

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Технология машиностроения»

**М. П. Кульгейко, Г. В. Петришин**

## **ОСНОВЫ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

**КРАТКИЙ КУРС ЛЕКЦИЙ**

**по дисциплине «Технология и оборудование  
магнитно-электрических способов обработки  
материалов» для студентов специальности  
1-36 01 01 «Технология машиностроения»  
дневной и заочной форм обучения**

**Гомель 2010**

УДК 621.791.92(075.8)  
ББК 30.61я73  
К90

*Рекомендовано научно-методическим советом  
машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 2 от 27.10.2009 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Материаловедение в машиностроении» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук, доц. *И. Н. Степанкин*

**Кульгейко, М. П.**

К90

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 : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 39 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Рассмотрены два наиболее распространенных способа магнитно-электрической обработки: магнитно-абразивная обработка, магнитно-электрическое упрочнение. Описание основных видов магнитно-электрической обработки сопровождается иллюстрационным материалом. Приведены подробные характеристики ферромагнитных материалов, применяемых при магнитно-электрических способах обработки.

Для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.791.92(075.8)  
ББК 30.61я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2010

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного машиностроительного производства характеризуется непрерывным повышением эксплуатационных характеристик материалов, из которых создаются детали машин. Возрастают требования к износостойкости, усталостной прочности, антикоррозионным свойствам при воздействии агрессивных сред, жаропрочности, ударной вязкости материалов. Одновременно повышаются требования к точности работы механизмов и машин, их надежности и быстродействию. При этом неперенным условием дальнейшего развития техники является постоянное совершенствование технологических процессов изготовления деталей машин. Так как только прогрессивные, высокопроизводительные процессы могут создать условия для широкого использования высококачественного и эффективного оборудования, внедрения комплексной механизации и автоматизации производства, применения малоотходной и безотходной технологии.

Общеизвестно, что существующие способы металлообработки, базирующиеся в основном на механическом воздействии инструмента на обрабатываемую поверхность, практически исчерпали свои реальные и потенциальные возможности. В процессе их осуществления возникают огромные усилия в технологических системах станок – приспособление – инструмент – заготовка, что приводит к значительным затратам силовой энергии, и, как следствие, к снижению производительности и качества обработки. Технические решения, направленные на устранение указанных недостатков, требуют значительных затрат средств и времени и не всегда экономически соизмеримы с получаемыми конечными результатами.

Поэтому развитие машиностроения и металлообработки в 3-м тысячелетии должно пойти как по пути интенсификации всех традиционных технологических процессов, так и создания новых прогрессивных процессов, которые сочетали бы в себе наивысшую производительность, наилучшее качество обработки с минимальными затратами и экологически чистым производством.

А это возможно обеспечить созданием высокоэффективных комбинированных технологических способов обработки, использующих сочетание различных активирующих факторов: силовых, электрических, тепловых, магнитных, химических и др.

Комплексное использование активирующих факторов реализовано в сравнительно недавно предложенных технологических способах обработки материалов – магнитно-электрических. Сущность маг-

нитно-электрических способов обработки заключается в том, что в процессе формообразования обрабатываемой поверхности одновременно используется несколько видов энергии: магнитного поля, электрического тока и механической. Такое комбинированное сочетание позволяет концентрировать на небольшом объеме обрабатываемой поверхности детали значительные величины энергии, что обеспечивает интенсификацию технологического процесса. Известно, что различные виды энергии могут взаимопереходить друг в друга, например, электрический ток в совокупности с магнитным полем может создавать механическое перемещение, а механическое перемещение детали в магнитном поле индуцирует электрический ток в ней, протекание же электрического тока, в свою очередь, создает магнитное поле и т. д. Комбинируя все эти виды энергии, с различными параметрами и характеристиками, можно создать большое количество новых технологических способов, позволяющих решать разные задачи. При этом возможно снимать с поверхности детали очень большие припуски независимо от твердости материала (контактная магнитно-электрическая обработка), получать поверхности высокого качества (магнитно-абразивная обработка, магнитно-электрическое шлифование), упрочнять рабочие поверхности деталей машин, придавая им высокие эксплуатационные свойства (магнитно-электрическое упрочнение). Возможно восстановление размеров изношенных поверхностей деталей машин с одновременным повышением долговечности их, интенсифицировать процессы механической обработки резанием (магнитно-электрическое точение, сверление, нарезание резьбы), а также пластического деформирования (волочения, прокатка) и др. Следовательно, вся совокупность магнитно-электрических способов представляет собой перспективную научно-техническую область технологии машиностроения.

Данное издание содержит описание наиболее распространенных, изученных и внедренных в производство магнитно-электрических способов обработки материалов деталей машин:

- магнитно-абразивной обработки (МАО);
- магнитно-электрического упрочнения (МЭУ).

Дисциплина «Технология и оборудование магнитно-электрических способов обработки материалов» является узкой специальной технической дисциплиной и предназначена для расширения познаний будущих инженеров-технологов в области электрофизических методов обработки.

Цель преподавания дисциплины – приобретение студентами комплекса специальных знаний и умений в области магнитно-электрических способов обработки материалов.

В процессе изучения дисциплины студенты должны усвоить основы магнитно-электрических способов обработки, их основные разновидности, знания которых необходимы при разработке новых высокопроизводительных и интенсификации традиционных технологических процессов обработки, упрочнения и восстановления различных поверхностей деталей машин.

## **Тема 1. МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА**

### **1.1. Особенности процесса магнитно-абразивной обработки**

Понятие «магнитно-абразивная обработка» объединяет большую совокупность способов абразивного резания, использующих магнитное поле непосредственно в зоне обработки. С помощью магнитно-абразивной обработки можно механизировать такие операции, как удаление заусенцев и скругление острых кромок, удаление окалины и тонких оксидных пленок, получение на поверхностях рельефных изображений, измельчение материалов, сверление хрупких материалов, упрочнение металлорежущих инструментов, полирование разных по форме поверхностей на деталях из материалов любой вязкости. Наведением магнитного поля в зоне резания предлагается интенсифицировать либо повысить качественные характеристики известных способов абразивной обработки: шлифования, суперфиниширования, виброабразивной обработки.

Особенность магнитно-абразивной обработки заключается в том, что абразивный инструмент формируется из абразивного порошка, обладающего магнитными свойствами. При этом роль упругой связки выполняет энергия магнитного поля. В процессе обработки имеется возможность регулирования жесткости абразивного инструмента путем изменения напряженности магнитного поля.

Обработка по данному методу представляет собой ориентированное и избирательное абразивное микрорезание и микровыглаживание. Сущность этого процесса состоит в том, что при сравнительно наибольших величинах микровыступов зерна порошка контактируют преимущественно с вершинами гребешков, являющихся концентраторами магнитных силовых линий. Каждый рабочий элемент (зерно)

в магнитном поле устанавливается наибольшей осью по направлению к обрабатываемой поверхности. При износе и затуплении вершин происходит переориентация элемента таким образом, что вновь образовавшаяся наибольшая ось направляется вдоль магнитных силовых линий. В результате обработка поверхности детали производится острыми кромками, т. е. имеет место процесс ориентированного абразивного резания.

Поскольку при МАО связкой абразивного инструмента служит энергия магнитного поля электромагнита, способная удерживать зерна порошка (инструмента) в подвижно связанном состоянии, а также координировать их относительно обрабатываемой поверхности, то появляется возможность существенно изменить условия обработки.

Особенностями МАО сложнопрофильных изделий типа тел вращения являются: непрерывный контакт порошка с обрабатываемой поверхностью детали, что дает возможность повысить точность ее геометрических размеров и формы и снижает циклические нагрузки на систему станок – приспособление – инструмент – деталь; отсутствие жесткого крепления абразивного зерна в связке, способствующее самопроизвольному нивелированию режущего инструмента относительно формы обрабатываемой поверхности, устраняющее вероятность появления в зоне резания критических давлений и температур и повышающие физико-химические показатели качества поверхностного слоя материала изделия; возможность управления жесткостью инструмента и регулирование за счет этого съема металла с формообразующей поверхности изделия; отсутствие трения связки о поверхность изделия, существенно снижающее температуру в зоне абразивной обработки; возможность резания наиболее острой кромкой зерна магнитно-абразивного порошка (не нужна периодическая заточка инструмента); осуществление размерной или безразмерной (декоративной) обработки, обеспечивающей за 10–120 с съем металла 0,02–0,05 мм на диаметр; снижение шероховатости  $R_a$  с 1,25–0,32 до 0,08–0,01 мкм или с 10,0–2,5 до 0,32–0,08 мкм; сохранение геометрических размеров в пределах допуска, оставленного для операции шлифования; исключение засаливания инструмента, что позволяет полировать мягкие и вязкие материалы типа меди, алюминия, титана [1].

Механизм резания при магнитно-абразивной обработке аналогичен механизму резания при обработке связанным абразивом. Зерна

ферромагнитного порошка в процессе обработки контактируют с заготовкой разными участками своей поверхности, отличающимися твердостью и геометрической формой, а значит, и разной способностью производить резание – диспергирование обрабатываемого материала с образованием стружки. Обработанная поверхность представляет собой совокупность рисок – следов резания и выглаженных участков. Направление рисок определяется скоростями рабочих движений заготовки и магнитного индуктора [2]. Исследования, проведенные Скворчевским Н.Я., показали, что 9–15 % объема царапин удалено диспергированием металла в стружку, а остальной объем металла вытеснен из царапин пластически в боковые навалы [2]. Сравнение результатов исследований при полировании меди абразивной лентой и магнитно-абразивным способом (зернистость порошка в обоих случаях была  $\Delta = 0,16/0,25$  мм) показало, что в первом случае стружкообразование протекает более интенсивно (стружка образуется больших размеров). Изменение размера стружек связано с изменением характера диспергирования: жесткое закрепление зерна в абразивной ленте и подвижное расположение зерна, допускающее перекатывание и переориентацию при магнитно-абразивной обработке. Как видно из *рис. 2.1*, стружки после магнитно-абразивной обработки представляют собой сегментообразные элементы или запятые, т. е. близки по форме к стружкам, образующимся после шлифования кругом. На поверхности стружек видны отдельно сильно деформированные участки, что свидетельствует о высоких пластических деформациях в зоне резания.

Таким образом, резание при магнитно-абразивной обработке носит преимущественно абразивный характер со значительно большей степенью пластической деформации металла, чем при других видах абразивной финишной обработки.

## **1.2. Магнитно-абразивная обработка наружных цилиндрических поверхностей**

При магнитно-абразивном полировании наружных цилиндрических поверхностей наиболее широкое практическое применение получила схема, предложенная Г.С. Шулевым (*рис. 1.1*). Согласно этой схеме, заготовку закрепляют в центрах или консольно в патроне, располагая ее между полюсами электромагнитного индуктора постоянного тока. Если длина обрабатываемой поверхности не превышает 80 мм, длину полюсов целесообразно выбирать равной длине заготовки. Ра-

бочими движениями в этом случае служат вращение заготовки (главное движение резания) и осцилляция (дополнительное движение), которую можно сообщать как заготовке, так и полюсам индуктора. Поскольку вся обрабатываемая поверхность одновременно подвергается полированию, то трудоемкость обработки здесь минимальна.

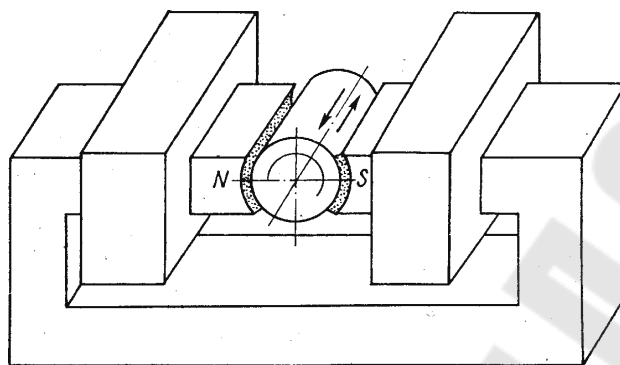


Рис. 1.1. Принципиальная схема магнитно-абразивной обработки тел вращения

Эту схему эффективно используют для обработки магнитопроводных заготовок с диаметрами обрабатываемой поверхности от 15 до 200 мм, а также тонкостенных немагнитных втулок, которые крепят на магнитопроводной оправке.

Ф.Ю. Сакулевич внес в описанную выше конструкцию некоторые изменения, добавив вспомогательное качательное движение детали, что позволило интенсифицировать процесс путем самозатачиваемости магнитно-абразивной массы [3].

Рассматриваемая схема обработки не исключает возможности обработки прерывистых поверхностей вращения, например, рассеченных кольцевыми или продольными пазами. Кромки пазов являются концентраторами магнитного потока. Около них зерна порошка испытывают повышенные силы магнитного притяжения и увеличенные силы трения, заставляющие их двигаться вместе с обрабатываемой поверхностью. В случае кольцевых пазов это обстоятельство нейтрализует положительную роль осциллирующего движения. Чтобы избежать снижения производительности и появления неоднородности обработки, Ю.М. Барон в своей работе [2] предложил расположить пазы на рабочих поверхностях полюсов (рис. 1.2, а).

Для обработки ферромагнитных заготовок с диаметрами  $D < 200$  мм и большой длиной обрабатываемой поверхности предлагается схема, приведенная на рис. 1.2, б [2].



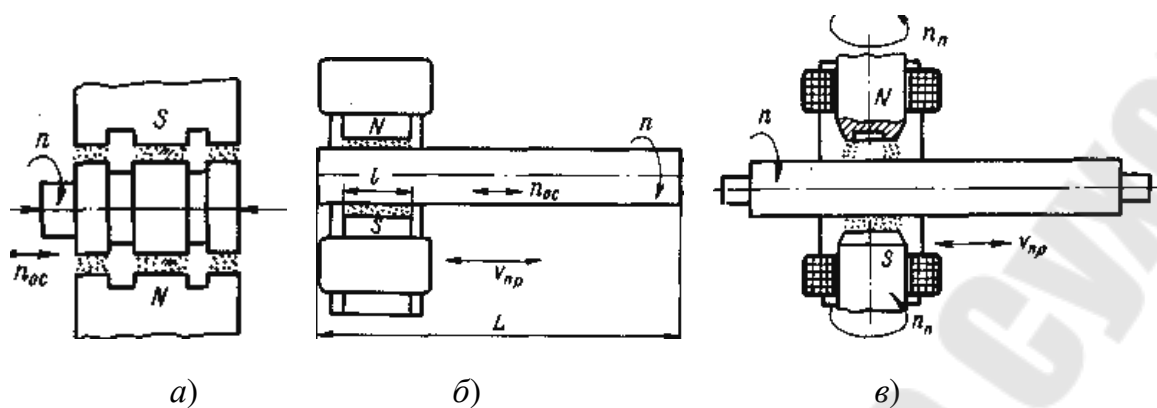


Рис. 1.2. Схемы обработки прерывистых (а) и длинномерных цилиндрических поверхностей с неподвижными (б) и вращающимися (в) полюсниками

Еще одна схема обработки длинных валов показана на рис. 1.2, в. Здесь полюсы электромагнита вращаются наряду с вращением заготовки и продольным движением индуктора. Исследования, выполненные Т.П. Тодоровым, показали, что наилучшие результаты обработки достигаются, если оси вращающихся полюсов смещены относительно оси заготовки с учетом направления ее вращения  $n$  [2].

При обработке ферромагнитных заготовок большого диаметра используются схемы с одно- и двусторонним расположением П-образных магнитных индукторов (рис. 1.3, а). Размеры катушек, потребляемая энергия и надежность удержания порошка в рабочих зазорах здесь не зависят от диаметра заготовки. Более универсальной является схема МАО с использованием индуктора на постоянных магнитах (рис. 1.3, б). Схема эффективна независимо от магнитных свойств и размеров заготовки.

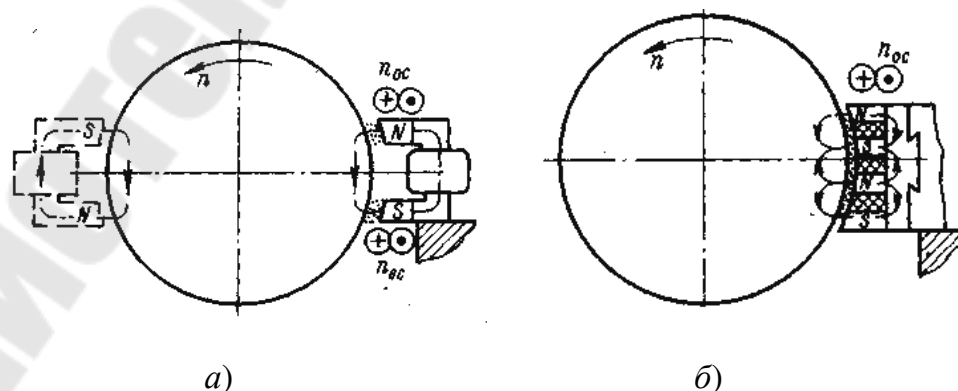


Рис. 1.3. Схемы обработки цилиндров большого диаметра индукторами электромагнитными (а) и на постоянных магнитах (б)

### 1.3. Магнитно-абразивная обработка отверстий

При магнитно-абразивном полировании затруднены размещение полюсов электромагнитных индукторов в отверстиях и создание там сильных магнитных полей.

Анализ известных изобретений позволяет выделить следующие направления решения этой задачи [2]–[4]:

- 1) вращение магнитно-абразивного порошка внутри отверстий навесным извне магнитным полем;
- 2) применение постоянных магнитов для прижима абразивных брусков к поверхности отверстия;
- 3) введение обоих полюсов электромагнита в отверстие;
- 4) введение одного из полюсов электромагнита в отверстие;
- 5) применение индукторов на постоянных магнитах;
- 6) прокачивание через отверстие магнитно-абразивного порошка (сжатым воздухом) или его суспензии с наложением извне магнитного поля.

На *рис. 1.4, а*, показана схема обработки тонкостенных втулок или труб, вращающихся между полюсами электромагнита [2]. Введение обоих полюсов электромагнита в обрабатываемое отверстие предполагает возможность обработки отверстий в деталях любой конфигурации. При этом разноименные полюсы могут быть размещены на индукторе радиально (*рис. 1.4, б*) или продольно (*рис. 1.4, в*). В обоих случаях диаметр отверстия должен быть достаточно велик, чтобы там разместился индуктор с катушками, обеспечивающими необходимую МДС. Введение внутрь отверстия только полюсов электромагнита позволяет обрабатывать отверстия меньших размеров (*рис. 1.4, г*). Наибольшая плотность магнитного потока и расположение порошка имеют место по линии раздела разноименных полюсов. Сильное поле в рабочем зазоре создать трудно, поскольку близкое расположение полюсов предполагает большие потоки утечки между ними внутри индуктора.

Применение на практике нашли схемы МАО, предполагающие размещение внутри отверстия только одного полюса электромагнита [2]. Полюсы противоположного знака располагают снаружи заготовки (см. *рис. 1.4, д, е*). Если материал заготовки немагнитный, то порошок надежнее удерживается в рабочих зазорах, но из-за большого магнитного сопротивления между полюсами трудно создавать высокие значения магнитной индукции в рабочих зазорах при большой толщине стенки втулки. Для ферромагнитных втулок легче создать большие индукции, но сложнее удерживать порошок в рабочих зазорах из-за ма-

лых градиентов индукции на тангенциальных границах зазоров. Для лучшего удерживания порошка внутренний полюс делают срезанным, а на его рабочей поверхности предусматривают дополнительные концентраторы потока.

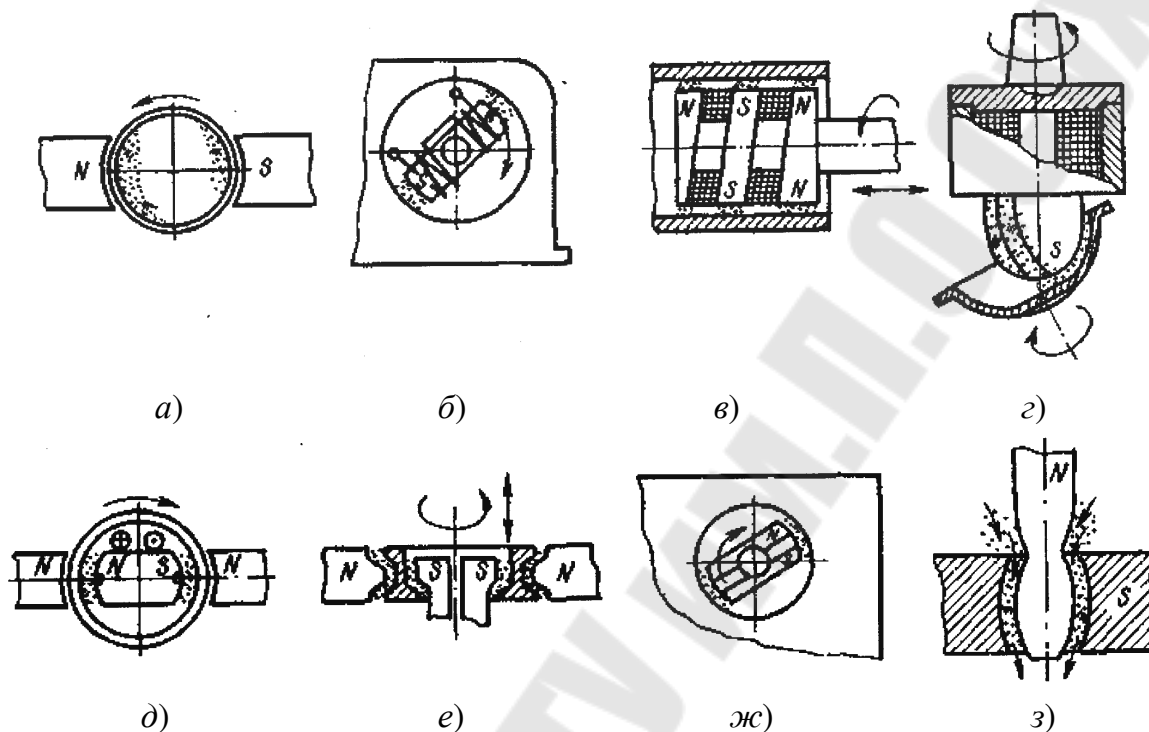


Рис. 1.4. Схемы магнитно-абразивной обработки отверстий

Схема (рис. 1.4, e) представляет возможность одновременной обработки наружных и внутренних фасонных поверхностей колец текстильных колец. Для возможности введения внутреннего полюса в фасонное отверстие полюс выполнен раздвижным.

Технологические возможности в области МАО отверстий расширяются с применением индукторов на постоянных магнитах (рис. 1.4, ж) [2]. Обработка такими индукторами не требует модернизации существующего оборудования.

Обработка фасонных отверстий может осуществляться путем прокачивания через такое отверстие ферромагнитной абразивной среды с наложением извне магнитного поля (рис. 1.4, з) [2].

П.И. Ящерицын, Л.Е. Сергеев, М.И. Сидоренко предлагают при полировании длинномерных отверстий использовать индуктор на постоянных магнитах (рис. 1.5).

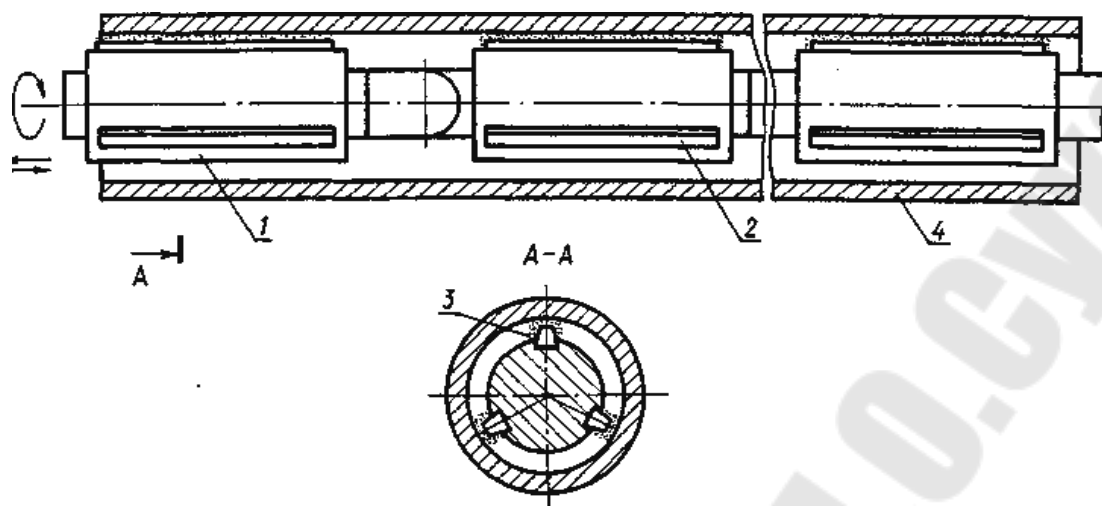


Рис. 1.5. Конструкция индуктора на постоянных магнитах с их параллельным расположением: 1 – каркас из немагнитного материала; 2 – постоянные магниты; 3 – ферроабразивный порошок; 4 – обрабатываемая деталь

Описанные выше конструкции устройств по обработке отверстий применимы для отверстий небольшой протяженности. В схеме, приведенной на рис. 1.5, в отличие от схем, описанных ранее, постоянные магниты расположены параллельно оси отверстия. Таким образом достигается компактность магнитной системы и становится возможной обработка глубоких отверстий. Цикл отдельных работ П.И. Ящерицына и других посвящен оптимизации режимов магнитно-абразивной обработки отверстий [1], [5].

Способ финишной магнитно-абразивной обработки внутренних поверхностей деталей из немагнитных материалов предложили Шимура Такео и Ямагучи Хитоми (Япония). Суть метода заключается в использовании постоянного магнитного поля, образованного магнитами, расположенными на наружной поверхности обрабатываемой детали. В качестве рабочего тела используется смесь железных гранул и с магнитным абразивом. Авторы в качестве примера привели результаты обработки трубы из нержавеющей стали.

## 1.4. Магнитно-абразивная обработка плоских и фасонных поверхностей

Обработка тонколистовых и объемных заготовок из ферромагнитных и немагнитных материалов требует применения разных схем обработки. На *рис. 1.6, а–ж* приведены схемы, нашедшие практическое применение. В схемах на *рис. 1.6, а–г* использовано двустороннее размещение разноименных полюсов индуктора относительно заготовки. Это обстоятельство требует для их воспроизведения специального оборудования.

Разработанная под руководством В.Н. Везуба схема (*рис. 1.6, а*) предназначена для обработки немагнитных листов постоянного или переменного сечения [2]. Электромагнит 3 расположен с минимальным зазором под заготовкой 2, которая крепится на специальной раме и движется поступательно со скоростью  $V_{пр}$ . Над верхней обрабатываемой поверхностью с зазором  $\delta$  размещен магнитопровод 1, снабженный приводом вращения. При включенном электромагните поток  $\Phi$  пронизывает заготовку и прижимает к ее поверхности магнитно-абразивный порошок, вращающийся вместе с магнитопроводом 3. При полировании по такой схеме дюралюминиевых листов с переменной толщиной 6–10 мм в качестве порошка используют крошку отбеленного чугуна или стальные иглы. Уменьшение параметра шероховатости после проката с  $R_z = 10–40$  мкм до  $R_z = 2–3$  мкм достигается при десятикратном снижении трудоемкости по сравнению с полированием ручными пневмомашинками.

Схема, приведенная на *рис. 1.6, б*, предназначена для обработки штучных заготовок [2]. Вертикальные магнитопроводы 4 выполнены вращающимися. Заготовке 5, закрепленной на столе, сообщают качательное в горизонтальной плоскости движение, выполняющее роль подачи  $V_{пр}$ . Исследования Л.Н. Кравченко доказали успешность применения этой схемы для обработки сталей, стекла, кремния [9].

Схему, приведенную на *рис. 1.6, в*, применяют для зачистки омедненных печатных плат от оксидных пленок [2]. Барабаны 6 и 8, соединенные с приводом вращения, являются разноименными полюсами электромагнитного индуктора. На цилиндрическую поверхность барабанов наращивают щетку из магнитно-абразивного порошка, а заготовку 7 принудительно протягивают между вращающимися барабанами. Наибольшая плотность магнитного потока имеет место между близко расположенными образующими барабанов. Это помогает создавать на обрабатываемых плоскостях увеличенные нормальные силы резания, но одновременно препятствует движению порошка вслед за вращающимися барабанами. Для увеличения сцепления порошка с барабанами на их поверхности создают концентраторы магнитного потока (например, с по-

мощью продольных рифлений). Если заготовка из ферромагнитного материала, то магнитная индукция между барабанами увеличивается, и труднее создать условия для вращения порошка вместе с барабанами.

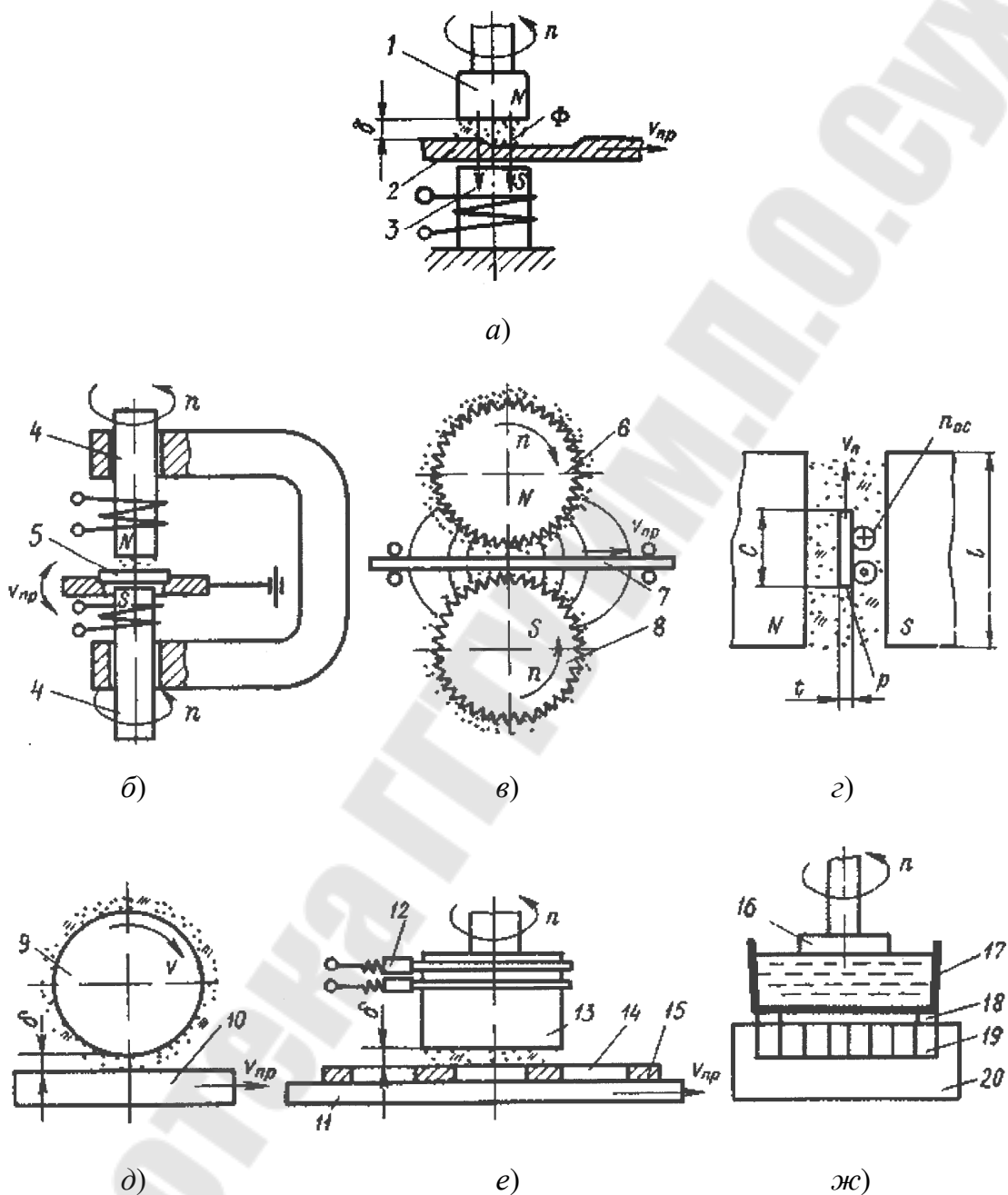


Рис. 1.6. Схемы магнитно-абразивной обработки плоскостей

Небольшие по ширине заготовки можно обрабатывать с применением схемы, приведенной на рис. 1.6, г [2]. Межполюсное пространство прямоугольной или кольцевой формы заполняют магнитно-абразивным порошком, а заготовке сообщают движение осцил-

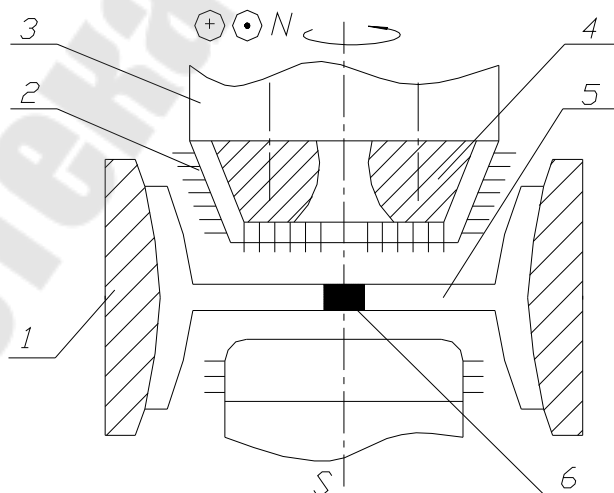
ляции  $n_{oc}$  и движение  $V_{II}$  вдоль рабочей зоны. При этом возможна одновременная обработка нескольких заготовок, следующих друг за другом.

Схемы, приведенные на *рис. 1.6, д, е*, предусматривают одностороннее расположение индуктора относительно заготовки. Это позволяет использовать для магнитно-абразивной обработки существующие металлорежущие станки (плоскошлифовальные, фрезерные).

Схема, приведенная на *рис. 1.6, е*, предназначена в основном для обработки ферромагнитных заготовок *14*, закрепленных на магнитопроводной плите *11*. Полюсы электромагнитного индуктора *13* в виде двух concentрических колец расположены на нижнем торце. Намагничивающая катушка встроена в корпус индуктора, питание ее осуществляется через подпружиненные щетки *12*. Магнитный поток, проходя через рабочие зазоры под каждым из полюсов, замыкается через материал ферромагнитной заготовки или через магнитопроводную плиту *11* при обработке намагнитных заготовок толщиной до 5–7 мм.

На *рис. 1.6, ж* представлена одна из схем МАО с применением магнитно-реологической жидкости для обработки оптических линз. Кювета *17* с жидкостью установлена над индуктором *20* с постоянными магнитами *19*, обращенными вверх одной полярностью. Линза *16* закреплена в шпинделе и прижата к поверхности жидкости с контролируемым усилием. Заданную напряженность поля в кювете устанавливают с помощью мерных подкладок *18*.

Для обработки плоских поверхностей фасонного профиля П.И. Ящерицын и другие предложили схему магнитно-абразивной обработки с использованием механических щеток (*рис. 1.7*).



*Рис. 1.7.* Схема МАО с применением механической щетки

Сущность предложенного метода заключается в использовании механических щеток. Благодаря тому, что площадь контакта волокон щетки с заготовкой минимальна, давление в рабочей зоне существенно повышается и съём металла увеличивается. Обработка сложнопрофильных поверхностей выполняется за одну технологическую операцию. Механическая щетка 2 (рис. 1.7) закрепляется на сердечнике 4, соединенным со шпинделем 3. В рабочий зазор между заготовкой 5 и волокнами щетки подается рабочая среда: ФАП и СОЖ. Заготовки Т-образной формы разделены немагнитной прокладкой 6 и закреплены с помощью упоров 1.

Обработка по такой схеме экономичнее обработки с использованием полюсных наконечников ввиду меньшего выброса ФАП и СОЖ в окружающую среду. Другое преимущество описанного способа – возможность декоративной обработки сложнопрофильных изделий с пазами и впадинами глубиной до 3–4 мм и выступами такой же высоты.

### **1.5. Магнитно-абразивная обработка фасонных поверхностей тел вращения**

Способ магнитно-абразивной обработки позволяет расширить существующие технологические возможности высококачественной обработки фасонных поверхностей. Здесь нет необходимости в изготовлении высокоточных фасонных абразивных инструментов, требующих периодической правки. Однако в каждом случае приходится по-своему приспособлять особенности процесса МАО к решению конкретной задачи.

Усилия ряда исследователей были направлены на решение с помощью МАО проблемы финишной обработки беговых колец прецизионных шарикоподшипников, на которых, кроме высоких требований к шероховатости ( $R_a = 0,02–0,08$  мкм) необходимо исправить погрешности формы окружности и обеспечить ее точность с допускаемыми отклонениями, измеряемыми в сотых долях микрометра.

Для МАО наружных беговых дорожек предлагались и были испытаны два варианта схемы обработки (рис. 1.8, а, б) [2], [6].



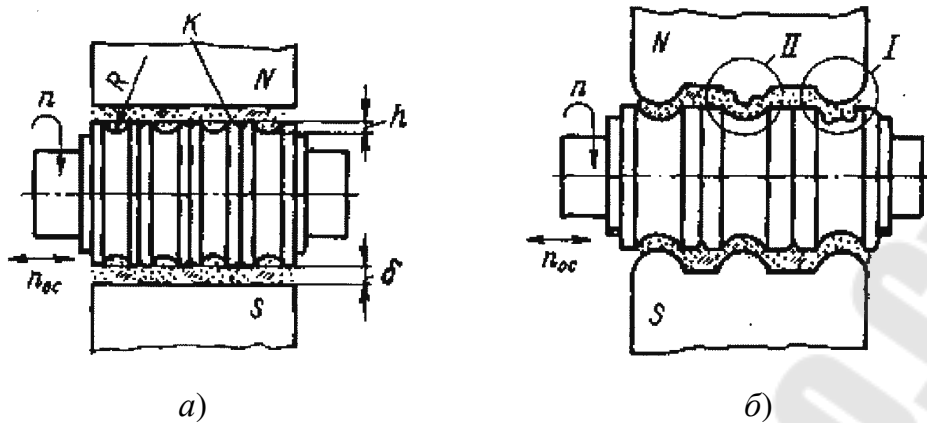


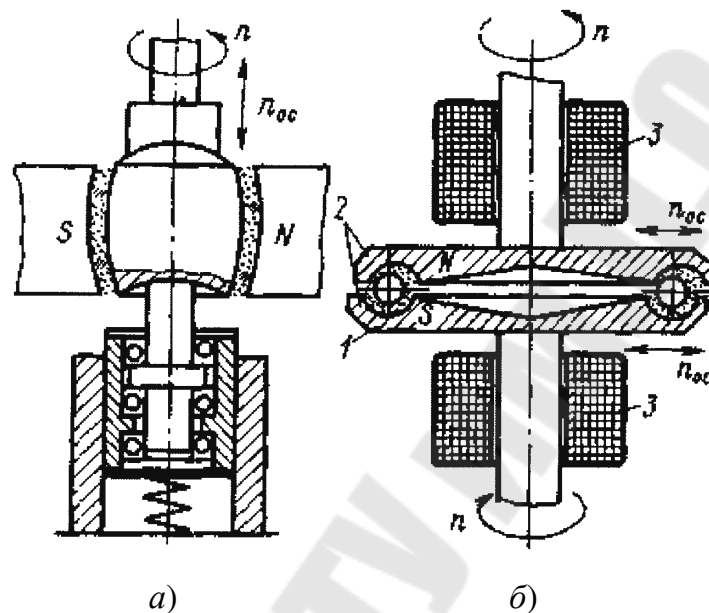
Рис. 1.8. Полирование желобов колец шарикоподшипников с цилиндрической (а) и фасонной (б) рабочими поверхностями полюсов

При использовании полюсов с цилиндрической рабочей поверхностью значительно упрощается их изготовление. Кроме того, одни и те же полюсы могут быть использованы для обработки нескольких типоразмеров колец. Однако применение такой схемы ограничивается глубиной профиля желоба  $h < 2,0$  мм. Разная высота  $\delta$  рабочего зазора предполагает концентрацию магнитного потока на выступающих участках колец и большую интенсивность съема металла на этих участках. Чем больше глубина  $h$  желоба, тем больше времени требуется для получения на нем заданного параметра шероховатости. Так, при исходном значении  $R_z = 6-7$  мкм для получения значения  $R_z = 2-3$  мкм на дне желоба основное время обработки составило: при  $h = 0,4$  мм – 15 с, при  $h = 0,9$  мм – 60 с, при  $h = 1,4$  мм – 90 с и при  $h = 1,8$  мм – 135 с. Более интенсивный съем выступающих участков сопровождается скруглением кромок  $k$  и некоторым увеличением радиуса  $R$  желоба в осевом сечении. Последнее может быть исключено корректировкой исходной формы желоба. Чем больше высота микронеровностей исходной поверхности, тем больше длительность обработки и искажение первоначальной формы.

Кольца с глубиной  $h > 2$  мм приходится полировать с профильными полюсами. В противном случае не обрабатывается дно желоба. По данным работы [2], при этой схеме обработки форма желоба тоже искажается (см. I на рис. 5.6, б). Однако специальная корректировка формы радиусных выступов на полюсах позволяет избежать таких искажений (см. II на рис. 5.6, б).

Отделочная обработка бочкообразных роликов после их бесцентрового шлифования необходима для улучшения качества рабочей

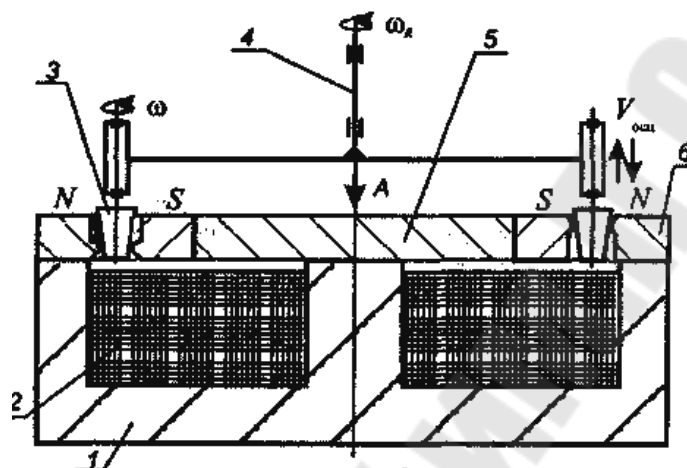
поверхности, но затруднена из-за отсутствия на ролике участков, с помощью которых можно его сцентрировать и закрепить на абразивном станке. По схеме, изображенной на *рис. 1.9а*, создана специальная установка. Ролик центрируется и закрепляется за сферические донные участки. С боковых сторон подводят фасонные полюсы электромагнита; а ролику сообщают вращение и осцилляцию вдоль оси.



*Рис. 1.9.* Схемы обработки бочкообразных роликов (*а*) и шариков (*б*) подшипников качения

На *рис. 1.9, б* приведена схема установки для МАО шариков подшипников качения, созданная в ФТИ АН БССР [2]. Обрабатываемые шарики *1* вместе с магнитно-абразивным порошком размещаются в кольцевом желобе, образованном между дисками *2*, которые являются разноименными полюсами электромагнита *3*. Одновременно с вращением в разных направлениях диски *2*, имеющие регулируемый эксцентриситет, совершают радиальные осцилляции  $n_{ос}$ . Магнитно-абразивный порошок обволакивает поверхность шариков и приводит их в сложное вращательное движение. Обработка осуществляется одновременно по всей поверхности шарика, а не по линии контура, как это имеет место при традиционной технологии. Скорость удаления припуска постоянна и для закаленных шариков диаметром 12,7 мм из стали марки ШХ15 составила 2–2,5 мкм/мин. Обеспечивается равномерное качество по всей поверхности сферы, шаржирование абразивом отсутствует. Снижение параметра шероховатости с  $R_a = 0,63$  мкм до  $R_a = 0,05$  мкм требует 10–15 мин основного времени [2].

Полирование наружных конических поверхностей осуществляется по схеме, показанной на *рис. 1.10*. По этой схеме работают роторные станки магнитно-абразивной обработки МАРС [2]. В данной схеме предусмотрены концентраторы магнитного поля, выполненные в виде поясков, расположенных по взаимно сопряженным зеркально отражающим одна другую винтовым линиям.



*Рис. 1.10.* Магнитно-абразивное устройство для обработки методом МАО фасонных поверхностей: 1 – станина; 2 – электромагнитная катушка; 3 – обрабатываемое изделие; 4 – привод роторной системы; 5 – магнитопровод; 6 – полюсные наконечники с концентраторами магнитного потока

Кроме вышеперечисленных, разработаны схемы и предложены методы обработки металлических форм, методы обработки внутренней полости шестигранной трубы и тонкостенных деталей из немагнитных материалов.

## Тема 2. МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

### 2.1. Сущность процесса магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей деталей машин

Сущность метода магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) заключается в совокупном одновременном воздействии на обрабатываемую поверхность и ферромагнитный порошок (ФМП), подаваемый в зазор между деталью и электродом, нескольких видов энергии: электрического тока, внешнего магнитного поля, кругового магнит-

ного поля электрического тока и механической, с помощью которых порошок расплавляется, наносится на обрабатываемую поверхность и диффундирует в глубь её [6].

Принципиальная схема одного из возможных вариантов МЭУ деталей машин представлена на *рис. 2.1*. Обрабатываемая деталь 1 устанавливается на электроизоляционные прокладки 2 с заданным рабочим зазором ( $PЗ$ )  $\delta$  относительно инструмента-электрода (ИЭ) 3, выполненного в виде диска с радиальными пазами на цилиндрической поверхности. ИЭ с электромагнитной катушкой 4 закрепляются на оправке 5, связанной с приводом. Электромагнитная катушка питается постоянным током. Деталь подключается к катоду, а электрод к аноду источника технологического тока (ИТ) 6. Для непрерывной подачи в  $PЗ$  ФМП определенного грануло-метрического и химического состава, сверху устанавливается дозирующее устройство (ДУ) 7. Частицы ФМП, попадая на цилиндрическую часть вращающегося ИЭ, удерживаются на ней при помощи внешнего магнитного поля, транспортируются в зону обработки и замыкают электрическую цепь деталь – ИЭ. В результате электрических разрядов, происходящих в местах контакта ФМП с упрочняемой поверхностью, за счет тепловой энергии осуществляется перенос части материала порошка на деталь, аналогично электроискровому легированию (ЭИЛ). По мере расплавления частиц порошка и образования в местах жидких перемычек, электродинамические силы разрывают жидкий мостик с образованием электрических разрядов, при этом часть расплава переносится на деталь, а часть совместно с нерасплавленными частицами ФМП выбрасывается из  $PЗ$ . Считается, что перенос материала порошка на поверхность детали продолжается и после прерывания электрического контакта за счет направленного переноса в канале проводимости. Одновременно в результате воздействия электроискровых разрядов, магнитных и электрических полей в поверхностных слоях детали происходят химические и структурные превращения, вследствие которых на поверхности её образуется твердый слой, надежно сцепленный с основой. Образование слоя за счет переноса материала расплава сопровождается также его электрической эрозией. Сочетание обоих процессов с превалированием какого-либо из них и обуславливает конечный технологический эффект МЭУ.

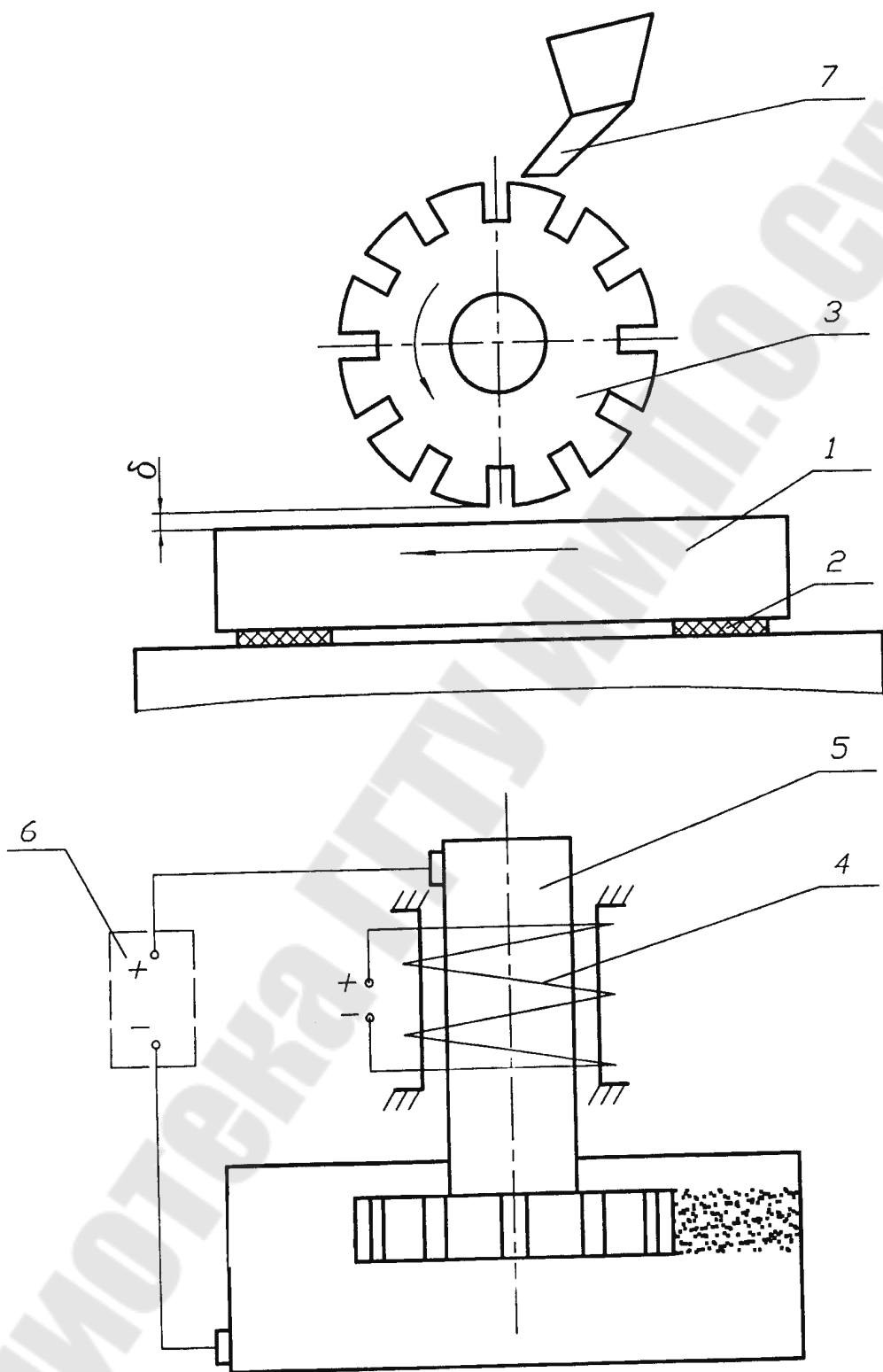


Рис. 2.1. Принципиальная схема магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей

В большинстве существующих установок для МЭУ в качестве ИТ используется машинные генераторы типа МГИ [6]. Установлено, что при использовании в качестве ИТ транзисторного широкодиапазонного генератора марки ШГИ-125-100 приращение массы образцов в 1,5 раза больше, чем это имеет место при применении машинных генераторов типа МГИ. Однако наибольшая производительность и толщина упрочнения слоя обеспечивается при использовании в качестве ИТ сварочного трансформатора ТД-500 в сочетании с вентилем для однополупериодного выпрямления напряжения в его вторичной цепи. Недостаток схем МЭУ на базе сварочного трансформатора – возможность возникновения стационарных дуговых разрядов, особенно при форсировании режимов, с целью увеличения производительности. Стационарная дуга выжигает ранее наплавленный слой и тем самым снижает качество упрочнения и резко повышает нагрев детали, что приводит к её температурной деформации. В промышленной установке для поверхностного упрочнения деталей УПУ-1, выпускаемой Калининградским опытно-механическим заводом «Кварц», в качестве ИТ используется тиристорный генератор импульсов, обеспечивающий двухполупериодное выпрямление электрического тока промышленной частоты с регулированием скважности и импульсов. Он, по сравнению с генераторами типа МГИ и ШГИ, является более простым и надежным в работе. Однако до настоящего времени технологические возможности его недостаточно полно исследованы. В принципе возможно использование и других источников тока, например, применяемых при электроэрозионной обработке и ЭИЛ [7].

Наиболее полно технологический процесс МЭУ отработан для деталей класса валов. При исследовании и внедрении различных схем и устройств были применены однополюсная и двухполюсная системы и ряд других вариантов расположения полюсов магнитов относительно обрабатываемой поверхности детали [6], [7]. Процесс упрочнения на двухполюсной установке при всех прочих равных условиях имеет более высокую стабильность по сравнению с однополюсной. Дальнейшим развитием метода явилось сообщение полюсному наконечнику дополнительных осциллирующих движений нормально упрочняемой поверхности, что позволило улучшить ряд технологических показателей МЭУ [6], [7]. Механическое силовое воздействие полюсного наконечника на ФМП в РЗ можно рассматривать как силовое активирование, за счет которого повышается СП, его производительность и качество нанесенного слоя, аналогично, как и при электроконтактном припекании [8].

Для упрочнения поверхностей отверстий в деталях класса втулок, дисков и в корпусных деталях применяются устройства, в которых ИЭ, выполненные в виде диска с радиальными пазами на цилиндрической поверхности, совершают вращательное или планетарное движение. При этом радиальные пазы улучшают кинематику движения частиц ФМП и обеспечивают концентрацию магнитного потока в РЗ. Для упрочнения поверхностей отверстий малого диаметра предложен способ, при реализации которого роль ИЭ выполняет проволока, непрерывно перемещаясь вдоль оси отверстия. Разработан ряд устройств для упрочнения плоских и сложно-профильных линейчатых поверхностей. Однако все эти устройства не обеспечивают стабильное протекание процесса МЭУ и, вследствие низких производительности и качества наносимых покрытий, не нашли применения.

Одним из основных условий СП МЭУ является дозированная подача порошка в РЗ, согласованная с количеством подводимой энергии. Несоблюдение этого условия снижает производительность и ухудшает качество нанесенного слоя, а в ряде случаев прекращает процесс. В существующих устройствах для непрерывной подачи ФМП используются различные ДУ, в основном вибрационного типа. Однако они имеют два существенных недостатка – неравномерность подачи ФМП во времени и по ширине лотка. Известные усовершенствования системы дозирования не устраняют указанные недостатки в полной мере, что сдерживает внедрение процесса МЭУ в промышленности. В некоторых случаях для повышения СП МЭУ обработку ведут в потоке охлаждающей жидкости, в среде электролита, газов. Однако применение охлаждающей жидкости снижает толщину и микротвердость наносимых покрытий, а упрочнение в среде электролита и газов приводит лишь к частичному улучшению некоторых технологических показателей.

В процессе упрочнения ИЭ быстро изнашиваются из-за эрозии рабочих поверхностей, что приводит к увеличению РЗ и нарушению стабильности упрочнения. Для повышения долговечности ИЭ углубления между концентраторами заполняют тугоплавким немагнитным материалом, но это, в свою очередь, увеличивает трудоемкость и себестоимость их изготовления. Лучшие результаты получаются при охлаждении ИЭ. В этом случае его эрозия уменьшается в 1,6 раза.

Поверхность детали в процессе упрочнения подвержена воздействию множества электрических разрядов, образующих микронеровности в виде лунок, заполненных расплавом частиц ФМП и основного металла. При наложении краевых поверхностей этих лунок образует-

ся общая картина шероховатости упрочненной поверхности.  $R_z$  поверхности после МЭУ не менее 80 мкм, а в большинстве случаев шероховатость поверхностей  $R_z$  160–320 мкм [4]. Поверхностный слой, упрочненный, например, ферробором, удовлетворительно обрабатывается абразивным инструментом из карбида кремния, но при этом удаляется часть упрочненного слоя и эффект от МЭУ заметно снижается. Для снижения шероховатости упрочненного слоя проведен целый ряд исследований и разработаны устройства, совмещающие процесс упрочнения с поверхностно-пластическим деформированием [2]. В некоторых случаях обкатку поверхности производят и после МЭУ. Шероховатость поверхности после МЭУ может быть снижена и за счет применения схем с оптимальным согласованием во времени магнитных, электрических и механических параметров.

В большинстве проведенных исследований в качестве наплавочного материала используются ФМП, что позволяет получать поверхностные слои со специальными свойствами: высокой износостойкостью в условиях жидкостного, сухого трения, в абразивной и коррозионной средах, а также обладающие окалиностойкостью и жаростойкостью. Наиболее часто применяется порошок ферробора различных марок: ФБ-1, ФБ-3. Это объясняется тем, что ферробор создает в поверхностных слоях высокотвердые и износостойкие структуры. Однако в проведенных исследованиях нет четких рекомендаций по применению определенной марки ферробора для упрочнения конкретного материала. В качестве ФМП исследователи применяют также двухкомпонентные сплавы на основе железа ( $Fe-V$ ,  $Fe-Ti$ ); высокоуглеродистый эвтектический сплав (С-300); быстрорежущие стали (Р6М5Ф3, Р6М5К5). Однако эти порошки являются более дорогими по сравнению с вышеуказанными.

МЭУ деталей тел вращения нашло применение в различных отраслях народного хозяйства. Известен опыт применения МЭУ для повышения долговечности деталей рыбопромыслового и рыбообрабатывающего оборудования, автомобилей и тракторов, горноперерабатывающего, горнодобывающего и нефтедобывающего оборудования, металлорежущего и специального технологического оборудования, деталей сельскохозяйственных машин.

## **2.2. Классификация существующих способов МЭУ ПП**

В настоящее время промышленность серийно не выпускает установки для МЭС ПП деталей машин. Это объясняется тем, что данный процесс недостаточно исследован. Поэтому нет и четкой классификации возможных принципиальных схем МЭУ ПП.



Более близкой является классификация способов электроэрозионного легирования деталей ФМП в магнитном поле, разработанная на основании анализа формообразования поверхностей во времени. Однако она носит общий характер и не в полной мере отражается сущность процесса МЭУ, как совокупного воздействия на процесс формообразования обрабатываемой поверхности трех видов энергии: магнитного поля, электрического тока и механического перемещения.

В основу предлагаемой классификации положена векторная интерпретация магнитно-электрических способов обработки деталей машин, разработанная Г.С. Шулёвым. Согласно данной интерпретации в каждой точке  $O$  обрабатываемой поверхности концентрируются векторы энергии магнитного поля  $\vec{B}$ , электрического тока  $\vec{J}$  и механического перемещения  $\vec{V}$  (рис. 2.2).

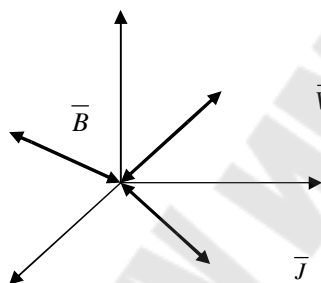


Рис. 2.2. Векторная интерпретация магнитно-электрических способов

Все принципиальные схемы МЭУ ПП можно разделить на следующие пять классов исходя из их векторного взаимодействия (рис. 2.3).

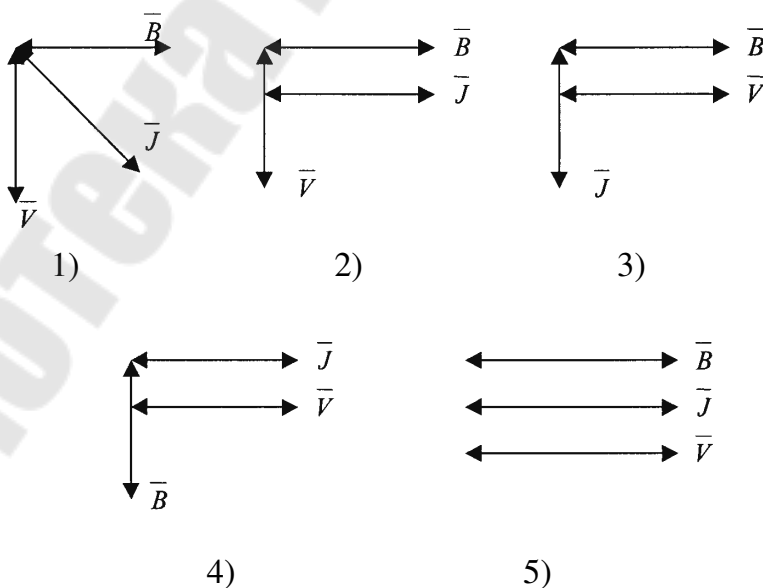


Рис. 2.3. Основные классы МЭУ ПП

Символика изображения каждого класса следующая:

1 класс –  $\bar{B} \perp \bar{J} \perp \bar{V}$ ;    2 класс –  $\bar{B} \parallel \bar{J} \perp \bar{V}$ ;    3 класс –  $\bar{B} \parallel \bar{V} \perp \bar{J}$ ;  
4 класс –  $\bar{J} \parallel \bar{V} \perp \bar{B}$ ;    5 класс –  $\bar{B} \parallel \bar{J} \parallel \bar{V}$ .

Все классы в зависимости от способа подачи энергии в зону обработки могут разделяться на три группы:

$$\left. \begin{array}{l} \bar{B} \\ \bar{J} \\ \bar{V} \end{array} \right\} = \text{const}(k) \quad \left. \begin{array}{l} \bar{B} \\ \bar{J} \\ \bar{V} \end{array} \right\} = f(\omega t) \quad \left. \begin{array}{l} \bar{B} \\ \bar{J} \\ \bar{V} \end{array} \right\} = f(t) \quad (2.1)$$

В первой группе каждый вид энергии может подаваться непрерывно, постоянно, заданной величины. Во второй группе – переменнo, с заданной частотой и амплитудой. В третьей – импульсно.

Каждый вид МЭУ может быть изображен формулой, например

$$\bar{B}(t) \perp \bar{J}(\omega t) \perp \bar{V}(k). \quad (2.2)$$

Она расшифровывается так: векторы магнитного поля  $\bar{B}$ , электрического тока  $\bar{J}$  и механического перемещения  $\bar{V}$  взаимоперпендикулярны; магнитное поле подается импульсно; электрический ток подается переменнo; механическое перемещение постоянно по величине.

### 2.3. Способ и установки для магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей деталей машин

Производительность МЭУ и качество наносимых покрытий во многом зависят от стабильности процесса МЭУ, для достижения которой необходимо обеспечить определенные технологические условия в зоне обработки, а именно, согласовать количество подводимой электрической энергии с дозированной подачей ФМП в РЗ. Однако применяемые на практике ДУ не обеспечивают равномерную подачу ФМП как по ширине ИЭ, так и во времени, что приводит к колебаниям величины электрического сопротивления, а следовательно, тока и количества выделяемого тепла в РЗ, являющихся одними из основных технологических факторов, определяющих процесс формирования покрытий. Кроме того, электрические, магнитные, геометрические характеристики элементов, замыкающих РЗ (ИЭ, ФМП, обрабатываемая поверхность детали), также являются случайными величинами. Все это в совокупности существенно снижает СП МЭУ. Для повышения СП МЭУ применяют следующие способы: обработку ве-

дуг в пульсирующем магнитном поле; регулируют величины напряжения и силы тока дуги [2]; регулируют усилие деформации; обработку ведут в условиях фазового сдвига основных технологических факторов процесса. Автором также разработан ряд устройств для упрочнения ПП деталей машин, которые реализуют метод МЭУ с одновременной СП путем автоматического регулирования одного из следующих параметров: количества порошка, подаваемого в РЗ; температурного режима в РЗ; величины РЗ; скорости перемещения обрабатываемой детали.

Как показали исследования, наиболее простым в реализации и надежным в работе является способ СП МЭУ путем автоматического регулирования величины РЗ, который поясняется *рис. 2.4*. Упрочняемая деталь 1, электроизолированная с помощью прокладки 2, устанавливается с первоначальным зазором  $b_1$  (РЗ) относительно ИЭ 3, закрепленного совместно с электромагнитной катушкой 4 на оправке 5, кинематически связанной с приводом. Детали и ИЭ сообщаются необходимые технологические движения, а в РЗ подаются напряжение от ИТ 6 и ФМП из ДУ 7. В результате электрических разрядов, происходящих в РЗ, ФМП расплавляется и наносится на упрочняемую поверхность. При изменении электрического сопротивления в РЗ по одной из вышеуказанных причин адекватно изменяется величина силы технологического тока и соответственно магнитная индукция электромагнитного поля, наводимого в датчике тока 8 и воспринимаемая блоком управления РЗ 9. Последний вырабатывает соответствующие управляющие сигналы, передаваемые на дополнительный электромагнит, установленный с зазором  $b_2$  либо под упрочняемой деталью 1, под оправкой 5. В первом случае дополнительный электромагнит 10, сердечник которого подпружинен пружиной 11, вызывает вертикальное линейное перемещение упрочняемой детали. Во втором – дополнительный электромагнит 12, с жестко установленным сердечником, вызывает угловые или линейные перемещения в вертикальной плоскости оправки, совместно с электродом 3. В обоих случаях происходит регулирование величины РЗ в соответствии с изменением электрического сопротивления в нем, тем самым обеспечивается СП МЭУ.

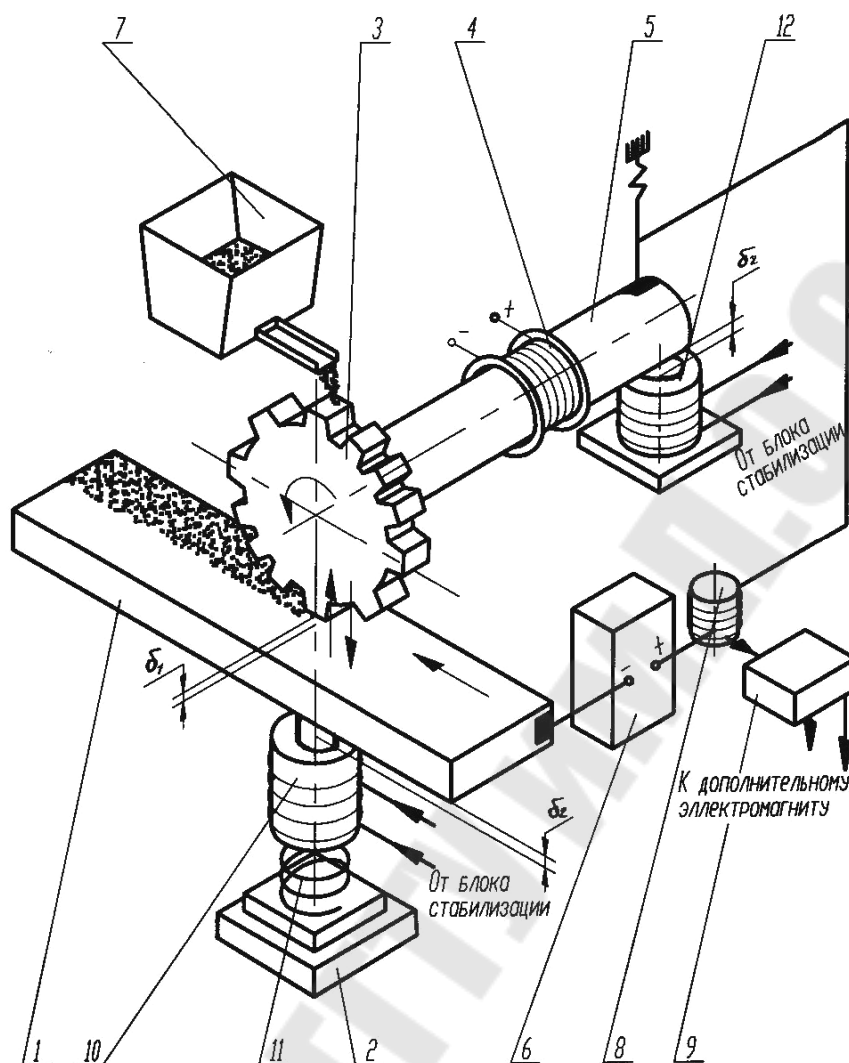


Рис. 2.4. Схема СП магнитно-электрического упрочнения ПП:  
 1 – деталь; 2 – электроизоляционная прокладка; 3 – ИЭ; 4 – катушка;  
 5 – оправка; 6 – ИТ; 7 – ДУ; 8 – датчик; 9 – блок стабилизации;  
 10, 12 – дополнительный электромагнит; 11 – пружина

Лабораторные исследования проводятся на установках двух типов:

- 1) с регулированием РЗ, путем линейного перемещения упрочняемой детали;
- 2) с регулированием РЗ путем углового перемещения оправки совместно с ИЭ.

Общий вид установки первого типа представлен на рис. 2.5, схемы ее механической и электрической частей – на рис. 2.6, а электронная схема – на рис. 2.7. В конструкции данной установки предусмотрен установленный на электроизоляционной прокладке 2 дополнительный электромагнит с катушкой 8 и сердечником 9 (рис. 2.6). Катушка 8 электрически связана с блоком 10 управления РЗ, подклю-

ченного к источнику питания 11. Сердечник 9 установлен с возможностью возвратно-поступательного перемещения вдоль оси катушки 8 и подпружинен в направлении перемещения пружиной 12. На сердечнике закреплено приспособление 13, предназначенное для установки и закрепления обрабатываемой детали 1. Блок 10 управления РЗ, выполненный по электронной схеме с гальванической развязкой силовой и управляющих частей, содержит магнитно-управляемые контакты (герконы) SF1, SF2, SF3 (рис. 2.6), установленные с возможностью взаимодействия с магнитным полем индуктивного датчика 14 величины технологического тока, включенного последовательно в силовую цепь ИТ 6. Последовательно к герконам подключены транзисторные ключи VT1, VT2, VT3, в коллекторную цепь которых включены реле К1, К2, К3, предназначенные для включения соответствующих ступеней регулирования напряжения на дополнительном электромагните с помощью тиристорных ключей VS1, VS2, VS3. При изменении электрического сопротивления в РЗ  $\delta$  меняется величина силы технологического тока и соответственно величина магнитного поля, создаваемого датчиком 14. В зависимости от величины этого поля срабатывает один геркон SF3 или два SF3, SF2 или все три. Соответственно, открываются транзисторные ключи (VT1-VT3) и включаются реле (К1-К3), которые своими нормально разомкнутыми контактами замыкают соответствующую цепь управления тиристорами (VS1-VS3). В зависимости от того, какой тиристор открыт, на катушку 8 дополнительного электромагнита подается большее или меньшее напряжение. В результате изменяется ток в катушке и сердечник 9 совместно с упрочняемой деталью 1 перемещается в вертикальной плоскости, регулируя величину РЗ и, как следствие, электрическое сопротивление в нем и силу технологического тока, поддерживая их значения в заданных пределах.

Общий вид установки второго типа представлен на рис. 2.5, а механическая и электрическая части ее на рис. 2.6. Механическая часть установки (рис. 2.9), в отличие от вышерассмотренной, дополнительно содержит подвижный корпус 8, в котором в подшипниках 9 установлен вал 10, связанный с приводом станка. Вал 10, посредством зубчатой передачи 11, связан с оправкой 5, на которой закреплен ИЭ 3. Магнитная система также состоит из двух электромагнитов: основного 4 и дополнительного 12. Однако каждый из них имеет двойную обмотку – основную и дополнительную. Основные обмотки соединены встречно-последовательно и включены в цепь блока питания

электромагнитов. Дополнительные обмотки также соединены встречно-последовательно и включены в силовую цепь ИТ 6. До включения ИТ 6 оправка 5 опирается на торец дополнительного электромагнита 12. При подаче тока на основные обмотки электромагнитов на их полюсах наводятся магнитные поля одинаковой полярности, в результате чего происходит отталкивание оправки от дополнительного магнита с силой:

$$P = 4,06 \cdot B^2 \cdot S, \quad (2.3)$$

где  $B$  – магнитная индукция в зазоре между оправкой и дополнительным электромагнитом, Тл;  $S$  – площадь торца сердечника дополнительного электромагнита, см<sup>2</sup>.

При этом корпус 8 вместе с оправкой поворачивается относительно вала 10 на определенный угол и между оправкой и дополнительным электромагнитом образуется зазор  $\delta_2$ . В процессе обработки при изменении электрического сопротивления в РЗ ( $\delta_1$ ) меняется величина силы технологического тока, который, протекая через дополнительные обмотки электромагнитов, изменяет величину магнитной индукции в зазоре  $\delta_2$ , тем самым вызывая колебания силы отталкивания  $P$ . Путем углового поворота ИЭ с оправкой 5 и корпусом 8 относительно вала 10, изменяет величину РЗ, чем обеспечивает постоянное электрическое сопротивление в нем.

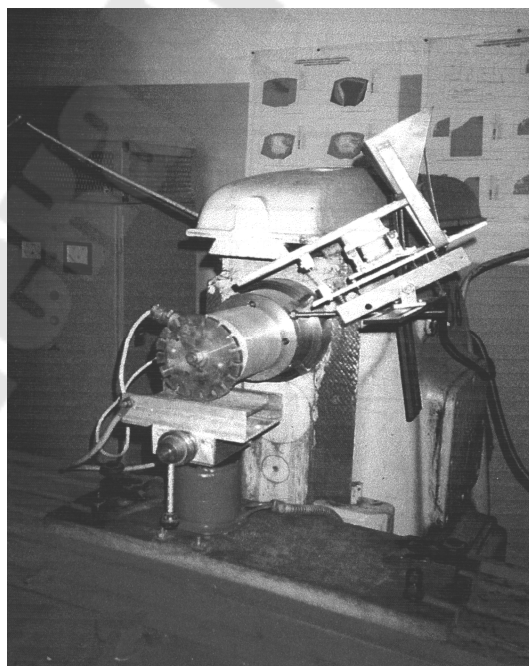


Рис. 2.5. Общий вид лабораторной установки первого типа для магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей

Установка второго типа легко перенастраивается для МЭУ на-  
ружных цилиндрических поверхностей. Для этого необходимо на  
столе станка установить приспособление с приводом, служащее для  
крепления обрабатываемой детали и сообщение ей необходимого  
вращательного движения.

Таким образом, для проведения лабораторных исследований,  
предложены две установки, которые реализуют схему МЭУ (рис. 2.6)  
и одновременно позволяют стабилизировать процесс нанесения по-  
крытий.

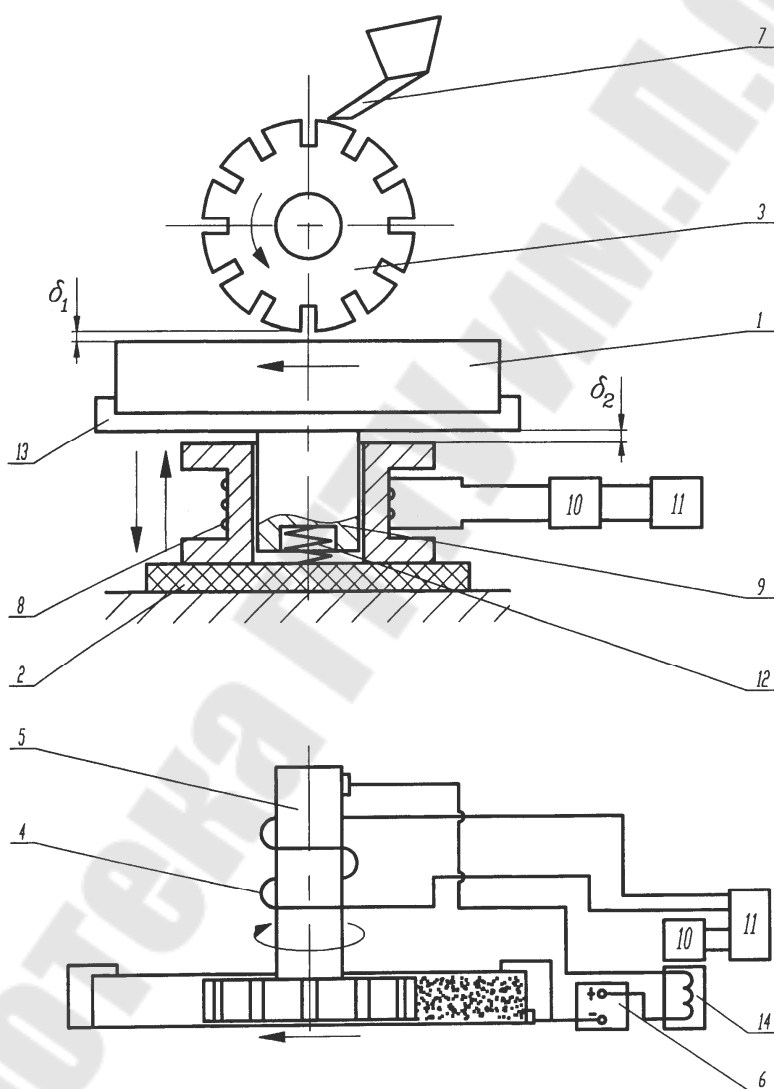


Рис. 2.6. Схема механической и электрической частей лабораторной установки первого типа: 1 – деталь; 2 – прокладка; 3 – ИЭ; 5 – оправка; 6 – ИТ; 7 – ДУ; 8 – катушка; 9 – сердечник; 10 – блок стабилизации; 11 – источник питания; 12 – пружина; 13 – приспособление; 14 – датчик

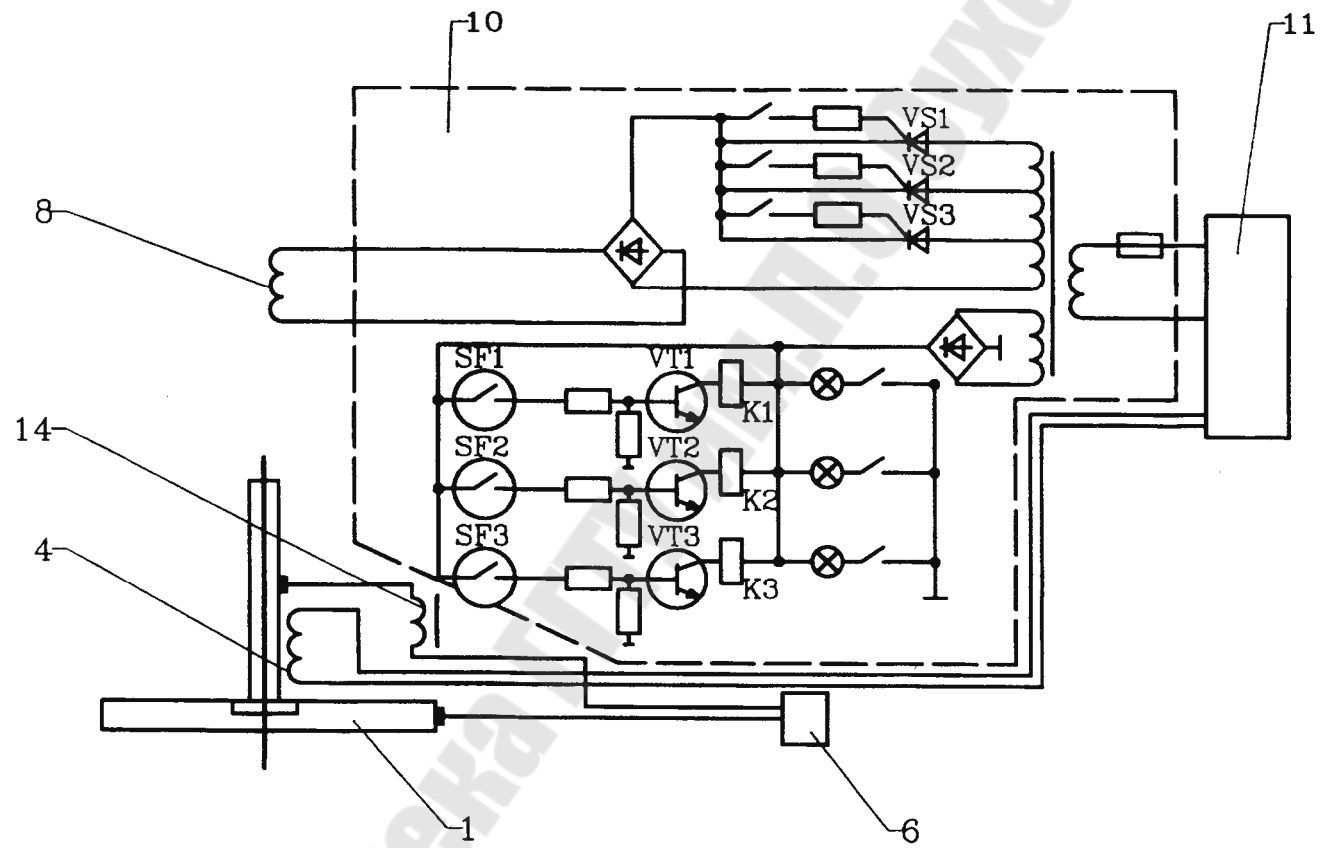


Рис. 2.7. Электронная схема лабораторной установки первого типа



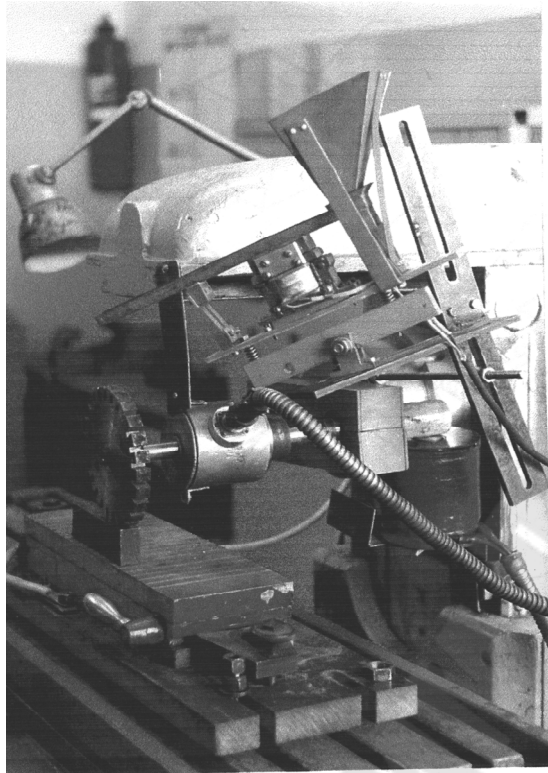


Рис. 2.8. Общий вид лабораторной установки второго типа для магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей

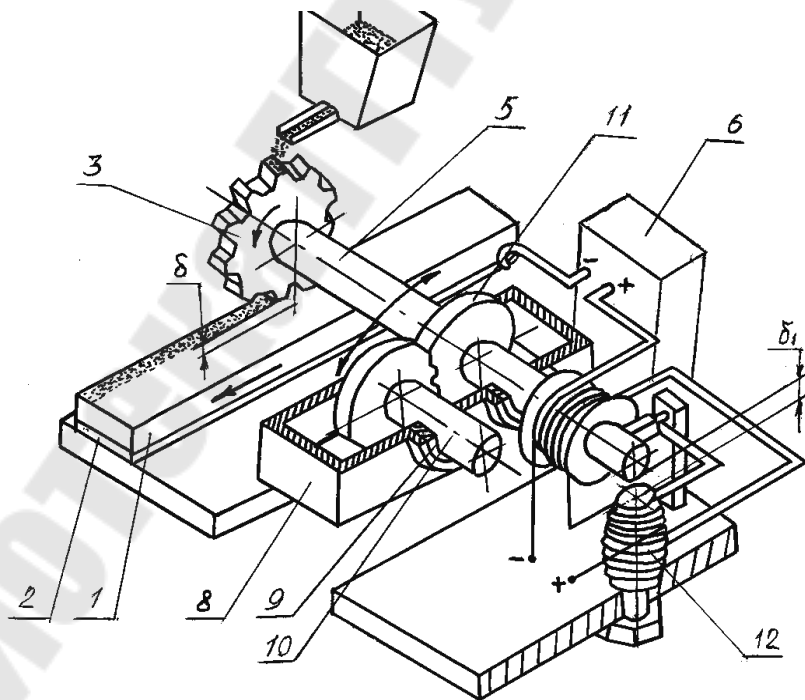


Рис. 2.9. Механическая и электрическая часть лабораторной установки второго типа для магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей:

1 – деталь; 2 – прокладка; 3 – ИЭ; 4 – основной электромагнит; 5 – оправка;  
6 – ИТ; 7 – ДУ; 8 – корпус; 9 – подшипник; 10 – вал; 11 – зубчатая передача;  
12 – дополнительный электромагнит

### Тема 3. ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ПОРОШКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СПОСОБАХ ОБРАБОТКИ

Существенное влияние на качество и производительность магнитно-электрических способов оказывают химический состав, а также физические и механические свойства порошков. В процессе МАО они выполняют роль абразивного инструмента и осуществляют основную работу резания. При МЭУ они выполняют функции своеобразного легирующего электрода, служащего для получения поверхностей с требуемыми физико-механическими свойствами.

В связи с этим к порошкам, применяемым при магнитно-электрических способах обработки, предъявляется ряд специальных требований, причем наряду с общим, есть и некоторые специфические, присущие только для МАО или только для МЭУ.

Общие требования, предъявляемые к порошкам:

– способность удерживаться в рабочем зазоре между полюсами магнитов и изделием под действием магнитных полей, т. е. хорошая магнитная проводимость;

– низкое электрическое сопротивление, позволяющее образовывать при контакте частиц порошка между собой, обрабатываемой поверхностью и полюсами магнитов замкнутые электрические цепи;

– высокая теплопроводность

– сопротивляемость разрушению под действием химически активных сред;

– способность измельчаться под механическим воздействием, т. е. высокая хрупкость;

– недефицитность и сравнительно небольшая отпускная стоимость.

*Порошки, применяемые при МАО*, обязательно должны обладать высокими абразивными свойствами, т. е. способностью осуществлять процесс резания и снятия определенного объема металла с поверхностей, имеющих значительную твердость (HRC<sub>3</sub> 45...65). Кроме того, они должны иметь высокую износостойкость, т. е. иметь высокую сопротивляемость процессу истирания рабочих граней частиц в процессе обработки.

*Порошки, применяемые при МЭУ*, должны обеспечивать упрочненным поверхностям повышенные физико-механические характеристики (высокую износостойкость, коррозионно-усталостную прочность, жаростойкость и др.), в соответствии с которыми и определяется их химический состав. Кроме того, они должны обладать низкой

температурой плавления, способностью к самофлюсованию и хорошей текучестью, обеспечивающей стабильное дозирование их в зону обработки через питатели.

В табл. 2.1 приведены сведения о ферромагнитных порошках, наиболее широко применяемых в магнитно-электрических методах обработки.

Таблица 3.1

### Ферромагнитные порошки и области их применения

Порошок	Обрабатываемый материал		Дополнительные сведения
	МАО	МЭУ	
Полимам-Т	Сталь, медные, алюминиевые и титановые сплавы	–	ТУ 06459-81
Ферабраз-1	Сталь, цветные металлы и сплавы	–	А.С. 755538 (СССР) А.С. 929423 (СССР)
СЧ20	–	Сталь	ГОСТ 1412-85
ФБ-17	Сталь	Сталь, черные металлы	ГОСТ 14848-69
БЧ-1*	–	Сталь, черные металлы	–
СЧЛ-1*	Сталь	Сталь, черные металлы	–

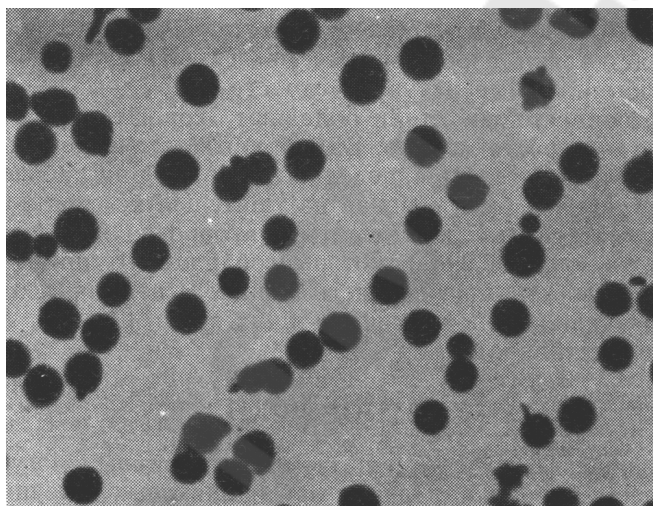
\*Порошки разработаны кафедрой «Технология машиностроения» ГГТУ им. П.О. Сухого.

Частицы порошков, используемых для МЭУ, должны иметь сферическую (рис. 3.1) или комкообразную форму (рис. 3.2). Такие порошки обладают хорошей сыпучестью, что позволяет достаточно просто регулировать и поддерживать постоянным расход порошка.

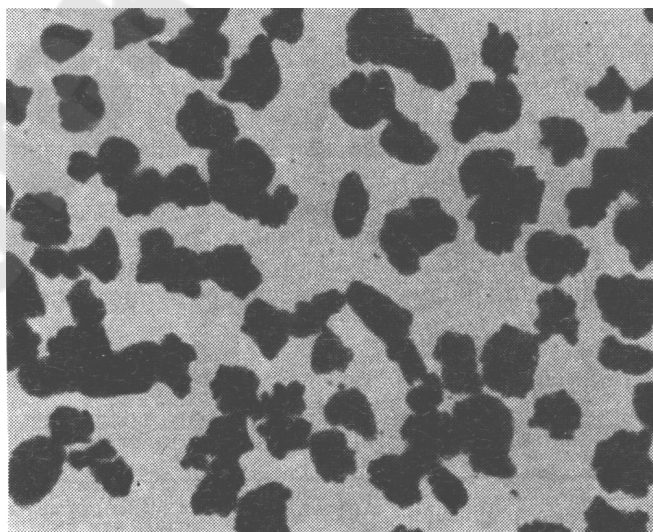
На рис. 3.3 показаны частицы порошка, имеющие сложную форму с большим количеством выступов. Такая форма частиц затрудняет подачу порошка из бункера в рабочий зазор. В бункере питателя во время работы образуются карнизы из порошка, которые периодически разрушаются, вызывая пульсацию расхода материала, что снижает стабильность процесса МЭУ. Порошки с такой формой частиц имеют также большую удельную площадь поверхности и легко окисляются при движении в потоке горячего газа, что приводит к ухудшению качества напыляемого покрытия.

Размер частиц порошка и его гранулометрический состав оказывает сильное влияние на процесс МЭУ и свойства получаемого материала.

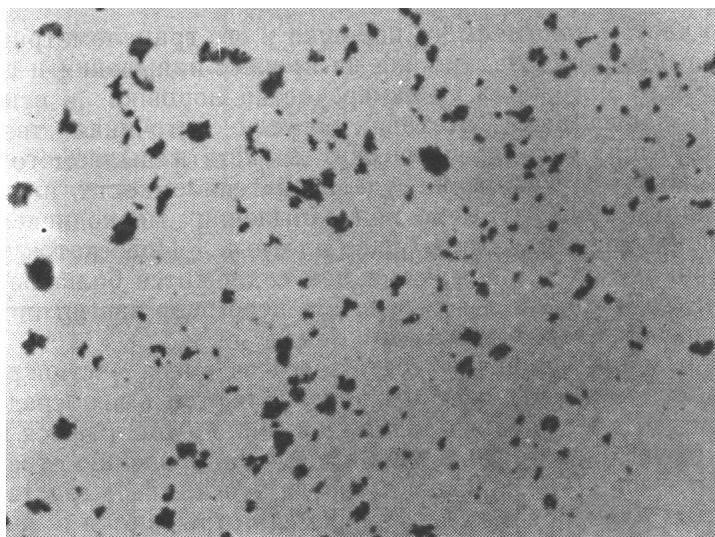
*Самофлюсующиеся сплавы.* Нанесение покрытий из самофлюсующихся сплавов и последующее их проплавление позволяет получать покрытия без пор. Обычно используют покрытия из самофлюсующихся сплавов, которые можно не подвергать последующему оплавлению. Самофлюсующиеся сплавы представляют собой сплавы на основе никеля, никеля и хрома, или кобальта, содержащие добавки бора и кремния. Напыление порошков таких сплавов дает возможность получать покрытия, обладающие износостойкостью, эрозионной стойкостью, коррозионной стойкостью, стойкостью к окислению при высоких температурах и т. д. Эти материалы поставляются в виде порошков. В некоторых случаях их используют для напыления в виде прутков, которые или отливают, или формуют из порошков с добавкой смол. В процессе МЭУ такие материалы применяются только в виде порошков.



*Рис. 3.1.* Сферические частицы порошка (никелевый сплав)



*Рис. 3.2.* Комкообразные частицы порошка молибдена



*Рис. 3.3.* Частицы порошка сложной формы

В настоящее время перспективным направлением стало производство и применение в процессе нанесения покрытий различными методами самофлюсующихся порошков на железной основе. Такие порошки по сравнению с их аналогами на никелевой основе значительно более дешевы, что и обуславливает их перспективность. Высокая твердость боридного слоя самофлюсующихся порошков на железной основе позволяет применять такие порошки также в процессе МАО.

## Литература

1. Ящерицын П. И. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива / П. И. Ящерицын, А. Н. Мартынов, А. Д. Гридин. – Мн. : Наука и техника, 1978. – 224 с. : ил.
2. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 176 с. : ил.
3. Сакулевич Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич ; под ред. П. И. Ящерицына. – Мн. : Наука и техника, 1981. – 328 с.
4. Кожуро Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Мн. : Навука і тэхніка, 1995. – 232 с.
5. Ящерицын П. И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / Ящерицын П. И. и [и др.]. – Мн. : Наука и техника, 1988. – 272 с.
6. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Мн. : Наука и техника, 1988. – 272 с.
7. Электроэрозионные процессы на электродах и микроструктурно-фазовый состав легированного слоя / И. И. Сафронов [и др.] ; под ред. Н. Н. Дорожкина. – Кишинев : Штиинца, 1999. – 591 с.
8. Ярошевич В. К. Электроконтактное упрочнение / В. К. Ярошевич, Я. С. Генкин, В. А. Верещагин. – Мн. : Наука и техника, 1982. – 256 с.
9. Иванов Г. П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин / Г. П. Иванов. – М. : Машгиз, 1961. – 303 с.
10. Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригака ; пер. с яп. В. Н. Попова. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с.
11. Пантелеенко Ф. И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них / Ф. И. Пантелеенко. – Мн. : УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
12. Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Филонов И.П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин. – Минск: УП «Технопринт», 2000.-268 с.
13. Кожуро Л. М., Миранович А. В., Немизанский Ю.В. Электромагнитная наплавка [Электрон. ресурс]. –2005. – Режим доступа: <http://emn-modern.narod.ru>
14. Упрочнение и восстановление рабочих поверхностей электромагнитной наплавкой и электромагнитной наплавкой с поверхностным пластическим деформированием [Электрон. ресурс] / Белорусский государственный аграрный технический университет. –2005. – Режим доступа: <http://bsatu.by>

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА .....	5
1.1. Особенности процесса магнитно-абразивной обработки.....	5
1.2. Магнитно-абразивная обработка наружных цилиндрических поверхностей.....	7
1.3. Магнитно-абразивная обработка отверстий .....	10
1.4. Магнитно-абразивная обработка плоских и фасонных поверхностей .....	13
1.5. Магнитно-абразивная обработка фасонных поверхностей тел вращения .....	16
2. МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	19
2.1. Сущность процесса магнитно-электрического упрочения плоских поверхностей деталей машин .....	19
2.2. Классификация существующих способов МЭУ ПП.....	24
2.3. Способ и установки для магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей деталей машин.....	26
3. ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ПОРОШКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СПОСОБАХ ОБРАБОТКИ.....	34
Литература.....	38

**Кульгейко Михаил Петрович  
Петришин Григорий Валентинович**

## **ОСНОВЫ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

**КРАТКИЙ КУРС ЛЕКЦИЙ  
по дисциплине «Технология и оборудование  
магнитно-электрических способов обработки  
материалов» для студентов специальности  
1-36 01 01 «Технология машиностроения»  
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 01.03.10.

Пер. № 130Е.

E-mail: [ic@gstu.by](mailto:ic@gstu.by)

<http://www.gstu.by>