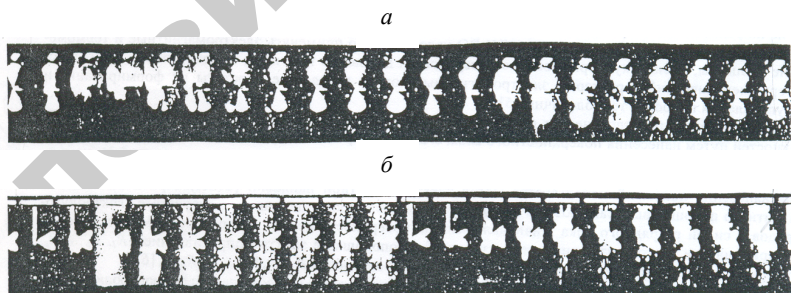


Рисунок 2.5. – Кинограммы электрических разрядов, отснятых в направлении оси (а) и перпендикулярно оси (б) единичной цепочки частиц ферромагнитного порошка

Обнаружено [94], что скорость движения частиц уменьшается по мере их удаления от оси разряда. Если считать, что энергия единичного разряда мгновенно выделяется вдоль его оси и переходит без потерь в энергию ударной волны, то скорость возникшей ударной волны [94]

$$w = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda W}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{4}} \tau^{-\frac{1}{2}},$$

где w – скорость движения фронта ударной волны;

λ – коэффициент, зависящий от типа волны и уравнения состояния;

ρ_0 – начальная плотность среды;

W – энергия разряда;

τ – текущее время.

Скорость движения частиц материала порошка $V_{\text{ч}}$ будет отставать от скорости фронта ударной волны [95, 96]

$$V_{\text{ч}} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} w,$$

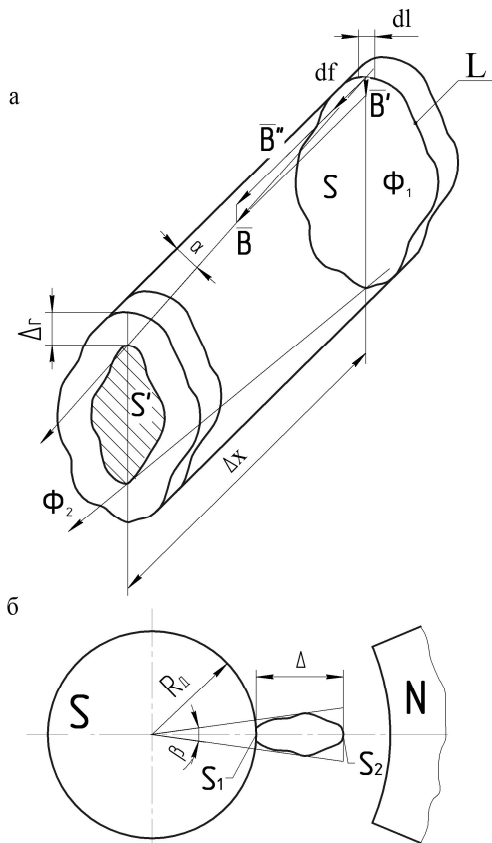
где ρ – плотность среды после прохождения фронта ударной волны.

Так как ρ после прохождения ударной волны быстро убывает, то соответственно быстро уменьшается и скорость частиц. Так, при обработке кинограмм (рисунок 2.5) установлено, что через 10^{-3} с от момента взрыва скорость частиц составляет 15–18 м/с, а через $2 \cdot 10^{-3}$ с будет 5–8 м/с. По кинограммам обнаружено, что при МЭУ наружных цилиндрических поверхностей большинство разрядов происходит у выхода из рабочего зазора. Это послужило основанием для исследования влияния геометрических параметров полюсных наконечников на увеличение массы покрытия и для их оптимизации, обеспечивающей уменьшение энергозатрат на намагничивание. Киносъемкой определено также, что продолжительность электрического разряда составляет 10^{-3} – $2 \cdot 10^{-3}$ с.

Динамика частиц порошка. Характер движения ферромагнитных частиц в рабочем зазоре можно объяснить путем анализа

действующих на них сил на различных стадиях формирования поверхностного слоя.

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



a – для элементарного участка;
б – для частицы

Рисунок 2.6. – Схема действия сил на частицу порошка нормально к поверхности детали

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 [97, 98], вектор его индукции \vec{B} можно разложить на два составляющих \vec{B}' и \vec{B}'' (рисунок 2.6 а). Мысленно рассечем час-

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

$$df = J_M B' dl, \quad (2.1)$$

где J_M – молекулярный ток по периметру участка, возникший вследствие намагничивания частицы.

Учитывая, что $B' = B \sin \alpha$ (рисунок 2.6 а), и интегрируя (2.1), определим силу f , действующую на весь периметр участка L :

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

Радиальная сила, действующая на частицу ферромагнитного порошка, находящуюся в неоднородном магнитном поле [99]:

$$f_p = \sum f = P_M \frac{\Delta B}{\Delta x}, \quad (2.2)$$

где P_M – магнитный момент частицы ферромагнитного порошка.

Определим величину градиента напряженности магнитного поля, приняв за Δx наибольший размер частицы порошка – Δ (рисунок 2.6 б).

Тогда

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

где Φ – магнитный поток;

S_1 и S_2 – площади сечений.

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

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

где R_d – радиус упрочняемой поверхности;

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

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

$$\text{Тогда } \frac{\Delta B}{\Delta x} = \frac{\Phi}{\beta b R_d (R_d + \Delta)}, \quad (2.3)$$

Магнитный момент частицы порошка в форме эллипсоида вращения

$$P_m = \frac{4}{3} K H_1 \Delta^2 b, \quad (2.4)$$

где K – магнитная восприимчивость материала ферропорошка;

H_1 – напряженность магнитного поля на нижней границе частицы;

Δ – размер большой оси эллипсоида, направленной вдоль магнитного поля.

Подставив (2.3) и (2.4) в выражение (2.2), 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 μ – магнитная проницаемость материала порошка.

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:

$$f_{\text{ц}} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\mu \Delta_i^2 b_i K H_i^2}{R_i + \Delta_i}, \quad (2.5)$$

где n – число частиц в цепочке;

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

H_i – напряженность магнитного поля на границе i -й частицы;

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

Таким образом, цепочка из ферромагнитных частиц под действием силы $f_{\text{ц}}$ прижимается к упрочняемой поверхности и перемещается вместе с ней по зазору, что и было обнаружено при кино съемке.

Действие тангенциальных сил. Для формирования поверхностного слоя необходимо затратить энергию на создание магнитного поля в рабочей зоне, нагрев и расплавление частиц порошка, разогрев поверхностного слоя детали, относительное перемещение упрочняемой поверхности и сердечников электромагнитов с ферромагнитным порошком, подачу упрочняющего порошка и транспортирующей среды.

Затраты энергии на создание магнитного поля в рабочей зоне, на подачу упрочняющего ферромагнитного порошка и транспортирующей среды определяются известными методами [100, 101] при проектировании устройства для МЭУ конкретных деталей. Затраты энергии на нагрев и расплавление частиц порошка, на разогрев поверхностного слоя детали определяются режимами работы применяемого источника разрядного тока.

При разработке конструкций устройств для МЭУ необходимо определять величину мощности, требуемой для осуществления относительного перемещения упрочняемой поверхности и сердечников электромагнитов с ферромагнитным порошком.

Мощность привода можно рассчитать исходя из величины тангенциальных сил, действующих на упрочняемую поверхность детали.

Тангенциальные магнитные силы возникают в результате неравномерного распределения ферромагнитного порошка в рабочем зазоре [98, 102] вследствие изменения магнитной индукции на границах участков с различным магнитным сопротивлением. Градиенты магнитной индукции можно создать искусственно концентраторами магнитного поля.

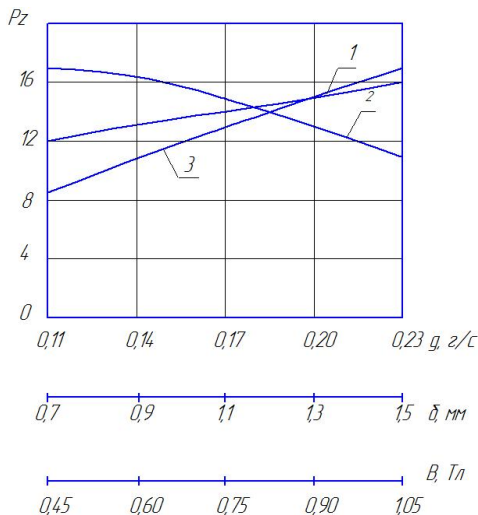
Процесс распределения частиц по зазору хаотичен, поэтому градиент магнитной индукции на отдельных участках рабочей зоны может изменяться с частотой образования цепочек из частиц порошка, как по величине, так и по направлению. При таких условиях тангенциальная сила, действующая на единичную частицу, будет неодинакова для различных частиц. Вследствие этого целесообразно рассмотреть величину суммарной тангенциальной силы.

Установлено [88, 103], что частицы ферромагнитного порошка концентрируются у выхода из рабочего зазора узкой полосой. Поэтому величину тангенциальных сил целесообразно относить к единице ширины полюсного наконечника.

Результаты исследований показывают [88], что величина тангенциальной силы P_z определяется технологическими факторами, наиболее значимым из которых является магнитная индукция B :

$$P_z = (0,08^2 - 0,20B + 0,18)^{-1}.$$

С увеличением магнитной индукции в рабочем зазоре величина тангенциальных сил возрастает (рисунок 2.7, кривая 1). Подобный характер зависимости можно объяснить ростом электродинамического торможения образца при увеличении магнитной индукции и усиленным удержанием частиц порошка в зазоре, в результате чего большое количество частиц участвует в абразивной подготовке поверхности и тормозит вращение образца. Однако при дальнейшем увеличении магнитной индукции темпы роста величины тангенциальных сил замедляются. Это объясняется тем, что по мере насыщения магнитная проницаемость ферромагнитного порошка приближается к магнитной проницаемости воздуха [104], в результате силы удержания частиц порошка в рабочем зазоре не возрастают.



1 – от магнитной индукции; 2 – от величины рабочего зазора;
3 – от подачи порошка

Рисунок 2.7. – Зависимость тангенциальной силы от режимов МЭУ

Увеличение рабочего зазора δ приводит к уменьшению тангенциальных сил (рисунок 2.7, кривая 2):

$$P_z = 34,72\delta^{-1} - 13,0\delta^{-2} - 6,06.$$

Происходит это вследствие того, что уменьшается количество частиц порошка, участвующих в абразивной подготовке упрочняемой поверхности и тормозящих вращение детали, а количество частиц, контактирующих с упрочняемой поверхностью, определяется числом токопроводящих цепочек.

Тангенциальные силы растут с увеличением количества подаваемого в рабочую зону ферромагнитного порошка q_n (рисунок 2.7, кривая 3):

$$P_z = 30,0q_n + 9,0.$$

С увеличением количества подаваемого ферромагнитного порошка растет число частиц, контактирующих с упрочняемой

поверхностью и тормозящих вращение образца. Вместе с тем, по мере заполнения зазора ферромагнитным порошком его магнитная проницаемость увеличивается, вследствие чего происходит перераспределение магнитного потока по сечению зазора и градиент магнитной индукции уменьшается.

Действие сил при электродуговом 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 (рисунок 2.8).

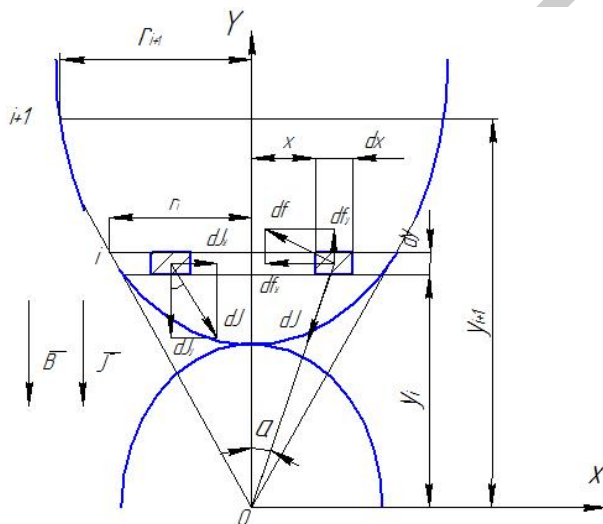


Рисунок 2.8. – Схема действия сил на частицу порошка при прохождении разрядного тока

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 [99, 105], равна

$$dB = \frac{\mu_a}{4\pi} \frac{dJ d\ell \sin\gamma}{R^2},$$

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;

γ – угол между направлением dJ и R ;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды.

Направление вектора магнитной индукции dB , определяемое по правилу буравчика, перпендикулярно плоскости рисунка 2.8.

Согласно теории электромагнетизма [106], сила, действующая на элемент $d\ell$:

$$df = [dB dJ] d\ell. \quad (2.6)$$

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

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

где J – ток в цепочке;

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

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 ока-

зывает 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

$$df_{\text{вр}} = B dJ_x dx.$$

Так как $dJ_x = dJ \sin \alpha$ (рисунок 2.8), то величина крутящего момента по сечениям изменяется соответственно изменению угла α . 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, нетрудно 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 [107].

Рассмотрим в i -м сечении на расстоянии x от оси частицы (рисунок 2.8) 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

$$dJ = \delta_i 2\pi x dx = \frac{2J}{r_i^2} x dx. \quad (2.7)$$

С помощью уравнения для магнитного поля внутри прямолинейного проводника с током [108] определим магнитную индукцию в рассматриваемом элементарном участке

$$dB = \frac{\mu J_x}{2\pi r_i^2}. \quad (2.8)$$

Подставляя (2.7) и (2.8) в формулу (2.6), учитывая, что $d\ell = dy / \cos\alpha$, 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

$$f_{yi} = \int_0^{r_i} df_{yi} = \frac{\mu J^2}{4\pi} \frac{dy}{y}. \quad (2.9)$$

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 :

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

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

$$f_y = \frac{\mu J^2}{4\pi} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}. \quad (2.10)$$

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 уравновешивается, 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, дейст-

вующие 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 энергии 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 неодинакова, что обуславливает различный градиент температур в зонах контакта частиц порошка между собой и с поверхностями детали и полюсного наконечника.

В общем случае, согласно [109], тепловая мощность q_3 , расходуемая на нагрев и плавление электрода-цепочки, определяется мощностью q_δ , выделяющейся по его длине от проходящего тока, и эффективной мощностью $q_{эд}$ электрической дуги

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

где J – сила тока;

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

η_3 – эффективный КПД нагрева дугой;

U – напряжение дуги.

При низкой интенсивности передачи энергии электромагнитного поля и постоянном внешнем давлении, когда потери энергии в окружающую среду минимальны, составляющая тепловой мощ-

ности q_{δ} может вызвать изотермическое расплавление электрода-цепочки. Однако в реальном процессе энергия подводится так быстро, что выделяющаяся теплота не успевает отводиться, и контактирующий участок детали, как видно из микрофотографий, 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 Δ и поперечным сечением ΔS ; 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 Δ и сечением ΔS .

При таких допущениях распределение температуры θ [109, 110] по длине x электрода-цепочки описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} c_n p_n \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= \frac{\partial \lambda_n}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_n \partial^2 \theta}{\partial x^2}; \\ &\dots \dots \dots \\ c_n p_n \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda_n \partial J}{\partial x} \right) + \frac{J^2 R_i}{\Delta S}; \\ &\dots \dots \dots \\ c_n p_n \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= \frac{\partial \lambda_n}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_n \partial^2 \theta}{\partial x^2}; \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

с граничными условиями:

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

где c_n, c_p, c_d – удельные теплоемкости материалов полюсного наконечника, порошка и детали соответственно;

p_n, p_p, p_d – удельные электрические сопротивления;

$\lambda_n, \lambda_p, \lambda_d$ – коэффициенты теплопроводности;

θ_c – температура окружающей среды;

J – сила тока дуги;

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 (2.11) и граничные условия 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 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 из (2.5) значение силы $f_{ц}$,

$$R_{i(i+1)} = p_f t_f / (\pi r^2 f_{ц}^{0,75}), \quad (2.12)$$

где R_k – сопротивление в контакте;

p_k – давление в контакте;

p_f – удельное сопротивление оксидной пленки;

t_f – суммарная толщина оксидной пленки;

r – радиус зоны контакта.

Расчеты процесса нагрева электрода-цепочки были проведены с учетом контактных сопротивлений (2.12) 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 [57, 109, 110].

Следовательно, для обеспечения условий возникновения дугового разряда у поверхности детали необходимо добиться, чтобы контактное сопротивление $R_{i(i+1)}$ в этой зоне было максимальным. В соответствии с (2.4), (2.5) и (2.12) 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 (2.11), (2.12), 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 [113, 114].

Применительно к условиям МЭУ на основе расчетов тепловых полей по методу источников с применением принципа наложения [115, 116], когда покрытие значительной толщины наносится за один проход и сопровождается объемной зоной тепловыделения, и по плоской схеме [117], когда размер зоны тепловыделения при наплавке мал, предложено [109] движущийся источник тепла принимать полосовым малой ширины или даже линейным, распределенным вдоль подачи полюсного накоенчика [118].

Закон распределения интенсивности теплового потока q_i 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 [119].

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 [120, 121]:

$$\theta_i = \frac{q_i}{2\pi\lambda(z - z_n)} \exp \left[-\frac{V_n((x - x_n)^2 + y^2)}{4\omega(z - z_n)} \right], \quad (2.13)$$

где $x_n, 0, z_n$ – координаты точечного источника;

q_i – его интенсивность;

λ – коэффициент теплопроводности;

ω – коэффициент температуропроводности;

V_n – скорость движения точечного источника тепла;

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 (2.13) было проинтегрировано по x_n и Z_n . Интегрирование по x_n от $x_n = -\ell_0$ до $x_n = \ell_0$ дает выражение [51, 120, 121] для полосового источника

$$\theta_{\ell} = \frac{q_{\ell} \sqrt{\omega}}{2\lambda \sqrt{\pi V_n}} \int_0^{B_0} \frac{d z_n}{\sqrt{z - z_n}} \left[-\frac{V_n y^2}{4\omega(z - z_n)} \right] \times \quad (2.14)$$

$$\times \left[\operatorname{erf} \left((\ell_0 + x) \sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z - z_n)}} \right) + \operatorname{erf} \left((\ell_0 - x) \sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z - z_n)}} \right) \right],$$

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

q_{ℓ} – интенсивность источника, распределенного по площадке $2\ell_0 \cdot B_0$.

Проинтегрировав (2.14) и считая, что все тепло выделяется вдоль оси детали X , а $B_0 = z - z_n$, получим выражение для линейного источника [109, 120, 121]:

$$\theta_r = \frac{q_r \sqrt{\omega}}{2\lambda \sqrt{\pi V_n} (z - z_n)} \exp \left[-\frac{V_n y^2}{4\omega(z - z_n)} \right] \times \quad (2.15)$$

$$\times \left[\operatorname{erf} \left((\ell_0 + x) \sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z - z_n)}} \right) + \operatorname{erf} \left((\ell_0 - x) \sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z - z_n)}} \right) \right],$$

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

Полученные соотношения (2.14) и (2.15) приемлемы для рассмотрения температурных полей деталей больших размеров с достаточным теплоотводом от зоны действия источника.

В случае, если теплоотвод недостаточно интенсивен, то 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 [118]. Для такой нестационарной одномерной задачи с граничными условиями I рода дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид [109, 116, 122]:

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

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

граничных условиях $\theta(R, \tau) = \theta_c = \text{const}$;

$\partial \theta(0, \tau) / \partial r = 0$; $\theta(0, \tau) \neq \infty$.

Решение этого уравнения [51, 120, 121] следующее:

$$\frac{\theta_c - \theta}{\theta_c - \theta_0} = \sum_{n=1}^{\infty} 2 \exp \left[-\frac{\mu_n^2 \omega \tau}{R^2} \right] j_0 \left(\frac{\mu_n r}{R} \right) / (\mu_n j_1(\mu_n)), \quad (2.16)$$

где R – радиус цилиндра;

τ – время, прошедшее с момента выделения теплоты;

j_0 – функция Бесселя I рода нулевого порядка от действительного аргумента; $\mu_n = (2n - 1) \pi / 2$.

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 [116, 122]:

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

при начальном условии $\theta(r, x, 0) = \theta_0 = \text{const}$,
 граничных условиях $\theta(r, \pm H/2, \tau) = \theta_c = \text{const}$,
 $\theta(R, x, \tau) = \theta_c = \text{const}$.

Решение этого уравнения имеет вид [122]:

$$\frac{\theta_c - \theta}{\theta_c - \theta_0} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} 4 \exp \left[- \left(\mu_m^2 + \left(\mu_n \frac{2R}{H} \right)^2 \right) \frac{\omega \tau}{R^2} \right] \times \quad (2.17)$$

$$\times \cos \left(\mu_n \frac{2x}{H} \right) j_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) / (\mu_n \mu_m j_1(\mu_m)),$$

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

По формулам (2.14)–(2.17) можно проводить расчеты температурных полей рабочей зоны для быстродвижущегося полосового или линейного источника [118].

Экспериментальные исследования температурных полей на поверхности обрабатываемой детали для определения граничных условий I рода показали, что упрочняемая поверхность нагревается в рабочей зоне до температуры в диапазоне 800–1200 °С. При этом температура по глубине всей детали в результате теплообмена с окружающей средой стабилизируется в интервале 200–300 °С [110, 123]. 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. Влияние вида источника технологического тока на стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения

На стабильность показателей качества покрытий, 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 [52, 70]. При этом диапазон значений параметров, обеспечивающий стабильный процесс МЭУ, ограничен из-за технологических возможностей ЭМС, которые в основном определяются источниками технологического тока.

Несмотря на большое количество работ, посвященных стабилизации процесса нанесения покрытий в ЭМП, например [50, 59, 60, 78], обоснование технологических требований к 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 [87]. 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 [69, 87].

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 [124]. Основными преимуществами инверторных сварочных источников являются [125–128]:

- 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 0,75–0,95; малые габариты и масса;
- высокая электробезопасность; возможность выполнения сварочно-наплавочных работ, как в стационарных, так и в полевых условиях.

Следует отметить, что в работах [50, 59, 60, 78] 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 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 [50, 51] 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·мм²); величина магнитной индукции в рабочем зазоре $B_z = 1,0$ Тл; размер частиц ФМП $\Delta = 320$ мкм; расход рабочей жидкости (СОЖ – 5%-й раствор эмульсола Э2 в воде) $q = 2,0 \cdot 10^{-3}$ дм³/(с·мм²).

Электрические измерения силы технологического тока в пределах 0,01–150 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 ЧЭ-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 [129]. В процессе исследования параметров качества покрытий изучалось по 5 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 ИТГ от средних значений [127, 130]:

$$k_{\text{в}} = \frac{\sigma_I}{I_{\text{д.ср.}}} 100 \%, \quad (2.18)$$

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

$i_{\text{д}}$ – действительное значение тока в i -й момент, А;

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

Для получения достоверных результатов эксперименты по определению производительности МЭУ, сплошности и разнотолщинности покрытий повторялись 50 раз, а их точность оценивалась следующим образом [131–133]:

– среднее арифметическое значение

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.19)$$

– абсолютная погрешность каждого опыта

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}, \quad (2.20)$$

– среднеквадратичная погрешность среднего арифметического

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}, \quad (2.21)$$

– доверительный интервал

$$\bar{x} - t_{\alpha,n} \sigma < x < \bar{x} + t_{\alpha,n} \sigma, \quad (2.22)$$

– относительная погрешность результатов опытов

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} 100 \%, \quad (2.23)$$

где x_i – результат i -го измерения;

$t_{\alpha,n}$ – критерий Стьюдента;

α – уровень значимости;

n – число измерений.

Стабильность исследуемых параметров качества формируемых покрытий и производительности МЭУ в работе определялась коэффициентом вариации по формуле [130]:

$$k_{vi} = \frac{\sigma_i}{M(\Pi_i)} 100 \%, \quad (2.24)$$

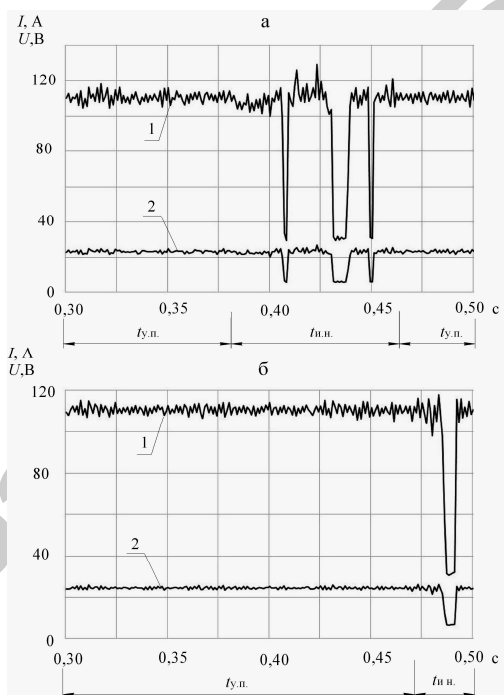
где $M(\Pi_i)$ – математическое ожидание i -го исследуемого параметра.

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 [127, 130].

Анализ осциллограмм (фрагменты представлены на рисунке 2.9 *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 ИТГ 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 ИТГ (участок импульсной нестабильности процесса кривой тока – $t_{и.н.}$) 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 ИТГ вызваны неравномерностью подачи ФМП в рабочий зазор из бункера-дозатора.



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

Рисунок 2.9. – Осциллограммы технологического тока (1) и напряжения (2) для сварочного выпрямителя модели ВД-306 (а) и инверторного сварочного источника модели Invertec V270 Г (б)

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 T 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 (таблица 2.1).

Таблица 2.1. – Статистическая оценка стабильности процесса МЭУ

Источник технологического тока модели	Количество измерений, n	Среднеквадратичное отклонение силы тока (σ_j), А	Среднее значение силы тока ($I_{д.ср.}$), 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

Результаты расчетов показывают, 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.

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 то, 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 [134].

Это обстоятельство подтверждается результатами исследования показателей качества покрытий и производительности процесса МЭУ (таблица 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 %.

Статистическая оценка экспериментальных значений исследуемых параметров (таблица 2.2) показывает, что значения коэффициентов вариации производительности $k_{vП}$, сплошности k_{vG} и разнотолщинности k_{vP} 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.

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	σ_i , мг/мин	$k_{vП}$, %		\bar{X} , мкм	σ_i , мкм	k_{vP} , %		\bar{X} , %	σ_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	11,3	12,4

2.3. Влияния внешнего магнитного поля на формирование в рабочем зазоре цепочек-микроэлектродов из частиц ферромагнитного порошка

Известно [51, 52, 73], 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 [69, 87].

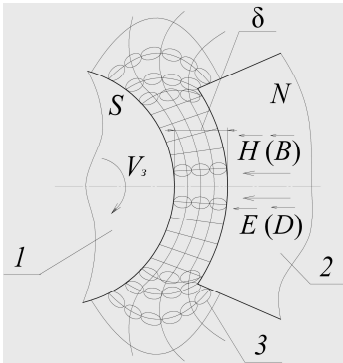
Следует отметить, что исключить вышеперечисленные недостатки возможно за счет использования в магнитных системах устройств МЭУ постоянных магнитов [68]. Тем самым обеспечиваются конструктивные преимущества магнитных систем на основе магнитотвердых материалов за счет:

- 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.

2.3.1. Теоретические исследования влияния внешнего магнитного поля на формирование цепочек-микроэлектродов из частиц ферромагнитного порошка в рабочем зазоре

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 [50–52, 57, 59, 60, 70, 78]. Следует отметить, что авторами не учитывалось влияние переменного характера 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 (рисунок 2.10) выполняется с помощью основных уравнений Максвелла [135, 136]:



1 – заготовка; 2 – полюсный наконечник; 3 – цепочка-микроэлектрод из частиц ФМП

Рисунок 2.10. – Картина магнитного поля в рабочем зазоре устройства МЭУ

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \gamma \vec{E}, \quad (2.25)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.26)$$

где γ – удельная проводимость среды, См/м;

векторные величины:

\vec{H} – напряженность магнитного поля, А/м;

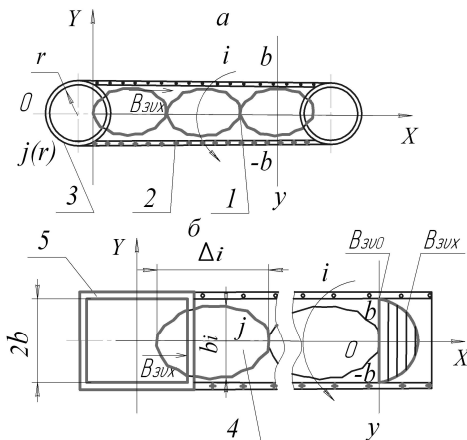
\vec{E} – напряженность электрического поля, В/м;

\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 [136]. В систему уравнений переменного магнитного поля входят уравнения непрерывности линий магнитной индукции \vec{B} и полного тока \vec{D} [137, 138]:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad \operatorname{div} \vec{D} = 0. \quad (2.27)$$



1 – цепочка-микроэлектрод; 2 – проводник-цилиндр; 3 – цилиндрический соленоид; 4 – частица ФМП; 5 – плоский соленоид

Рисунок 2.11. – Схема расположения цепочки-микроэлектрода в рабочем зазоре при расчете индукции с проводником цилиндрической (а) и прямоугольной формы (б)

рисунок 2.11 а), которая сориентирована вдоль силовой линии (по оси X). Примем следующие допущения: цепочку-микроэлектрод, состоящую из частиц ФМП (4) с размерами малой (b_i) и большой (Δ_i) осей, будем рассматривать как однородный проводник, представляющий собой трубку тока в виде сплошного цилиндра (2), у которого величины (γ , ϵ_a и μ_a) постоянные.

В результате преобразования по аналогии с [136] уравнений (2.25) и (2.26), исключая вектор напряженности \vec{E} , получим следующие уравнения:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\text{rot} \vec{E} = -\frac{1}{\gamma} \text{rot} \text{rot} \vec{H}, \quad (2.28)$$

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

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды, Гн/м.

Выбрав направление силовых линий за ось X системы координат (рисунок 2.3 а и б), для отличной от нуля компоненты магнитного поля B_{z0x} из уравнения соленоидальности (2.27) получим $(\partial / \partial x) B_{z0x} = 0$, и магнитная индукция может изменяться только поперек направления силовых линий. На основании этого рассмотрим воздействие нестационарного внешнего магнитного поля на цепочку-микроэлектрод (рису-

Аналогично источнику [136], 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 (2.28):

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_a} \Delta \vec{B}. \quad (2.29)$$

Исключив из уравнений (2.25 и 2.26) вектор индукции \vec{B} (плотность свободных зарядов в рассматриваемом проводнике $\rho = 0$), проведя такие же преобразования, получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \epsilon_a} \Delta \vec{E}. \quad (2.30)$$

где ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м.

Уравнения 2.29 и 2.30 приведены для мгновенных значений векторов МП и являются уравнениями диффузии или теплопроводности [136, 139]. Для рассмотрения этого случая примем следующее допущение: исследуемый объект рассматривается как соленоид 3 (рисунок 2.11 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 [136] задача определения магнитного поля $B_{\text{внх}}(r, t)$ в самом проводнике (цепочке-микроэлектроде) $r \leq b$ (рисунок 2.11 а) при $t > 0$ сводится к уравнению

$$\frac{\partial B_{\text{звх}}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_a} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial B_{\text{звх}}}{\partial r} \right), \quad (2.31)$$

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

Для рассматриваемого варианта граничные условия будут: $B_{\text{звх}}(b, t) = 0$ (при $t > 0$) и, соответственно, начальные – $B_{\text{звх}}(r, 0) = B_{\text{зв0}} = \mu_a i_{\text{п}} [136]$, где $i_{\text{п}} = I/2r$ – поверхностная плотность тока проводника, А/м [140]; I – электрический ток питания электромагнита, А.

Решение поставленной задачи (2.31) допускается [136, 139] заменой цилиндрической формы соленоида и проводника тока на прямоугольную с толщиной $2b$ (рисунок 2.11 б). В соответствии с таким принятым решением задача определения магнитной индукции и характера воздействия поля на цепочку-микроэлектрод примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_{\text{звх}}}{\partial t} &= \frac{1}{\gamma \mu_a} \left(\frac{\partial^2 B_{\text{звх}}}{\partial y^2} \right), & (|y| < b, t > 0); \\ B_{\text{звх}}(-b, t) &= B_{\text{звх}}(b, t) = 0 & (\text{при } t > 0); \\ B_{\text{звх}}(y, 0) &= B_{\text{зв0}} & (|y| \leq b). \end{aligned} \quad (2.32)$$

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

$$B_{\text{звх}}(y, t) = f(t) F(y). \quad (2.33)$$

Для этого проделаем трафаретные пошаговые решения с помощью разделения переменных уравнения Лапласа [139]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(t \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \frac{1}{t} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (2.34)$$

Подставим зависимость (2.16) в уравнение (2.34) и получим

$$F(y) \frac{d}{dt} \left(t \frac{df}{dt} \right) + \frac{1}{t} f(t) \frac{d^2 F}{dy^2} = 0. \quad (2.35)$$

Выполним разделение переменных равенства (2.35) посредством умножения на t и деления на произведение $f(t) F(y)$:

$$\frac{t}{f(t)} \frac{d}{dt} \left(t \frac{df}{dt} \right) + \frac{1}{F(y)} \frac{d^2 F}{dy^2} = 0. \quad (2.36)$$

Преобразуем полученное выражение (2.36) в обыкновенные уравнения для $f(t)$ и $F(y)$ с условием, что каждое из слагаемых (2.36) 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 [136]:

$$\frac{f'(t)}{vf(t)} = \frac{F''(y)}{F(y)} = -k^2. \quad (2.37)$$

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 (2.20):

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

Подставив решения (2.37) в выражение (2.33), получим зависимости функций:

$$f_n(t) = C_n e^{-vk_n^2 t} \quad \text{и} \quad F_n(y) = \cos k_n y, \quad (2.38)$$

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 (2.31) в соответствии с методикой [108] формально составим ряд Фурье, подставив зависимости (2.38) в выражение (2.16):

$$B_{\text{звх}}(y, t) = f_n(t) F_n(y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\nu k_n^2 t} \cos k_n y. \quad (2.39)$$

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 $B_{\text{зв0}}$, а на границах $-|y| = b, 3b, 5b, \dots$ знак меняется на противоположный [136].

Для ряда Фурье (2.39) 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 $C_1 = (4/\pi)B_{\text{зв0}} = (4/\pi)\mu_a i_n = (4/\pi)\mu_a I/2r$ [135, 136] 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 (2.39):

$$B_{\text{звх1}}(y, t) = \frac{4}{\pi} B_{\text{зв0}} e^{-\frac{1}{\gamma \mu_a} \left(\frac{\pi}{2b}\right)^2 t} \cos\left(\frac{\pi}{2b}\right) y = \frac{4}{\pi} B_{\text{зв0}} e^{-\frac{t}{t_3}} \cos \frac{\pi y}{2b}, \quad (2.40)$$

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 (рисунок 2.11 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 (2.40) 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 (2.40) установлено, что значение величины магнитной индукции на поверхности цепочки-микроэлектрода составляет $B_{\text{зхл}} = 0,76$ Тл, а величина времени затухания магнитного поля в цепочке-микроэлектроде $t_3 = 0,2 \cdot 10^{-3}$ с.

Экспериментально измерение магнитной индукции $B_{\text{зхл}}$ 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 240–320 мкм. Результаты измерений показали, что магнитная индукция $B_{\text{зхл}}$ находилась в пределах 0,74–0,82 Тл, что соответствует расхождению между теоретическими расчетами и экспериментальными 2,6–7,3 %.

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 (рисунок 2.12 а) приводит к изменению во времени величин силы прижима $f_{\text{ц}}$ частиц ФМП к обрабатываемой поверхности заготовки детали [63, 80]:

$$f_{\text{ц}} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\mu \Delta_i^2 b_i K H_{vi}^2}{L_i + \Delta_i}, \quad (2.41)$$

где n – число частиц в цепочке-микроэлектроде;

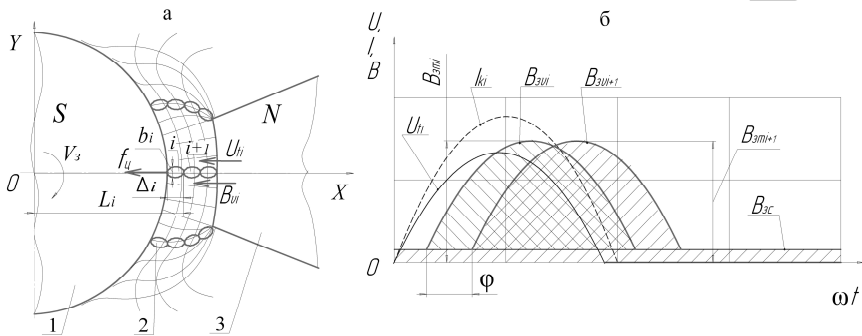
μ – магнитная проницаемость материала порошка, Гн/м;

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

Δ_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.



1 – заготовка; 2 – частица порошка; 3 – полюсный наконечник

Рисунок 2.12. – Схема действия силы прижима f_u на цепочку-микроэлектрод в рабочем зазоре устройства МЭУ (а), временная диаграмма тока электромагнита (I_{ki}) и напряжения источника питания технологического тока (U_{vi}), индукций в рабочем зазоре (б)

С учетом существующей связи между магнитной индукцией и напряженностью МП $B_{vi} = \mu H_{vi}$ [70] формула для определения величины силы прижима f_u цепочки-микроэлектрода к обрабатываемой поверхности (2.41) примет вид:

$$f_u = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i^2 b_i K B_{vi}^2}{\mu(L_i + \Delta_i)}, \quad (2.42)$$

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

Следовательно, сила прижима f_u цепочки-микроэлектрода к обрабатываемой поверхности определяется размерами частиц ФМП

и неоднородностью внешнего магнитного поля в рассматриваемой точке рабочего зазора. Ранее проведенные исследования [50, 52, 57] показывают, что внешнее МП в рабочем зазоре ограничено эквидистантными поверхностями полюсного наконечника и обрабатываемой поверхностью заготовки, неоднородно. Используемые электромагниты как нелинейные элементы электрической цепи в МС устройств МЭУ генерируют индукцию B_{3vi} , 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 (рисунок 2.12 а), изменяется по косинусоидальному закону (рисунок 2.12 б) [48, 141]:

$$B_{3vi} = B_{3mi} \cos \omega t ,$$

где B_{3mi} – амплитудная величина индукции внешнего МП в точке (x_i, y_i) цепочки-микроэлектрода, находящейся в рабочем зазоре вдоль силовой линии, Тл;

ω – 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.:

$$B_{3vi+1} = B_{3mi+1} \cos(\omega t + \varphi) , \quad (2.43)$$

где φ – сдвиг по фазе между векторами индукций МП B_{3vi} и B_{3vi+1} , рад.

Учитывая, что для электромагнитных катушек стандартной I-образной конструкции, питаемых током промышленной частоты, угол φ (рисунок 2.13) достигает небольшого значения (порядка $5 \cdot 10^{-3}$ рад) [142], получим:

$$\frac{B_{3vi+1} - B_{3vi}}{B_{3vi}} = \frac{B_{3mi+1} - B_{3mi}}{B_{3mi}} + \left(\frac{B_{3mi+1}}{B_{3mi}} \right) \frac{\varphi}{\text{tg} \omega t} . \quad (2.44)$$

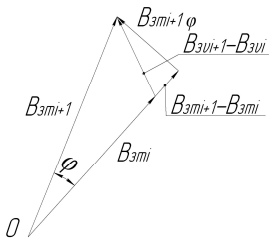


Рисунок 2.13. –
Векторная диаграмма
магнитных индукций
цепочек-
микроэлектродов

Так как значение отношения амплитудных величин магнитной индукции B_{3mi+1}/B_{3mi} 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:

$$\frac{B_{3vi+1} - B_{3vi}}{B_{3vi}} = \frac{B_{3mi+1} - B_{3mi}}{B_{3mi}} + \frac{\varphi}{\operatorname{tg}\omega t}. \quad (2.45)$$

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.

Для установления влияния амплитудной и фазовой составляющих индукции на силу прижима $f_{\text{ц}}$ 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 3–5 А и 12–36 В.

Фазовый сдвиг магнитного потока в различных точках рабочего зазора определялся путем измерения линейной развертки при подаче напряжений на входы каналов вертикального отклонения [133] с использованием универсального осциллографа С1-77.

Результаты экспериментальных исследований (таблица 2.3) показывают, что неоднородность в рабочем зазоре наиболее характерна для переменного внешнего магнитного поля, генерируемого электромагнитом, питаемым однофазным током по однопериодной схеме.

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
Однополупериодная	0,75	0,32	$(5-7) 10^{-3}$	6–9	18–25
Двухполупериодная	0,78	0,63	$(3-4) 10^{-3}$	2–4	8–10

Амплитудная и фазовая составляющие индукции превышают в 2,25–3,0 раза и 2,25–2,5 раза составляющие неоднородности магнитного поля, формируемого электромагнитом, питаемым однофазным током по двухполупериодной схеме. Значение величины постоянной магнитной индукции в 2 раза меньше.

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 [142].

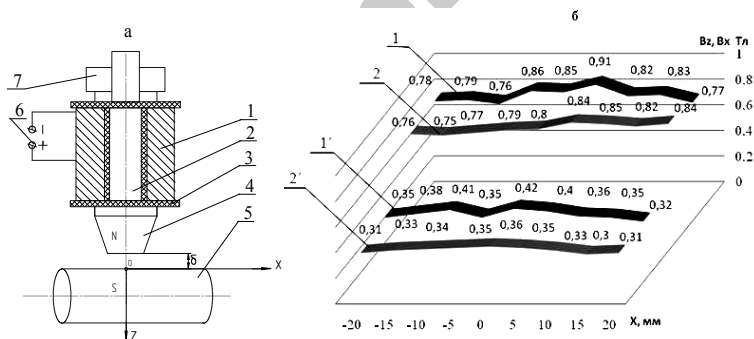
Установлено, что наибольшее влияние на силу прижима цепочки-микроэлектрода к обрабатываемой поверхности оказывает фазовая составляющая индукции, с увеличением частоты (100 Гц и более) питания которой ее значение снижается до нуля. При этом гармонический характер изменения величины магнитной индукции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

Результаты исследований (таблицы 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 $B_{з}$, изменялась в пределах 0,35–0,9 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 (рисунок 2.14 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.



1 – обмотка, 2 – сердечник, 3 – изолятор, 4 – полюсный наконечник, 5 – заготовка, 6 – источник питания, 7 – оправка; X – расстояние от продольной оси полюсного наконечника

Рисунок 2.14. – 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)

Анализ полученных результатов показывает, что магнитные поля (частотой 12,5 и 50 Гц) недостаточно однородны (рисунок 2.14 б), что не обеспечивает устойчивое положение цепочек-микроэлектродов [69].

Данное обстоятельство, вероятно, связано не только с влиянием неоднородности внешнего магнитного поля, генерируемого электромагнитом 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 [52, 69].

2.3.2. Экспериментальные исследования процесса магнитно-электрического упрочнения

Для подтверждения результатов исследований, описанных в подразделе 2.3.1, 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 Т (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 Т 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

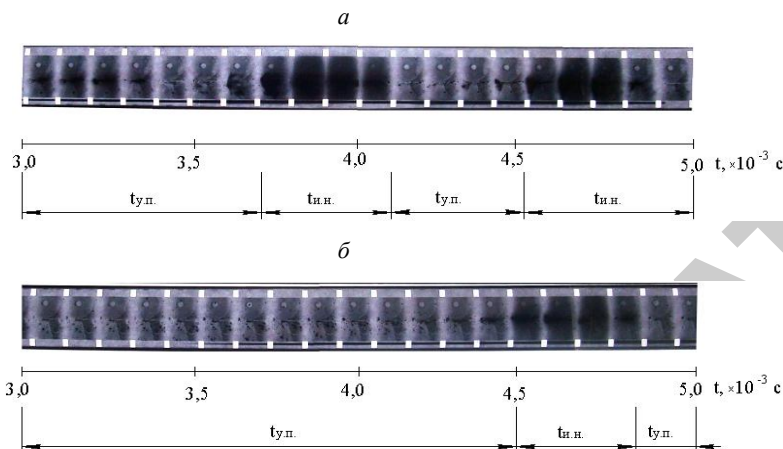
и прохождения по ним электрических разрядов выполнялась высокоскоростной камерой модели СКС-1М. Питание исследуемых ЭМК осуществлялось однофазным выпрямленным током по однополупериодной схеме, а также источником, обеспечивающим прямоугольные импульсы с частотой 12,5 Гц.

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 одной 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-микроэлектродов 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.

Анализ кинограмм следования электрических разрядов в РЗ в процессе МЭУ (рисунок 2.15) показывает, что частота повторяемости участков импульсной нестабильности процесса наплавки в 2,2–2,85 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.



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

**Рисунок 2.15. – Кинограммы электрических разрядов
в рабочем зазоре при МЭУ**

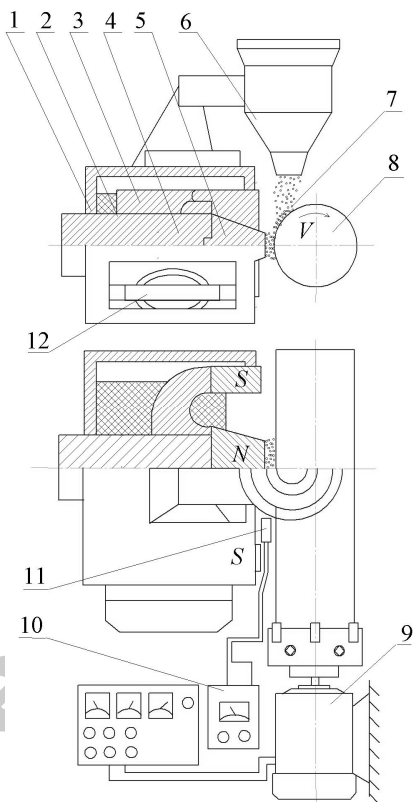
Установлено, что механизм формирования цепочек-микроэлектродов состоит из следующих стадий: ориентирование и выстраивание их вдоль силовых магнитных линий на входе в рабочий зазор; последующее перемещение их с поверхностью заготовки; прекращение перемещения с поверхностью заготовки и концентрирование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

Для проведения исследований на втором этапе была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рисунок 2.16), 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.

Экспериментальная установка (рисунок 2.16) 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 $80,0 \times 5,0 \times 0,8$ 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 Invertes V 270 T (на рисунке 2.16 не показан). Для скоростной съемки процесса МЭУ в РЗ перпендикулярно направляющим основания 2 крепилась камера СКС-1М (на рисунке 2.16 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 [50–52, 73] показал, что для проведения экспериментов достаточно центрального композиционного ротатбельного равномерного планирования (ЦКРУП) II порядка. Исследуемым параметром принята сплошность покрытий G , от значений которой зависит средняя площадь опорной поверхности покрытия [23, 52, 57]. Независимыми переменными были технологические факторы – величина магнитной индукции в рабочем зазоре $B_{зс}$ и плотность разрядного тока i , оказывающие основное влияние на величину магнитно- и электродинамических сил, действующих на частицы ФМП в РЗ [50].

Рисунок 2.16. – Схема экспериментальной установки

Постоянными факторами приняты следующие: рабочий зазор $\delta = 2,0$ мм; размер частиц ФМП $\Delta = 240\text{--}320$ мкм; скорость вращения образцов $V = 0,05$ м/с; расход ФМП $q = 2,8 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²); расход РЖ $q = 2,0 \cdot 10^{-3}$ дм³/(с·мм²); длина $R_{\text{п}}$, высота рабочего торца h и угол охвата полюсного наконечника α соответственно 15 мм, 5,7 мм и 12° [143]; ферромагнитный порошок Fe-2%V ГОСТ 9849-86; форма постоянно-го магнита – прямоугольная с габаритными размерами 100×80×40 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 (рисунок 2.16).

Оценка сплошности покрытий и исследование стабильности процесса МЭУ выполнялись по методикам и на оборудовании, описанным в разделе 2.2.

С учетом работ [50–52, 70] установили условия проведения экспериментов, опыты которых рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел (таблица 2.4).

Таблица 2.4. – Условия проведения опытов

Уровень фактора	Технологический фактор	
	i , А/мм ²	$B_{\text{зс}}$, 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 (+ α)	2,6	0,80
Звездная точка (- α)	1,0	0,20
Интервалы варьирования:		
основной	0,6	0,18
по α	0,8	0,30

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКРУП II 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 $B_{\text{зс}}$:

$$Y = 90,990 + 6,286 \cdot X_1 + 4,245 \cdot X_2 - 2,417 \cdot X_1 X_2 - 2,366 \times X_1^2 - 0,573 \cdot X_2^2. \quad (2.46)$$

Выявлено, что все коэффициенты регрессии (2.46) значимы с 95%-й доверительной вероятностью по критерию Стьюдента. Установлено, что модель адекватна при 5%-м уровне значимости по критерию Фишера. Графическое отображение модели (2.46) представлено одномерными сечениями функции отклика Y в двумерной системе координат (рисунок 2.17). Анализ математико-статистической модели (2.46) позволил определить степень влияния технологических факторов на сплошность покрытий (таблица 2.5) и расположить их в порядке убывания значимости в следующей последовательности $G: B_{zc} \rightarrow i$.

Таблица 2.5. – Влияние технологических факторов на сплошность покрытий

Технологический фактор		Степень влияния технологических факторов, %
		G
		Y
i	X_1	40,3
B_{zc}	X_2	59,7

Проанализировав зависимость (рисунок 2.17), 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/мм².

При уменьшении значений величин магнитной индукции и плотности разрядного тока ($B_{zc} < 0,65$ Тл и $i < 1,80$ А/мм²)

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. Наплавленный слой представляет собой множественное сочетание отдельных выступов и впадин между ними.

Анализ результатов осциллографирования (рисунок 2.18 а) показывает, что для процесса МЭУ характерно преобладание участков импульсной нестабильности, имеющих диапазон изменения разрядного тока 30–118 А (относительное отклонение тока – 74,6 %). 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 $k_{vG} = 21,4$ %).

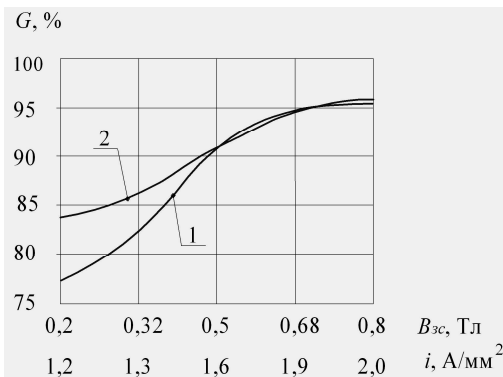
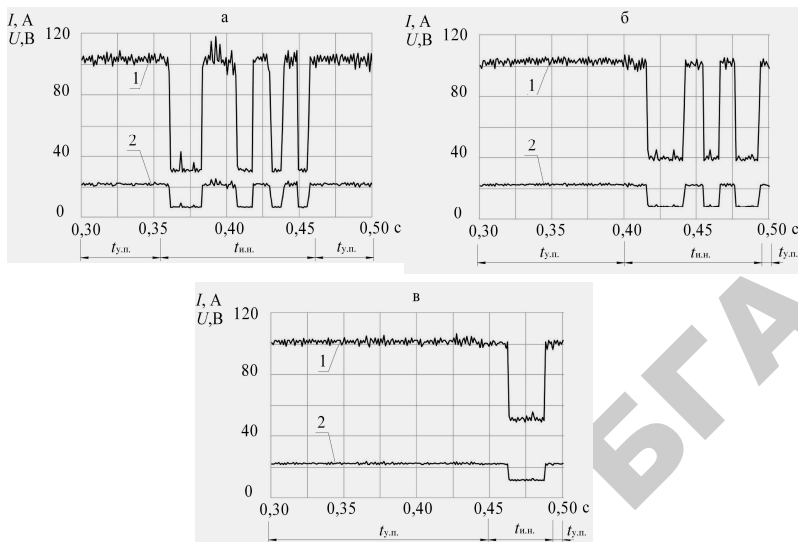


Рисунок 2.17. – Зависимость сплошности покрытий G от величины магнитной индукции I в P3 и плотности разрядного тока 2

Следует отметить, что при значениях величин магнитной индукции и плотности разрядного тока ($B_{зс} < 0,20$ Тл и $i < 1,20$ А/мм²) энергии магнитного и электрического полей недостаточно для удержания и расплавления частиц ФМП в рабочем зазоре. Процесс МЭУ протекает неустойчиво, с преобладающим 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/мм²) увеличивается воздействие электродинамических сил на частицы ФМП, происходит рост мощности электрического разряда и температуры нагрева частиц ФМП. Вследствие этого наблюдаются 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. Установлено, что повторяемость периодов стабильного процесса МЭУ и участков импульсной неустойчивости одинаковая (рисунок 2.18 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 %.



$t_{у.п.}$ – участок установившегося процесса МЭУ; $t_{н.п.}$ – участок импульсной нестабильности процесса МЭУ. Условия проведения экспериментов:

$a - B_{зс} < 0,20$ Тл и $i < 1,20$ А/мм²,

$б - B_{зс} > 0,75$ Тл и $i > 1,95$ А/мм²; $в - B_{зс} = 0,7$ Тл и $i = 1,95$ А/мм²

Рисунок 2.18. – Осциллограммы технологического тока (1) и напряжения (2)

В результате принятых технологических ограничений с учетом работ [51, 52, 57, 70] и выполненного анализа зависимости (рисунок 2.17) установлено, что при значениях магнитной индукции в рабочем зазоре $B_{зс}$ и плотности разрядного тока i , находящихся в пределах диапазонов $0,65 < B_{зс} < 0,75$ Тл и $1,80 < i < 1,95$ А/мм², процесс МЭУ идет стабильно, с формированием покрытия, состоящего из плотно расположенных точечных капель расплава. Анализ результатов осциллографирования (рисунок 2.18 в) показывает, что для МЭУ характерно преобладание периодов стабильного процесса, для которых отклонение силы разрядного тока от среднего значения составляет 5 А. На участках импульсной нестабильности относительное отклонение силы разрядного тока – 51,5 %.

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 рабо-

чем зазоре ($B_{зс}$), равной 0,7 Тл, и плотности разрядного тока (i) – 1,95 А/мм². Выявлено, что бóльшие 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.

2.4. Исследования магнитной системы из 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 [68]:

1. Получить требуемую величину магнитной индукции в рабочем зазоре $B_{зс}$ 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 $B_{зс} = f(L_M)$ при $R_M = \text{const}$ и $B_{зс} = f(R_M)$ при $L_M = \text{const}$;

– определение оптимальных параметров конструкции магнитной системы.

Из научных источников [142] 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 особенное 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 [141, 142, 144, 145], 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 [68, 146].

2.4.1. Выбор материала для постоянных магнитов

В процессе магнитно-электрического упрочнения на элементы магнитной системы, находящиеся в рабочей зоне устройств, воздействуют 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 [68, 142].

Сравнительный анализ основных характеристик магнитотвердых материалов (таблица 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_{zc} (до 1,2 Тл), коэрцитивной силой H_c (до 140 кА/м) и удельной магнитной энергией (до 16,5 кДж/м³), требуемыми механической прочностью и коррозионной устойчивостью, значительно дешевле редкоземельных материалов (в 2–12,5 раз) [144].

Таблица 2.6. – Сравнительные характеристики магнитотвердых материалов

Магнитотвердый материал	B_r , Тл	$(BH/2)$ макс, кДж/м ³	H_c , кА/м	Цена, тыс. руб. за 1 кг материала (по состоянию на 01.01.2014)
Гибкие магнитные материалы (магнитопласты)	0,17	6,4	105,50	54,0–118,0
Керамика (БИ, БА, СА)	0,40	12,0	191,10	17,7–29,5
Альнико (ЮНДК)	1,35	20,0	143,50	472,0
Sm-Co	1,05	80,0	732,50	2950,0–5900,0
Спеченные Nd-Fe-B	1,42	200,0	950,25	1052,0–1770,0

2.4.2. Расчет параметров магнитной системы

Известный аналитический расчет электромагнитной составляющей рабочей зоны позволяет определить величины сопротивлений отдельных участков МС на пути прохождения магнитного потока [144, 147, 148]:

$$R_M = R_{ст} + R_B, \quad (2.47)$$

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 [147, 148]:

$$R_{ст} = \frac{l}{\mu_B \mu_{ст} S}; \quad R_B = \frac{\Delta}{\mu_0 S}, \quad (2.48)$$

где l – суммарная длина участков стального магнитопровода, м;

μ_B – относительная магнитная проницаемость воздушного участка, Гн/м;

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

μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 \gg 12,5 \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

S – площадь поперечного сечения магнитопровода, м²;

Δ – 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, – эквипотенциальные [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 [144, 147]:

$$B_{зс} = k_3 B; \quad H_{зс} = \frac{B_{зс}}{\mu_0}, \quad (2.49)$$

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

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

Длина L_M и площадь нейтрального сечения S_M постоянного магнита представляют основные искомые величины [117, 119]:

$$L_M = \frac{H_3 \cdot f \cdot \sigma}{H_d}; \quad S_M = \frac{B_{зс} \cdot \sigma \cdot S_{зс}}{B_d}, \quad (2.50)$$

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

$S_{зс}$ – площадь поперечного сечения рабочего зазора, м²;

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

σ – коэффициент рассеяния магнитного потока;

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

Согласно [144], ориентировочно величину σ принимаем 10–25 для системы, армированной полюсным наконечником.

По вычисленным величинам L_M , S_M магнитной системы и на основании результатов экспериментальных исследований потокораспределения в МС магнитная цепь условно разбивается на ряд уча-

стков и рассчитывается проводимость каждого звена магнитной системы. Проводимости рабочего G_B и технологических воздушных зазоров G_T находятся по зависимостям [144, 147]:

$$G_{\delta} = \frac{\mu_0 S_{3c}}{\delta_3}; \quad G_T = \frac{\mu_0 S_T}{\delta_T}, \quad (2.51)$$

где S_T – площадь поперечного сечения технологического зазора, m^2 ;
 δ_T, δ_3 – длины технологического и рабочего зазоров соответственно, м.

Общая проводимость всех воздушных путей магнитного потока рабочей зоны определяется по формуле [144, 147]:

$$G = G_{\delta} + G_a + G_M,$$

где G_{δ} – проводимости технологического и рабочего зазоров, м;
 G_a – проводимости отдельных участков арматуры, м;
 G_M – полная проводимость воздушных путей магнита, м.

Определение величин B_M, H_M (индукция, напряженность постоянного магнита) и B_{3c} производится графически с помощью кривой размагничивания $B_M = f(H_M)$. После строятся характеристики полной проводимости магнитной системы k_1 и рассеяния магнита и деталей арматуры с учетом углового коэффициента k_2 , соответственно [144, 1479, 148]:

$$k_1 = G \frac{L_M}{S_M}; \quad k_2 = (G_M + G_a) \frac{L_M}{S_M}. \quad (2.52)$$

Величина индукции B_M постоянного магнита устанавливается по графической зависимости возврата, а величина B_{3c} в рабочем зазоре – по выражению [144, 147]:

$$B_{3c} = \frac{B_M S_M}{S_{3c} \sigma}. \quad (2.53)$$

Для расчета исследуемых конструкций магнитных систем устройств МЭУ была разработана программа с использованием языка

программирования «Visual Basic 6.0» (рисунок 2.19). 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.

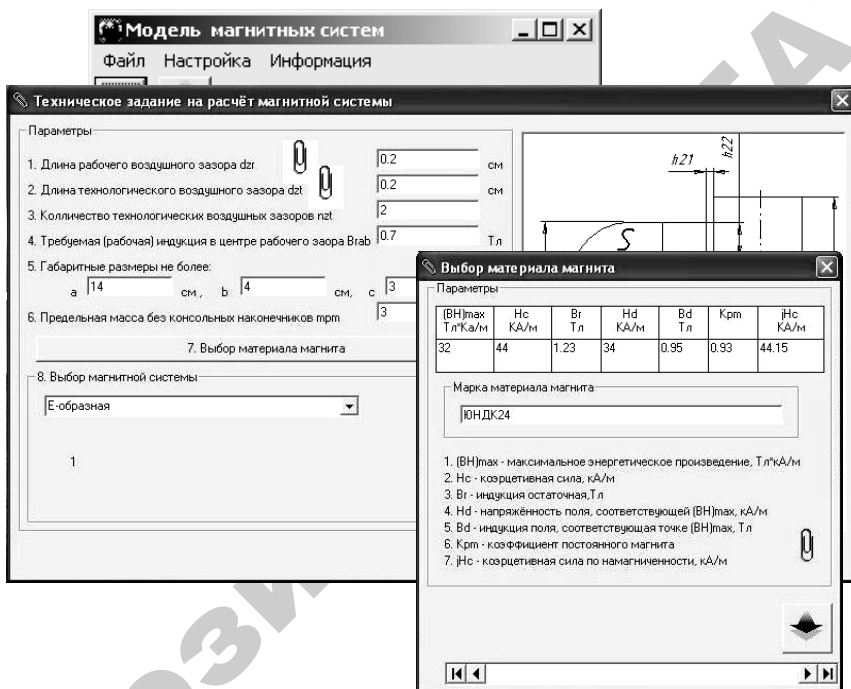


Рисунок 2.19. – Фрагменты интерфейса программы расчета конструкций магнитной системы установки МЭУ

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).

Расчет магнитных систем с применением программы производили по известной методике [144], использующей эмпирические соотношения и коэффициенты (2.47)–(2.49), полученные ранее и проверенные многолетним опытом [147–149]. Программа позволяла предварительно вычислить размеры магнитной системы L_M , S_M (2.50) 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 , арматуры магнитопровода G_a , рабочего и технологических зазоров G_δ (2.51). Определение действительной рабочей точки графической зависимости размагничивания магнита (B_M , H_M) с учетом марки материала магнита и магнитопровода, потоков утечки Φ , сопротивления в зазорах и стыках проводилась графическим методом, используя зависимость $B_M = f(H_M)$.

После этого определялись напряженность $H_{зс}$ и индукция $B_{зс}$ магнитного поля в рабочем зазоре, а также величина коэффициента рассеяния магнитного поля σ для оптимизируемой конструкции магнитной системы (2.52, 2.53). В случае несовпадения полученного значения $B_{зс}$ 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 – $B_{зс} = 0,7$ 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 $S_M = 23,5 \cdot 10^2$ мм².

Исследуемая система (рисунок 2.20) состоит из экранирующего корпуса 4, внутри которого находится постоянный магнит Е-образной формы 1, к торцевым поверхностям которого примыкают два плоских наконечника 5, установленные с зазором Δ_n относительно заготовки 6. Сердечник 2 системы со сменным

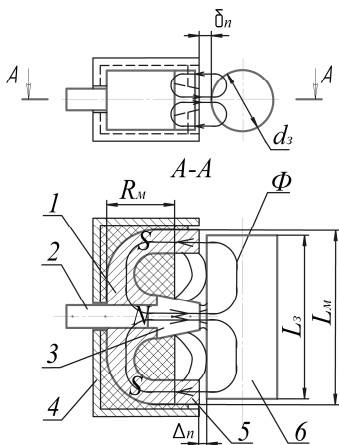


Рисунок 2. 20. – Схема конструкции E-образной магнитной системы с разомкнутым магнитопроводом

полюсным наконечником 3 установлен в центральной части магнита с возможностью регулирования величины магнитной индукции $B_{зс}$ в рабочем зазоре посредством изменения расстояния Δ_n между магнитотвердыми материалами (боковыми ПН) и обрабатываемой поверхностью заготовки. При этом величина рабочего зазора δ_n остается постоянной, а магнитный поток Φ , который проходит по ПМ, полюсным наконечникам, рабочим и технологическим воздушным зазорам и заготовке, образует замкнутую Φ -образную магнитную цепь.

2.4.3. Оптимизация конструктивных параметров магнитной системы

Для оптимизации конструкции магнитной системы установки МЭУ применили ЦКРУП II порядка. В качестве исследуемого параметра приняли магнитную индукцию в рабочем зазоре $B_{зс}$, а независимыми переменными были факторы L_M и R_M .

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 работы [68], установили условия проведения экспериментов (таблица 2.7), опыты которых рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Таблица 2.7. – Условия проведения опытов

Уровень фактора	Технологический фактор	
	L_m , мм	R_m , 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 (+ α)	130,0	38,0
Звездная точка (- α)	90,0	22,0
Интервалы варьирования:		
основной	15,0	5,0
по α	20,0	8,0

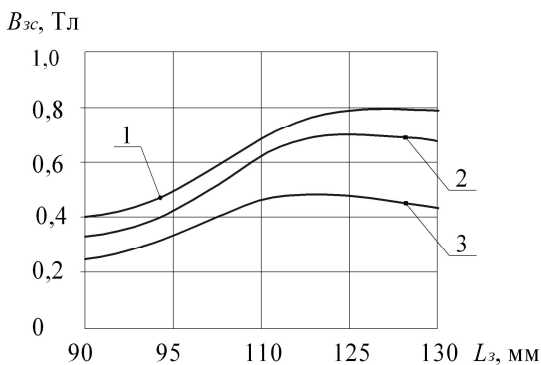
Измерение величины магнитной индукции $B_{зс}$ производили тесламетром Т-10/1 со специальными датчиками Холла, установленными в контрольных точках рабочего зазора (по краям и в центре).

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКРУП II 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 :

$$Y = 0,580 + 0,093 \cdot X_1 + 0,123 \cdot X_2 + 0,029 \cdot X_1 X_2 - 0,063 \times X_1^2 - 0,067 \cdot X_2^2. \quad (2.54)$$

Выявлено, что все коэффициенты регрессии (2.54) 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 (2.54), геометрическая интерпретация которой представлена в виде одномерных сечений в двумерной системе координат (рисунок 2.21). 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.



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

Рисунок 2.21. – Зависимость величины магнитной индукции в рабочем зазоре от длины постоянного магнита при следующих значениях его ширины:

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 $B_{зс} = 0,7$ Тл.

2.4.4. Определение вида конфигурации магнитопровода

Так как расчет конструктивных параметров магнитной системы на основе постоянного магнита E-образной формы выполнен с некоторыми допущениями, потребовалось проведение экспериментальных исследований различных конфигураций МС с постоянными магнитами [68]. С помощью экспериментальной установки, описанной в подразделе 2.3.2, определялась величина магнитной индукции и характер распределения магнитного поля в рабочем зазоре. Форма постоянных магнитов при одинаковой массе и ориентации их полюсов относительно поверхности

Для определения оптимальных 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 оптимальной величины магнитной индукции в рабочем зазоре МС на ПМ выполнялось с использованием математического пакета MathCAD.

обрабатываемой заготовки детали варьировалась. Для этого в установке (рисунок 2.16) 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 рисунке 2.22 (а–з).

Система 1 (рисунок 2.22 а) является разомкнутой, 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 (рисунок 2.22 б) является замкнутой и дополнительно к элементам магнитопровода с полюсными наконечниками и постоянными магнитами крепится замыкающее звено длиной 200 мм.

Система 3 (рисунок 2.22 в) также замкнута, содержит добавочную симметричную ветвь замыкающего звена.

Система 4 (рисунок 2.22 г) является разомкнутой, 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 (рисунок 2.22 д) является разомкнутой, 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° .

Система 6 (рисунок 2.22 *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 (рисунок 2.22 *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 (рисунок 2.22 *з*) 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 (рисунок 2.23) показывают, что система 1 (рисунок 2.22 *а*) обеспечивает получение наименьшей величины магнитной индукции в рабочем зазоре. Это связано, прежде всего, с тем, что для данной разомкнутой МС наряду с рабочим (полезным) магнитным потоком Φ_n , проходящим по стальным участкам магнитопровода, в значительной степени присутствуют потоки утечки (рассеяния) Φ_y .

Данные потоки не попадают в стальную арматуру и проходят по воздуху с боковых и торцевых поверхностей полюсного наконечника (Φ_{y1} , Φ_{y2}), а также с боковых поверхностей постоянных магнитов (Φ_{y3}). Добавление к магнитам квадратного сечения замыкающих звеньев в виде бруска длиной 200 мм (системы 2 и 3, представленные на рисунке 2.22, *б*, *в*) позволяет уменьшить потоки рассеяния и, тем самым, увеличить полезный поток. Однако такое решение не обеспечивает получение необходимой величины индукции в рабочем зазоре.

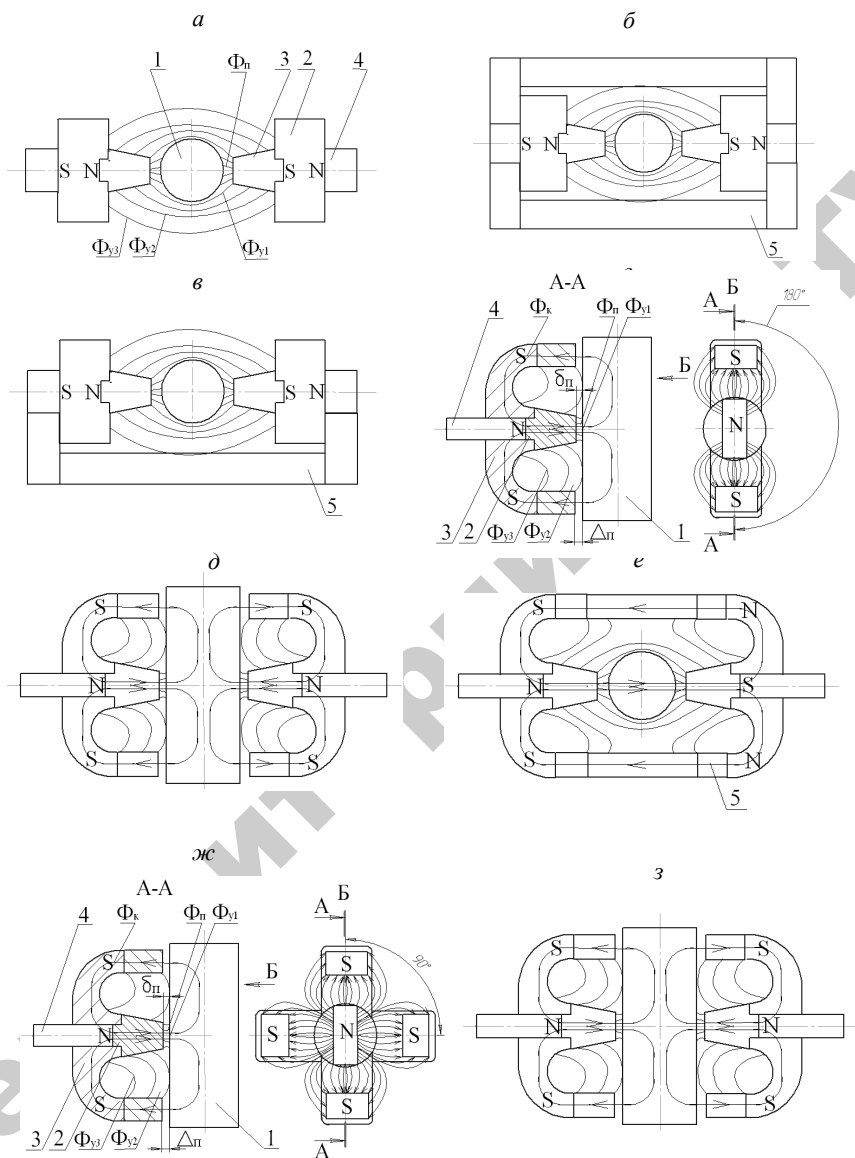


Рисунок 2.22. – Схемы магнитных систем с разомкнутым (а, б, г, д, ж, з) и замкнутым (в, е) магнитопроводами

$B_{зс}$, Тл

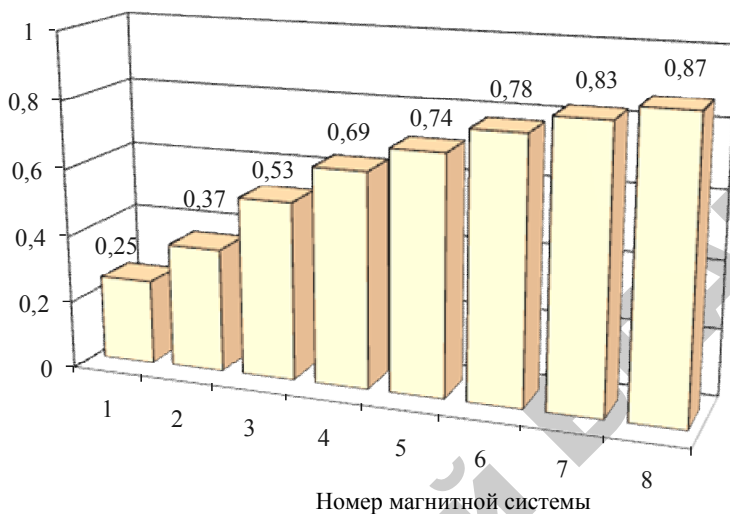
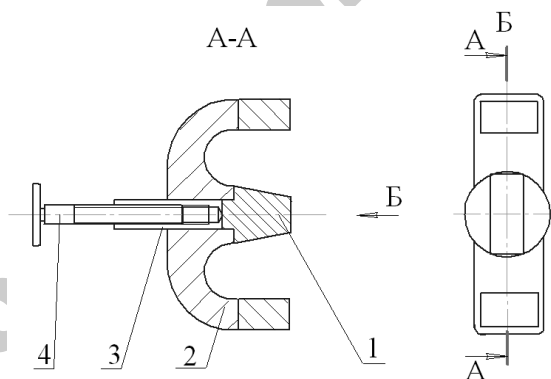


Рисунок 2.23. – Зависимости значений магнитной индукции в рабочем зазоре от конструктивного исполнения магнитных систем



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

Рисунок 2.24. – Схема исследуемой конструкции E-образной магнитной системы

Более эффективна, исходя из конструктивных особенностей устройств МЭУ, магнитная система 4 (рисунок 2.22 з), состоящая из постоянного магнита E-образной формы (рисунок 2.24),

сердечника магнитопровода длиной 100 мм и полюсного нако-
нечника. Достоинство ее состоит в том, что данный магнит об-
разует два кольцевых рабочих магнитных потока Φ_k , которые,
замыкаясь, проходят через обрабатываемую заготовку. Тем са-
мым значительно уменьшаются потоки рассеяния (Φ_{y1} и Φ_{y2}) и
обеспечивается высокая концентрация магнитного потока в ра-
бочем зазоре.

Установлено удовлетворительное совпадение расчетных
данных и результатов измерений. Так, расхождение величины
магнитной индукции принятой для расчета и измеренной в ра-
бочем зазоре, составило 0,04–0,07 Тл (или 5–8 %).

Сравнительный анализ систем 5 и 6 (рисунок 2.22, *д* и *е*) по-
казывает, что применение оппозитно расположенных магнитов
с арматурой, у которых одноименные полюса расположены под
углом 180° , позволяет увеличить индукцию на 6,8 % и 11,5 %
соответственно по сравнению с системой 4.

Следует отметить решающее значение расположения магни-
тов по отношению к обрабатываемой заготовке детали. Так,
вертикальное расположение системы 6 (рисунок 2.22 *е*) позво-
ляет получать большую индукцию магнитного поля в рабочем
зазоре за счет меньшего количества технологических зазоров.
Расположение магнитов Е-образной формы с одноименно рас-
положенными полюсами магнитов под углом 90° (рису-
нок 2.22 *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, по-
вышает производительность МЭУ за счет большей площади
обрабатываемой поверхности. Применение данных МС реко-
мендуется для МЭУ плоских поверхностей и последующей
магнитно-абразивной обработки.

Таким образом, анализ схем и результатов измерений магнитной
индукции в рабочем зазоре систем 1–8 (рисунки 2.22 и 2.23) по-
казывает, что наиболее рациональными являются магнитные системы
4–8, которые обеспечивают необходимую концентрацию полезного
магнитного потока в рабочей зоне [68].

Конструкции этих МС предполагает 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 (рисунок 2.22 *г, д*) с расположением одноименных полюсов под углом 180° , а для обработки плоских поверхностей деталей – схемы с расположением одноименных полюсов под углом 90° (рисунок 2.22 *ж, з*) [68].

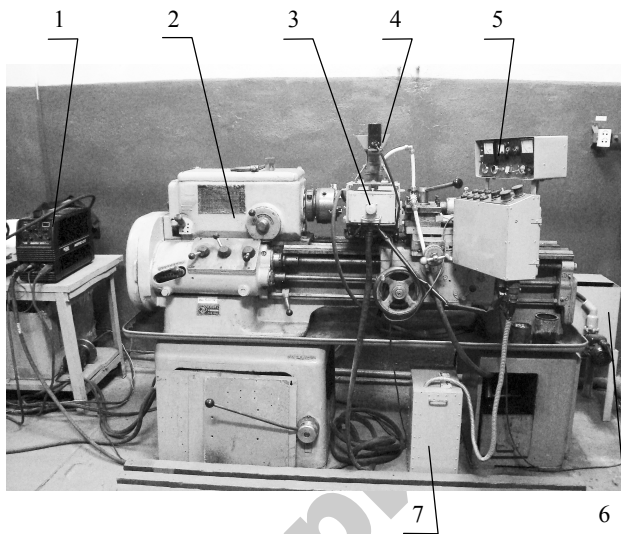
2.5. Экспериментальное исследование стабильности характеристик постоянного магнитного поля

На основании теоретических и экспериментальных исследований процесса МЭУ разработана и изготовлена установка для нанесения защитных покрытий с магнитной системой на постоянных магнитах модели УНП 1 [134] (рисунок 2.25).

Установка работает следующим образом. Обрабатываемая деталь крепится в центрах и приводится во вращательное движение от привода станка 1 (рисунок 2.25). На полюсный наконечник и заготовку детали подают напряжение от инверторного источника технологического тока 2, а в зазор между полюсным наконечником 3 (рисунок 2.26) электромагнитного питателя 5 и заготовкой детали 8 – композиционный ферромагнитный порошок из бункера-дозатора 4 со смесителем 2 в потоке рабочей жидкости (СОЖ – 5%-й раствор эмульсола Э2 в воде). Частицы ФМП выстраиваются вдоль магнитных силовых линий, циркулирующих в двух замкнутых кольцевых потоках «постоянный магнит – заготовка детали». При возникновении разряда в рабочем зазоре происходит расплавление частиц ФМП импульсами электрических разрядов, полярный перенос и распределение по поверхности заготовки капель расплава порошка в постоянном магнитном поле.

Магнитная система установки модели УНП 1 (рисунок 2.27) состоит из сердечника 1, магнитотвердого материала 2, полюсного наконечника 3, экранирующего корпуса (дюралюминиевые пластины) 4, дополнительных наконечников 5 и немагнитного материала (эпоксидная смола с дюралюминиевой

стружкой) 6. Регулирование величины магнитной индукции в рабочем зазоре в пределах 0,3–0,8 Тл производится изменением расстояния между ПМ и заготовкой.

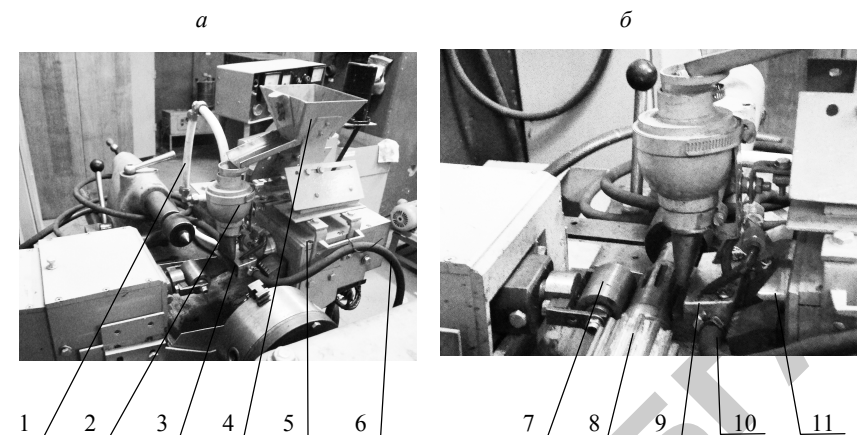


1 – источник технологического тока модели Invertec V 270 T; 2 – токарно-винторезный станок мод. 1Е61М; 3 – электромагнитный питатель установки; 4 – бункер-дозатор; 5 – пульт управления; 6 – насосная станция для подачи охлаждающей жидкости; 7 – трансформатор

Рисунок 2.25. – Фотография установки магнитно-электрического упрочнения модели УНП 1

Тепловая энергия, передаваемая полюсному наконечнику в процессе магнитно-электрического упрочнения, отводится смазочно-охлаждающей жидкостью, проходящей через него от насосной станции 6 (рисунок 2.25).

Этим обеспечивается стабильный температурный режим, необходимый для продолжительной нормальной работы постоянного магнита. Защиту постоянного магнита от механического воздействия обеспечивает экранирующий корпус, выполненный из ферромагнитного материала.



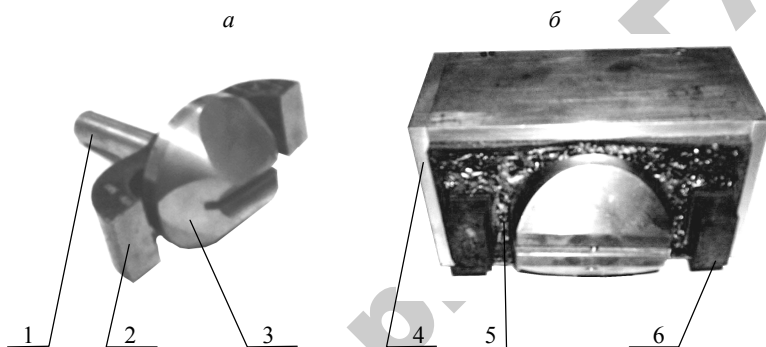
1 – трубопровод для подачи рабочей жидкости; 2 – смеситель; 3 – полюсный наконечник; 4 – бункер-дозатор; 5 – электромагнитный питатель; 6 – трубопровод для подачи охлаждающей жидкости наконечника; 7 – накатное устройство; 8 – деталь; 9 – сопло; 10 – трубопровод для отвода охлаждающей жидкости; 11 – сердечник магнита постоянного

Рисунок 2.26. – Фотографии рабочей зоны установки модели УНП 1

Основным требованием, предъявляемым к магнитным системам, является постоянство во времени величины и распределения магнитного поля в рабочей зоне устройств МЭУ при воздействии внешних технологических факторов [50, 52, 150, 151]. Эксплуатация устройств показывает, что в рабочей зоне постоянно присутствует неравномерность распределения магнитного поля, вызванная конструктивным исполнением различных магнитных систем. Вследствие этого требовалось оценить влияние МС с электро- и постоянными магнитами на характер распределения МП. Измерения величины индукции внешнего МП в рабочей зоне установок моделей ЭУ-5 и УНП 1 с МС на электро- и постоянных магнитах соответственно выполнялись тесламетром Т-10/1 и специальными щупами с датчиками Холла.

По изменению величины индукции вдоль торца полюсного наконечника в контрольных точках 1, 2, 3 (рисунок 2.28 а, б) делали вывод о характере распределения магнитного поля в рабочей зоне установок МЭУ.

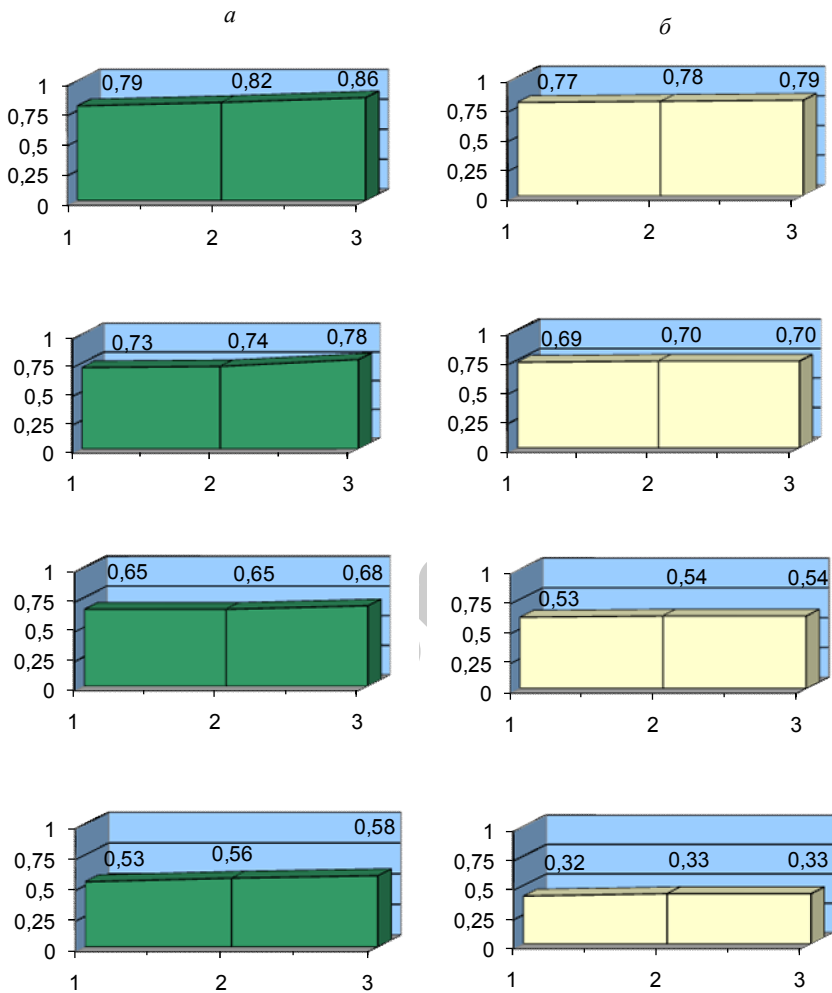
Анализ результатов эксперимента [69] показывает (рисунок 2.28 *а*, *б*), что переменное магнитное поле, генерируемое МС с электромагнитом, недостаточно однородно, так как изменение среднего значения величины индукции по длине полюсного наконечника в рабочем зазоре составило 0,03–0,07 Тл. Магнитное поле, получаемое магнитной системой с постоянным магнитом, более однородно, так как колебания величины индукции незначительны и составили 0,01–0,02 Тл. Результаты эксперимента подтверждаются более равномерным износом полюсного наконечника в процессе МЭУ на установке УНП 1, чем при наплавке на установке ЭУ-5.



а – магнитная система без экранирующего корпуса;
б – с экранирующим корпусом

Рисунок 2.27. – Фотографии конструктивного исполнения магнитной системы установки модели УНП 1

Одним из основных факторов, влияющих на изменение свойств магнита, является температура его нагрева и продолжительность эксплуатации установки магнитно-электрического упрочнения [50, 51]. 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 ч. 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.



МС с электрическим магнитом (а), МС с постоянным магнитом (б)

Рисунок 2.28. – Эпюры распределения магнитной индукции в рабочем зазоре δ по длине торца полюсного наконечника Н

Степень влияния на обратимые изменения свойств постоянного магнита определяли соответствующим температурным коэффициентом магнитной индукции [68, 148]:

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

где ΔB_{3c} – изменение индукции, вызванное изменением температуры на Δt , Тл;

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

Δt – 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 30–80 °С, изменение магнитной индукции ΔB_{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 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 установлена взаимосвязь сил прижима цепочек-микроэлектродов к обрабатываемой поверхности с характеристиками внешних магнитных полей. 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 °.

В результате расчетов и экспериментальных исследований, в соответствии с методикой определения конструктивных параметров магнитной системы устройства МЭУ в зависимости от параметров рабочей зоны устройства и технологической схемы наплавки установлена рациональная конструкция магнитной системы на основе постоянного магнита Е-образной формы из сплава ЮНДК24Т, получены математико-статистические зависимости магнитной индукции в рабочем зазоре B_{zc} 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 Е-образная форма постоянных магнитов, у которых одноименные полюса расположены под углами 180 и 90 °: целесообразно применять Е-образную форму для обработки поверхностей цилиндрических деталей – с расположением одноименных полюсов под углом 180°, а для обработки плоских деталей – под углом 90 °. При одновременном охлаждении рабочей жидкостью сменного полюсного наконечника и заготовки температура нагрева постоянного магнита находилась в пределах 30–80 °С, а изменение магнитной индукции ΔB_{zc} в рабочем зазоре наблюдалось в пределах 0,05–0,10 Тл. При магнитно-электрическом упрочнении в течение 1120 ч среднее значение температурного коэффициента магнитной системы составляет $\alpha_b = 0,018$ %/1 °С, что свидетельствует о стабильности характеристик магнита Е-образной формы.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

3.1. Моделирование процесса магнитно-электрического упрочнения

Одной из важнейших задач технологических процессов упрочнения и восстановления является обеспечение заданных характеристик качества поверхностей детали наиболее производительным путем при минимальных затратах [50, 51]. Поэтому при исследовании технологических параметров МЭУ принят критерий оптимальности – минимальная себестоимость и максимальная производительность процесса нанесения покрытий, обеспечивающие требуемые эксплуатационные свойства деталей. В связи с этим в работе потребовалось провести исследования с применением метода на основе многопараметрической оптимизации режима МЭУ с использованием детерминированного и стохастического подходов [51, 73, 152–155].

Анализ априорной информации и проведенные ранее исследования [50–52, 70, 73] показали, что процесс МЭУ достаточно полно описывается математико-статистическими моделями II порядка, полученными по матрице ЦКРУП. Методика выполнения многофакторного регрессионного анализа с ротатбельным равномер-планированием экспериментов приведена в [153–155]. В качестве параметров оптимизации магнитно-электрического упрочнения износостойких покрытий взяты следующие параметры: производительность процесса Q и относительная износостойкость покрытия ε .

Независимыми переменными приняты следующие факторы: плотность разрядного тока i , А/мм²; величина рабочего зазора δ , мм; скорость подачи S , мм/об; окружная скорость заготовки детали V , м/с; расход композиционного порошка q , г/(с·мм²).

Постоянными взяты факторы: магнитная индукция в рабочем зазоре $B_{zc} = 0,7$ Тл; размер частиц композиционного порошка $\Delta = 240 - 320$ мкм; расход рабочей жидкости $q = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ дм}^3 / (\text{с} \cdot \text{мм}^2)$. В качестве рабочей жидкости использовалась СОЖ – 5%-й раствор эмульсола Э2 в воде. Все опыты рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел. Оптимальный технологический режим МЭУ определяли для ферромагнитных порошков Fe-2%V, Fe-Ti и ФБХ-6-2 [156].

Экспериментальные исследования проводились на образцах из стали 45 ГОСТ 1050-88, представляющих собой кольца с наружным диаметром 40,0 мм, внутренним – 16,0 мм и высотой 12,0 мм. Образцы подвергались нормализации и обрабатывались до параметра шероховатости поверхности $Ra = 12,5$ мкм.

Нанесение износостойких покрытий на поверхности деталей машин выполнялось на установке модели УНП 1. Производительность МЭУ определялась по приращению массы наплавленного материала в единицу времени. Масса исходных образцов – 125,0 г. Взвешивание образцов и ФМП выполнялось на лабораторных весах ВЛА-200-2М с точностью до 0,001 г. Значение показателей для данных условий МЭУ определялось как среднее арифметическое результатов замеров на пяти образцах.

Износостойкость покрытий при трении скольжения со смазкой исследовалась на машине трения модели 2070 СМТ-1 по стандартной методике по схеме «диск–колодка». Испытывались партии по 5 образцов с покрытиями [157].

С учетом работ [61, 62, 69, 83, 84, 85], были определены условия проведения эксперимента для получения математико-статистических моделей нанесения износостойких покрытий МЭУ (таблица 3.1). Все опыты рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКРУП II порядка, с использованием пакета Excel Microsoft Office, позволила получить математико-статистические модели, определяющие зависимости производительности процесса МЭУ Q от технологических факторов:

Таблица 3.1. – Условия проведения опытов

Уровень фактора	Технологический фактор				
	i , А/мм ²	δ , мм	S , мм/об	V , м/с	q , $\Gamma/(\text{с}\cdot\text{мм}^2) \times$ $\times 10^{-3}$
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Основной (0)	1,80	2,00	0,25	0,06	2,55
Верхний (+1)	2,20	2,50	0,35	0,08	3,00
Нижний (-1)	1,40	1,50	0,15	0,04	2,10
Звездная точка (+ α)	2,60	3,00	0,45	0,10	3,45
Звездная точка (- α)	1,00	1,00	0,05	0,02	1,65
Интервалы варьирования:					
основной	0,40	0,50	0,10	0,02	0,45
по α	0,80	1,00	0,20	0,04	0,90

$$\begin{aligned}
 Y_1 = Q_{\text{Fe-2\%V}} = & 223,936 + 1,214 \cdot X_1 - 0,412 \cdot X_2 - 1,610 \cdot X_3 - \\
 & - 2,015 \cdot X_4 + 0,712 \cdot X_5 - 5,102 \cdot X_1 X_2 + 0,108 \cdot X_1 X_3^* + 4,541 \cdot X_1 X_4 + \\
 & + 5,516 \cdot X_1 X_5 + 1,824 \cdot X_2 X_3 + 5,521 \cdot X_2 X_4 - 4,511 \cdot X_2 X_5 - 6,012 \cdot X_3 X_4 + \\
 & + 0,114 \cdot X_3 X_5 - 5,106 \cdot X_4 X_5 - 0,986 \cdot X_1^2 - 0,514 \cdot X_2^2 - 0,313 \cdot X_3^2 - \\
 & - 0,603 \cdot X_4^2 - 0,997 \cdot X_5^2;
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned}
 Y_1 = Q_{\text{ФБХ-6-2}} = & 218,375 + 0,986 \cdot X_1 - 0,403 \cdot X_2 - 1,384 \cdot X_3 - \\
 & - 1,987 \cdot X_4 + 0,298 \cdot X_5 - 3,858 \cdot X_1 X_2 - 0,101 \cdot X_1 X_3^* - 4,057 \cdot X_1 X_4 - \\
 & - 5,058 \cdot X_1 X_5 - 1,248 \cdot X_2 X_3 + 4,879 \cdot X_2 X_4 - 4,027 \cdot X_2 X_5 - \\
 & - 5,849 \cdot X_3 X_4 + 0,108 \cdot X_3 X_5 - 4,983 \cdot X_4 X_5 - 0,886 \cdot X_1^2 - 0,481 \cdot X_2^2 - \\
 & - 0,276 \cdot X_3^2 - 0,498 \cdot X_4^2 - 1,509 \cdot X_5^2;
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned}
 Y_1 = Q_{\text{Fe-Ti}} = & 212,456 + 1,194 \cdot X_1 - 0,387 \cdot X_2 - 1,503 \cdot X_3 - \\
 & - 2,103 \cdot X_4 + 0,975 \cdot X_5 - 4,529 \cdot X_1 X_2 + 0,234 \cdot X_1 X_3 - 5,527 \cdot X_1 X_4 - \\
 & - 5,268 \cdot X_1 X_5 + 1,714 \cdot X_2 X_3 + 4,853 \cdot X_2 X_4 - 5,537 \cdot X_2 X_5 - \\
 & - 7,012 \cdot X_3 X_4 + 0,104 \cdot X_3 X_5 - 4,737 \cdot X_4 X_5 - 0,768 \cdot X_1^2 - 0,523 \cdot X_2^2 - \\
 & - 0,524 \cdot X_3^2 - 0,586 \cdot X_4^2 - 1,629 \cdot X_5^2.
 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Модели, определяющие характер зависимости относительной износостойкости покрытия ε от технологических факторов МЭУ для исследуемых ФМП, представлены ниже:

$$\begin{aligned}
 Y_2 = \varepsilon_{\text{Fe-2\%V}} = & 2,137 + 0,165 \cdot X_1 + 0,028 \cdot X_2 - 0,187 \cdot X_3 - 0,091 \cdot X_4 - \\
 & - 0,035 \cdot X_5 + 0,151 \cdot X_1 X_2 - 0,655 \cdot X_1 X_3 + 0,158 \cdot X_1 X_4 - 0,177 \cdot X_1 X_5 - \\
 & - 0,315 \cdot X_2 X_3 + 0,068 \cdot X_2 X_4 - 0,144 \cdot X_2 X_5 - 0,181 \cdot X_3 X_4 - 0,075 \cdot X_3 X_5^* - \\
 & - 0,212 \cdot X_4 X_5 - 0,102 \cdot X_1^2 - 0,019 \cdot X_2^2 - 0,059 \cdot X_3^2 - 0,026 \cdot X_4^2 - \\
 & - 0,028 \cdot X_5^2; \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_2 = \varepsilon_{\text{ФБХ-6-2}} = & 2,264 + 0,179 \cdot X_1 - 0,018 \cdot X_2 - 0,204 \cdot X_3 - 0,108 \cdot X_4^* - \\
 & - 0,047 \cdot X_5 + 0,187 \cdot X_1 X_2 - 0,655 \cdot X_1 X_3^* - 0,101 \cdot X_1 X_4 - 0,207 \cdot X_1 X_5 - \\
 & - 0,217 \cdot X_2 X_3 + 0,113 \cdot X_2 X_4 - 0,203 \cdot X_2 X_5 - 0,115 \cdot X_3 X_4 + 0,095 \cdot X_3 X_5 + \\
 & + 0,277 \cdot X_4 X_5 - 0,081 \cdot X_1^2 - 0,015 \cdot X_2^2 - 0,083 \cdot X_3^2 - 0,069 \cdot X_4^2 - \\
 & - 0,021 \cdot X_5^2; \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_2 = \varepsilon_{\text{Fe-Ti}} = & 1,953 + 0,123 \cdot X_1 + 0,029 \cdot X_2 - 0,198 \cdot X_3 - 0,112 \cdot X_4^* - \\
 & - 0,031 \cdot X_5 + 0,114 \cdot X_1 X_2 - 0,571 \cdot X_1 X_3 + 0,119 \cdot X_1 X_4 - 0,091 \cdot X_1 X_5 - \\
 & - 0,266 \cdot X_2 X_3 + 0,081 \cdot X_2 X_4 + 0,203 \cdot X_2 X_5 - 0,193 \cdot X_3 X_4 + 0,014 \cdot X_3 X_5 + \\
 & + 0,217 \cdot X_4 X_5^* - 0,098 \cdot X_1^2 - 0,024 \cdot X_2^2 - 0,034 \cdot X_3^2 - 0,041 \cdot X_4^2 - \\
 & - 0,014 \cdot X_5^2. \quad (3.6)
 \end{aligned}$$

Выявлено, что не все коэффициенты регрессии (3.1)–(3.6) значимы с 95%-й доверительной вероятностью по критерию Стьюдента (* – коэффициент не значим). Установлено, что математико-статистические модели адекватны при 5%-м уровне значимости по критерию Фишера.

Таким образом, получены математико-статистические модели процесса МЭУ на установке модели УНП 1 (3.1)–(3.6), которые позволяют установить степень влияния технологических факторов на параметры оптимизации и определить оптимальный режим нанесения износостойких покрытий.

3.2. Влияние технологических факторов на параметры оптимизации

Степень влияния технологических факторов МЭУ композиционных ферромагнитных порошков на исследуемые параметры определяли в соответствии с методикой, приведенной в [154, 155]. Анализ математико-статистических моделей (3.1)–(3.6) и данных таблицы 3.2 показывает, что в порядке убывания значимости влияния на исследуемые параметры факторы можно расположить в следующие ряды: $Y_1 = Q: V \rightarrow S \rightarrow i \rightarrow q \rightarrow \delta$ и $Y_2 = \varepsilon: S \rightarrow i \rightarrow V \rightarrow q \rightarrow \delta$.

Таблица 3.2. – Влияние технологических факторов на параметры МЭУ

Технологический фактор	Степень влияния фактора на параметры оптимизации, %					
	$Y_1=Q$			$Y_2=\varepsilon$		
	Fe-2%V	ФБХ-6-2	Fe-Ti	Fe-2%V	ФБХ-6-2	Fe-Ti
Плотность разрядного тока, i	19,07	19,49	19,37	32,6	32,12	24,95
Величина рабочего зазора, δ	6,48	7,96	6,28	5,53	3,23	5,88
Скорость продольной подачи, S	25,30	27,35	24,39	36,96	36,69	40,16
Окружная скорость, V	31,67	36,27	34,13	17,98	19,42	22,71
Расход ФМП, q	17,48	8,93	15,83	6,93	8,54	6,29

Наибольшее влияние на производительность процесса МЭУ Q оказывает окружная скорость заготовки V и скорость продольной подачи S . Далее в порядке убывания следуют плотность разрядного тока i , расход композиционного порошка q , величина рабочего зазора δ .

На относительную износостойкость ϵ оказывает значительное влияние скорость продольной подачи, плотность разрядного тока i . Затем по степени значимости располагаются в ряд окружная скорость заготовки V , величина рабочего зазора δ и расход композиционного порошка q .

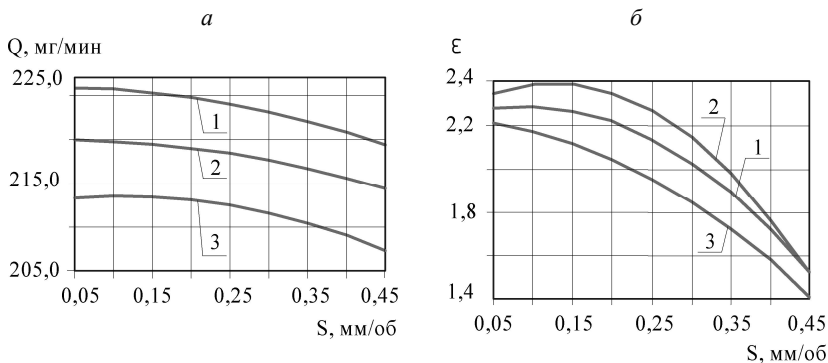
Установлено, что влияние скоростей V и S на производительность процесса и относительную износостойкость – самое большое из всех рассматриваемых технологических факторов; при изменении подачи в пределах от 0,08 до 0,27 мм/об и окружной скорости от 0,02 до 0,06 м/с они оказывают значительное влияние на исследуемые показатели. Это объясняется скольжением частиц ФМП по вершинам микронеровностей и своевременным подводом участков обрабатываемой поверхности заготовки детали в рабочий зазор.

Однако при увеличении окружной скорости и скорости продольной подачи более 0,08 м/с и 0,30 мм/об значительная часть частиц ФМП уносится из рабочего зазора микронеровностями заготовки детали. В результате происходит значительное снижение производительности процесса упрочнения и относительной износостойкости.

Анализируя зависимости, представленные на рисунках 3.1 и 3.2, можно сделать вывод, что оптимальными являются продольная подача и окружная скорость, при которых удовлетворяются следующие условия: $0,04 < V < 0,06$ м/с; $0,15 < S < 0,27$ мм/об.

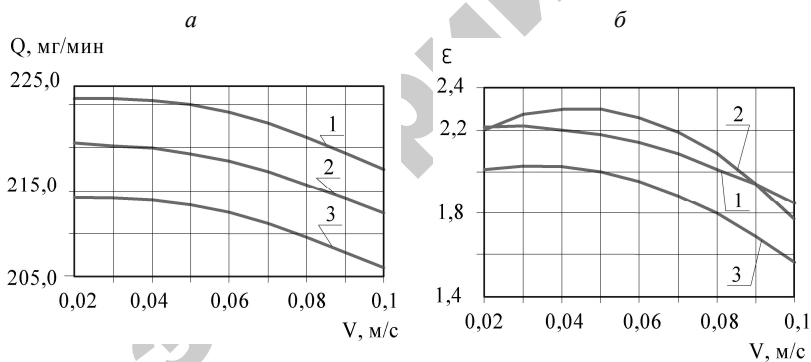
Плотность разрядного тока оказывает существенное влияние, как на относительную износостойкость, так и на производительность процесса. Выявлено, что при увеличении плотности разрядного тока до оптимальных значений (1,9–2,2 А/мм²) происходит преобразование электрической энергии в тепловую и обеспечиваются стабильные нагрев и плавление устойчиво расположенных цепочек-микроэлектродов из ферромагнитного порошка в рабочем зазоре.

В результате возрастают производительность процесса МЭУ и износостойкость покрытий. Вместе с тем при превышении максимального значения плотности тока (более 2,3 А/мм²) производительность и износостойкость снижаются, так как, согласно источникам [61, 62, 69], повышается вероятность возникновения электрического разряда у поверхности полюсного наконечника по причине увеличения коэффициента передачи энергии.



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

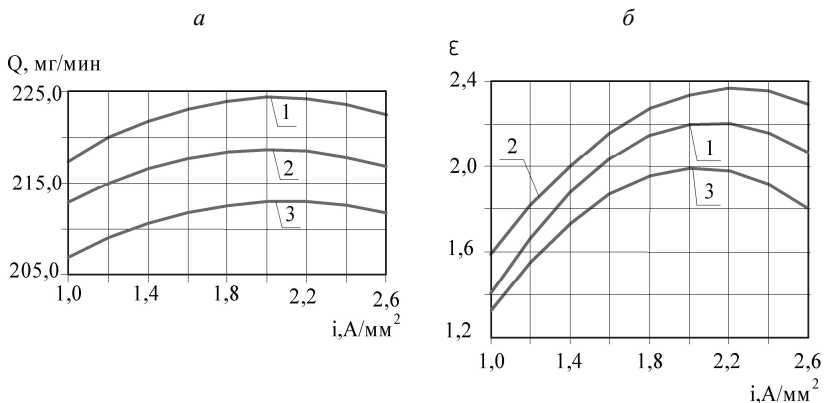
Рисунок 3.1. – Зависимость производительности Q (а) и относительной износостойкости покрытий ϵ (б) от подачи S при МЭУ



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

Рисунок 3.2. – Зависимость производительности Q (а) и относительной износостойкости покрытий ϵ (б) от окружной скорости заготовки V при МЭУ

Оптимальные значения плотности разрядного тока i для исследуемых ферромагнитных порошков (рисунок 3.3) находятся в пределах и $1,7 < i < 2,2 \text{ А/мм}^2$.



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

Рисунок 3.3. – Зависимость производительности Q (а) и относительной износостойкости покрытий ε (б) от плотности разрядного тока i при МЭУ

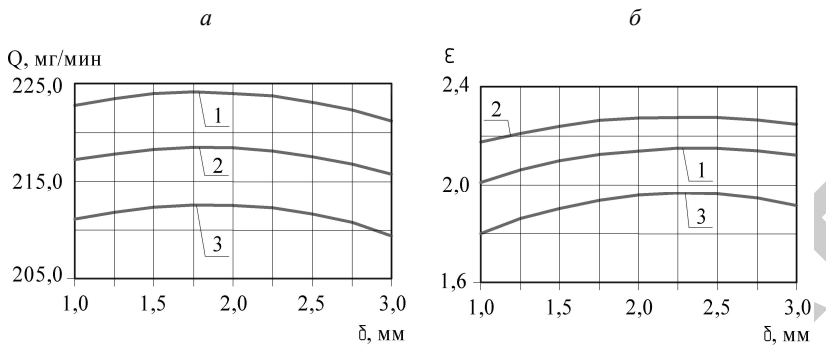
Исследованиями установлено, что при уменьшении рабочего зазора влияние последнего на исследуемые параметры незначительно из-за удержания постоянным магнитным полем наибольшего количества цепочек-микроэлектродов. Количество передаваемой энергии ФМП и перенос расплава материала порошка на обрабатываемую деталь вследствие этого снижаются. При рабочем зазоре, равном длине от 3 до 5 размеров, частицы ферромагнитного порошка по большой оси обеспечиваются наиболее оптимальными условиями для формирования покрытия.

Дальнейшее увеличение рабочего зазора способствует снижению производительности МЭУ и износостойкости из-за незначительного количества цепочек-микроэлектродов и их большой длины. Анализ математико-статистических моделей (3.1)–(3.6) и рисунка 3.4 показывает, что рабочий зазор находится в пределах $1,5 < \delta < 2,2$ мм.

Наиболее благоприятные значения расхода различных ФМП (рисунок 3.5), которые обеспечивают производительность МЭУ и относительную износостойкость покрытий, равны:

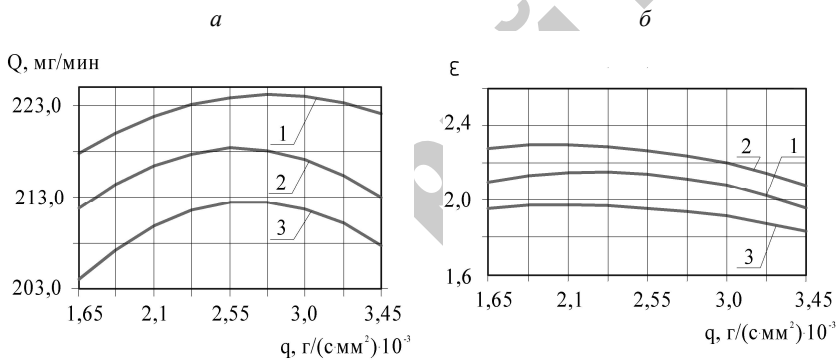
$$\begin{aligned}
 qQ_{\text{Fe-2\%V}} &= 2,81 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2); & qQ_{\text{ФБХ-6-2}} &= 2,75 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2); \\
 qQ_{\text{Fe-Ti}} &= 2,73 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2) & \text{и } q\varepsilon_{\text{Fe-2\%V}} &= 2,92 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2); \\
 q\varepsilon_{\text{ФБХ-6-2}} &= 2,85 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2); & q\varepsilon_{\text{Fe-Ti}} &= 2,84 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2).
 \end{aligned}$$

Установлено, что значения расхода исследуемых композиционных ферромагнитных порошков незначительно отличаются.



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

Рисунок 3.4. – Зависимость производительности Q (а) и относительной износостойкости покрытий ε (б) от величины рабочего зазора δ при МЭУ



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

Рисунок 3.5. – Зависимость производительности Q (а) и относительной износостойкости покрытий ε (б) от расхода ФМП q при МЭУ

3.3. Оптимизация технологических режимов магнитно-электрического упрочнения

Многопараметрическая оптимизация технологических режимов процесса МЭУ выполнялась в соответствии с методикой, приведенной в [154, 155]. Так как анализируемые функции отклика (3.1)–(3.6) унимодельны, то экстремум определяется по поверхности отклика функции $D_o = 1/D$ методом спирального координатного

спуска. Для желательностей d_i МЭУ с использованием установки модели УНП 1 построили шкалу (рисунок 3.6), исходя из требований, предъявляемых к обработанной поверхности.

С учетом ограничений технологических факторов МЭУ, которые были приняты, определены варианты режимов магнитно-электрического упрочнения для исследуемых композиционных ферромагнитных порошков (таблицы 3.3–3.5). Обработку данных производили с помощью математического пакета MathCAD. Принимали технологический режим процесса МЭУ за оптимальный, который наиболее желателен.

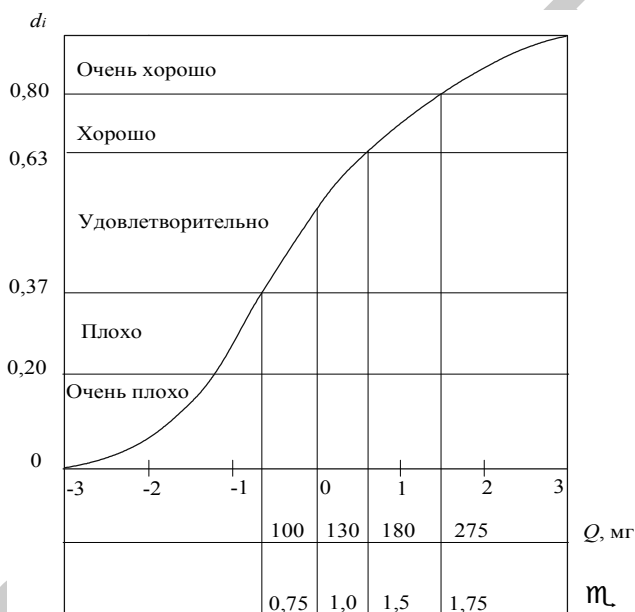


Рисунок 3.6. – Шкала желательности для покрытий и процесса МЭУ

Таблица 3.3. – Поиск оптимального режима МЭУ порошка Fe-2%V

Номер варианта	Кодированное значение варьируемого фактора					Значение параметра оптимизации		Желательность D
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_1	Y_2	
1	-0,056	0,56	0,393	-0,141	-0,169	223,518	2,099	0,757
2	0,170	-1,106	-0,649	-0,139	1,030	235,475	2,196	0,856

Таблица 3.4. – Поиск оптимального режима МЭУ порошка ФБХ-6-2

Номер варианта	Кодированное значение варьируемого фактора					Значение параметра оптимизации		Желательность
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_1	Y_2	
1	0,156	-0,962	-1,944	0,164	0,782	219,944	2,072	0,747
2	0,279	-1,119	-0,303	-0,231	0,702	223,583	2,306	0,863

Таблица 3.5. – Поиск оптимального режима МЭУ порошка Fe-Ti

Номер варианта	Кодированное значение варьируемого фактора					Значение параметра оптимизации		Желательность
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_1	Y_2	
1	-0,242	0,529	0,282	-0,135	-0,003	212,138	1,872	0,735
2	-0,436	0,425	0,263	-0,365	0,693	212,905	1,911	0,793

Исследованиями установлено, что значения оптимальных режимов МЭУ имеют незначительные отличия (таблица 3.6), а по некоторым факторам почти совпадают.

Таблица 3.6. – Оптимальные режимы МЭУ композиционных порошков

Исследуемый порошок	Оптимальное значение фактора				
	i , А/мм ²	δ , мм	S , мм/об	V , м/с	q , г/(с·мм ²)
Fe-2%V	1,87	1,55	0,185	0,057	$2,95 \cdot 10^{-3}$
ФБХ-6-2	1,91	1,50	0,220	0,055	$2,86 \cdot 10^{-3}$
Fe-Ti	1,73	2,21	0,276	0,053	$2,86 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, с помощью многопараметрической оптимизации и принятых ограничений для МЭУ различных композиционных порошков можно рекомендовать следующие режимы:

$$i = 1,73-1,91 \text{ А/мм}^2;$$

$$\delta = 1,50-2,21 \text{ мм};$$

$$S = 0,185-0,276 \text{ мм/об};$$

$$V = 0,055-0,057 \text{ м/с};$$

$$q = (2,86-2,95) \cdot 10^{-3} \text{ г/(с·мм}^2\text{)}.$$

4. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

4.1. Оборудование и материалы, применяемые для нанесения покрытий

Нанесение покрытий на образцы выполнялась на установках с магнитными системами на электро- (модель ЭУ-5) и постоянных магнитах (модель УНП 1). Устройство, принцип работы установки модели ЭУ-5 описаны в источнике [50], установки модели УНП 1 – в главе 2. Режимы нанесения покрытий различных композиционных ФМП определены для установки модели ЭУ-5 на основе данных работы [50], для установки модели УНП 1 – в главе 3.

В качестве образцов использовались цилиндрические образцы из стали 45 ГОСТ 1050–88, микроструктура которых в исходном состоянии представляла собой смесь феррита и сорбитообразного перлита. Твердость – 240 НВ.

Эталонные образцы из стали 45 ГОСТ 1050–88 подвергались закалке с нагрева ТВЧ. Нагрев под закалку осуществлялся на высокочастотной установке ТГИ 25/100-4 в индукторе со спреерным охлаждением водой.

Механическая обработка образцов с покрытиями (рисунок 4.1) осуществлялась шлифованием на станке модели ЗБ12 кругами карбида кремния зеленого зернистостью 16–25.

При выборе материалов, 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 [50, 51, 53].

Этим требованиям соответствуют гранулированные композиционные порошки на основе железа, изготовленные путем распыления струи жидкого расплава водой или газом высокого давления [50, 51, 73]. Форма частиц порошков сферическая. Сфероидизированные порошки с гранулометрическим составом 160–360 (ГОСТ



Рисунок 4.1. – Фотография образцов с покрытиями

ФБХ-6-2 (ГОСТ 11546–75). Химический состав используемых ФМП для магнитно-электрического упрочнения покрытий приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Химический состав композиционных ферромагнитных порошков

Марка ФМП	Содержание элемента, 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	–	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 для сравнения эффективности нанесения покрытий обусловлен тем, что:

- ферросплавы на основе железа (таблица 1.1) 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 легирующих компонентов и при их нанесении возможно образование устойчивых твердых карбидов ванадия и титана с углеродом, а также упрочнение твердого раствора интерметаллидными фазами;

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

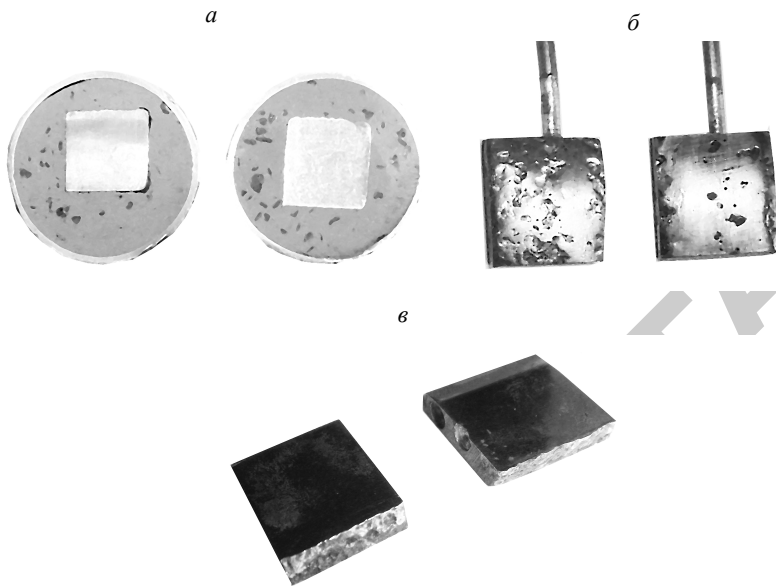
4.2. Исследование физико-механических свойств покрытий

На первом этапе исследовались микроструктура, фазовый состав, уровень микронапряжений и дисперсности структур, концентрация легирующих элементов материалов, микротвердость и твердость покрытий, полученных на установке модели УНП-1. На втором этапе изучались пористость, сплошность и разнотолщинность покрытий, полученных на установках МЭУ с МС на электро- и постоянных магнитах, трещинообразование.

4.2.1. Методики проведения исследований физико-механических свойств покрытий

Микроструктурный анализ. Изучение микроструктуры, микротвердости, пористости, разнотолщинности и трещинообразования покрытий проводилось на микрошлифах двух типов – шлифы поперечного среза (рисунок 4.2 *а*) и шлифы лицевой поверхности покрытия (рисунок 4.2 *б*). Шлифы поперечного среза изготавливались 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 два этапа. На первом этапе проводилось травление их 4 %-м раствором азотной кислоты в этиловом спирте, что давало возможность выявить структуру основы покрытий и зоны термического влияния. На втором – травление в реактиве Мураками следующего состава: 10 г красной кровяной соли, 10 г гидроксида калия, 20 мл воды. Травление проводилось при температуре 40 °С в течение двух часов [129, 158].



а – шлифы поперечного среза; *б* – шлифы лицевой поверхности покрытия;
в – образцы для рентгенофазового и микрорентгеноспектрального анализов

Рисунок 4.2. – Фотографии образцов, использовавшихся при исследовании физико-механических свойств покрытий, полученных магнитно-электрическим упрочнением

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».

Рентгенофазовый анализ. Рентгенофазовый анализ образцов с покрытиями (рисунок 4.2 *в*) выполнялся на рентгеновском дифрактометре общего назначения ДРОН-3,0 в CoK_α монохроматизированном излучении (монохроматизация – вторичная и осуществляется пиролитическим графитом; щели после трубки – Соллера $2^\circ 30'$, 1, 6, перед счетчиком – Соллера $2^\circ 30'$, 0,25). Вращение образцов в собственной плоскости, управление дифрактометром, сбор и обработка информации выполнялись с применением программы «X-RAY» автоматизации рентгеноструктурного анализа [159, 160].

Рентгеновская съемка полной рентгенограммы проводилась в диапазоне углов $2\theta = 11,5\text{--}100^\circ$ и $20\text{--}120^\circ$ с шагом $0,1^\circ$. Режим съемки – сканирующий.

Для проведения качественного и полуколичественного рентгенофазового анализа выполнялся следующий комплекс работ: устанавливался элементный состав исследуемых образцов с покрытиями; в базе данных «PDF.dat» картотеки JCPDS программного комплекса «PDF2.dat» [160, 161] производился поиск возможных при элементном составе Fe, V, Cr, B, Ti, C карточек фаз; находились карточки, на основе которых созданы 3 отдельных базы данных: 1. «Fe_V_C.new», 2. «Fe_Cr_B_C.new», 3. «Fe_Ti_C.new»; в соответствие с молекулярным составом каждой фазы в базу данных вводились массовые коэффициенты поглощения, определявшиеся для каждой фазы с использованием программы «X-RAY»; выполнялась идентификация фазового состава исследуемых покрытий.

Определение параметров тонкой структуры. Для изучения параметров тонкой структуры α -Fe линии (110), (220) и (222) снимались в сканирующем режиме. При этом угловой интервал измерения – 2θ каждой линии определялся по ее положению из полного рентгеновского спектра для проведения фазового анализа $\pm 4^\circ$ в обе стороны от положения максимальной интенсивности линии. Шаг съемки по углу составлял $0,05^\circ$. Время экспозиции на каждый шаг измерения – τ устанавливалось на основе данных съемки полного спектра, интенсивности каждой линии по данным карточки ASTM [161] с условием обеспечения четко выраженного спектра линии.

Расчет параметров тонкой структуры осуществлялся в три этапа с помощью специального пакета программ «GOR» автоматизированного рентгенодифрактометрического исследования тонкой структуры, включающего подпрограммы «Split Line», «FOURL l» и «MIC 2L» [160, 161].

На первом этапе использование подпрограммы «Split Line» позволяло провести удаление дублетных линий $\text{CoK}_{\alpha 2}$, разделение наложенных линий и выделение из сложного спектра линий (110)–(220) и (222). На втором этапе при помощи подпрограмм «FOURL l» и «Split Line» выполнялась первичная обработка дифракционных данных, определялись коэффициенты Фурье профилей образца и эталона, а также функции физического уширения.

На третьем этапе применялась подпрограмма «MIS 2L», которая позволяла рассчитывать эффективные размеры кристаллитов при отсутствии влияния микродеформаций и подбирать модели распределения плотности числа ячеек; рассчитывать распределения микродеформаций при отсутствии влияния мелкодисперсности и подбирать модели распределения микродеформаций; совместно решать первую и вторую задачи в приближении изотропности; решать третью задачу в приближении анизотропности [161, 162].

В результате рассмотренного выше полного комплекса работы с применением пакета программ «GOR», реализованного на персональном компьютере, по полному спектру идентифицировалась кристаллическая решетка основы исследуемых образцов, и определялись параметры съемки выбранных для расчетов отдельных линий фазы, параметры тонкой структуры – положение максимума и центра тяжести линий (углы 2θ); функция физического уширения – $\beta_{1/2}$, рад.; средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР) – \bar{D} , Å; размер ОКР по Селякову – $D_{\text{эфф}}$, Å; относительная среднеквадратическая микродеформация – $\langle E^2 \rangle^{1/2}$; плотность дислокаций в объеме кристалла – ρ , см⁻²; средний размер ОКР, который сравнивался с эффективным размером блоков по Селякову-Шерреру: $D_{\text{эфф}} = 0,9 \cdot \lambda / \beta \cdot \cos \theta$.

Электронно-микроскопический анализ. Электронно-микроскопические исследования выполнялись с помощью растрового электронного микроскопа марки LEO 1455 VP фирмы «Carl Zeiss» (Германия) на поверхности микрошлифов поперечного среза, имеющих ширину 5 мм. Исследования проводились при нормальном падении пучка (диаметр 50–500 Å) отраженных и вторичных электронов на поверхность образца и ускоряющем напряжении 20 кВ [163].

Микрорентгеноспектральный анализ. Исследования элементного состава наплавленного слоя выполнялись с использованием энергодисперсионного SiLi-олупроводникового детектора фирмы «Röntec» (Германия).

Для обеспечения удовлетворительной статистической обработки числа импульсов в пиках спектр записывался не менее 300 с. Количественный анализ осуществлялся с использованием программного обчета спектров, выполняемого на основе сравнения с эталонными образцами и уровнем тормозного излучения.

Оценка размера области генерации рентгеновского излучения производилась по формуле:

$$R_x = 0,033(E_0^{1,7} - E_{кр}^{1,7}) A / z \rho, \quad (4.1)$$

где E_0 – энергия первичного пучка электронов, эВ;

$E_{кр}$ – критический потенциал возбуждения анализируемого элемента, эВ;

A – средний атомный вес;

z – средний атомный номер;

ρ – средняя плотность, кг/м³.

Определение средней концентрации элементов осуществлялось на участке покрытия площадью $S \approx 180 \text{ мкм}^2$ (при увеличении в 2000 раз) с анализируемым приповерхностным объемом, равным $S R_x$.

Для микрорентгеноспектрального анализа распределения исследуемых элементов по глубине наплавленного слоя и на границе покрытия и основы осуществлялось сканирование по заданной линии. Построение концентрационного профиля распределения анализируемых элементов в исследуемом образце и эталоне осуществлялось в результате настройки детектора на необходимые элементы и регистрации количества импульсов тока i на поверхностях эталона и образца при напряжениях 30, 20, 10 кэВ [164].

Воспроизводимость экспериментально полученных результатов, а также точность определения концентрации составляла $\pm 1,5 \%$.

Микротвердость и твердость. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при величине статической нагрузки на индентор $P \sim 0,49 \text{ Н}$ (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 $P \sim 60 \text{ кг}$.

Порядок подготовки образцов, тарировка приборов, приемы измерения и оценка полученных величин выполнялись согласно [129, 158].

Пористость, сплошность и разнотолщинность покрытий. Объемная пористость покрытий определялась методом гидростатического взвешивания [51, 129]. 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 Π определялась по формуле

$$\Pi = \frac{(m_1 - m_2)}{\rho_{\text{ж}}} \frac{1}{V} 100\%, \quad (4.2)$$

где m_1, m_2 – масса покрытия до и после пропитки соответственно, кг;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность насыщающей жидкости, кг/м³;

V – объем покрытия, м³.

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

Изучение параметров качества (толщина, сплошность и пористость) осуществлялось для пяти образцов с покрытиями, полученными магнитно-электрическим упрочнением в постоянном магнитном поле на оптимальных режимах.

Трещинообразование. Оно оценивалось с помощью микроскопа. В качестве количественного критерия принималась удельная длина трещин на поверхности площадью 1,0 мм². Исследование трещинообразования выполнялось в следующем порядке: вначале измерялась видимая площадь поверхности микрошлифа покрытия под окуляром; затем определялась длина трещин посредством перемещения стола с образцом вдоль направления трещин относительно перекрестья окуляра микроскопа.

В процессе исследования разнотолщинности и сплошности покрытий, трещинообразования изучалось по пять наиболее характерных участков одного образца с покрытием.

Статистическая обработка экспериментальных данных. Для получения достоверных результатов эксперименты по определению микротвердости и трещинообразования повторяли 5 раз, параметров тонкой структуры – 3 раза, сплошности, пористости и разнотолщинности покрытий, полученных на установках МЭУ с МС на электро- и постоянных магнитах, – 50 раз. Точность экспериментальных исследований рассчитывалась по формулам (2.2)–(2.7), приведенным в разделе 2.1.

4.3. Микроструктура, фазовый состав и свойства покрытий

Основными факторами, влияющими на формирование структуры наплавленного слоя, являются высокая скорость нагрева частиц ФМП (порядка 10^3 – 10^6 °C/с), обусловленная большой плотностью энергии, и охлаждение, достигаемое за счет теплоотвода в СОЖ и основу металла (скорость охлаждения достигает до 10^3 – 10^5 °C/с). Это обстоятельство в большинстве случаев при МЭУ приводит к неполному протеканию диффузионных процессов и формированию литой, мелкодисперсной, неравновесной структуры [51, 52].

4.3.1. Микроструктура покрытий

Анализ фотографий микроструктуры покрытий из композиционных порошков Fe-2%V, Fe-Ti и ФБХ-6-2 (рисунки 4.3–4.5 а) позволяет выделить характерные зоны, образующиеся при МЭУ. Видно, что 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 наплавленного материала и его теплофизические свойства, режим МЭУ, тепловые условия процесса и скорость охлаждения [50, 52, 69].

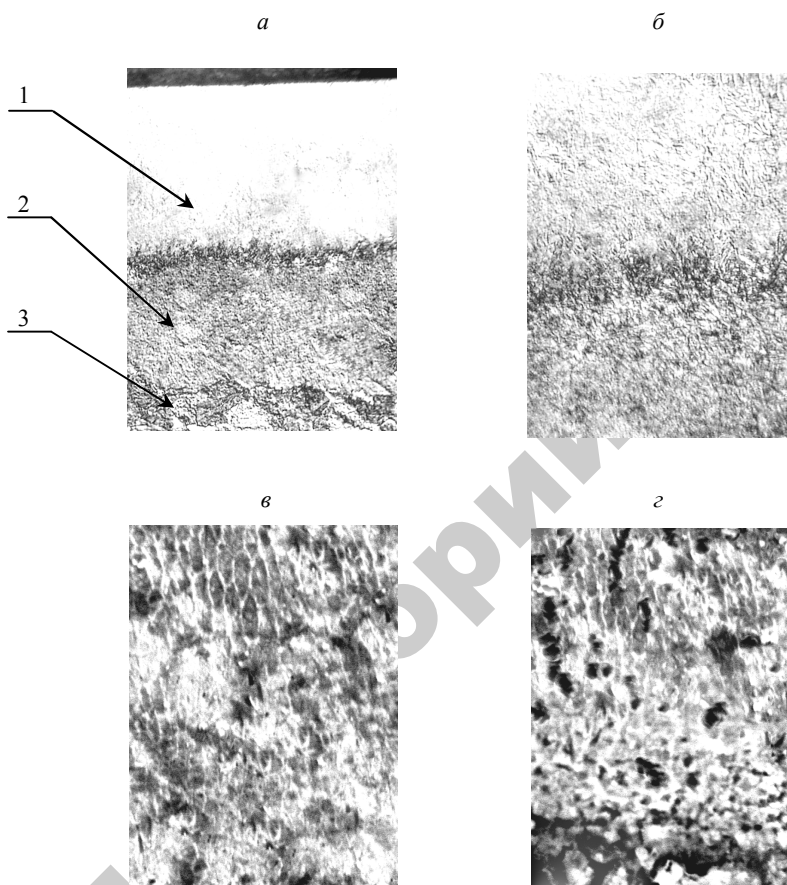
Анализ фотографий микроструктуры покрытий, полученных МЭУ композиционного порошка Fe-2%V (рисунок 4.3), показывает, что наплавленный слой характеризуется литой макроструктурой металла, в которой не выявлено окислов и посторонних включений. Микроструктуры наплавленных металлов мелкодендритного строения. Причем наружная часть покрытия (рисунок 4.3 в) имеет равноосное ячеистое строение, а на границе с основой (рисунок 4.3 г) – столбчатое дендритно-ячеистое, которое ориентировано в направлении максимального теплоотвода (перпендикулярно поверхности образца). Структура наплавленного

металла состоит из основы – твердого раствора ванадия в α -железе, остаточного аустенита, карбидов ванадия (V_2C , $V_4C_{2,67}$) и железа (FeC , FeC_8). Поверхности раздела (рисунок 4.3 *а, б*), расположенные между наплавленными слоями и основой, четко обозначены. При этом зона термического влияния (рисунок 4.3 *з*) имеет структуру дислокационного мартенсита. Под зоной термического влияния находится область неполной закалки, структура которой представляет феррит и отдельные участки перлита, превратившегося в троосто-мартенсит.

В покрытиях, полученных нанесением ФМП Fe-Ti (рисунок 4.4), не обнаружено окислов и посторонних включений. Структура покрытия (рисунок 4.4 *в, з*) идентична и состоит из дендритов твердого раствора титана в α -железе, а также незначительного количества остаточного аустенита, интерметаллидов ($FeTi$, Fe_2Ti), карбидов титана (TiC) и железа (FeC). Поверхность раздела на границе «покрытие–основа» (рисунок 4.4 *а, б*) имеет более 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).

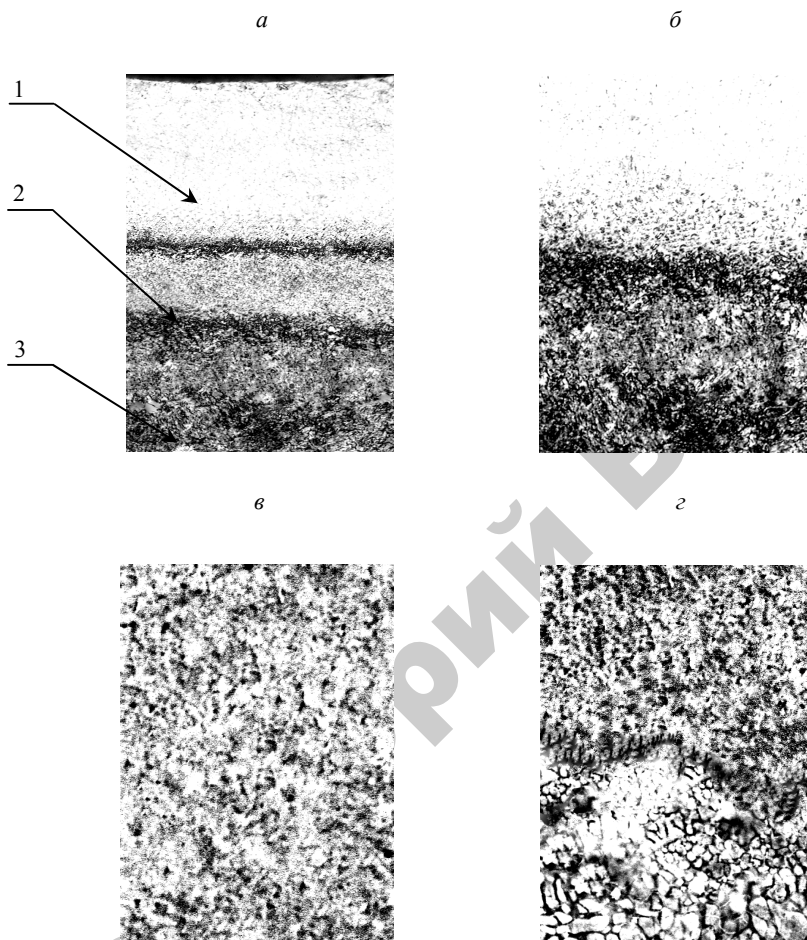
В нетравленном виде в покрытии, полученном МЭУ композиционного ферромагнитного порошка ФБХ-6-2 (рисунок 4.5), не выявлено дефектов в виде посторонних включений. Наплавленные слои покрытия имеют микроструктуру мелкодисперсного строения (рисунок 4.5 *в, з*). При этом слабо протравившиеся поверхностные слои толщиной 100–150 мкм состоят из частиц очень тонкого игольчатого строения размером до 5 мкм. На границе раздела наплавленных слоев частицы карбидов игольчатого строения увеличены в размерах до 10–15 мкм и вытянуты в сторону основного металла. Структура покрытия состоит из основы – твердого раствора хрома в α -железе, а также остаточного аустенита, карбидов железа (Fe_2C), боридов (FeB , CrB_2 , Cr_5B_3) и ферроборида ($Cr_{1,65}Fe_{0,35}B_{0,96}$). Переход от основного металла к наплавленному (рисунок 4.5 *а, б*) – 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 [69, 156].



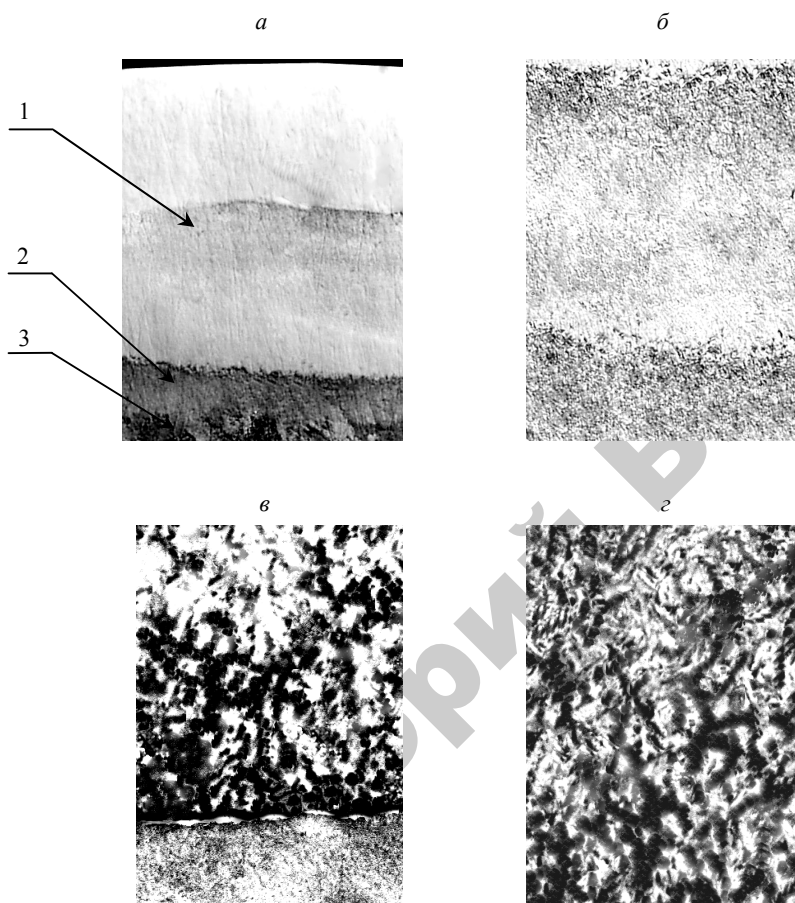
1 – покрытие; 2 – зона термического влияния; 3 – основной материал;
a, б – оптическая металлография, поперечный шлиф ($\times 200$), ($\times 500$);
в, г – растровая электронная микроскопия участков 1, 2 соответственно ($\times 5000$)

**Рисунок 4.3. – Фотографии микроструктуры покрытия,
полученного МЭУ композиционного ферромагнитного порошка Fe-2%V**



1 – покрытие; 2 – зона термического влияния; 3 – основной материал;
а, б – оптическая металлография, поперечный шлиф ($\times 200$), ($\times 500$);
в, г – растровая электронная микроскопия участков 1, 2 соответственно ($\times 5000$)

**Рисунок 4.4. – Фотографии микроструктуры покрытия,
полученного МЭУ композиционного ферромагнитного порошка Fe-Ti**



1 – покрытие; 2 – зона термического влияния; 3 – основной материал;
a, б – оптическая металлография, поперечный шлиф ($\times 200$), ($\times 500$);
в, г – растровая электронная микроскопия участков 1, 2 соответственно ($\times 5000$)

Рисунок 4.5. – Фотографии микроструктуры покрытия,
 полученного МЭУ композиционного ферромагнитного порошка ФБХ-6-2

4.3.2. Тонкие исследования покрытий

Проведенный анализ микроструктуры покрытий позволил провести качественную оценку состояния покрытий. Количественную оценку изменения структур покрытий, полученных МЭУ в постоянном магнитном поле, в зависимости от химического состава наплавляемых материалов, проводили посредством рентгеноструктурного и рентгенофазового анализов.

4.3.2.1. Рентгенофазовый анализ

При проведении рентгеновского фазового анализа ставилась задача исследовать фазовый состав покрытий, полученных МЭУ композиционных порошков Fe-2%V, Fe-Ti и ФБХ-6-2. Результаты рентгенофазового анализа покрытий представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. – Фазовый состав покрытий

Материал ФМП	Присутствующая фаза	Содержание, %
Fe-2%V	V ₂ C	0,70
	V ₄ C _{2,67}	–
	FeC	1,10
	FeC ₈	0,60
	твердый раствор V в α-Fe	93,80
Fe-Ti	FeTi	1,30
	Fe ₂ Ti	0,70
	TiC	2,10
	FeC	1,80
	твердый раствор Ti в α Fe остаточный аустенит	92,30 1,80
ФБХ-6-2	FeB	1,20
	Fe ₂ B	–
	CrB ₂	1,70
	Cr ₅ B ₃	1,50
	Cr _{1,65} Fe _{0,35} B _{0,96}	0,70
	Cr ₇ C ₃	1,20
	Fe ₂ C	2,60
	твердый раствор Cr в α-Fe остаточный аустенит	87,50 3,60

В результате рентгенофазового анализа установлено, что покрытия представляют собой конгломерат твердых и пластичных фаз, когерентно связанных между собой. К первым относится твердый пересыщенный раствор с объемно-центрированной кубической кристаллической решеткой (мартенсит), карбиды ванадия, железа, титана и хрома, интерметаллиды, бориды, ферроборид, а ко вторым – раствор с гранецентрированной кубической решеткой (аустенит). Выявлено, что в покрытиях из порошков ФБХ-6-2 и Fe-2%V доля аустенита значительно больше, чем в покрытии из Fe-Ti. Это обусловлено достаточно высокой концентрацией углерода, стабилизирующего аустенит, что объясняется особенностью формирования структуры в процессе упрочнения на установке модели УНП 1.

Так, при МЭУ порошков ФБХ-6-2 и Fe-2%V, осуществляемой с более высокой плотностью технологического тока, в результате подплавления материала основы происходит встречная диффузия углерода в покрытие, а также частичное расплавление карбидов в жидком металле. Для покрытия, полученного магнитно-электрическим упрочнением порошка Fe-Ti, отмечается максимальное содержание углерода в составе легирующего элемента и дисперсных эвтектических карбидов железа, что, очевидно, связано с большим переносом части материала с рабочей поверхности плюсового наконечника магнитной системы установки для МЭУ.

4.3.2.2. Рентгеноструктурный анализ

Целью рентгеновского структурного анализа являлась оценка уровня микронапряжений и дисперсности структур покрытий по величине физического уширения линий (110) и (220).

Результаты проведенного рентгеноструктурного анализа и расчетов параметров тонкой структуры покрытий приведены в таблице 4.3.

Анализ полученных результатов исследования и расчетов параметров тонкой структуры показывает, что все покрытия имеют: тонкодисперсное строение с размером кристаллитов в пределах 17,90–30,20 нм; плотность дислокаций (хаотических), в объемах кристаллов в пределах $(11,6213–12,6991) \cdot 10^8$, $1/\text{см}^2$; относительную среднеквадратическую микродеформацию в пределах $(22,43–36,21) \cdot 10^{-4}$.

Следует отметить, что покрытия из порошка ФБХ-6-2 имеют меньшие значения размеров блоков когерентного рассеяния

и величины неоднородных микроискажений, а большие – плотности дислокаций. Это обусловлено более «жестким» режимом МЭУ (максимальные плотность разрядного тока $i = 1,91 \text{ А/мм}^2$ и расход ферромагнитного порошка $q = 2,86 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с·мм}^2)$) при минимальном рабочем зазоре $\delta = 1,5 \text{ мм}$, в результате которого происходят увеличение неравновесности твердого раствора (мартенсита) и повышение уровня неупорядоченности кристаллической структуры покрытий.

Таблица 4.3. – Параметры тонкой структуры материалов покрытий

Материал ФМП	Направление в кристалле	(hkl)	Размер областей когерентного рассеяния, ($D_{эфф}$), нм	Относительная средняя квадратическая микродеформация, $(\langle E^2 \rangle^{1/2}) \cdot 10^{-4}$	Плотность дислокаций в объеме кристалла, $\cdot 10^8, 1/\text{см}^2$	Угол 2θ , град.	Физическое уширение линий $\beta_{1/2}$, рад.
Fe-2%V	[110]	(110)	28,6±0,5145	–	–	44,668	0,5457
		(220)	–	36,21±29,14	11,6213	98,315	1,2195
Fe-2% Ti	[110]	(110)	30,2±0,5923	–	–	44,562	0,4979
		(220)	–	36,15±28,14	11,6991	98,680	1,2126
ФБХ-6-2	[110]	(110)	17,9±0,6354	–	–	44,474	0,4738
		(220)	–	22,43±17,41	12,5576	98,356	0,7552

4.3.3. Микрорентгеноспектральный анализ покрытий

При выполнении микрорентгеноспектрального анализа необходимо было изучить распределение легирующих элементов (ванадия, титана, хрома, бора, марганца и кремния) по глубине наплавленного слоя и на границе покрытий и основы.

Результаты анализа показывают, что формирование поверхностного слоя происходит с различной концентрацией легирующих элементов материалов композиционных порошков (рисунки 4.6–4.8). При этом видно, что концентрация легирующих элементов соответствует максимуму в наружной части покрытия, затем происходит постепенное ее снижение в сторону основы [69].

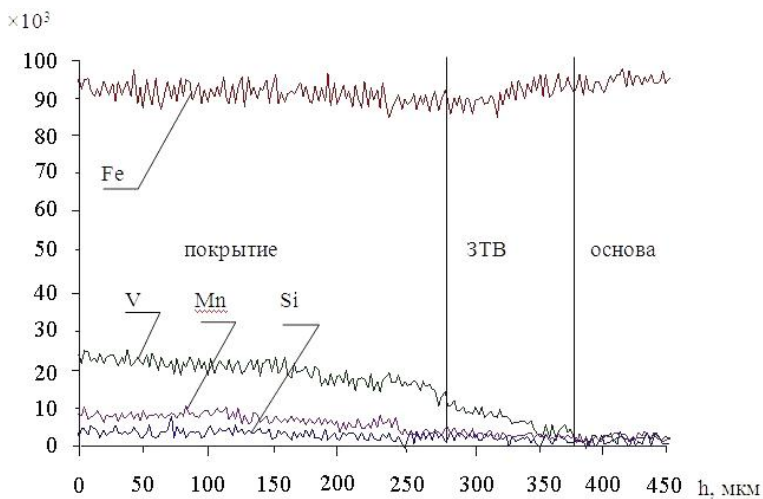


Рисунок 4.6. – Распределение интенсивности рентгеновского излучения основных элементов поверхностного слоя из ФМП Fe-2%V

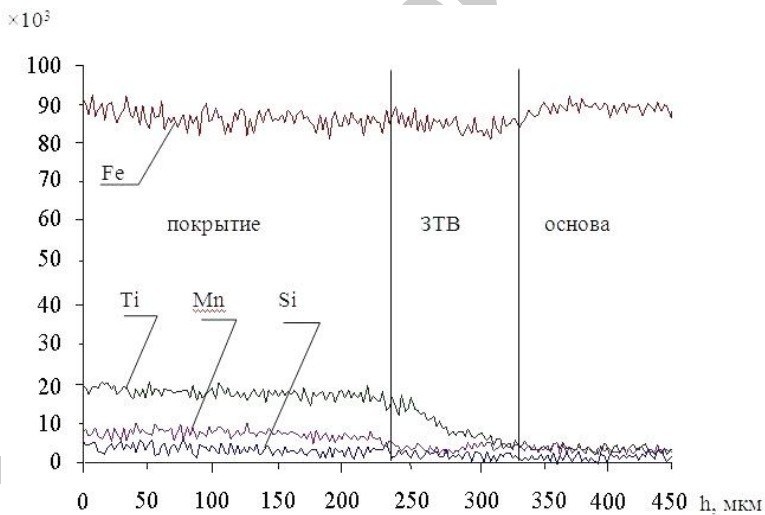


Рисунок 4.7. – Распределение интенсивности рентгеновского излучения основных элементов поверхностного слоя из ФМП Fe-2% Ti

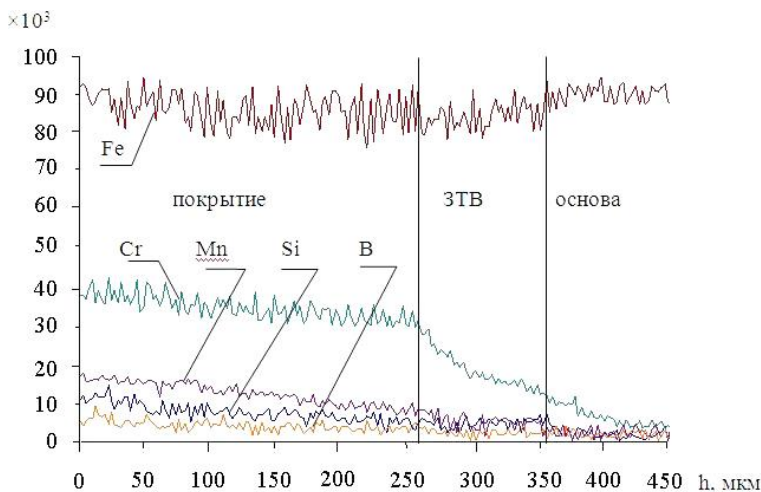


Рисунок 4.8. – Распределение интенсивности рентгеновского излучения основных элементов поверхностного слоя из ФМП ФБХ-6-2

Отмечается плавный переход легирующих элементов (рисунки 4.6–4.8) наплавленных слоев к основе и содержание их в поверхностном слое образцов. Это свидетельствует об интенсивном растворении этих элементов в твердых растворах покрытий и протекании диффузионных процессов ванадия, титана, хрома в основу. Так как при МЭУ с относительно небольшой плотностью технологического тока и малой скоростью перемещения электрических разрядов в рабочем зазоре слой металла, под действием постоянного магнитного поля равномерно и плотно распределенные по поверхности образцов, находясь в расплавленном состоянии более длительный промежуток времени. Глубина диффузии этих элементов за время МЭУ и последующего охлаждения составляет 30–80 мкм.

Концентрация легирующих элементов в большей степени выражена для покрытий из порошка ФБХ-6-2. Это указывает на наличие карбидов этих элементов и боридов, которые менее растворены в жидком металле в результате более интенсивного охлаждения и кристаллизации. При этом равномерное распределение карбидо-боридной составляющей по глубине наплавленного слоя и плавный переход легирую-

щих элементов на границе покрытий и основы (рисунки 4.6–4.8) обуславливают повышение однородности физико-механических свойств покрытий и положительно влияют на их триботехнические свойства [69]. Следует отметить, что результаты микрорентгеноспектрального исследования покрытий, полученных магнитно-электрическим упрочнением в постоянном магнитном поле, согласуются с данными рентгенофазового и рентгеноструктурного анализов.

4.3.4. Микротвердость поверхностного слоя

Известно [61, 62], 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 [129, 162].

На рисунках 4.9 и 4.10 представлены фотографии микроструктуры покрытий из ФМП с дорожками уколов индентора прибора ПМТ-3 и характерные кривые распределения микротвердости по глубине наплавленного слоя.

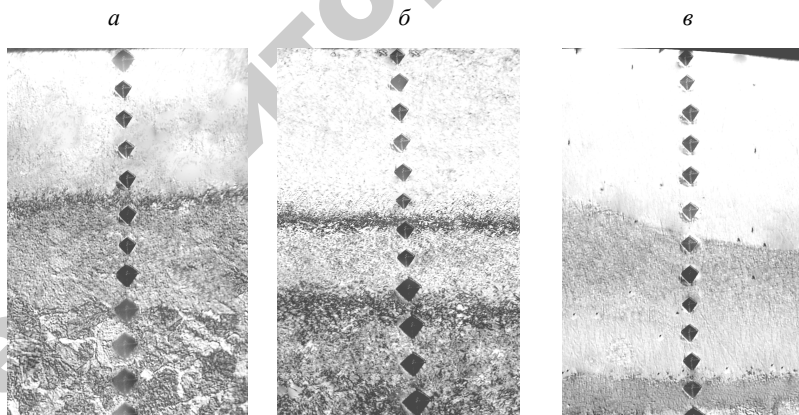
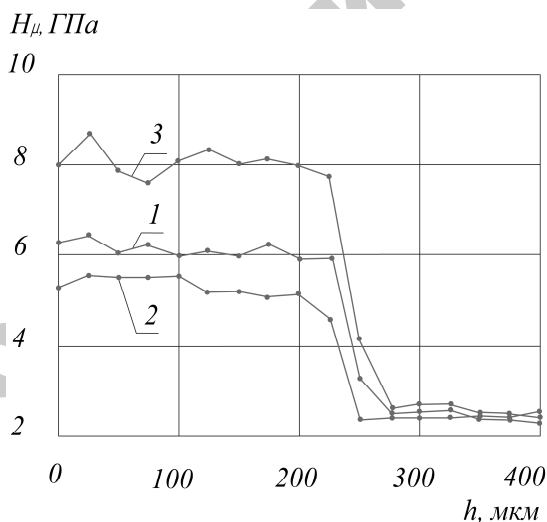


Рисунок 4.9. – Фотографии микроструктуры покрытий из ФМП Fe-2%V (а), Fe-Ti (б) и ФБХ-6-2 (в) с дорожками уколов ($\times 200$)

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 изменения значений микротвердости по толщине покрытий из порошков Fe-2%V и Fe-Ti в пределах 4,5–6,2 ГПа незначительны, 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_5B_3 , ферроборид $Cr_{1,65}Fe_{0,35}B_{0,96}$, а также бориды на основе железа FeB и FeB_2 . 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 [69, 156].



Покрытия из ФМП:
 1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2
 Рисунок 4.10. – Распределение микротвердости по толщине слоя, полученного МЭУ

4.3.5. Сплошность, пористость и разнотолщинность покрытий, трещинообразование

Работоспособность упрочненных и (или) восстановленных поверхностей деталей значительно зависит от качества наплавленных покрытий (сплошность, пористость, толщина) [52]. 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 [70].

В процессе МЭУ на сплошность покрытий оказывают наибольшее влияние магнитная индукция B_{zc} и плотность разрядного тока i , а на пористость и разнотолщинность покрытий – плотность разрядного тока i и размер частиц порошка Δ [51, 52]. 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 МЭУ обеспечивается постоянным во времени значением величины магнитной индукции в рабочем зазоре, равным 0,7 Тл.

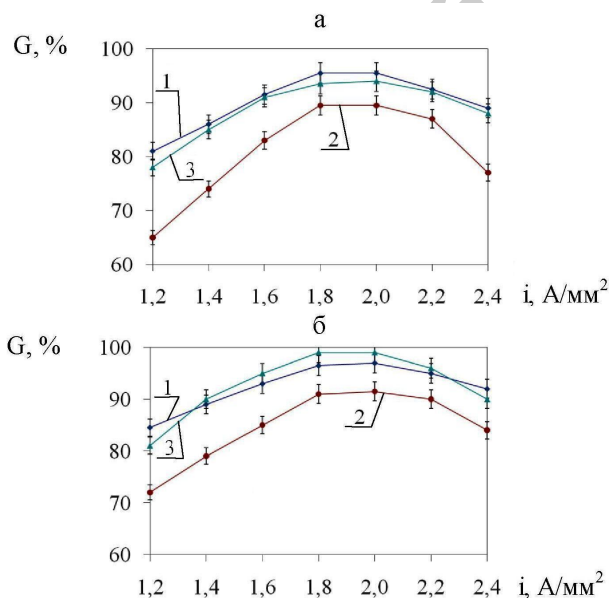
В соответствии с этим в задачу исследований параметров качества покрытий, полученных наплавкой на установках МЭУ с МС на электро- и постоянных магнитах, входило исследование зависимости сплошности покрытий от плотности разрядного тока i , а пористости и разнотолщинности покрытий – от плотности разрядного тока i и размера частиц композиционного порошка Δ .

Анализ результатов исследований (рисунок 4.11 *а* и *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.

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

мой 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 МЭУ за счет увеличения плотности разрядного тока от 1,2 до 2,0 А/мм² 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/мм² 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.



I – разброс значений сплошности покрытий из ФМП:

1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2

Рисунок 4.11. – Зависимость сплошности покрытий, полученных на установках МЭУ с МС на электро- (а) и постоянных магнитах (б), от плотности разрядного тока i

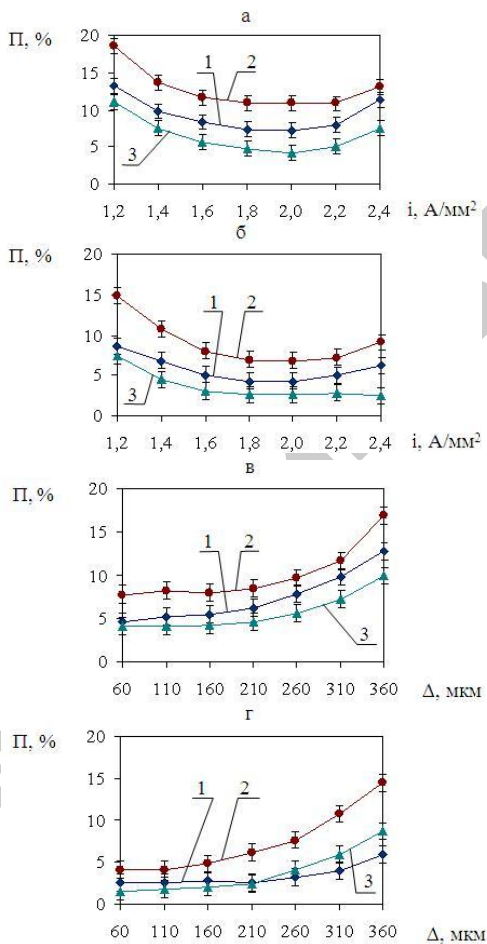
Выявлено, что сплошность покрытий, полученных наплавкой различных ФМП на установке с МС на ПМ, на 2,7–6,3 % выше, чем для покрытий, наплавленных на установке с МС на ЭМ. Следует отметить, что для покрытий из порошков ФБХ-6-2 и Fe-2%V в некоторых случаях наблюдается повышенная однородность и плотность покрытий, при которых сплошность составляет около 100 %.

Анализ результатов исследований (рисунок 4.12 *а–з*) 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. 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/мм² пористость покрытий снижается. Вместе с тем, при увеличении плотности разрядного тока более 2,0 А/мм² 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 МЭУ 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 (рисунок 4.13 *а* и *б*) показывает, что наибольшая пористость находится на границе наплавленного слоя и основы. 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 [69, 156].

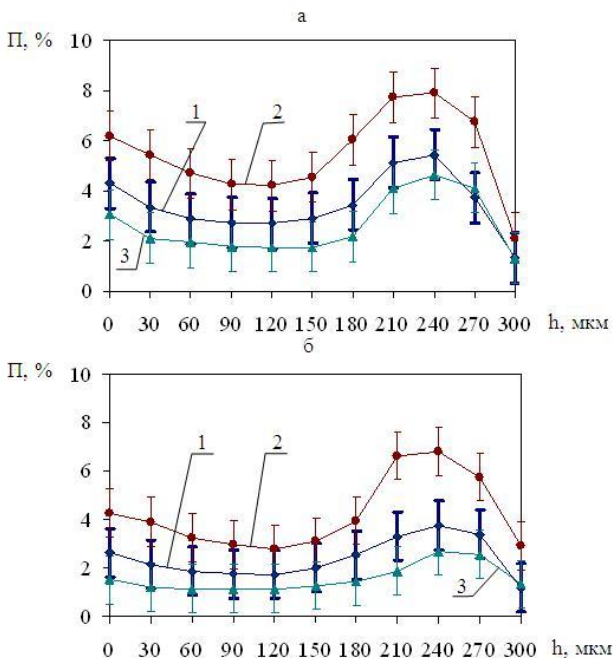
Установлено, что объемная пористость покрытий, полученных на установке УНП-1, ниже в 1,67–1,71 раза, чем пористость покрытий, наплавленных на установке ЭУ-5. Пористость на границе с основой меньше в 1,26–2,12 раза



1 – разброс значений объемной пористости покрытий из ФМП:

1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2

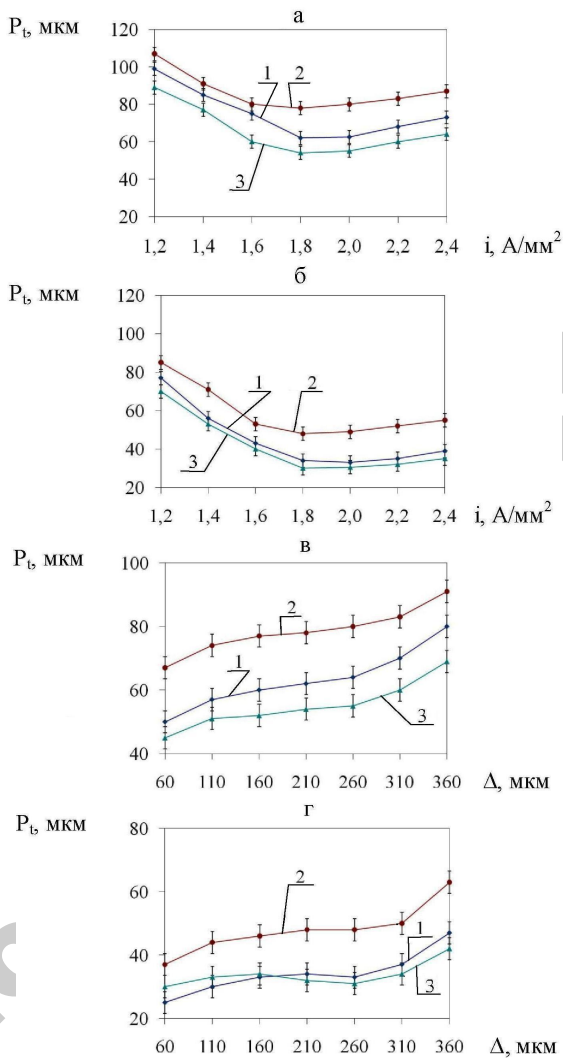
Рисунок 4.12. – Зависимость объемной пористости покрытий, полученных на установках МЭУ с МС на ЭМ (а, б) и ПМ 9 (б, г), от плотности разрядного тока i (а, б) и размера частиц порошка Δ (в, г)



Г – разброс значений пористости покрытий из ФМП:
 1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2

Рисунок 4.13. – Распределение пористости по глубине покрытий, полученных на установках МЭУ с МС на ЭМ (а) и ПМ (б)

Анализ результатов исследований (рисунок 4.14 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. 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.



Г – разброс значений разнотолщинности покрытий из ФМП:

1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2

Рисунок 4.14. – Зависимость разнотолщинности покрытий, полученных на установках МЭУ с МС на ЭМ (а, б) и ПМ (б, г), от плотности разрядного тока i (а, б) и размера частиц порошка Δ (в, г)

Выявлено, что с увеличением плотности разрядного тока от 1,2 до 1,8 А/мм² разнотолщинность покрытий снижается. Однако при увеличении плотности разрядного тока более 2,2 А/мм² 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 (таблица 4.4), 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 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 4.4. – 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 $k_{vПп}$, разнотолщинности k_{vPt} и сплошности k_{vG} покрытий меньше соответственно на 25,3, 28,9 и 18,1 %).

Установлено, что причиной появления трещин на поверхности и в покрытиях, полученных наплавкой на установке МЭУ с МС на ЭМ, является возникновение остаточных напряжений в результате неравномерного разогрева и охлаждения покрытий, а также фазовых превращений, сопровождающихся искажением кристаллической решетки. Для покрытий, полученных наплавкой на установке МЭУ с МС на ПМ, характерно наличие небольшого количества поперечных микротрещин, находящихся в покрытии и локализованных в пределах капель расплава частиц ФМП (рисунок 4.15).

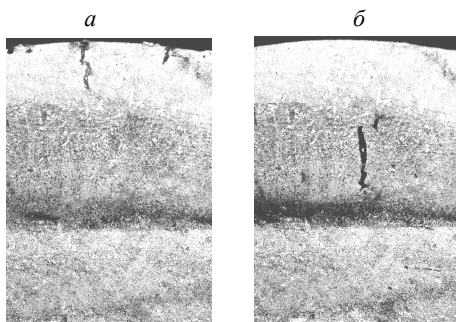


Рисунок 4.15. – Фотографии микроструктуры покрытий с трещинами на поверхности (а) и в покрытии (б) из ФМП Fe-Ti ($\times 200$)

Покрытия имеют различную удельную длину трещин (таблица 4.5). Так, покрытия, полученные наплавкой на установке модели УНП-1, имеют удельную длину трещин в пределах 20,0–40,0 мкм/мм², а покрытия, полученные наплавкой на установке модели ЭУ-5, имеют удельную длину трещин в пределах 35,0–90,0 мкм/мм². Соответственно удельная длина трещин уменьшается в 1,75–2,2 раза, что, очевидно, объясняется неодинаковой длительностью сохранения жидкой фазы в процессе кристаллизации капель расплава ферромагнитного порошка [156].

Таблица 4.5. – Трещинообразование покрытий из ФМП

Исследуемый параметр	Материала ФМП					
	Fe-2%V	Fe-Ti	ФБХ-6-2	Fe-2%V	Fe-Ti	ФБХ-6-2
	МЭУ на установке с МС на ЭМ			МЭУ на установке с МС на ПМ		
Удельная длина трещин, мкм/мм ²	35,0	70,0	90,0	20,0	35,0	40,0

Известно [51, 52], что понижение уровня трещинообразования до минимума возможно вследствие корректировки режима МЭУ в сторону его «смягчения», а именно, уменьшения плотности мощности подводимого теплового потока и скорости охлаждения покрытий за счет изменения параметров режима наплавки.

В результате проведенного экспериментального исследования установлено, что снижение удельной длины трещин достигается при следующем режиме МЭУ в постоянном магнитном поле: размер частиц ФМП $\Delta = 160$ мкм; расход РЖ $q = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ дм}^3 / (\text{с} \cdot \text{мм}^2)$; плотность разрядного тока $i = 1,80 \text{ А/мм}^2$; величина РЗ $\delta = 1,5$ мм; скорость подачи $S = 0,15$ мм/об; окружная скорость заготовки $V = 0,050$ м/с; расход ФМП $q = 2,75 \cdot 10^{-3} \text{ г} / (\text{с} \cdot \text{мм}^2)$. В результате МЭУ композиционных ФМП на рекомендуемом режиме удельная длина трещин составила до 10–15 мкм/мм².

4.4. Износостойкость упрочненных поверхностей

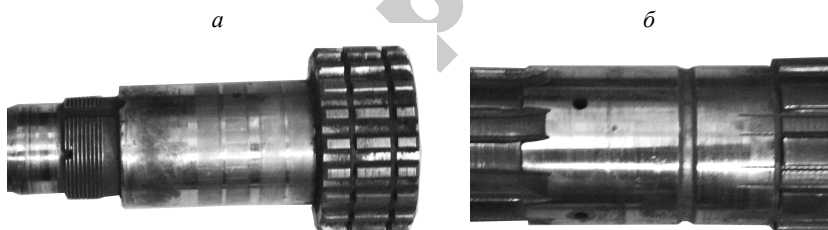
Известно [8, 20, 165], что в процессе эксплуатации по причине абразивного износа происходит потеря работоспособности у 75–80 % автотракторной техники. На процесс изнашивания при трении оказывают основное влияние структура и физико-механический комплекс свойств поверхностного слоя материала, от которых зависит характер формирующихся динамических структур, механизмы разрушения и кинетика изнашивания [166, 167].

Следует отметить, что для обеспечения требуемой работоспособности трущихся поверхностей эффективными являются защитные покрытия, полученные МЭУ, структура, износостойкость и антифрикционные свойства которых могут быть оптимизированы [168]. Учитывая, что специфика изнашивания покрытий проявляется во влиянии структуры, химического состава, сплошности и пористости покрытий, изменении величин микротвердости, представляет практический интерес оценка износостойкости покрытий, полученных наплавкой ФМП в постоянном магнитном поле.

В большинстве случаев МЭУ упрочняют и восстанавливают посадочные поверхности деталей типа тел вращения под слабо-

и средненагруженные подшипники скольжения, которые подвергаются воздействию агрессивных и абразивосодержащих сред в условиях трения со смазкой [51, 52].

Вместе с тем известны детали, у которых рабочие поверхности находятся в контакте с роликоподшипниками [87, 134, 169–171]. Например, вторичный вал коробки перемены передач автомобиля КамАЗ-5320 (рисунок 4.16 *а*) и первичный вал коробки перемены передач трактора К-701 (рисунок 4.16 *б*), у которых триботехническая система «ролики шестерни передачи – шейка вала» работает в условиях трения качения с проскальзыванием с маслом и маслом, загрязненным частицами абразива. Износ контактирующих поверхностей деталей характеризуется такими повреждениями, как углубления на шейке вала в виде дорожек качения размером 0,05–0,10 мм, ямки, раковины, местное отслаивание или выкрашивание поверхностных слоев на роликах. Вместе с тем процесс изнашивания различных материалов покрытий, полученных МЭУ, в условиях трения качения с проскальзыванием со смазочным материалом и смазочным материалом, загрязненным частицами абразива, не исследован.



а – вал вторичный коробки перемены передач автомобиля КамАЗ-53212;
б – вал первичный коробки перемены передач трактора К-701

Рисунок 4.16. – Фотографии изношенных посадочных поверхностей деталей автотракторной техники

В связи с этим целью исследований являлось изучение механизма изнашивания износостойких покрытий, полученных МЭУ в постоянном магнитном поле, и выбор наплавочных материалов для различных условий изнашивания.

4.4.1. Методика проведения исследования износостойкости покрытий

В рамках проводимых исследований ставилась задача оценить износостойкость образцов с покрытиями, полученными наплавкой ФМП Fe-2%V, Fe-Ti и ФБХ-6-2 на установке модели УНП 1, с износостойкостью образцов из стали 45 ГОСТ 1050-88, закаленных с нагрева ТВЧ на глубину 1,2–1,6 мм до твердости 52–54 HRC.

На цилиндрические образцы с наружным диаметром 40 мм, внутренним – 16 мм и высотой 12 мм из стали 45 ГОСТ 1050-88, подвергнутые нормализации, наносились покрытия толщиной до 0,5 мм на диаметр. После этого образцы с покрытиями шлифовались на круглошлифовальном станке модели ЗБ12 кругами карбида кремния зеленого зернистостью 16–25 (например, 1 300×40×127 63С 25–16 СМ 1 7 К 35 м/с ГОСТ Р 52781–2007) до получения параметра шероховатости поверхности $Ra = 0,63$ мкм, что соответствует шероховатости реальных деталей, работающих в трибосопряжениях.

В работе износные испытания образцов с покрытиями (рисунок 4.17) проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 30480–97 «Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования» и ГОСТ 23.224–86 «Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей» на машине трения модели 2070 СМТ-1 (рисунок 4.18) по стандартной методике по схемам «диск–колодка» (рисунок 4.19 а) и «диск–диск» (рисунок 4.19 б) при сравнительной оценке износостойкости покрытий соответственно при трении скольжения и трении качения с 10 %-м проскальзыванием.



а – до начала испытаний; **б** – после приработки с конртрелом;
в – после окончания испытаний

Рисунок 4.17. – Фотографии образцов с покрытиями, использовавшимися в процессе триботехнических исследований



Рисунок 4.18. – Фотография машины для испытаний материалов на трение и износ модели 2070 СМТ-1

Контртела применялись из следующих материалов: чугуна ХТВ ГОСТ 3185–74 (для условий трения скольжения) и стали ШХ15 ГОСТ 801–78, подвергнутой закалке в камерной печи и отпуску до твердости 60–62 HRC (для условий трения качения с проскальзыванием). Выбор этих материалов в качестве сопряженных деталей обусловлен следующими обстоятельствами:

– чугун в большей степени, чем другие материалы, сохраняет физико-механические свойства в процессе трения скольжения и является одним из рас-

пространенных материалов в машиностроении;

– высокоуглеродистая хромистая сталь ШХ15 применяется для изготовления тел качения небольших сечений (роликов, шариков).

При исследовании износостойкости в условиях трения скольжения со смазочным материалом использовалось масло индустриальное И-Г-А-32 ГОСТ 14479.4–87, а в условиях трения качения с проскальзыванием – трансмиссионное масло ТМ-3-18 (ТАП-15В) ГОСТ 23652–79. Масла перед испытаниями отфильтровывались. При трении со смазочным материалом, содержащим абразив, в масло добавлялись частицы кварцевого песка, измельченные до размера менее 30,0 мкм в количестве 0,05–0,25 г/см³. Масляно-абразивную смесь в количестве 40 мл заливали в ванночку приспособления.

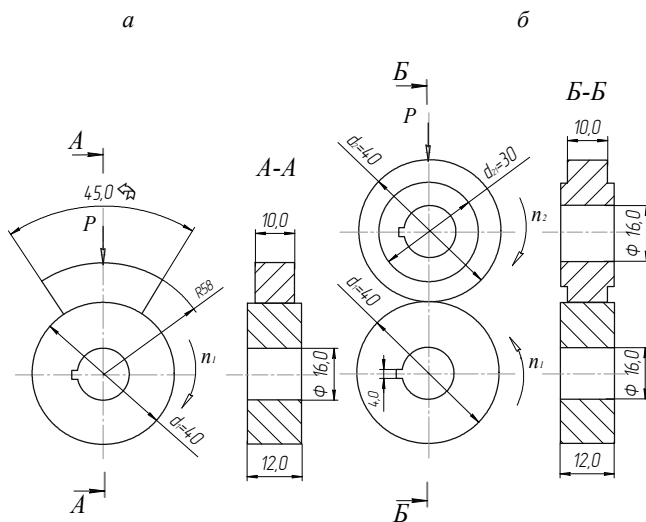


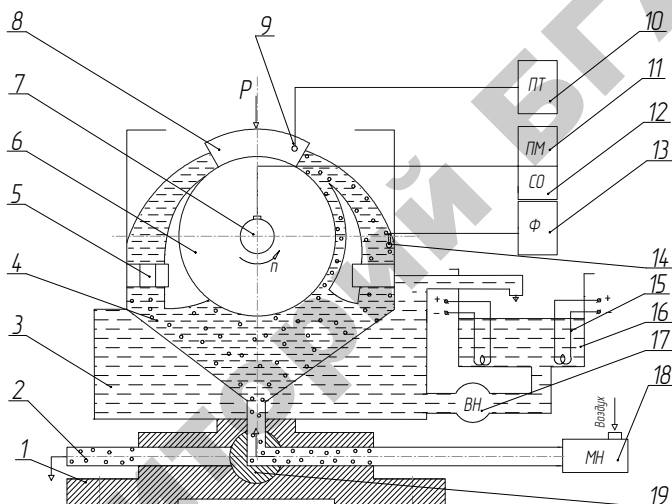
Схема испытания: *а* – «диск–колодка», *б* – «диск–диск»

Рисунок 4.19. – Схемы триботехнических исследований материалов покрытий в условиях трения скольжения (*а*) и трения качения с проскальзыванием (*б*)

При этом для каждой партии испытываемых образцов использовалась свежая порция смеси. Абразивные частицы во взвешенном состоянии в период испытаний поддерживались лопастями крыльчатки, посаженной на одном валу с образцом. Стабильность температурного режима смеси поддерживалась пропусканием воды через двойное дно ванночки. Температура смазочного материала при испытаниях поддерживалась на заданном уровне (25,0–95,0 °С) в камере 4 (рисунок 4.20) с помощью электрических нагревателей 15 общей мощностью 3,5 кВт и измерялась хромель-копелевой термопарой 14, подключенной к регистрирующему прибору Ф 564 (13) компенсационными проводами. Температурный режим образцов и контртел контролировался посредством хромель-копелевой термопары 9 и электронного потенциометра КСП-4 (10), установленного в измерительном блоке машины трения.

На всех этапах исследования износостойкости образцы предварительно прирабатывались с колодкой или диском. Окончание приработки определялось по стабилизации величины момента

трения пары и температуры. Для обеспечения точности и достоверности исследований износостойкости образцы с покрытиями и эталонные испытывались в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Так, режим испытаний соответствовал реальным усредненным условиям работы деталей узлов машин (подшипники скольжения, фрикционные муфты коробок передач и др.), для которых характерны следующие значения: величина нагрузки на образец $P = 0,35$ кН (давление в месте контакта $2,5$ МПа); относительная скорость скольжения $V_c = 2,0$ м/с (частота вращения $n = 750$ мин⁻¹); температура масла в ванне $t_m = 25$ °С ($T = 298$ К).



- 1 – корпус камеры; 2 – трубка для слива масла; 3 – кожух охлаждения; 4 – камера для масла (масляно-абразивной смеси); 5 – магнитные пробки; 6 – образец для испытаний на изнашивание; 7 – шпindel машины; 8 – колодка образца; 9, 14 – термопара; 10 – потенциометр; 11 – потенциометр для измерения момента трения; 12 – счетчик оборотов образца; 13 – прибор Ф 564; 15 – электронагреватель; 16 – бак с водой; 17 – водяной насос; 18 – мембранный насос; 19 – трехходовый кран

Рисунок 4.20. – Принципиальная схема установки для триботехнических исследований материалов покрытий

Исследования износостойкости образцов с покрытиями и эталонных в условиях трения качения с 10 %-м проскальзыванием выполнялись с применением метода математического планирования

эксперимента. В качестве исследуемого параметра принималась интенсивность изнашивания образцов. Варьируемыми факторами при изнашивании покрытий со смазочным материалом являлись нагрузка на верхний образец P , температура масла в ванне t_m и относительная скорость качения V_k . При изнашивании покрытий со смазочным материалом, загрязненным частицами абразива, помимо вышеуказанных, использовался фактор – концентрация абразивных частиц в масле K_q [171]. Согласно методике исследования износостойкости режим испытаний соответствовал условиям работы деталей трансмиссий автотракторной техники, для которых характерны: относительная скорость качения V_k (0,5–3,0 м/с); нагрузка на образец P (0,5–2,5 кН); температура масла в ванне t_m (25–90 °С); концентрация абразивных частиц в масле K_q (0,05–0,25 г/см³). При трении качения (рисунок 4.19 б) проскальзывание (η) оценивалось отношением частоты вращения (n_2) ведомого диска диаметром (d_2) к частоте вращения (n_1) ведущего диска диаметром (d_1) при условии $d_1 \approx d_2$ ($\eta = n_2/n_1$).

Время испытания износостойкости покрытий в различных условиях изнашивания при трении скольжения и качения с проскальзыванием принималось таким, чтобы путь трения для образцов, исследуемых на разных режимах, был одинаковым. Он составлял $20 \cdot 10^3$ м при трении со смазочным материалом и $6 \cdot 10^3$ м при трении со смазочным материалом с частицами абразива. Это связано с меньшей интенсивностью изнашивания при наличии смазки и необходимостью увеличения износа для уменьшения погрешности измерений. Испытывались партии по пять образцов.

Для определения износа образцов использовался линейный метод. Измерение образцов выполнялось оптическим длинномером ИЗВ-1 (рисунок 4.21), точность измерения которого в двух взаимно перпендикулярных плоскостях по двум сечениям составляла $\pm 0,5$ мкм. Измерительной базой являлись цилиндрические неизнашиваемые ленточки по краям образца. Контртела измерялись в центральной плоскости по двум сечениям. Разность размеров образца и контртела в каждом сечении до и после изнашивания составляла величину износа за время испытания.



Рисунок 4.21. –
Фотография оптического
длинномера ИЗВ-1

Исследование шероховатости поверхности покрытий выполнялось на профилографе-профилометре модели 296 ТУ 2-034–83 завода «Калибр». Изучение состояния изношенных поверхностей трения производилось с применением светового микроскопа Mef-3 фирмы «Reichert-Jung» (Австрия).

Оценку износостойкости покрытий при сравнительных испытаниях проводили по средней для испытываемых покрытий интенсивности изнашивания I , определяемой по формуле [172, 173]:

$$I = \omega/h, \quad (4.3)$$

где ω – линейный износ на диаметр, мкм;
 h – путь трения за время испытаний, км, равный

$$h = \pi D N \cdot 10^{-6}, \quad (4.4)$$

где D – номинальный диаметр образца, мм;
 N – общее число оборотов, совершенное образцом.

При испытаниях определяли также момент и коэффициент трения различных пар.

Коэффициент трения скольжения определяли из зависимости

$$f = 2M_{\text{тр}}/(D P), \quad (4.5)$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент трения, Н·м; P – нагрузка на образец, Н.

Коэффициент трения качения определяли из зависимости

$$f = M_{\text{тр}}/P. \quad (4.6)$$

4.4.2. Износостойкость покрытий в условиях трения скольжения

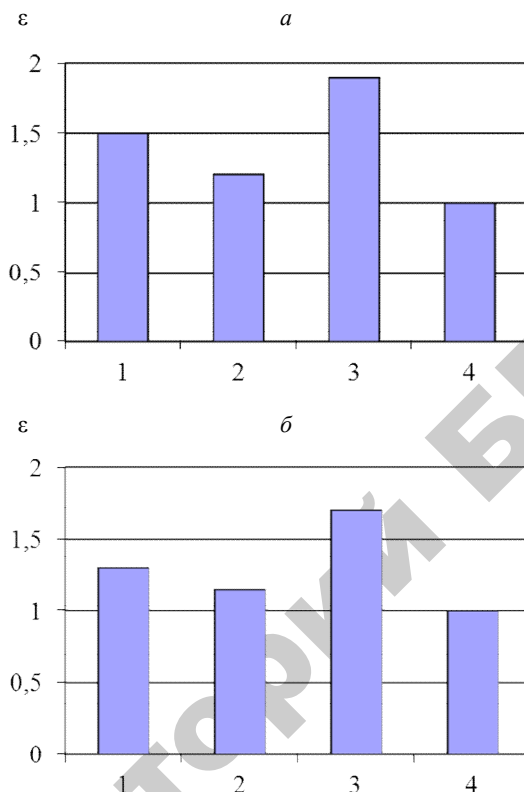
Анализ данных показывает, что влияние на износостойкость покрытий оказывает не только химический и фазовый составы наплавленных слоев, но и качество покрытий (пористость, сплошность и др.), технологические параметры процесса наплавки и конструктивное исполнение магнитных систем устройств МЭУ [157, 171].

Триботехнические характеристики покрытий, полученных МЭУ в постоянном магнитном поле, представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6. – Триботехнические характеристики покрытий, полученных МЭУ

Материал ФМП	Параметр					
	Интенсивность изнашивания I , мкм/км		Момент трения $M_{тр}$, Н·м		Коэффициент трения f	
	с маслом	с маслом и частицами абразива	с маслом	с маслом и части- цами абразива	с маслом	с маслом и частицами абразива
Fe-2% V	2,1	3,2	0,61	0,83	0,08	0,11
Fe-Ti	2,7	4,2	0,72	0,84	0,10	0,12
ФБХ-6-2	1,7	2,4	0,63	0,78	0,09	0,10
Эталон (сталь 45, 52– 54 HRC)	3,2	4,7	0,71	0,84	0,10	0,12

Установлено [157], что в различных условиях изнашивания при трении скольжения наибольшей износостойкостью обладают покрытия из ферромагнитного порошка ФБХ-6-2 (рисунок 4.22).



Условия трения скольжения: *a* – со смазочным материалом;
б – со смазочным материалом с частицами абразива

Рисунок 4.22. – Диаграммы относительной износостойкости покрытий из ФМП Fe-2%V (1), Fe-Ti (2) и ФБХ-6-2 (3), эталона (4)

Так, износостойкость этих покрытий в 1,7–1,9 раза выше износостойкости эталона. Износостойкость покрытий из ФМП Fe-2%V по сравнению с эталоном больше в 1,3–1,5 раза. Покрытия из ФМП Fe-Ti имеют износостойкость, почти равную эталону.

В порядке убывания износостойкости покрытий при трении скольжения последние можно расположить в следующей последовательности:

ФБХ-6-2 → Fe-2%V → Fe-Ti → эталон (сталь 45, 52–54 HRC).

Анализ результатов триботехнических исследований контртела и покрытий (таблицы 4.6 и 4.7) показывает, что минимальный износ пар сопряжений при трении скольжения с маслом получен для покрытий

из ферромагнитных порошков ФБХ-6-2 и Fe-2%V. Это обусловлено в первую очередь наличием в структуре покрытий остаточного аустенита – пластичной и более мягкой фазы, которая выполняет роль демпфера, снижающего динамические нагрузки на поверхность, и ускоряет процесс приработки пары «деталь–контртело».

Таблица 4.7. – Интенсивность изнашивания контртела

Материал ФМП	Интенсивность изнашивания контртела I , мкм/км	
	с маслом	с маслом и частицами абразива
Fe-2%V	2,5	3,5
Fe-Ti	2,5	4,1
ФБХ-6-2	2,8	3,7
Эталон (сталь 45, 52–54 HRC)	3,5	4,7

Положительная роль метастабильного аустенита в покрытии из порошка ФБХ-6-2 состоит в том, что он хорошо сопротивляется изнашиванию при трении скольжения со смазочным материалом вследствие образования при трении в поверхностном слое мартенсита деформации, но и прочно

удерживает от выкрашивания мелкие карбиды хрома и бора.

В условиях гидроабразивного изнашивания (масло с частицами абразива) наименьший износ пар сопряжений получен для покрытия из порошка ФБХ-6-2, что обусловлено присутствием в наплавленном слое закалочного мартенсита, комплексных боридов и ферроборида. Следует отметить, что минимальный износ пары трения «покрытие из порошка ФБХ-6-2–чугун ХТВ» также объясняется минимальной пористостью и максимальной сплошностью покрытия [157].

Установлено [157], что пара трения «покрытие из порошка Fe-Ti–чугун ХТВ» имеет по сравнению с другими исследуемыми трибосопряжениями наибольшие момент и коэффициент трения скольжения с маслом и маслом с частицами абразива.

Следовательно, для пары трения, работающей при трении скольжения со смазочным материалом и смазочным материалом с частицами абразива, рекомендуется использовать покрытия из ферромагнитного порошка ФБХ-6-2, а для неподвижных соединений – покрытия из ФМП Fe-2%V или Fe-Ti.

Анализ результатов испытаний износостойкости покрытий показал, что разброс экспериментальных данных не превышает 5–7 %.

4.4.3. Износостойкость покрытий в условиях трения качения с проскальзыванием

В целях сокращения числа опытов применен центральный композиционный ортогональный план II порядка. В качестве исследуемого параметра принята интенсивность изнашивания образцов I , а независимыми переменными – факторы P , V_k , t_m и K_q [143].

С учетом результатов исследований [51, 174] установили условия проведения экспериментов (таблица 4.8), которые рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Таблица 4.8. – Условия проведения экспериментов

Уровень фактора	Фактор			
	P , кН	V_k , м/с	t_m , °C	K_q , г/см ³
	X_1	X_2	X_3	X_4
Основной (0)	1,5	1,75	60	0,15
Верхний (+1)	2,0	2,37	77,5	0,20
Нижний (-1)	1,0	1,12	42,5	0,10
Звездная точка (+ α)	2,5	3,0	90	0,25
Звездная точка (- α)	0,5	0,5	25	0,05
Интервалы варьирования:				
основной	0,5	0,62	17,5	0,05
по α	1,0	1,25	35	0,10

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКОП II порядка с использованием средств стандартного пакета Excel Microsoft Office и математического пакета MathCAD, позволили получить математико-статистические модели, определяющие зависимости исследуемого параметра I покрытий от факторов P , V_k и t_m в условиях трения качения с проскальзыванием со смазочным материалом:

$$Y_1 = I_{\text{ФБХ-6-2}} = 0,6271,097 \cdot X_1 - 0,0012 \cdot X_2^* - 0,0365 \cdot X_3 + 0,0042 \cdot X_1 X_2^* - 0,347 \cdot X_1 X_3 - 0,0011 \cdot X_2 X_3^* + 0,795 \cdot X_1^2 + 0,0031 \cdot X_2^2 + 0,00071 \cdot X_3^2; \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}
 Y_1 = I_{\text{Fe-2\%V}} = & 1,05 - 1,456 \cdot X_1 + 0,00012 \cdot X_2^* - 0,042 \cdot X_3 - \\
 & - 0,0014 \cdot X_1 X_2^* + 0,591 \cdot X_1 X_3 - 0,0015 \cdot X_2 X_3^* + 1,026 \cdot X_1^2 + \\
 & + 0,0047 \cdot X_2^{*2} + 0,00073 \cdot X_3^2;
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

$$\begin{aligned}
 Y_1 = I_{\text{Fe-Ti}} = & 1,68 - 1,406 \cdot X_1 - 0,00092 \cdot X_2^* - 0,035 \cdot X_3 + 2,341 \cdot X_1 X_3 - \\
 & - 0,0017 \cdot X_1 X_2^* + 0,0019 \cdot X_2 X_3^* + 0,99 \cdot X_1^2 + 0,00015 \cdot X_2^{*2} + \\
 & + 0,00065 \cdot X_3^2;
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

и математико-статистические модели, определяющие зависимости исследуемого параметра I покрытий от факторов P , V_k , t_M и $K_ч$ в условиях трения качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива:

$$\begin{aligned}
 Y_2 = I_{\text{ф6х-6-2}} = & 1,211 - 0,812 \cdot X_1 - 0,0047 \cdot X_2^* - 0,035 \cdot X_3 + 5,612 \cdot X_4 - \\
 & - 0,0034 \cdot X_1 X_2^* + 1,521 \cdot X_1 X_3 + 0,127 \cdot X_1 X_4 - 0,0018 \cdot X_2 X_3^* - \\
 & - 0,0098 \cdot X_2 X_4^* - 1,126 \cdot X_3 X_4 + 0,745 \cdot X_1^2 + 0,0019 \cdot X_2^{*2} + \\
 & + 0,00058 \cdot X_3^2 + 2,765 \cdot X_4^2;
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

$$\begin{aligned}
 Y_2 = I_{\text{Fe-2\%V}} = & 1,46 - 1,045 \cdot X_1 + 0,00064 \cdot X_2^* - 0,0396 \cdot X_3 + 6,440 \cdot X_4 - \\
 & - 0,0091 \cdot X_1 X_2^* + 1,932 \cdot X_1 X_3 + 0,567 \cdot X_1 X_4 - 0,00715 \cdot X_2 X_3^* - \\
 & - 0,0014 \cdot X_2 X_4^* - 2,314 \cdot X_3 X_4 + 0,910 \cdot X_1^2 + 0,00047 \cdot X_2^{*2} + \\
 & + 0,0008 \cdot X_3^2 + 6,795 \cdot X_4^2;
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

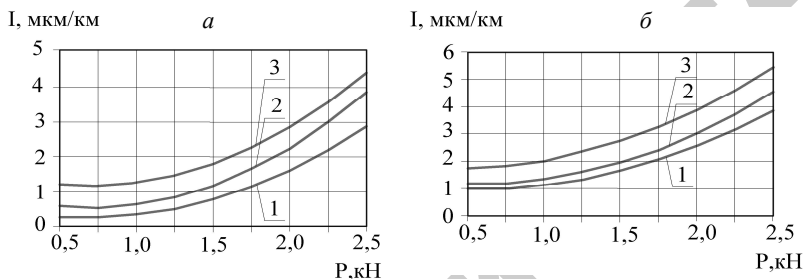
$$\begin{aligned}
 Y_2 = I_{\text{Fe-Ti}} = & 1,876 - 0,687 \cdot X_1 - 0,00044 \cdot X_2^* - 0,051 \cdot X_3 + 8,701 \cdot X_4 - \\
 & - 0,0057 \cdot X_1 X_2^* + 0,934 \cdot X_1 X_3 + 1,347 \cdot X_1 X_4 + 0,0025 \cdot X_2 X_3^* + \\
 & + 0,00095 \cdot X_2 X_4^* + 1,017 \cdot X_3 X_4 + 0,845 \cdot X_1^2 + 0,00075 \cdot X_2^{*2} + \\
 & + 0,00095 \cdot X_3^2 + 9,451 \cdot X_4^2.
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Выявлено, что не все коэффициенты регрессии (4.7)–(4.12) значимы с 95%-й доверительной вероятностью по критерию Стьюдента (* – коэффициент не значим). Установлено, что модели адекватны при 5%-м уровне значимости по критерию Фишера.

Анализ математико-статистических моделей (4.7)–(4.12) показывает, что в принятых пределах варьирования относительная

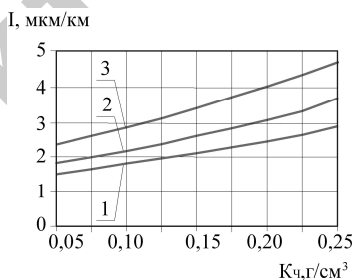
скорость трения качения V_k не оказывает существенного влияния на интенсивность изнашивания образцов.

Степень влияния факторов на параметр I для различных композиционных порошков определяли по величине коэффициентов моделей (4.7)–(4.12), геометрическая интерпретация которых представлена в виде одномерных сечений в двумерной системе координат. Зависимости, представленные на рисунках 4.23–4.25, находятся в факторном пространстве, так как пределы экстраполяции были ограничены условием $-\alpha < X_i < +\alpha$.



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

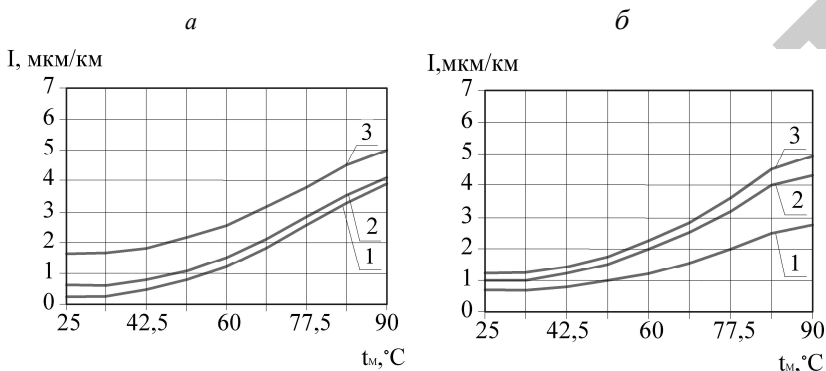
Рисунок 4.23. – Зависимость интенсивности изнашивания покрyтий, полученных МЭУ в постоянном магнитном поле, от нагрузки в условиях трения качения с проскальзыванием с маслом (а) и маслом с частицами абразива (б)



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

Рисунок 4.24. – Зависимость интенсивности изнашивания покрyтий, полученных МЭУ в постоянном магнитном поле, от концентрации абразивных частиц в масле в условиях трения качения с проскальзыванием с маслом и частицами абразива

Установлено, что по степени влияния на интенсивность изнашивания покрытий параметры можно расположить в ряд при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом: $Y_1 = I: P \rightarrow t_M \rightarrow V_K$ и в ряд – при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива: $Y_2 = I: K_{\text{ч}} \rightarrow P \rightarrow t_M \rightarrow V_K$.



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

Рисунок 4.25. – Зависимость интенсивности изнашивания покрытий, полученных МЭУ в постоянном магнитном поле, от температуры масла в ванне в условиях трения качения с проскальзыванием с маслом (а) и маслом с частицами абразива (б)

Анализ зависимостей интенсивности изнашивания покрытий от нагрузки P показывает, что износ имеет нелинейный характер, увеличение концентрации абразивных примесей в масле приводит к росту интенсивности изнашивания покрытий по зависимости, близкой к линейной. При трении со смазочным материалом интенсивность изнашивания резко возрастает при нагрузке больше 1,25 кН. В этом случае имеет место процесс нормального механохимического износа, характеризующийся почти линейной зависимостью износа поверхностей пар трения и средней объемной температуры от нагрузки. При трении со смазочным материалом с частицами абразива, интенсивность изнашивания возрастает при нижней величине нагрузки 0,5–0,8 кН. При этом наблюдается процесс разрушения трущихся поверхностей, сопровождающийся резким увеличением интенсивности тепловыделения и износом 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 без внутреннего кольца».

Установлено, что с уменьшением концентрации абразивных частиц в масле влияние температуры масла в ванне на изнашивание покрытий увеличивается. При температуре масла более 50 °С интенсивность изнашивания покрытий резко увеличивается, что, вероятно, связано с нарушением гидродинамического режима смазки и значительным снижением прочности и толщины смазочного слоя [171].

Выявлено, что по приведенным характеристикам (рисунки 4.23–4.25) наилучшую совместимость имеет пара трения «покрытие из порошка Fe-2%V–сталь ШХ15», второй является пара «покрытие из порошка ФБХ-6-2–сталь ШХ15» и третьей – «покрытие из порошка Fe-Ti–сталь ШХ15».

С применением графоаналитического метода двумерных сечений для принятых условий изнашивания определена оптимальная область работы исследуемых трибосопряжений при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом: $P = 0,5–1,0$ кН и $t_m = 25–45$ °С; при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива: $P = 0,5–0,8$ кН, $t_m = 25–40$ °С, $K_ч = 0,05$ г/см³ [171].

Результаты испытаний по определению коэффициента трения покрытий при варьируемых значениях нагрузки и относительной скорости качения приведены на рисунке 4.26. Из графиков видно, что коэффициент трения увеличивается линейно с повышением нагрузки, а при увеличении скорости качения коэффициент уменьшается незначительно. При этом значения величины коэффициента трения качения для условий трения с маслом с частицами абразива больше в 1,12–1,18 раза, чем для условий трения с маслом без частиц абразива. Снижение фрикционных свойств покрытий объясняется тем, что в процессе изнашивания при трении со смазочным материалом с частицами абразива увеличивается высота неровностей поверхности и, соответственно, площадь контакта трущейся

пары уменьшается. Установлено, что шероховатость покрытий увеличилась в 1,5–2,5 раза до значений параметра $Ra = 0,8\text{--}1,6$ мкм по сравнению с шероховатостью покрытий, полученных после шлифования [171].

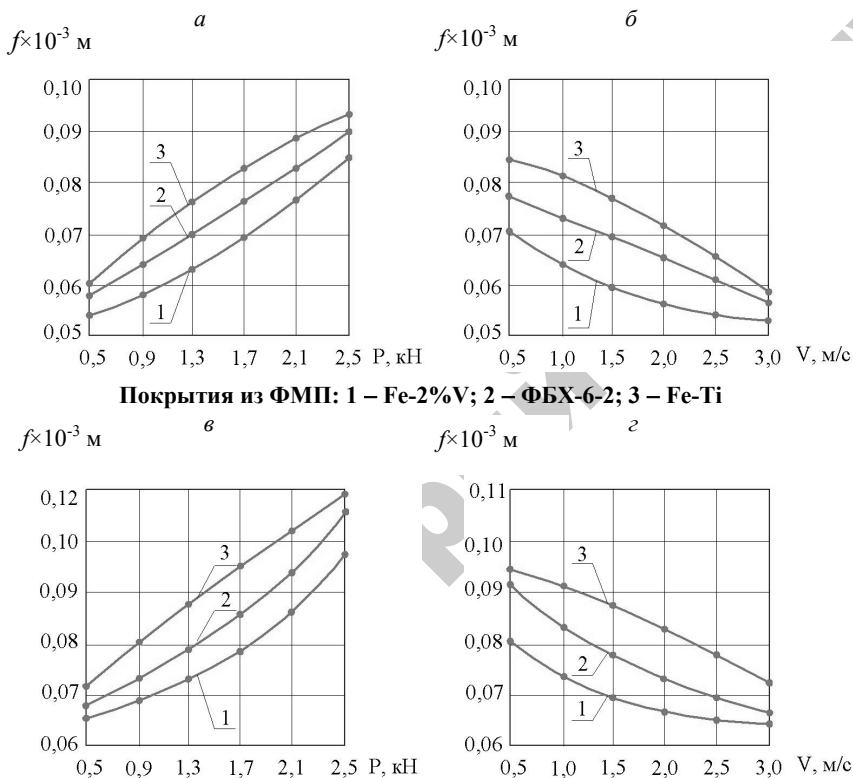


Рисунок 4.26. – Зависимости коэффициентов трения качения покрытий в условиях трения со смазочным материалом (*а, б*) и смазочным материалом с частицами абразива (*в, г*) от величины нагрузки P при $V_k = 1,25$ м/с, $t_m = 25^\circ\text{C}$ и от относительной скорости качения V_k при $P = 0,8$ кН, $t_m = 25^\circ\text{C}$

Анализ результатов испытаний износостойкости контртела и покрытий (рисунок 4.27) показывает, что наибольшей износостойкостью обладают покрытия из порошков Fe-2%V. Износостойкость этого покрытия при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива и при трении качения

с проскальзыванием со смазочным материалом в 1,7–1,8 раза и в 1,9–2,2 раза соответственно выше износостойкости эталона.

Износостойкость покрытий по сравнению с эталоном для ФБХ-6-2 больше в 1,3–1,5 раза и 1,6–1,8 раза соответственно. Покрытия из порошка Fe-Ti имеют износостойкость больше эталона в 1,10–1,15 раз, что находится в пределах погрешности эксперимента.

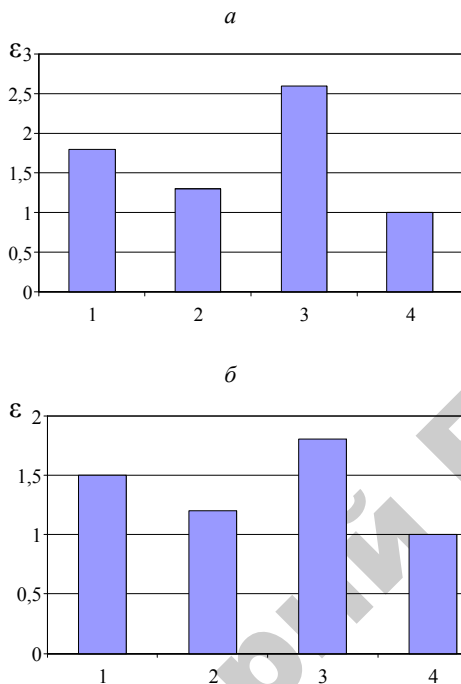
Результаты триботехнических исследований свидетельствуют о высоком уровне физико-механических свойств покрытий, полученных МЭУ на установке модели УНП 1. При этом достаточно высокое содержание метастабильного аустенита обеспечивает необходимую пластичность основы ФМП Fe-2%V и ФБХ-6-2, в результате чего приповерхностные микрообъемы покрытий способны выдерживать большее количество циклов передеформирования в процессе изнашивания.

Изучение изношенных поверхностей образцов показывает, что на поверхностях имеются участки с отколовшимися частицами, а также выглаженные участки с рисками, расположенными вдоль направления относительного перемещения контактирующих поверхностей (рисунок 4.28).

При этом шероховатость поверхностей покрытий после испытаний находится в пределах параметра $Ra = 0,5–1,2$ мкм. По всей поверхности контакта имеет место комбинированное взаимодействие поверхностей – адгезионное и упругопластическое, продуктами изнашивания которых являются равновесные тонкодисперсные частицы.

По мере увеличения нагрузки на образцы происходит нарушение когезионного взаимодействия между частицами, их выкрашивание, 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.

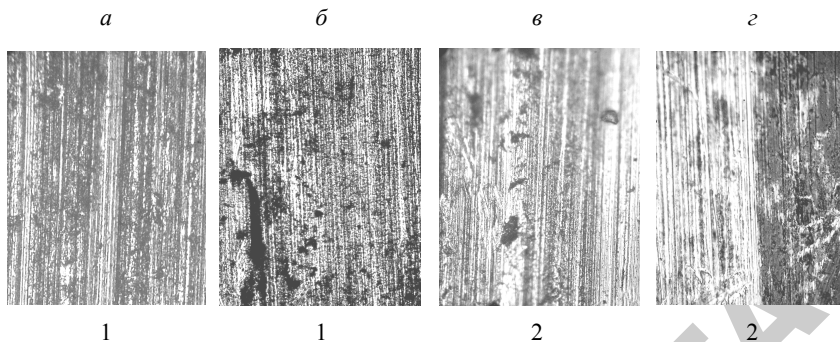
В данном случае параметр шероховатости поверхностей покрытий после испытаний составил $Ra = 1,0–2,2$ мкм [87, 171].



Условия трения качения: *а* – со смазочным материалом;
б – со смазочным материалом с частицами абразива

Рисунок 4.27. – Диаграммы относительной износостойкости покрытий из ФМП ФБХ-6-2 (1), Fe-Ti (2) и Fe-2%V (3), эталона (4)

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 модели УНП 1, выполнялись в условиях ремонтных предприятий ОАО «Вилейская райагропромтехника» и ОАО «Завод Минскагропромаш» [87, 171]. Результаты исследований показали, что после пробега автомобилей, равного 100 тыс. км, интенсивность изнашивания посадочных мест валов, изготовленных по типовой технологии и восстановленных, составила $(3,2-5,9) \cdot 10^{-5}$ мкм/км и $(2,7-5,3) \cdot 10^{-5}$ мкм/км соответственно [171].



а, в – после приработки образцов с контролелем;

б, г – после испытания (путь трения образцов – 20×10^3 м)

Рисунок 4.28. – Фотографии поверхностей трения образцов с покрытиями из ФМП Fe - 2%V (1) и ФБХ-6-2 (2) в условиях трения качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива ($\times 200$)

Анализ дисперсии результатов испытаний износостойкости поверхностей трения валов коробки перемены передач показал, что разброс экспериментальных данных не превышает 11 % для стеновых и 14 % – для производственных испытаний.

Испытания износостойкости посадочных мест под подшипники качения валов коробки перемены передач в производственных условиях показали, что технология упрочнения и восстановления МЭУ в постоянном магнитном поле обеспечивает ресурс деталей, соответствующий уровню восстановленных деталей по типовой технологии упрочнения и восстановления деталей на основе наплавки проволокой Нп – 30ХГСА в среде углекислого газа (CO_2).

По результатам исследований физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий можно сделать следующие выводы:

1. Выявлено, что структура наплавленных слоев, полученных МЭУ композиционных ферромагнитных порошков в постоянном магнитном поле, имеет гетерогенный характер и состоит из пересыщенных твердых растворов легирующих элементов порошков в α -железе в связи с переходом остаточного аустенита в мартенсит и частичным распадом последнего с выделением дисперсных карбидов. Установлено, что покрытия имеют тонкодисперсное строение с размером кристаллитов в пределах 17,90–30,20 нм; плотность

дислокаций (хаотических), в объемах кристаллов в пределах $(11,6213-12,6991) \cdot 10^8$, $1/\text{см}^2$; относительную среднеквадратическую микродеформацию в пределах $(22,43-36,21) \cdot 10^{-4}$.

2. Установлено, что микротвердость покрытий имеет незначительные колебания и плавное изменение по толщине в пределах 4,5–6,2 ГПа – для покрытий из ФМП Fe-2%V и Fe-Ti, в пределах 7,5–8,7 ГПа – для покрытия из ФМП ФБХ-6-2. Установлено, что покрытие из порошка ФБХ-6-2 имеет максимальную микротвердость (8,7 ГПа), что обусловлено присутствием в структуре слоев закалочного мартенсита и комплексных боридов хрома, ферроборида, боридов на основе железа.

3. Установлено, что из технологических параметров магнитно-электрического упрочнения в постоянном магнитном поле наибольшее влияние на показатели качества покрытий оказывает плотность разрядного тока, при оптимальных значениях (в пределах 1,73–1,91 А/мм²) которого в процессе наплавки обеспечивается равномерное распределение по обрабатываемой поверхности расплава материала ферромагнитных порошков на основе железа и однородность наплавленных слоев по толщине покрытий. Выявлено, что средние значения сплошности, объемной пористости и разнотолщинности покрытий, полученных МЭУ в постоянном магнитном поле на оптимальных режимах, находятся в пределах 91,2–98,7 %, 3,0–7,0 % и 22–48 мкм соответственно. Показано, что использование постоянных магнитов вместо электрических при магнитно-электрическом упрочнении позволяет снизить объемную пористость и разнотолщинность покрытий соответственно на 40,0–41,6 % и 33,3–59,3 % без существенного увеличения (на 2,0–3,4 %) сплошности.

4. Установлены зависимости интенсивности изнашивания покрытий при трении качения с проскальзыванием от параметров, характеризующих условия работы трибосопряжений (деталей трансмиссий автотракторной техники); что по степени влияния нагрузки (P), температуры масла (t_m), относительной скорости качения ($V_{\text{ч}}$) и концентрации абразивных частиц в масле ($K_{\text{ч}}$) на интенсивность изнашивания покрытий их можно расположить в ряд при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом: $Y_1 = I: P \rightarrow t_m \rightarrow V_{\text{к}}$ и в ряд – при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива: $Y_2 = I: K_{\text{ч}} \rightarrow P \rightarrow t_m \rightarrow V_{\text{к}}$. Относительная скорость трения качения $V_{\text{к}}$ не

оказывает существенного влияния на интенсивность изнашивания поверхностей образцов. Определена рациональная область работы исследуемых трибосопряжений при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом: $P = 0,5-1,0$ кН и $t_M = 25-45$ °С; при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива: $P = 0,5-0,8$ кН, $t_M = 25-40$ °С, $K_{\text{ч}} = 0,05$ г/см³.

5. Установлено, что по сравнению со сталью 45, закаленной до твердости 52–54 HRC, наибольшей износостойкостью при трении качения с проскальзыванием обладают покрытия из порошка Fe-2%V (выше в 1,7–2,2 раза), при трении скольжения – покрытия из порошка ФБХ-6-2 (выше в 1,7–1,9 раза). Это позволило рекомендовать для пар трения, работающих при трении качения с проскальзыванием, использовать покрытия из порошка Fe-2%V, а при трении скольжения – покрытия из порошка ФБХ-6-2.

4.5. Остаточные напряжения в упрочненном поверхностном слое

При магнитно-электрическом упрочнении поверхностей деталей с поверхностным пластическим деформированием [52, 83, 175] в поверхностных слоях упрочняемого материала происходят пластические деформации и, как следствие, возникают остаточные напряжения.

Определим характер распределения этих напряжений, основываясь на теории упругости и пластичности.

Рассмотрим контактное давление на упрочняемой поверхности при деформировании двух цилиндрических тел, одно из которых – однородное, а второе – двухслойное (рисунок 4.29).

Обозначим: упругие постоянные однородного тела – E_1 , μ_1 ; упругие постоянные для основы детали и наплавленного слоя соответственно – E_0 , μ_0 и E_H , μ_H ; эквивалентные упругие постоянные двухслойного тела – $E_{\text{эКВ}}$ и $\mu_{\text{эКВ}}$.

Эквивалентные упругие постоянные определяются зависимостями:

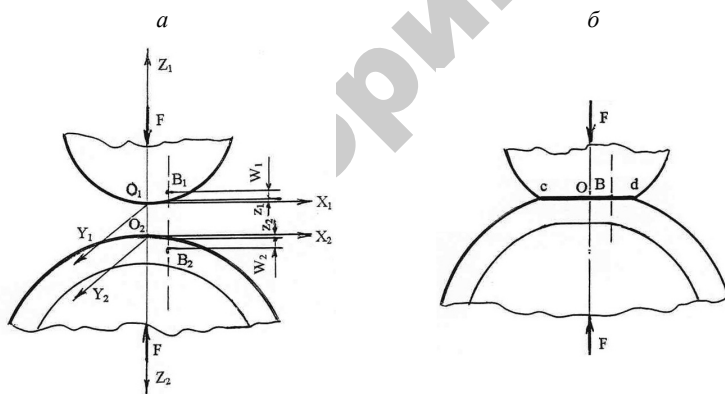
$$E_{\text{эКВ}} = \frac{E_0 E_H (h_2 + R_3)}{h_2 E_0 + R_3 E_H}; \quad \mu_{\text{эКВ}} = \frac{\mu_H + \mu_0}{2}.$$

Под действием силы F тела приводятся в соприкосновение, и точка O_1 совпадает с точкой O_2 . В результате деформации вместо точечного контакта образуется площадка контакта конечных размеров (рисунок 4.29 б). Допущения, принятые при решении задачи о контакте двух однородных тел [177], справедливы, когда одно из контактирующих тел является двухслойным:

1) в окрестности точки O поверхности до нагружения можно описать уравнениями 2-го порядка;

2) размеры площадки контакта малы, по сравнению с радиусами кривизны поверхностей контактирующих тел, поэтому в функциях разложений $z_1(x,y)$, $z_2(x,y)$, аналогично (1), достаточно оставить квадратичные члены;

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= A_1x^2 + B_1y^2 + 2C_1xy, \\ z_2 &= A_2x^2 + B_2y^2 + 2C_2xy. \end{aligned} \right\}; \quad (4.13)$$



W_1, W_2 – величины перемещений точек B_1 и B_2 после нагружения;
 z_1 и z_2 – координаты точек B_1 и B_2 при контакте двух тел

Рисунок 4.29 – Схемы цилиндрических тел до соприкосновения (а) и после приложения силы F (б)

3) напряженное и деформированное состояние практически не отличается от того, которое возникает в упругом полупространстве, так как рассматривается состояние на площадке контакта и вблизи нее.

После приложения силы F тела приводятся в соприкосновение, и точки O_1 и O_2 совпадут. Некоторая точка шарика B_1 совпадет с точкой детали B_2 (рисунок 4.29 *a*) и образует точку B на границе контакта (рисунок 4.29 *б*), в пределах размеров которого справедлива зависимость

$$z_1 + W_1 + z_2 + W_2 = \delta_k = \text{const}, \quad (4.14)$$

где W_1 и W_2 – величины перемещений точек B_1 и B_2 соответственно;
 δ_k – величина сближения тел при контакте.

Подставив (4.14) в формулу (4.13), получим

$$W_1 + W_2 = \delta_k - (A_1 + A_2)x^2 - (B_1 + B_2)y^2 - 2(C_1 + C_2)xy. \quad (4.15)$$

Квадратичная форма, стоящая в правой части (4.15), может быть преобразована (поворотом осей X и Y) в сумму квадратов. Поэтому зависимость (4.15) можно представить следующим образом:

$$W_1 + W_2 = \delta_k - Ax^2 - By^2. \quad (4.16)$$

Если нагрузка q распределена по площади эллипса пропорционально ординатам эллипсоида, то, согласно [183]:

$$W = \frac{1 - \mu_{\text{экв}}^2}{E_{\text{экв}}} \frac{p_0}{a} \left[abK - \frac{b}{a} Dx^2 - \frac{a}{b} (K - D)y^2 \right],$$

где a и b – соответственно большая и малая полуоси эллипса;

$$D = \frac{1}{e^2} (K - L);$$

$$K = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} d\varphi \quad - \quad \text{полный эллиптический интеграл}$$

I рода;

$$L = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} d\varphi \quad - \quad \text{полный эллиптический интеграл}$$

II рода;

$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$ – относительный эксцентриситет контурного эллипса области нагружения.

Давление в центре определяется по формуле $p_0 = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi ab}$.

Если полупространство однородное, то $E_n = E_0 = E$,

а $\mu_n = \mu_0 - \mu_{\text{ЭКВ}}$, и при эллипсоидальном распределении нагрузки вертикальное перемещение точек верхней границы полупространства будет равно

$$W = \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{p_0}{a} \left[abK - \frac{b}{a} Dx^2 - \frac{a}{b} (K - D)y^2 \right].$$

Подставив эти значения W в формулу (4.16), получим

$$\delta_k - (Ax^2 + By^2) = \eta \frac{p_0}{a} \left[abK - \frac{b}{a} Dx^2 - \frac{a}{b} (K - D)y^2 \right], \quad (4.17)$$

где $\eta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_{\text{ЭКВ}}^2}{E_{\text{ЭКВ}}}$.

Если приравнять соответственно свободные члены и коэффициенты при x^2 и y^2 в левой и правой частях равенства (4.17), получим

$$\delta_k = \eta p_0 bK; \quad A = \eta p_0 \frac{b}{a^2} D; \quad B = \eta p_0 \frac{1}{b} (K - D).$$

Величины A и B могут быть определены через значения главных кривизн поверхностей контактирующих тел [184]:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\chi}{4} - \frac{1}{4} \sqrt{(k_{11} - k_{12})^2 + (k_{21} - k_{22})^2 + 2(k_{11} - k_{12})(k_{21} - k_{22})\cos 2\omega}; \\ B &= \frac{\chi}{4} + \frac{1}{4} \sqrt{(k_{11} - k_{12})^2 + (k_{21} - k_{22})^2 + 2(k_{11} - k_{12})(k_{21} - k_{22})\cos 2\omega}, \end{aligned} \right\} (4.18)$$

где k – главная кривизна соприкасающихся тел в точке первоначального контакта (для однородного – k_{11} и k_{12} , для двухслойного – k_{21} и k_{22}); $\chi = k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22}$; ω – угол между $(k_{11}-k_{12})$ и $(k_{21}-k_{22})$.

Сумма A и B , согласно (4.18), будет равна

$$A + B = \frac{\chi}{2}.$$

Преобразовав δ_k , A и B с учетом p_0 , получим:

$$\left. \begin{aligned} a &= n_a \sqrt[3]{\frac{3}{2} \frac{\eta F}{\chi}}, \text{ где } n_a = \sqrt[3]{\frac{2}{\pi} \left(1 + \frac{B}{A}\right) D}; \\ b &= n_b \sqrt[3]{\frac{3}{2} \frac{\eta F}{\chi}}, \text{ где } n_b = \sqrt[3]{\frac{2}{\pi} \left(1 + \frac{A}{B}\right) (K - D) \sqrt{1 - e^2}}; \\ p_0 &= n_p \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{3}{2} \left(\frac{\chi}{\eta}\right)^2} F, \text{ где } n_p = \frac{1}{n_a n_b}; \\ \delta_k &= n_\delta \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{9}{4} \eta^2 \chi F^2}, n_\delta = K \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \frac{1}{1 + \frac{B}{A}} \frac{1}{D}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

Значения n_a , n_b , n_p и n_δ принимают по соотношению A/B [184].

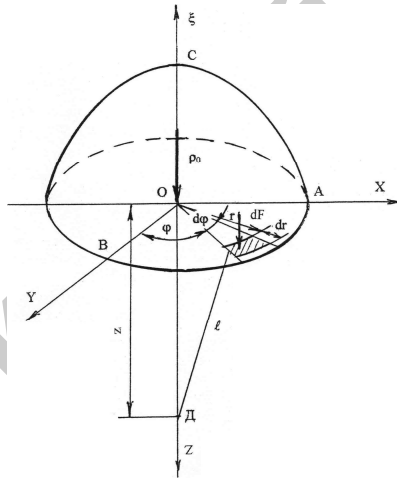
Контакт шарика и цилиндрической детали при возрастании силы происходит по площадке с формой эллипса, большая полуось которого расположена по образующей цилиндра (рисунок 4.30). Нормальное контактное давление распределяется по эллипсоидальному закону. Главная кривизна по осям эллипсоида будет соответственно $k_{11} = k_{12} = \frac{1}{R_1}$; $k_{21} = \frac{1}{R_2}$; $k_{22} = 0$.

Так как угол ω – произвольная величина, по формулам (4.18) получим

$$A = \frac{1}{2R_1}, B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \frac{A}{B} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (4.20)$$

Таким образом, при конкретных значениях радиусов шарика и детали по формулам (4.20) можно определить A , B и A/B , а по формулам (4.19) – размеры контактной площадки a , b и максимальное давление в ее центре p_0 .

Рассмотрим распределение напряжений в упрочненном поверхностном слое. Первоначально шарик и цилиндрическая поверхность детали имеют точечный контакт. После приложения к накатнику усилия поверхностный слой детали деформируется, и точечное касание переходит в соприкосновение по площадке, имеющей эллиптический контур. Пространственная эпюра давлений, передаваемых от одного тела к другому, ограничена поверхностью эллипсоида (рисунок 4.30):



p_0 – давление в центре эллипсоида; r и l – соответственно радиус и расстояние до элементарной площадки; dF – нагрузка на элементарную площадку

Рисунок 4.30. – Пространственная эпюра давления при контакте шарика с цилиндрической поверхностью

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{\xi^2}{c^2} = 1,$$

где $a = OA$, $b = OB$, $c = OC$.

Величина давления p в произвольной точке площадки контакта

$$p = p_0 \frac{\xi}{c},$$

где $\frac{\xi}{c} = \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}}$ и $p_0 = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi ab}$.

Перейдем от декартовых координат к полярным с заменой $x = r \sin \varphi$ и $y = r \cos \varphi$, тогда

$$p = p_0 \sqrt{1 - r^2 A^2},$$

где $A^2 = \frac{\sin^2 \varphi}{a^2} + \frac{\cos^2 \varphi}{b^2}$;

r – расстояние от оси Z до центра площадки контакта;

φ – текущее значение угла от оси Y до рассматриваемой точки.

Уравнение контурного эллипса в полярной системе координат имеет вид:

$$r_0^2 A^2 = 1,$$

где r_0 – значение полярного радиуса r на контуре площадки контакта.

Усилие деформирования, действующее по элементарной площадке:

$$dF = p r d\varphi dr = p_0 \sqrt{1 - r^2 A^2} r d\varphi dr. \quad (4.21)$$

Напряжения в процессе накатки. Учитывая, что размеры площадки контакта малы по сравнению с размерами шарика и цилиндрической детали, напряжения можно определять по зависимостям действия сосредоточенной силы на упругое полупространство [185]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{3}{2} \frac{F}{\pi} \frac{z^3}{\ell^5}; \quad \sigma_r = \frac{F}{2\pi} \left(\frac{1-2\mu}{\ell(\ell+z)} - \frac{3zr^2}{\ell^5} \right); \\ \sigma_\theta &= \frac{F}{2\pi} (1-2\mu) \left(\frac{z}{\ell^3} \frac{1}{\ell(\ell+z)} \right); \quad \tau_{zr} = \tau. \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

где $\ell = \sqrt{r^2 + z^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

Касательные напряжения $\tau_{\theta r} = \tau_{r\theta} = 0$, $\tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = 0$.

Перейдем от (4.22) к напряжениям, действующим по площадкам, перпендикулярным осям X , Y :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_r \sin^2 \varphi + \sigma_\theta \cos^2 \varphi; \\ \sigma_y &= \sigma_r \cos^2 \varphi + \sigma_\theta \sin^2 \varphi; \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \frac{1}{2} (\sigma_r - \sigma_\theta) \sin 2\varphi; \\ \tau_{zy} &= \tau_{yz} = \tau_{rz} \cos \varphi; \\ \tau_{zx} &= \tau_{xz} = \tau_{rz} \sin \varphi. \end{aligned} \right\}$$

Очевидно, что наиболее опасными будут точки, расположенные на оси Z . Определим напряжение σ_z от эллипсоидальной нагрузки.

Напряжение $d\sigma_z$ на элементарной площадке от нагрузки dF , согласно (4.21) и (4.22), можно представить:

$$d\sigma_z = -\frac{3}{2} \frac{dF}{\pi} \frac{z^3}{\ell^5} = -\frac{3}{2} \frac{p_0}{\pi} \sqrt{1-r^2 A^2} \frac{z^3}{(r^2+z^2)^{5/2}} r dr d\varphi \quad (4.23)$$

Чтобы получить значение σ_z , проинтегрируем зависимость (4.23) по углу φ от 0 до 2π и по радиусу r от 0 до r_0 :

$$\sigma_z = -\frac{3}{2} \frac{p_0}{\pi} z^3 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r_0} \sqrt{\frac{1-r^2 A^2}{(r^2+z^2)^{5/2}}} r dr = -\frac{6}{\pi} p_0 z^3 \int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^{r_0} \sqrt{\frac{1-r^2 A^2}{(r^2+z^2)^{5/2}}}.$$

После вычисления интегралов и преобразований [183] получим для точек, лежащих на оси Z :

$$\sigma_z = -p_0 \frac{ab}{\sqrt{a^2+z^2} \sqrt{b^2+z^2}}. \quad (4.24)$$

Аналогично определяются остальные напряжения для точек, лежащих на оси Z :

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_x &= -p_0 \frac{ab}{a^2 - b^2} \left(1 - \sqrt{\frac{b^2 + z^2}{a^2 + z^2}} + 2 \frac{z}{a} (L^* - K^*) - \right. \\
 &\quad \left. - 2\mu \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \sqrt{\frac{b^2 + z^2}{a^2 + z^2}} + \frac{z}{a} \left(\frac{a^2}{b^2} L^* - K^* \right) \right) \right); \\
 \sigma_y &= -p_0 \frac{ab}{a^2 - b^2} \left(1 + \frac{a^2 b^2 + z^2 (2a^2 - b^2)}{b^2 \sqrt{a^2 + z^2} \sqrt{b^2 + z^2}} - 2 \frac{z}{a} \left(\frac{a^2}{b^2} L^* - K^* \right) + \right. \\
 &\quad \left. + 2\mu \left(1 - \sqrt{\frac{b^2 + z^2}{a^2 + z^2}} + \frac{z}{a} (L^* - K^*) \right) \right); \\
 \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \tau_{zx} = 0.
 \end{aligned} \right\} (4.25)$$

$$\left. \begin{aligned}
 K^* = K(e, \psi) &= \int_0^\psi \sqrt{\frac{1}{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} d\varphi, \\
 L^* = L(e, \psi) &= \int_0^\psi \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} d\varphi.
 \end{aligned} \right\}, \quad (4.26)$$

где K^* , L^* – эллиптические интегралы первого и II рода соответственно, в которых

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{z}{a}, \quad e^2 = 1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2.$$

Таким образом, напряжения σ_z , σ_x и σ_y , действующие в точках на оси Z по площадкам, перпендикулярным к осям Z , X и Y , являются главными напряжениями.

Для удобства вычислений σ_z , σ_x и σ_y запишем:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= -p_0 \frac{1}{\sqrt{1+\alpha^2} \sqrt{1+\beta^2}^2}; \\ \sigma_x &= -p_0 \frac{\lambda}{1-\lambda^2} \left[1 - \sqrt{\frac{\lambda^2 + \alpha^2}{1+\alpha^2}} + 2\alpha(L^* - K^*) - \right. \\ &\quad \left. - 2\mu \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \sqrt{\frac{\lambda^2 + \alpha^2}{1+\alpha^2}} + \alpha \left(\frac{1}{\lambda^2} L^* - K^* \right) \right) \right]; \\ \sigma_y &= -p_0 \frac{\lambda}{1-\lambda^2} \left[-1 + \frac{1+\alpha^2 \left(\frac{2}{\lambda^2} - 1 \right)}{\sqrt{1+\alpha^2} \sqrt{\lambda^2 + \alpha^2}} - 2\alpha \left(\frac{1}{\lambda^2} L^* - K^* \right) + \right. \\ &\quad \left. + 2\mu \left(1 - \sqrt{\frac{\lambda^2 + \alpha^2}{1+\alpha^2}} + \alpha(L^* - K^*) \right) \right], \end{aligned} \right\} \quad (4.27)$$

где $\alpha = \frac{z}{a}$, $\beta = \frac{z}{b}$, $\lambda = \frac{b}{a}$.

После подсчета значений главных напряжений для конкретных условий их обозначим $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

Зная главные напряжения, можно определить, при каком давлении p_0 в опасной точке проявляются процессы пластической деформации. Для этого можно воспользоваться критериями Треска или Мизеса [177]. Согласно критерию Треска, текучесть наступает, когда удвоенные наибольшие касательные напряжения достигнут предела текучести σ_T , то есть $\sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T$.

Согласно критерию Мизеса, текучесть наступает, когда интенсивность напряжений достигнет предела текучести σ_T , то есть

$$\sigma_{\text{эКВ}}^* = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sigma_T.$$

Известно [177], что пластические деформации раньше всего появляются не на площадке контакта (точка O), а на некотором расстоянии z от начала координат. Следовательно, для определения значения p_0 , при котором в наплавленной цилиндрической детали появятся пластические деформации, необходимо построить кривые наибольших касательных напряжений или интенсивности напряжений по координате Z . По этим зависимостям можно будет установить их экстремальные значения и определить величину p_0 , при которой наступит текучесть. В опасной точке при любых значениях $\lambda = b/a$ наибольшим будет $\sigma_{\text{эКВ}}$ по критерию Треска, определяемое полуразностью $\sigma_z - \sigma_y$ [177]. При расчетах следует учитывать, что для любых значений λ эта полуразность для рассматриваемых материалов колеблется в небольших пределах $\sigma_z - \sigma_y = (0,62 - 0,65)p_0$.

При $z = 0$ напряжения в центре эллиптической площадки контакта, согласно (4.27), равны:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= -p_0; \\ \sigma_x &= -p_0 \frac{2\mu + \lambda}{1 + \lambda}; \\ \sigma_y &= -p_0 \frac{1 + 2\mu\lambda}{1 + \lambda}. \end{aligned} \right\}$$

Касательные напряжения на этих площадках равны нулю, поэтому σ_z , σ_x и σ_y – главные напряжения. По критерию Треска для центра эллиптической площадки $\sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_z - \sigma_x$, и при разных значениях λ оно колеблется в пределах $\sigma_z - \sigma_x = (0, 20 - 0, 40)p_0$.

При пластическом деформировании роликовым накатником после приложения силы к накатнику первоначальное линейное касание переходит в соприкосновение по узкой площадке, ширина которой $2b$. Для изучения напряжений рассмотрим случай, когда большая ось эллипса $2a$ неограниченно возрастает, эксцентриситет контурного эллипса $e=1$, а $K - D=1$. Тогда

$$b = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{\eta q}{\chi}},$$

где $q = F / \ell$ – линейная интенсивность напряжений; $\chi = (R_1 + R_2) / (R_1 - R_2)$.

Эллиптические интегралы при $\psi = \arctg \frac{z}{a} = \frac{\pi}{2}$, согласно (4.26), определяются:

$$K^* = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\cos \varphi} = \ln \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = \ln(\infty), \quad L^* = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi d\varphi = 1.$$

Тогда, согласно (4.24):

$$\sigma_z = -p_0 \frac{b}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{a^2}} \sqrt{b^2 + z^2}} = -p_0 \frac{b}{\sqrt{b^2 + z^2}}.$$

С учетом обозначений, принятых для (4.27):

$$\sigma_z = -p_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}}. \quad (4.28)$$

Зависимость (4.25) для σ_x преобразуется следующим образом:

$$\sigma_x = -p_0 \left[\frac{ab}{a^2 - b^2} - \frac{ab}{a^2 - b^2} \sqrt{\frac{b^2 + z^2}{a^2 + z^2}} + 2 \frac{zab}{a} \left(\frac{L^*}{a^2 - b^2} - \frac{K^*}{a^2 - b^2} \right) - \right. \\ \left. - 2\mu \left(\frac{ab}{a^2 - b^2} - \frac{ab}{a^2 - b^2} \frac{a^2}{b^2} \sqrt{\frac{b^2 + z^2}{a^2 + z^2}} + \frac{zab}{a} \left(\frac{a^2 L^*}{b^2(a^2 - b^2)} - \frac{K^*}{a^2 - b^2} \right) \right) \right].$$

Так как при $\alpha \rightarrow \infty$ и $e=1$, интеграл K^* обращается в логарифмическую бесконечность, а $L^*=1$, то слагаемые $\frac{K^*}{a^2 - b^2}$, $\frac{L^*}{a^2 - b^2}$ обращаются нуль и $\frac{a^2}{b^2} \frac{L^*}{(a^2 - b^2)} = \frac{L^*}{b^2 \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)} = \frac{1}{b^2}$.

Следовательно, зависимость σ_x можно представить так:

$$\sigma_x = -p_0 \left[\frac{b}{a - \frac{b^2}{a}} - \frac{b}{a - \frac{b^2}{a}} \sqrt{\frac{b^2 + z^2}{a^2 + z^2}} - 2\mu \left(\frac{b}{a - \frac{b^2}{a}} - \frac{b}{1 - \frac{b^2}{a^2}} \frac{1}{b} \sqrt{\frac{b^2 + z^2}{1 + \frac{z^2}{a^2}}} + zb \frac{1}{b^2} \right) \right],$$

$$\text{при } \alpha = \infty, \sigma_x = -2\mu p_0 \left(\sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}} - \frac{z}{b} \right).$$

С учетом обозначений, принятых для (4.27):

$$\sigma_x = -2\mu p_0 \left(\sqrt{1 + \beta^2} - \beta \right). \quad (4.29)$$

Аналогично преобразуется зависимость (4.25):

$$\sigma_y = -p_0 \left(\frac{1 + 2\beta^2}{\sqrt{1 + \beta^2}} - 2\beta \right). \quad (4.30)$$

Формулы (4.28)–(4.30) определяют нормальные напряжения на площадках, перпендикулярных осям Y и X , для точек, лежащих на

оси Z. Касательные напряжения на этих площадках равны нулю. Следовательно, напряжения σ_z , σ_x и σ_y являются главными напряжениями. Формулы (4.28)–(4.30) показывают, что все напряжения отрицательны при любом значении β , а наибольшее по абсолютной величине – σ_z . Следовательно, при всех значениях β главными являются напряжения $\sigma_3 = \sigma_z$. Две другие составляющие σ_x и σ_y по абсолютной величине могут меняться местами в зависимости от значений β . При небольших значениях β напряжение σ_y больше по абсолютной величине, чем σ_x , а после некоторого значения β , наоборот $|\sigma_x| > |\sigma_y|$. В зависимости от величины они будут принимать значения σ_1 или σ_2 . При определении эквивалентных напряжений по критерию Треска этот факт необходимо учитывать, так как $\sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_1 - \sigma_3$. По критерию Мизеса при любых значениях β получим одинаковую зависимость для $\sigma_{\text{эКВ}}^*$.

Таким образом, изучение напряженного состояния в опасных точках показывает, что в процессе накатки наибольшие эквивалентные напряжения будут возникать не на поверхности контакта, а на некоторой глубине [177]. Этот вывод получен в предположении, что контактируют гладкие поверхности.

Однако наплавленный слой является шероховатым, имеет макронеровности, и пластическое деформирование выступов начинается при давлении меньшем, чем то, которое требуется для появления пластических деформаций в опасной точке упрочненной поверхности. При этом происходит смятие выступов, а заметные остаточные напряжения возникают только тогда, когда в верхних точках наплавленного слоя эквивалентные напряжения достигнут предела текучести, и пластические деформации распространятся на некоторую глубину. Тогда при снятии давления в упрочненной детали наблюдаются остаточные напряжения.

Рассмотрим область пластической деформации. Для определения значения давления p_0 , при котором появятся пластические деформации в опасной точке, воспользуемся критерием Треска.

Допустим, что $\sigma_1 = \sigma_y$.

Тогда, по критерию Треска:

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_y - \sigma_z = 2p_0 \left(\beta - \frac{\beta^2}{\sqrt{1+\beta^2}} \right). \quad (4.31)$$

Определим, при каком значении β эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{эКВ}}$ имеет наибольшую величину:

$$\frac{d\sigma_{\text{эКВ}}}{d\beta} = 2p_0 \left(1 - \frac{2\beta\sqrt{1+\beta^2} - \beta^3(1+\beta^2)^{-\frac{1}{2}}}{1+\beta^2} \right) = 0$$

$$\text{или } 1 + \beta^2 - 2\beta\sqrt{1+\beta^2} + \frac{\beta^3}{\sqrt{1+\beta^2}} = 0.$$

Решая это уравнение, получим $\beta=0,8$, при котором определим максимальное значение $\sigma_{\text{эКВ}}$, если $\sigma_1 = \sigma_y$:

$$\sigma_{\text{эКВ}(\text{max})} = 2p_0 \left(0,8 - \frac{0,8^2}{\sqrt{1+0,8^2}} \right) = 0,6005p_0.$$

Допустим, что $\sigma_1 = \sigma_x$. Тогда

$$\sigma'_{\text{эКВ}} = p_0 \left(-2\mu(\sqrt{1+\beta^2} - \beta) + \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}} \right). \quad (4.32)$$

Определим β , при котором $\sigma'_{\text{эКВ}}$ имеет максимальное значение:

$$\frac{d\sigma'_{\text{эКВ}}}{d\beta} = p_0 \left(-2\mu\beta(1+\beta^2)^{-\frac{1}{2}} + 2\mu + \frac{-\beta(1+\beta^2)^{-\frac{1}{2}}}{1+\beta^2} \right) = 0.$$

Умножая обе части этого уравнения на $(1+\beta^2)^{\frac{1}{2}}$, получим

$$2\mu(\sqrt{1+\beta^2} - \beta) - \frac{\beta}{1+\beta^2} = 0. \quad (4.33)$$

Уравнение (4.33) можно решить, заранее задавая конкретные значения коэффициента Пуассона μ . Для этого разобьем (4.33) на два уравнения:

$$y_1 = \frac{y}{2\mu} = \sqrt{1 + \beta^2} - \beta; \quad y_2 = \frac{\beta}{1 + \beta^2}.$$

Построим кривые $y_1 = f_1(\beta)$ и $y_2 = f_2(\beta)$ (рисунок 4.31), их пересечение даст решение уравнения (4.33).

Анализ зависимости $\sigma'_{\text{эКВ}} / p_0$ от величины коэффициента Пуассона μ показывает, что только при $\mu=0,21$ максимальное значение $\sigma'_{\text{эКВ}} = \sigma_x - \sigma_z$ достигает экстремального значения $\sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_y - \sigma_z$. Следовательно, при $0,21 < \mu < 0,5$

$$\sigma_{\text{эКВ}(\text{max})} > \sigma'_{\text{эКВ}(\text{max})}. \quad (4.34)$$

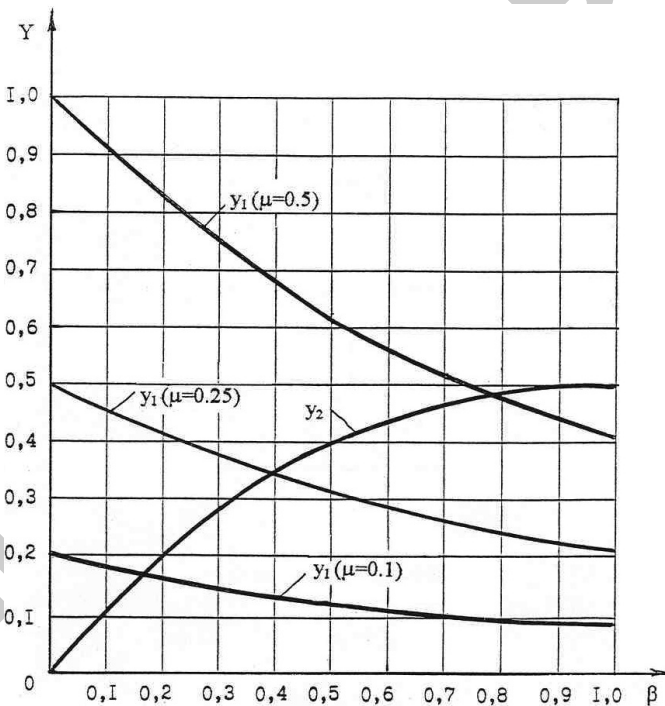


Рисунок 4.31. – Номограмма для определения безразмерной координаты β в зависимости от коэффициента Пуассона μ

Для металлов и сплавов μ не бывает меньше 0,22. Следовательно, при поверхностном деформировании упрочненных стальных деталей справедливо условие (4.34).

Рассмотрим эпюры изменения эквивалентных напряжений по оси Z (рисунок 4.32). Эквивалентные напряжения $\sigma'_{\text{эКВ}} = \sigma_x - \sigma_z$ определены при $\mu = 0,28$. На поверхности контакта при $z = 0$.

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_y - \sigma_z = 0; \quad \sigma'_{\text{эКВ}} = \sigma_x - \sigma_z = 0,44 p_0.$$

Как видно из рисунка 4.32, наибольшие эквивалентные напряжения возникают в точке на глубине $z=0,8b$ и достигают в ней предела текучести $\sigma_{\text{эКВ}(\text{max})} = 0,6005 p_0 = \sigma_T$.

Подставим значение b в формулу для определения p_0 :

$$p_0 = \frac{2}{\pi} \frac{F}{\ell} \sqrt{\frac{\pi \ell \chi}{4 \eta F}} = \frac{\sqrt{F \chi}}{\sqrt{\pi \ell \eta}}. \quad (4.35)$$

Следовательно, текучесть в опасной точке наступит при условии:

$$F = \frac{\sigma_{\text{эКВ}}^2 \pi \ell \eta}{0,36 \chi} = F_T. \quad (4.36)$$

При дальнейшем увеличении силы F , действующей на накатник, текучесть будет распространяться вверх и вниз по оси Z .

Определим площадь ω эпюры эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{эКВ}}$ от поверхности ($z = 0$) до центра упрочняемой детали ($z = R_2$):

$$\begin{aligned} \omega &= \int_0^{\beta_0} \sigma_{\text{эКВ}} d\beta = 2 p_0 \left[\int_0^{\beta_0} \beta d\beta - \int_0^{\beta_0} \beta^2 (1 + \beta^2)^{-\frac{1}{2}} \right] \\ &= p_0 \left[\beta_0^2 - \beta_0 \sqrt{1 + \beta_0^2} + \ln(\beta_0 + \sqrt{1 + \beta_0^2}) \right], \end{aligned}$$

где $\beta_0 = R_2 / b$.

Подставляя в ω значение p_0 , согласно (4.35), получим

$$\omega = \sqrt{\frac{F\chi}{\pi\ell\eta}} \left[\beta_0(\beta_0 - \sqrt{1+\beta_0^2}) + \ln(\beta_0 + \sqrt{1+\beta_0^2}) \right].$$

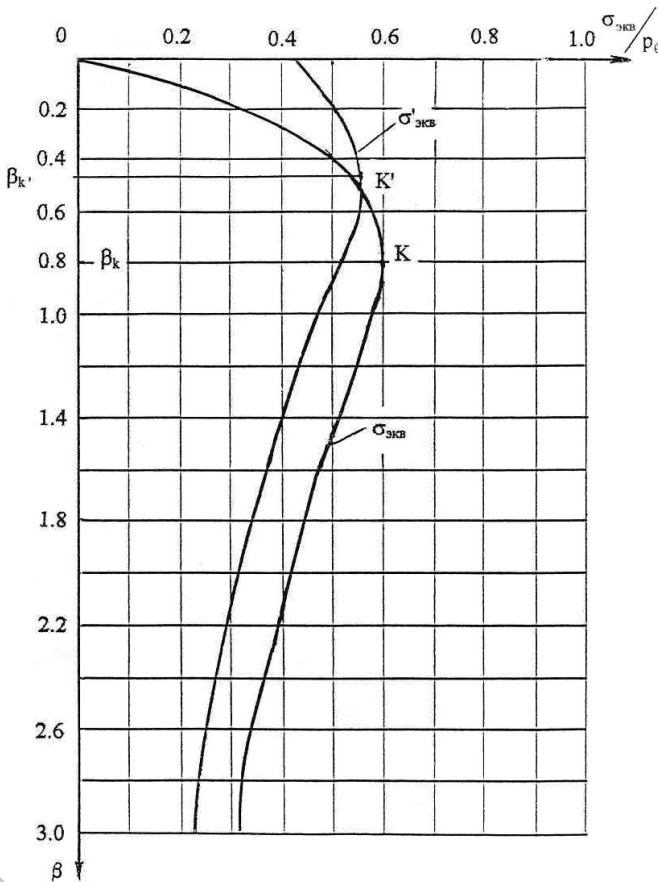


Рисунок 4.32 – Эпюры распределения эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ и $\sigma'_{\text{экв}}$ по глубине упрочняемого слоя

Для конкретной упрочняемой поверхности все величины, кроме F , являются постоянными. Поэтому площадь эпюры эквивалентных напряжений однозначно определяется величиной силы F . Рассматривая малые пластические деформации, полагаем, что при

их появлении соотношение между ω и F будет таким же, как при упругих деформациях по всей длине радиуса R_2 [52].

При увеличении силы F , прежде всего, появляются пластические деформации в точке K при $\beta = 0,8$ (рисунок 4.32). Сила, соответствующая появлению пластических деформаций, определяется формулой (4.36). При дальнейшем увеличении силы F пластические деформации могут появиться в точке K' , положение которой определяется из уравнения (4.33). Так, при $\mu=0,28$ получаем $\beta_{(K')} = 0,435$, подставляя которое в (4.32), определяем $\sigma'_{\text{экр(макс)}} = 0,55 p_0$.

Определим, во сколько раз сила F_T больше силы F'_T :

$$\frac{F_T}{F'_T} = \frac{(0,60)^2}{(0,55)^2} = 1,2.$$

Таким образом, видим, что при возрастании силы F текучесть раньше наступит в точке K и только потом при $\sigma'_{\text{экр(макс)}} = \sigma_T$ – в точке K' .

Следовательно, можно сделать вывод, что механизм и величину формируемых остаточных напряжений в системе «покрытие–основа» при МЭУ износостойких покрытий, в первом приближении, можно оценить, используя основные положения теорий термоупругости, многослойных пластин и механики сплошной среды [186].

Разработанный алгоритм математической модели расчета остаточных напряжений в системе «покрытие–основа» позволил с помощью пакета прикладных программ MATHCAD PLUS 6.0 и MATHEMATICA 2.2, работающих в среде WINDOWS, произвести численные исследования остаточных напряжений в покрытиях, сформированных МЭУ и поверхностным пластическим деформированием различных порошков (таблица 4.9).

При определении остаточных напряжений для каждого образца задавались теплофизические и упругие характеристики материалов покрытия и основы, геометрические параметры системы, диапазон температур, который обеспечивался режимом термомеханического упрочнения. Последний был оптимальным, за исключением силы разрядного тока, так как изменением его регулировали температуру в системе «покрытие–

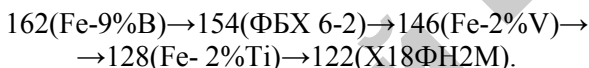
основа». Приняли, что покрытия наплавлились на поверхность диаметром 40 мм из стали 45 (ГОСТ 1050–88), подвергнутой нормализации, порошками, представленными в таблице 4.9.

Таблица 4.9. – Химический состав композиционных ферромагнитных порошков

Марка порошка	Содержание элементов, массовая доля, %										
	Fe	Ni	V	Ti	Si	B	C	Mn	Cr	Mo	Al
Fe-2%V	осн.	–	2,0	–	0,4	–	0,4	–	–	–	–
X18ФН2 М	осн.	2,0	–	–	2,2	–	2,6	1,0	17,6	1,2	–
ФБХ 6-2	осн.	–	–	–	1,7	1,6	4,5	2,7	34,0	–	–
Fe-2%Ti	осн.	–	–	2,0	0,4	–	0,4	–	–	–	–
Fe-9%B	осн.	–	–	–	8,2	9,0	–	–	–	–	8,2

Установлено, что в зависимости от условий термомеханического упрочнения величина остаточных напряжений в покрытии изменяется в пределах от 122 до 162 МПа, в основе – от –8 до –15 МПа. Характер их распределения не изменяется: в покрытии формируются растягивающие тангенциальные и сжимающие радиальные напряжения, в основе – сжимающие тангенциальные и радиальные. Увеличение теплонапряженности процесса термомеханического упрочнения за счет повышения разрядного тока приводит к росту термопластических деформаций в системе «покрытие–основа». Так, изменение разрядного тока от 100 до 150 А увеличивает остаточные напряжения в 1,5–1,8 раза. Например, для покрытия Fe-2%V при температуре поверхности основы 159 °С тангенциальные растягивающие напряжения на поверхности покрытия равны 146 МПа, при 200 °С – 263 МПа, т. е. напряжения увеличиваются. При тех же условиях тангенциальные сжимающие напряжения на поверхности основы соответственно равны –11,5; –14,8 МПа.

Следовательно, с возрастанием температуры увлечение тангенциальных напряжений в основе аналогично увеличению их в покрытии. Такая закономерность характерна и для других исследуемых материалов порошка. Так, например, наименьшие остаточные напряжения в примененном температурном диапазоне температур имеют покрытия из порошка X18ФН2М, наибольшие – Fe-9%В. Численные исследования остаточных напряжений показали, что при температуре основы 150 °С, которую обеспечивает оптимальная сила разрядного тока, равная 100 А, в покрытиях формируются растягивающие остаточные напряжения, которые для покрытий из рассматриваемых порошков (см. таблицу 4.9) в порядке убывания их величины можно расположить в следующей последовательности:



По условию минимальных остаточных напряжений на границе раздела «покрытие–основа» наиболее благоприятным для эксплуатационных условий будет покрытие из порошка X18ФН2М, которое имеет наименьшие растягивающие остаточные напряжения в покрытии.

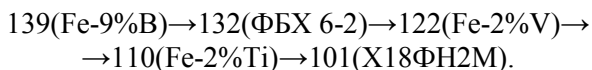
Результаты численных исследований остаточных напряжений в системе «покрытие–основа» показали, что величина остаточных напряжений в зависимости от химического состава порошка и режима термомеханического упрочнения покрытий может изменяться в широких пределах.

С целью проверки разработанного теоретического метода расчета остаточных напряжений в системе «покрытие–основа» проведены исследования по их экспериментальному определению, которые проводились рентгеноструктурным анализом, используя метод определения параметров линейно-напряженного состояния материала по смещению линий рентгенограммы [118, 181].

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН-3 в кобальтовом немонахроматизированном излучении. Съёмка профиля рентгеновской линии выполнялась в автоматиче-

ском режиме. Покрытия из порошков (таблица 4.9) на образцы из стали 45 наносили на оптимальном режиме.

Анализ полученных результатов показал, что в покрытиях формируются остаточные напряжения растяжения, которые для исследуемых порошков в порядке убывания их величины можно расположить в следующей последовательности:

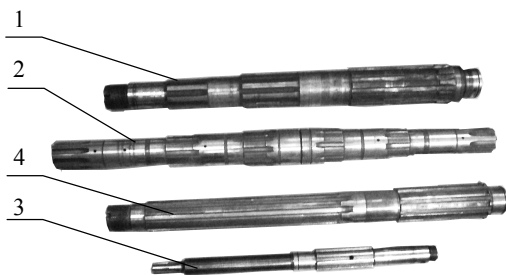


Видно, что остаточные напряжения, определенные в покрытиях, как расчетным путем, так и экспериментально, по значениям близки. При этом определенные экспериментально имеют меньшие значения. Расхождения значений напряжений находятся в пределах 14–18 %, что дает основание рекомендовать разработанную математическую модель для расчета остаточных напряжений в системе «покрытие–основа» при МЭУ.

Остаточные напряжения, определенные в системе «покрытие–основа», как расчетным путем, так и экспериментально, близки по значениям. Наибольшие эквивалентные напряжения при поверхностном деформировании возникают в упрочненном слое на глубине 0,5–0,8 полуширины контактной площадки. Предложена методика расчета остаточных напряжений после магнитно-электрического упрочнения с поверхностным пластическим деформированием деталей.

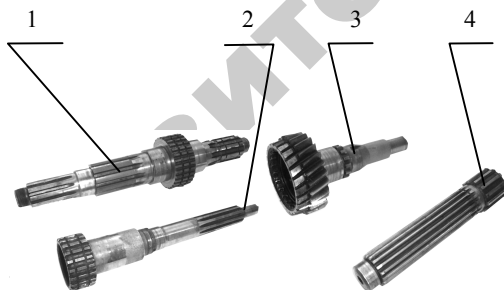
5. ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ

На основании полученных результатов исследований, описанных в предыдущих главах, разработаны технологический процесс нанесения защитных покрытий из ФМП с использованием электрических разрядов и энергии постоянных магнитов ТД 02100.00001Р и конструкторская документация на установку с магнитной системой на постоянных магнитах КД УНП 1-01.00.000.



1 – вал первичный (ведущий);
2 – вал грузовой; 3 – валик привода масляного насоса; 4 – вал промежуточный

Рисунок 5.1. – Фотография валов коробки перемены передач трактора К-701



1 – вал промежуточный, 2 – вал вторичный,
3 – вал первичный коробки перемены передач автомобиля КамАЗ-5320; 4 – вал первичный коробки перемены передач трактора «Беларус»

Рисунок 5.2. – Фотографии валов коробок перемены передач автомобиля КамАЗ-5320, трактора «Беларус»

Проведенные испытания установки УНП 1 в производственных условиях позволили сделать вывод о целесообразности ее применения для упрочнения и восстановления цилиндрических поверхностей деталей, работающих при больших нагрузках, например, валов (с полым или сплошным сечением) коробок перемены передач тракторов и автомобилей (рисунки 5.1 и 5.2).

5.1. Технологический процесс магнитно-электрического упрочнения

Типовой технологический процесс упрочнения и восстановления с применением МЭУ в постоянном магнитном поле композиционных ферромагнитных порошков на цилиндрические поверхности деталей (например, валов первичных коробов перемены передач тракторов К-701) состоит из следующих операций:

1. Очистка и мойка деталей от загрязнений в виде грязевых отложений, абразивных и металлических частиц.

Основными средствами для очистки являются: щелочные (щелочи, щелочные соли) и синтетические моющие средства (синтетические поверхностно-активные вещества, натриевые соли неорганических кислот), например МЛ-51, МЛ-52, Темп-100, Лабомид-101. Очистка производится в температурном интервале 70–100°С, время обработки – 4–6 ч, концентрация – 50 г/л.

2. Дефектация и сортировка деталей проводится с целью определения технического состояния деталей: деформации и износа поверхностей, цельности материала, изменения свойств и характеристик рабочих поверхностей, сохранности формы.

3. Подготовительные операции:

3.1. Предварительная механическая обработка поверхности.

Как правило, предварительная обработка поверхностей не требуется. Однако, если поступающие в ремонт валы из-за больших нагрузок, испытываемых во время эксплуатации, имеют деформацию, то для устранения этого дефекта предусмотрена операция правки детали на стенде типа МС-902. В случае значительных отклонений восстанавливаемой поверхности детали от цилиндричности выполняются шлифование на круглошлифовальном станке модели ЗВ423 для устранения отклонений геометрической формы, контроль геометрических размеров деталей, при необходимости – изоляция поверхностей, не подлежащих МЭУ.

3.2. Подготовка композиционного ферромагнитного порошка для наплавки. При этой операции выполняется выбор химического и получение требуемого фракционного составов порошка. В зависимости от химического состава композиционного порошка может изменяться его фракционный состав в пределах 100–320 мкм. Требуемый фракционный состав получается рассевом

на приборе типа 029 с ситами, имеющими ячейки 100; 125; 160; 200; 250; 320 мкм. Для обеспечения равномерной подачи и хорошей сыпучести ФМП перед наплавкой его просушивают при температуре 120–150° С.

3.3. Подготовка рабочей жидкости для наплавки. Для этого необходимо выполнить дегазацию, деионизацию, обеззараживание и диспергирование РЖ.

3.4. Подготовка установки для МЭУ и настройка оборудования для работы. Операция включает в себя следующую последовательность работ: 1) выбираются рациональные режимы МЭУ (сила технологического тока, магнитная индукция в рабочем зазоре, расход композиционного порошка и РЖ, зернистость ФМП); 2) выполняются операции по подготовке установки УНП 1 и необходимых приспособлений к работе (установка и закрепление детали в центрах станка, заправка порошком бункера-дозатора и рабочей жидкостью до требуемого уровня емкости, установка рабочего зазора и др.); 3) осуществляется предварительная отработка режима МЭУ.

4. Магнитно-электрическое упрочнение. Нанесение покрытий выполняется в следующей последовательности: 1) сообщение вращательного движения детали; 2) подача в рабочий зазор ФМП и РЖ; 4) включение технологического тока; 5) контроль технологических, энергетических и кинематических параметров в процессе МЭУ; 6) демагнитизация детали.

5. Механическая обработка покрытий после МЭУ. Детали с покрытием подвергаются шлифованию, которое обеспечивает точность обрабатываемой поверхности, а затем, при необходимости – финишной магнитно-абразивной обработке. При этом припуск на последнюю находится в пределах допуска шлифовальной операции. МАО повышает физико-механические и эксплуатационные свойства упрочненных и восстановленных деталей. Для механической обработки используются круглошлифовальные станки, а для финишной – установка для МАО с постоянными или электрическими магнитами модели ЭУ-6.

6. Контроль размеров деталей и качества покрытий. При восстановлении деталей проводится летучий, промежуточный и окончательный контроль. Летучий контроль выполняется выборочно, как на отдельных операциях технологического процесса, так

и на готовых деталях. Промежуточный контроль проводится пооперационно, по сгруппированным операциям.

Блок-схема технологического процесса упрочнения и восстановления цилиндрических поверхностей валов коробок перемены передач автотракторной техники представлена на рисунке 5.3.

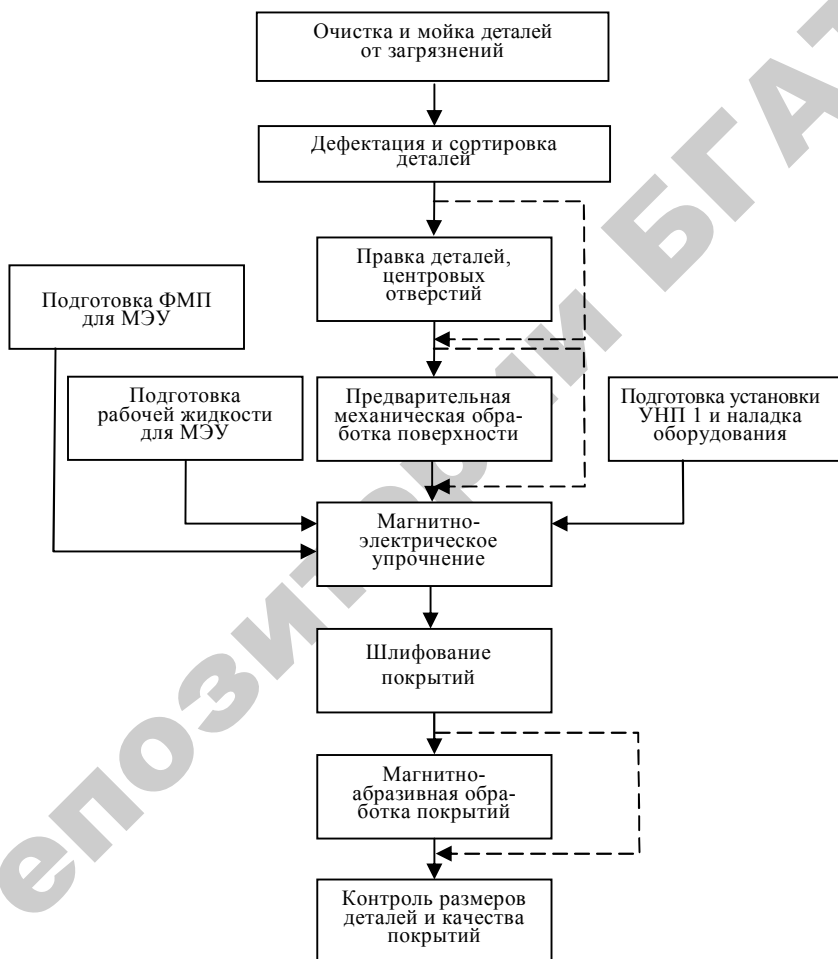


Рисунок 5.3. – Блок-схема типового технологического процесса упрочнения и восстановления цилиндрических поверхностей деталей автотракторной техники

По результатам производственной апробации установки модели УНП 1 рекомендованы рациональные режимы технологического процесса упрочнения и восстановления цилиндрических поверхностей деталей (таблица 5.1). Установлено, что в результате применения МЭУ повысились износостойкость упрочненных и восстановленных поверхностей деталей автотракторной техники в 1,65–1,90 раза.

Таблица 5.1. – Рациональные режимы технологического процесса упрочнения и восстановления цилиндрических поверхностей деталей

Технологический параметр метода обработки	Режим операции технологического процесса
Магнитно-электрическое упрочнение	
1. Плотность технологического тока i , А/мм ²	1,90
2. Величина магнитной индукции B_{zc} , Тл	0,70
3. Скорость продольной подачи S , мм/об	0,19
4. Окружная скорость заготовки V , м/с	0,05
5. Зернистость порошка	240–320
6. Величина рабочего зазора δ , мм	1,55
7. Расход композиционного порошка q , г/(с·мм ²)·10 ⁻³	2,95
8. Расход РЖ q , дм ³ /(с·мм ²)·10 ⁻³	0,4
9. Композиционный порошок	Fe-2%V
10. Смазочно-охлаждающая жидкость	5%-й раствор эмульсола Э2 в воде
Шлифование	
1. Окружная скорость круга V_k , м/с	30,0–40,0
2. Окружная скорость заготовки V_d , м/мин	35,0–40,0

Окончание таблицы 5.1

Технологический параметр метода обработки	Режим операции технологического процесса
3. Продольная минутная подача $S_{пр}$, мм/мин	3,0–6,0
4. Поперечная подача $S_{поп}$, мм/дв. ход	0,01–0,018
5. Смазочно-охлаждающая жидкость	5%-й раствор товарного эмульсола Э2 в воде
6. Характеристика шлифовального круга	1 300×40×127 63С 25–16 СМ 1 7 К 35 м/с ГОСТ Р 52781–2007
Магнитно-абразивная обработка	
1. Окружная скорость заготовки V , м/с	1,0
2. Скорость продольной подачи $S_{пр}$, мм/об	0,0025
3. Величина магнитной индукции B_z , Тл	0,40–0,80
4. Величина рабочего зазора δ , мм	2,0
5. Зернистость порошка	240–320
6. Степень заполнения порошком рабочей зоны K	1,0
7. Композиционный порошок	Fe-Ti
8. Рабочая жидкость (СОЖ)	5%-й раствор эмульсола Э2 в воде

5.2. Перспективы развития технологии магнитно-электрического упрочнения и восстановления цилиндрических поверхностей деталей

Решение проблемы повышения долговечности деталей авто-тракторной техники и сельскохозяйственных машин связано:

– с разработкой новых высокоэффективных технологий, которые характеризуются высокой производительностью, низкой энергоемко-

стью, безотходностью, экологической чистотой и позволяющих получить высокое качество изготавливаемых и восстанавливаемых деталей;

– с совершенствованием действующих технологических процессов восстановления и упрочнения изношенных поверхностей деталей, обеспечивающих 100%-ное восстановление ресурса и требуемые эксплуатационные свойства машин.

В связи с этим проведенные многолетние исследования показывают высокую эффективность развития процесса МЭУ за счет:

– разработки и создания принципиально новых технологических схем и устройств, реализующих процесс МЭУ;

– применения различных композиционных порошков в составе паст и регулирования технологическими параметрами МЭУ;

– создания комбинированных (МЭУ и МАО) и совмещенных (МЭУ и ППД) способов упрочнения и восстановления поверхностей деталей машин;

– совершенствования конструкций исполнительных и рабочих механизмов (органов) установки МЭУ;

– управления тепловыми процессами нагрева и плавления основного и наплавляемого материала;

– управления глубиной и степенью упрочнения поверхностного слоя деталей посредством регулирования электромагнитного и термомеханического потоков в рабочей зоне установки МЭУ;

– разработки методологии выбора операций МЭУ, позволяющей одновременно оптимизировать технологический процесс упрочнения и восстановления рабочих поверхностей детали и прогнозировать долговечность сопряженной детали и узла в целом;

– механизации и автоматизации процесса МЭУ в мелко- и среднесерийном производстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований суперпозиций импульсов электрических разрядов и магнитного поля в рабочем зазоре установлена взаимосвязь сил прижима устройств МЭУ цепочек-микроэлектродов к обрабатываемой поверхности с характеристиками внешних магнитных полей. 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° .

Установлена рациональная конструкция магнитной системы на основе постоянного магнита Е-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. Установлено, что по степени влияния на производительность Q процесса технологические режимы магнитно-электрического упрочнения можно расположить в ряд $Y_1 = Q: V \rightarrow S \rightarrow i \rightarrow q \rightarrow \delta$, а на относительную износостойкость ε формируемых покрытий – в ряд $Y_2 = \varepsilon: S \rightarrow i \rightarrow V \rightarrow q \rightarrow \delta$. Определены оптимальные технологические режимы МЭУ (плотность разрядного тока $i = 1,73\text{--}1,91$ А/мм²; величина рабочего зазора $\delta = 1,50\text{--}2,21$ мм; величина продольной подачи $S = 0,185\text{--}0,276$ мм/об; окружная скорость заготовки $V = 0,053\text{--}0,057$ м/с; расход ферромагнитного порошка $q = 2,86 \cdot 10^{-3}\text{--}2,95 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²), обеспечивающие стабильность процесса нанесения покрытий с производительностью в пределах 212,5–225 мг/мин и относительной износостойкостью покрытий в пределах 1,9–2,3. Показано, что использование постоянных магнитов вместо электрических при магнитно-электрическом упрочнении позволяет снизить объемную пористость и разнотолщинность покрытий соответственно на 40,0–

41,6 % и 33,3–59,3 % без существенного увеличения (на 2,0–3,4 %) сплошности.

Определена рациональная область работы исследуемых трибосопрежений при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом: $P = 0,5–1,0$ кН и $t_m = 25–45$ °С; при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива: $P = 0,5–0,8$ кН, $t_m = 25–40$ °С, $K_ч = 0,05$ г/см³.

На основании экспериментальных исследований износостойкости покрытий установлено, что по сравнению со сталью 45, закаленной до твердости 52–54 HRC, наибольшей износостойкостью при трении качения с проскальзыванием обладают покрытия из порошка Fe-2%V (выше в 1,7– 2,2 раза), при трении скольжения – покрытия из порошка ФБХ-6-2 (выше в 1,7–1,9 раза). Это позволило рекомендовать для пар трения, работающих при трении качения с проскальзыванием, использовать покрытия из порошка Fe-2%V, а при трении скольжения – покрытия из порошка ФБХ-6-2.

На основании полученных результатов исследований разработана и внедрена в производство технология упрочнения и восстановления типовых цилиндрических поверхностей деталей МЭУ в постоянном магнитном поле (с полым и сплошным сечением), работающих при больших нагрузках.

Результаты исследований могут быть использованы в ремонтных предприятиях Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь и Министерства промышленности Республики Беларусь при упрочнении и восстановлении и других деталей, в частности, рабочих органов почвообрабатывающих машин и деталей металлургического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Организация технического сервиса в агропромышленном комплексе : учеб. пособие / В. П. Миклуш, А. С. Сайганов. – Минск : ИВЦ Минфина, 2014. – 607 с.
2. Сайганов, А. С. Этапы развития вторичного рынка сельскохозяйственной техники в системе АПК и обоснование его емкости / А. С. Сайганов // Аграрная экономика. – 2013. – № 7. – С. 54–59.
3. 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.
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 : учеб. для вузов : в 2 ч. / Е. А. Пучин [и др.] ; под ред. Е. А. Пучина. – М. : УМЦ «Триада», 2006. – Ч. 1. – 348 с.
7. Обработка упрочненных поверхностей в машиностроении и ремонтном производстве : учеб. пособие / С. И. Богодухов [и др.]. – М. : Машиностроение, 2005. – 256 с.
8. Восстановление деталей машин : справочник / Ф. И. Пантелеенко [и др.] ; под ред. В. П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.
9. Черноиванов, В. И. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы) / В. И. Черноиванов, И. Г. Голубев. – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.
10. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 1998. – 583 с.
11. Рагунович, С. П. Задачи ремонтного производства, роль сварки и родственных технологий в их реализации / С. П. Рагунович, В. К. Шелег // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. / УП «Технопринт», Полоцкий гос. ун-т ; под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя. – Минск, 2001. – С. 13–16.

12. Надежность и ремонт машин / В. В. Курчаткин [и др.] ; под общ. ред. В. В. Курчаткина. – М. : Колос, 2000. – 776 с.

13. Пулька, Ч. В. Наплавка рабочих узлов почвообрабатывающей и уборочной сельскохозяйственной техники (обзор) / Ч. В. Пулька // Автоматическая сварка. – 2003. – № 8. – С. 36–41.

14. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве / В. И. Черноиванов [и др.] ; под общ. ред. В. И. Черноиванова. – М. ; Челябинск : ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2001. – 831 с.

15. Поляк, М. С. Технология упрочнения : в 2 т. / М. С. Поляк. – М. ; Л. В. М. : СКРИПТ, Машиностроени», 1995. – Т. 1: Технологические методы упрочнения. – 832 с.

16. Машиностроение : энциклопедия : в 40 т. / ред. совет : К. В. Фролов [и др.]. – М. : Машиностроение – 1, 2006. – Т. 3–4: Технология сварки, пайки и резки : Раздел 3: Технология производства машин / В. К. Лебедев [и др.] ; под ред. Б. Е. Патона. – 768 с.

17. Процессы плазменного нанесения покрытий : теория и практика / А. Ф. Ильющенко [и др.] ; под общ. ред. А. П. Достанко, П. А. Витязя. – Минск : Науч. центр иссл. политики и бизнеса «Армита-Маркетинг, Менеджмент», 1999. – 544 с.

18. Белоцерковский, М. А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М. А. Белоцерковский. – Минск : УП «Технопринт». – 2004. – 200 с.

19. Дорожкин, Н. Н. Восстановление деталей сельскохозяйственных машин / Н. Н. Дорожкин, В. Н. Гиммельфарб. – Минск : Ураджай, 1987. – 140 с.

20. Рекомендации по разработке технологических процессов восстановления изношенных деталей типа «вал» электроконтактной наплавкой (приваркой) стальных проволок / М. З. Нафиков [и др.]. – Уфа : Штайм, 2009. – 40 с.

21. Теория и практика восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники : монография / Г. Ф. Бетенья [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2006. – 468 с.

22. Хоккинс, М. Металлические и керамические покрытия. Получение, свойства и применение : пер. с англ. / М. Хоккинс, В. Валтасари, П. Сидки. – М. : Мир, 2000. – 518 с.

23. Восстановление и упрочнение деталей и инструментов концентрированными источниками тепла / Ф. Х. Бурумкулов [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2003. – № 9. – С. 35–39.

24. Упрочнение и ремонт ответственных деталей машин методом электроэрозионного легирования / В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковский // Тяжелое машиностроение. – 2005. – № 2. – С. 29–32.

25. Теория электрических и физико-химических методов обработки: учеб. пособие / В. П. Смоленцев [и др.]. – Воронеж : ГОВПО Воронеж. гос. техн. ун-т, 2007. – 376 с.

26. Аверьянова, И. О. Технология машиностроения. Высокоэнергетические и комбинированные методы обработки : учеб. пособие / И. О. Аверьянова, В. В. Клепиков. – М. : ФОРУМ, 2008. – 304 с.

27. Верхотуров, А. Д. Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров. – Владивосток : Дальнаука, 1992. – 180 с.

28. Коваленко, В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин, В. С. Черненко. – Киев : Техника, 1990. – 192 с.

29. Григорьянц, А. Г. Методы поверхностной лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. – М. : Высшая школа, 1987. – 191 с.

30. Евдокимов, В. Д. Технология упрочнения машиностроительных материалов : учеб. пособие-справочник / В. Д. Евдокимов [и др.] ; под ред. В. Д. Евдокимова. – Одесса ; Николаев : Изд-во НГТУ им. Петра Могилы, 2005. – 352 с.

31. Полевой, С. Н. Упрочнение машиностроительных материалов / С. Н. Полевой, В. Д. Евдокимов. – М. : Машиностроение, 1994. – 496 с.

32. Бернштейн, М. Л. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле / М. Л. Бернштейн, В. Н. Пустовойт. – М. : Машиностроение, 1987. – 256 с.

33. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справочник / Л. Г. Одинцов ; под общ. ред. Л. Г. Одинцова. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.

34. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А. Г. Бойцов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1991. – 144 с.

35. Уманский, В. Б. Новые способы упрочнения деталей машин : справ. пособие / В. Б. Уманский, Л. К. Маняк. – Донецк : Донбасс, 1990. – 144 с.

36. Электромеханическая обработка : технологические и физические основы, свойства, реализация : монография / В. П. Багмутов [и др.]. – Новосибирск : Наука, 2003. – 318 с.

37. Федоров, С. К. Повышение долговечности деталей сельскохозяйственной техники электромеханической обработкой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / С. К. Федоров ; ФГОУ ВПО Моск. гос. агр. ун-т. – М., 2009. – 32 с.

38. Захаров, И. Н. Исследование структуры поверхностного слоя среднеуглеродистой стали, упрочненной электромеханической обработкой / В. П. Багмутов, Н. Г. Дудкина, И. Н. Захаров // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – № 12. – С. 18–21.

39. Таранов, А. С. Повышение эффективности упрочнения поверхности валов при ремонте сельскохозяйственной техники поверхностным пластическим деформированием в переменном магнитном поле: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / А. С. Таранов ; ЧГАА. – Челябинск, 2010. – 44 с.

40. Пустовойт, С. В. Совершенствование дуговой сварки электромагнитными методами / С. В. Пустовойт, Г. И. Лесков // Автоматическая сварка. – 2000. – № 1. – С. 39–42.

41. Горохова, М. Н. Повышение эффективности комбинированного способа восстановления деталей ферромагнитными порошками: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / М. Н. Горохова ; ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии. – М., 2013. – 31 с.

42. Рыжов, Р. Н. Применение шестипольной электромагнитной системы для управления параметрами формирования швов при сварке неплавящимся электродом / Р. Н. Рыжов, В. Д. Кузнецов, А. В. Мальшев // Автоматическая сварка. – 2004. – № 2. – С. 45–49.

43. Сидоренко, С. М. Распределение индукции управляющего продольного магнитного поля при сварке тавровых соединений / С. М. Сидоренко, А. Д. Размышляев, В. Р. Маевский // Автоматическая сварка. – 2002. – № 9. – С. 48–50.

44. Расчет индуктора с магнитопроводом для нагрева плоских поверхностей / А. С. Письменный [и др.] // Автоматическая сварка. – 2000. – № 11. – С. 39–43.

45. Коротких, В. М. Управляемые энергоэффективные технологии плазменного напыления защитных покрытий сельскохозяйственного назначения / В. М. Коротких // Технологии и средства сельского хозяйства. – 2011. – № 8. – С. 83–87.

46. Поверхностное упрочнение стальных деталей сжатой электрической дугой / А. Е. Михеев [и др.] // Сварочное производство. – 2003. – № 2. – С. 24–27.

47. Юнусбаев, Н. М. Восстановление автотракторных деталей электроконтактной приваркой порошковых материалов в магнитном поле: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Н. М. Юнусбаев ; ФГОУ БашГАУ. – Уфа, 2006. – 6 с.

48. Электроэрозионные процессы на электродах и микроструктурно-фазовый состав легированного слоя / И. И. Сафронов [и др.] ; под ред. Н. Н. Дорожкина. – Кишинев : Штиница, 1999. – 591 с.

49. 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.

50. Ракомсин, А. П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / А. П. Ракомсин ; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск : Парадокс, 2000. – 201 с.

51. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск : ФТИ НАНБ, 1997. – 416 с.

52. Акулович, Л. М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л. М. Акулович. – Полоцк : ПГУ, 1999. – 240 с.

53. Кульгейко, М. П. Основы магнитно-электрических способов обработки материалов: крат. курс лекций по дисциплине «Технология и оборудование магнитно-электрических способов обработки материалов» для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» днев. и заоч. форм обучения / М. П. Кульгейко, Г. В. Петришин. – Гомель : Гомельский гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, 2010. – 39 с.

54. Совмещение процессов электромагнитного упрочнения и наплавки проволокой изношенных поверхностей деталей машин / М. Л. Хейфец [и др.] // Вестник ПГУ. – Сер. В.: Машиноведение и технология машиностроения. – 2006. – № 6. – С. 36–41.

55. Способ магнитоэлектрического легирования металлических поверхностей : пат. 2016718 Рос. Федер., МПК5 В 23 Н 9/00 / Г. С. Шулев, В. А. Хенсон, Т. А. Иванова ; заявитель Калинингр. техн. ин-т рыбн. пром-ти и хоз-ва. – № 4932651/08 ; заявл. 06.05.91 ; опубл. 30.07.94 // Открытия. Изобрет. – 1994. – № 14. – С. 45.

56. Устройство для магнитно-электрического нанесения покрытия из ферромагнитного порошка : пат. 8825 Респ. Беларусь, МПК В 23 Н 9/00, С 23 С 14/35 / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Люцко, Г. В. Петришин, В. Ф. Соболев, Е. Е. Лапицкий ; заявитель Гом. гос. ун-т им. П. О. Сухого. – № а 20040289 ; заявл. 01.04.04 ; опубл. 30.12.05 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 6 (53). – С. 69–70.

57. Гальго, В. И. Совершенствование процесса восстановления деталей сельскохозяйственных машин электромагнитной наплавкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / В. И. Гальго ; Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – Минск, 1992. – 24 с.

58. Устройство для нанесения покрытий электромагнитной наплавкой : пат. 1445 Респ. Беларусь, МПК В 23 К 9/04, В 22 D 19/10, В 23 Р 6/00 / Л. М. Акулович, Ж. А. Мрочек, Ю. Г. Орлов, С. Л. Кожуро, Л. М. Кожуро, М. Г. Краснер ; заявитель малое предпр. «БелИнтерм». – № 656 ; заявл. 30.09.93 ; опубл. 16.12.96 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1996. – № 4 (11). – С. 134–135.

59. 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.

60. Борисов, Б. П. Исследование и разработка процесса магнитоэлектрического упрочнения деталей машин в условиях фазового сдвига активирующих факторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Б. П. Борисов ; ФТИ АН БССР. – Минск, 1983. – 19 с.

61. Способ нанесения металлического покрытия из ферромагнитного порошка : пат. 11504 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 19/10, В 23 Р 6/00 / Н. Л. Грецкий, М. Л. Хейфец, Б. П. Чемисов, В. С. Точило, С. К. Толстиков ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 200611164 ; заявл. 23.11.06 ; опубл. 30.06.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1 (66). – С. 65.

62. Устройство для электромагнитной наплавки : пат. 2036 Респ. Беларусь, МПК В 23 К 9/04 / Л. М. Акулович, Ж. А. Мрочек, Ю. Г. Орлов, Л. М. Кожуро, С. Л. Кожуро, Н. Н. Филлипова, В. С. Шукин ; заявитель малое предпр. «БелИнтерм». – № 657 ; заявл. 30.09.93 ; опубл. 30.03.98 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1998. – № 1 (16). – С. 102.

63. Устройство для нанесения покрытий из порошков ферромагнитных материалов : а. с. 463531 СССР, МКИ В 23 Р 1/18,

В 22 F 7/00, С 23 С 5/00 / Ю. Г. Голиков, Б. П. Чемисов, Г. С. Шулев; Калинингр. техн. ин-т рыбн. пром-ти и хоз-ва – №1801274/22-1 ; заявл. 23.06.72 ; опубл. 15.03.75 // Открытия. Изобрет. – 1975. – № 10. – С. 27.

64. Устройство для упрочнения поверхностей деталей ферромагнитными порошками в магнитном поле : а. с. 1301601 СССР, МКИ В 23 Н 9/00 / Г. С. Шулев, В. А. Люцко, О. И. Палий; Гом. политехн. ин-т. – № 3943643/31-08 ; заявл. 08.08.85 ; опубл. 07.04.87 // Открытия. Изобрет. – 1987. – 13. – С. 54.

65. Устройство для магнитно-электрического нанесения покрытия : пат. 6254 Респ. Беларусь, МПК В 23 Н 9/00 / М. П. Кульгейко, В. А. Люцко, Д. В. Мельников, В. Ф. Соболев ; заявитель Гом. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – № а 19991006 ; заявл. 11.11.99 ; опубл. 30.06.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 2 (41). – С. 144–145.

66. Способ электроискрового легирования металлических изделий : а. с. 491461 СССР, МКИ В 23 Р 1/18 / В. И. Крикун, В. Л. Голодок, И. Ф. Марченко. – №1745460/25-8 ; заявл. 09.02.72 ; опубл. 15.11.75 // Открытия. Изобрет. – 1975. – № 42. – С. 29.

67. Устройство для электроэрозионного упрочнения поверхностей ферромагнитными порошками в магнитном поле : а. с. 1425007 СССР, МКИ В 23 Н 9/00 / В. И. Щербаков, Н. Н. Дорожкин, И. Ф. Марченко; Калинингр. техн. ин-т рыбн. пром-ти и хоз-ва – № 4031742/28-08 ; заявл. 04.03.86 ; опубл. 23.09.88 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 35. – С. 55.

68. Мрочек, Ж. А. Использование постоянных магнитов в устройствах электромагнитной наплавки / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, А. В. Миранович // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 75–84.

69. 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.

70. Акулович, Л. М. Самоорганизация процессов упрочняющей обработки / Л. М. Акулович, В. С. Ивашко, М. Л. Хейфец. – Минск : Народная книга, 2008. – 236 с.

71. Александров, Б. П. Исследование электроимпульсного способа нанесения твердых износостойких покрытий примени-

тельно к восстановлению автотракторных деталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Б. П. Александров ; ФТИ АН РСФСР. – Л. : ЛСХИ, 1976. – 22 с.

72. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан [и др.] ; под общ. ред. В. А. Волосатова. – Л. : Машиностроение, 1988. – 719 с.

73. Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 232 с.

74. Афанасенко, Е. В. Восстановление и упрочнение деталей машин комбинированным методом электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Е. В. Афанасенко ; БАТУ. – Минск, 1994. – 28 с.

75. Романова, Т. К. Управление структурой и свойствами покрытий из порошков быстрорежущих сталей при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники электромагнитной наплавкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Т. К. Романова ; БАТУ. – Минск, 1999. – 18 с.

76. Хейфец, М. Л. Формирование покрытий ферропорошками в электромагнитном поле / М. Л. Хейфец [и др.] // Вестник ПГУ. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. – 2007. – № 2. – С. 2–10.

77. Рабочий орган установки магнитоэлектрического упрочнения : пат. 322 Респ. Беларусь, МПК В 23 Н 9/00 / М. П. Кульгейко, И. В. Гринкевич, В. М. Кисленок; заявитель Гом. гос. ун-т им. П. О. Сухого. – № и 20010001 ; заявл. 01.03.2001 ; опубл. 30.09.2001 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2001. – № 3 (30). – С. 167.

78. Люцко, В. А. Технология и установки магнитоэлектрического упрочнения плоских поверхностей деталей машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.13 / В. А. Люцко ; ПГУ. – Новополоцк, 2004. – 24 с.

79. Пантелеенко, Ф. И. Электромагнитная наплавка плоских изношенных поверхностей деталей машин / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2004. – № 1. – С. 2–6.

80. Электротехнический справочник / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.] – 9-е изд., стер. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. – 518 с.

81. Бар, В. И. Электротехнические установки и их источники питания : учеб. пособие / В. И. Бар ; Тольятт. гос. ун-т. – Тольятти : 2002. – 105 с.

82. Шеховцов, В. П. Электрическое и электромеханическое оборудование : учебник / В. П. Шеховцов. – М. : Форум ; Инфра-М, 2004. – 407 с.

83. Акулович, Л. М. Магнитоэлектрическое упрочнение с обкаткой / Л. М. Акулович, М. А. Рощеня // Промышленность Белоруссии. – 1973. – № 7. – С. 71.

84. Акулович, Л. М. Сущность магнитоэлектрического упрочнения металлических поверхностей и современный уровень развития способа // в сб.: Общие вопросы технологии. Сер. 17, вып. 124. – М., 1981. – С. 42–57.

85. Акулович, Л. М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк : ПГУ, 1999. – 240 с.

86. Устройство для электромагнитной наплавки : пат. 2036С1 РБ, МКИ В23К9/04. / Л. М. Акулович, Ж. А. Мрочек, Ю. Г. Орлов, Л. М. Кожуро, С. Л. Кожуро, Н. Н. Филиппова, В. С. Щукин ; заявитель малое предпр. «БелИнтерм». – № 657 ; заявл. 30.09.93 ; опубл. 30.03.98 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1998. – № 1 (16). – С. 102.

87. 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.

88. Ящерицын, П. И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1988. – 272 с.

89. Акулович, Л. М. К вопросу о формировании упрочненного слоя при магнитоэлектрическом упрочнении / в сб.: Магнитно-абразивное полирование деталей. – Минск, 1976. – С. 120–124.

90. Акулович, Л. М. Особенности формирования поверхности покрытия при магнитоэлектрическом упрочнении / Л. М. Акулович [и др.] // в сб.: Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Мн. : Ураджай, 1991. – Вып. 34. – С. 176–181.

91. Кожуро, Л. М. Механизм переноса расплава материала порошка при электромагнитной наплавке / Л. М. Кожуро [и др.] // Известия АН Беларуси. – Сер. физ.-техн. наук. – 1996. – № 4. – С. 39–42.

92. Чемисов, Б. П. Исследование процесса генерации поверхностей деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.164 / АН БССР. – Минск, 1971. – 17 с.
93. Арцимович, Л. А. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях : учеб. пособие / Л. А. Арцимович, С. Ю. Лукъянов. – 2-е изд. – М. : Наука, 1978. – 224 с.
94. Физические процессы при электроэрозионной обработке металлов / под ред. А. П. Владзиевского // Труды ЭНИМС. – М. : ЭНИМС, 1967. – 89 с.
95. Райнхарт, Дж. С. Взрывная обработка металлов / Дж. С. Райнхарт, Дж. Пирсон. – М. : Мир, 1966. – 391 с.
96. Коул, Р. Подводные взрывы. – М. : Иностранная литература, 1950. – 495 с.
97. Барон, Ю. М. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса абразивной обработки деталей машин в магнитном поле: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.164 / ЛПИ. – Л. , 1969. – 22 с.
98. Барон, Ю. М. Технология абразивной обработки в магнитном поле / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение, 1975. – 128 с.
99. Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1980. – 512 с.
100. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – М. : Энергия, 1975. – 752 с.
101. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 928 с.
102. Коновалов, Е. Г. Основы электроферромагнитной обработки / Е. Г. Коновалов, Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1974. – 272 с.
103. Акулович, Л. М. Определение геометрических параметров полюсных наконечников в устройствах для магнитоэлектрического упрочнения / Л. М. Акулович, М. А. Рошня, Ф. Ю. Сакулевич // Известия АН БССР. – Сер. физ.-техн. наук. – 1975. – № 4. – С. 116–117.
104. Блюмберг, В. А. Магнитно-абразивное полирование поверхностей деталей машин / В. А. Блюмберг, Ю. М. Барон // Вестник машиностроения. – 1972. – № 3. – С. 86.
105. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1988. – Т. II: Теория поля. – 512 с.
106. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1988. – Т. VIII: Электродинамика сплошных сред. – 512 с.

107. Лесков, Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 335 с.

108. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – Л. : Энергия, 1981. – 536 с.

109. Ящерицын, П. И. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск : ФТИ, 1997. – 416 с.

110. Кожуро, Л. М. Тепловые процессы и температурные поля пластического деформирования наплавленной поверхности / Л. М. Кожуро [и др.] // Известия АН Беларуси. – Сер. физ.-техн. наук. – 1994. – № 2. – С. 120.

111. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М. : Иностранная литература, 1961. – 348 с.

112. Гельман, А. С. Основы сварки давлением / А. С. Гельман. – М. : Машиностроение, 1989. – 264 с.

113. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.

114. Телегин, А. С. Тепломассоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. – М. : Metallurgy, 1995. – 400 с.

115. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.

116. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1969. – 292 с.

117. 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.

118. Кожуро, Л. М. Обработка износостойких покрытий : учеб. пособие / Л. М. Кожуро [и др.] ; под общей ред. Ж. А. Мрочка. – Минск : Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.

119. Дилигенский, Н. В. Асимптотические расчеты тепловых режимов технологических процессов механической обработки металлов и сварки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14 / Ин-т техн. теплофизики АН УССР. – Киев, 1973. – 41 с.

120. Резников, А. Н. Теплообмен при резании и охлаждении инструментов / А. Н. Резников. – М. : Машгиз, 1963. – 200 с.

121. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.

122. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.

123. Акулович, Л. М. Формирование поверхностного слоя деталей машин при электромагнитной наплавке / Л. М. Акулович / в сб.: Технология ремонта машин и механизмов. – Киев : Знание, 1998. – С.48–49.

124. Юшин, А. А. Разработка критериев оценки сварочных свойств установок для дуговой сварки с управляемым каплепереносом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 / А. А. Юшин ; МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2012. – 16 с.

125. 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.

126. 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.

127. 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.

128. Invertec V270 (-S, -T pulse). Руководство по эксплуатации. – Cleveland, Ohio, 2005. – 23 с.

129. Методы исследования материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л. И. Тушинский [и др.]. – М. : Мир, 2004. – 384 с.

130. Ланкин, Ю. Н. Показатели стабильности процесса дуговой сварки плавящимся электродом / Ю. Н. Ланкин // Автоматическая сварка. – 2011. – № 1. – С. 7–15.

131. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 2003. – 479 с.

132. Смирнов, В. А. Прикладная статистика в пакете анализа MS Excel : учеб. пособие / В. А. Смирнов. – Пенза : ПГУАС, 2008. – 88 с.

133. 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.

134. Акулович, Л. М. Об устойчивости электромагнитной наплавки / Л. М. Акулович, А. В. Миранович, А. В. Линник // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : матер. Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апреля 2012 г. / Белорусско-российский ун-т. – Могилев, 2012. – С. 98–100.

135. Кингсеп, А. С. Основы физики. Курс общей физики : учебник : 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.

136. Яковлев, В. И. Классическая электродинамика : учеб. пособие / В. И. Яковлев. – Новосибирск : Новосиб. гос. ун-т, 2003. – Ч. 1: Электричество и магнетизм. – 267 с.

137. 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.

138. Галанин, М. П. Квазистационарные электромагнитные поля в неоднородных средах : математическое моделирование / М. П. Галанин, Ю. П. Попов. – М. : Наука. Физматлит, 1995. – 320 с.

139. Юдаев, Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача : учебник / Б. Н. Юдаев. – М. : Высшая школа, 1988. – 480 с.

140. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. – М. : Гардарики, 2001. – 317 с.

141. Борисов, Ю. М. Электротехника : учеб. для вузов / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.

142. 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.

143. Акулович, Л. М. Оптимизация геометрических параметров полюсных наконечников в устройствах электромагнитной наплавки / Л. М. Акулович, А. В. Миранович, В. В. Тризна // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск : Технопринт, 2001. – Вып. 17. – С. 153–156.

144. Постоянные магниты : справочник / А. Б. Альтман [и др.] ; под ред. Ю. М. Пятинина. – М. : Энергия, 1983. – 486 с.

145. Миткевич, А. В. Стабильность постоянных магнитов / А. В. Миткевич. – Л. : Энергия, 1971. – 128 с.

146. Миранович, А. В. Проектирование конструкции магнитной системы на постоянных магнитах устройств для обработки плоских поверхностей / А. В. Миранович // Современные методы проектирования машин : респ. межвед. сб. науч. тр. : в 7 т. – Минск : Технопринт, 2004. – Вып. 2. – Т. 5: Технология изготовления машин. – С. 127–132.

147. Келин, Н. А. Методы и устройства для контроля магнитных свойств постоянных магнитов / Н. А. Келин. – М. : Энергоиздат, 1984. – 79 с.

148. Коген-Далин, В. В. Расчет и испытание систем с постоянными магнитами / В. В. Коген-Далин. – М. : Энергия, 1977. – 247 с.

149. Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применение ; пер. с англ. / под ред. Ф. Херлаха. – М. : Мир, 1988. – 456 с.

150. Нестерин, В. А. Оборудование для импульсного намагничивания и контроля постоянных магнитов / В. А. Нестерин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 87 с.

151. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1988. – Т. IV: Гидродинамика. – 733 с.

152. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

153. Лавров, В. В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / В. В. Лавров, Н. А. Спирин. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.

154. Ящерицын, П. И. Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск : Вышэйшая школа, 1985. – 236 с.

155. Аверченков, В. И. Основы математического моделирования технических систем : учеб. пособие / В. И. Аверченков, В. П. Федоров, М. Л. Хейфец. – Брянск : БГТУ, 2004. – 271 с.

156. 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.

157. Кожуро, Л. М. Исследование триботехнических свойств покрытий, полученных наплавкой в электрическом и магнитном полях / Л. М. Кожуро, А. В. Миранович, А. Г. Зеленцов // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : сб. науч. тр. : в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т. – Новополоцк, 2007. – Т. 1. – С. 107–111.

158. Механические испытания металлов и их неразъемных соединений : курс лекций / Л. Р. Дудецкая [и др.]. – Минск. : МИПК при БГПА, 2000. – 100 с.

159. Ковба, Л. М. Рентгенофазовый анализ. Практическое руководство / Л. М. Ковба, В. И. Трунов. – М. : МГУ, 1976. – 232 с.

160. Система автоматизации рентгеновских дифрактометров серии «ДРОН». – Электрон. дан. и прогр. «X-Ray», версия 2.0. (756 Мб). – М. : МГУ, 1995. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): зв., цв.

161. The PDF-2 database. 1999 JCPDS-International Center for Diffraction Data. – Электрон. дан. и прогр. «Program PCPDFWIN» Version 2.02 (584 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): зв., цв.

162. Качанов, Н. Н. Рентгеноструктурный анализ. Практическое руководство / Н. Н. Качанов, Л. И. Миркин. – М. : Машгиз, 1980. – 214 с.

163. Горелик, С. С. Рентгеноструктурный и электронно-оптический анализ / С. С. Горелик, Ю. А. Скоков, Л. Н. Расторгуев. – М. : МИСИС, 1994. – 328 с.

164. Электронная спектроскопия / пер. с англ. ; под ред. И. В. Боровского. – М. : Мир, 1971. – 493 с.

165. Гаркунов, Д. Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин) : учебник / Д. Н. Гаркунов. – М. : Изд-во МСХА, 2002. – 632 с.

166. Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учеб. для техн. вузов / А. В. Чичинадзе [и др.] ; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – 2-е изд. – М. : Машиностроение, 2001. – 664 с.

167. Богданович, Л. Н. Трение и износ в машинах / Л. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Минск : Вышэйшая школа, 1999. – 374 с.

168. Сафонов, И. И. Формирование высоких триботехнических свойств изделий наплавкой / И. И. Сафонов. – Кишинев : Картя Молдовянска, 1989. – 286 с.

169. Когаев, В. П. Прочность и износостойкость деталей машин / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. – М. : Высшая школа, 1991. – 320 с.

170. Трение, изнашивание и смазка : справочник / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М. : Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 400 с.

171. Акулович, Л. М. Исследование влияния стабилизированных параметров электромагнитной наплавки на износостойкость покрытий / Л. М. Акулович, А. В. Миранович // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси ; редкол. : С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2014. – Кн. 2: Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – С. 17–29.

172. Икрамов, У. А. Расчетные методы оценки абразивного износа / У. А. Икрамов. – М. : Машиностроение, 1987. – 288 с.

173. Доценко, В. Л. Изнашивание твердых тел / В. Л. Доценко. – М. : ЦНИТИхимнефтемаш, 1990. – 192 с.

174. Технология ремонта машин : в 2 ч. / Е. А. Пучин [и др.] ; под ред. Е. А. Пучина. – М. : УМЦ «Триада», 2006. – Ч. II. – 284 с.

175. Мрочек, Ж. А. Остаточные напряжения / Ж. А. Мрочек [и др.]. – Минск: Технопринт, 2003. – 352 с.

176. Барвинок, В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В. А. Барвинок. – М. : Машиностроение, 1990. – 384 с.

177. Безухов, Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н. И. Безухов. – М. : Высшая школа, 1968. – 512 с.

178. Писаренко, Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – Киев : Наукова думка, 1976. – 416 с.

179. Комяк, Н. И. Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений / Н. И. Комяк, Ю. Т. Мясников. – Л. : Машиностроение, 1972. – 88 с.

180. Миркин, Л. И. Рентгеноструктурный анализ машиностроительных материалов : справочник / Л. И. Миркин. – М. : Машиностроение, 1979. – 134 с.

181. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – М. : МИСИС, 2002. – 360 с.

182. Кершенбаум, В. Я. Механическое формирование поверхностей трения / В. Я. Кершенбаум. – М. : Машиностроение, 1987. – 232 с.

183. Пономарев, С. Д. Расчеты на прочность в машиностроении : в 3 т / С. Д. Пономарев [и др.]. – М. : Машгиз, 1959. – Т. 2. – 974 с.

184. Раппопорт, Р. М. Задача Буссинеска для слоистого упругого полупространства / Р. М. Раппопорт. – Ленинград. политех. ин-та. – Л., 1948. – № 5. – С. 44–52.

185. Boussinesq, J. Équilibre d'élasticité d'un sol isotrope sans pesanteur, supportant 366 différents poids / C. R. Acad Sc. – Paris, 1978. – V. 86. – P. 1260–1263.

186. Теоретические основы процессов поверхностного пластического деформирования / Е. М. Макушок, Т. В. Калиновская, С. М. Красневский [и др.] ; под ред. В. И. Беляева. – Минск : Наука и техника, 1988. – 182 с.

Научное издание

Акулович Леонид Михайлович,
Миранович Алексей Валерьевич

**МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

Ответственный за выпуск *М. А. Прищепов*
Редакторы *В. М. Воронович, Т. В. Каркоцкая*
Корректор *В. М. Воронович*
Компьютерная верстка *Е. А. Хмельницкой*
Дизайн и оформление обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 26.12.2016 г. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 13,72. Уч.-изд. л. 10,72. Тираж 100 экз. Заказ 445.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.