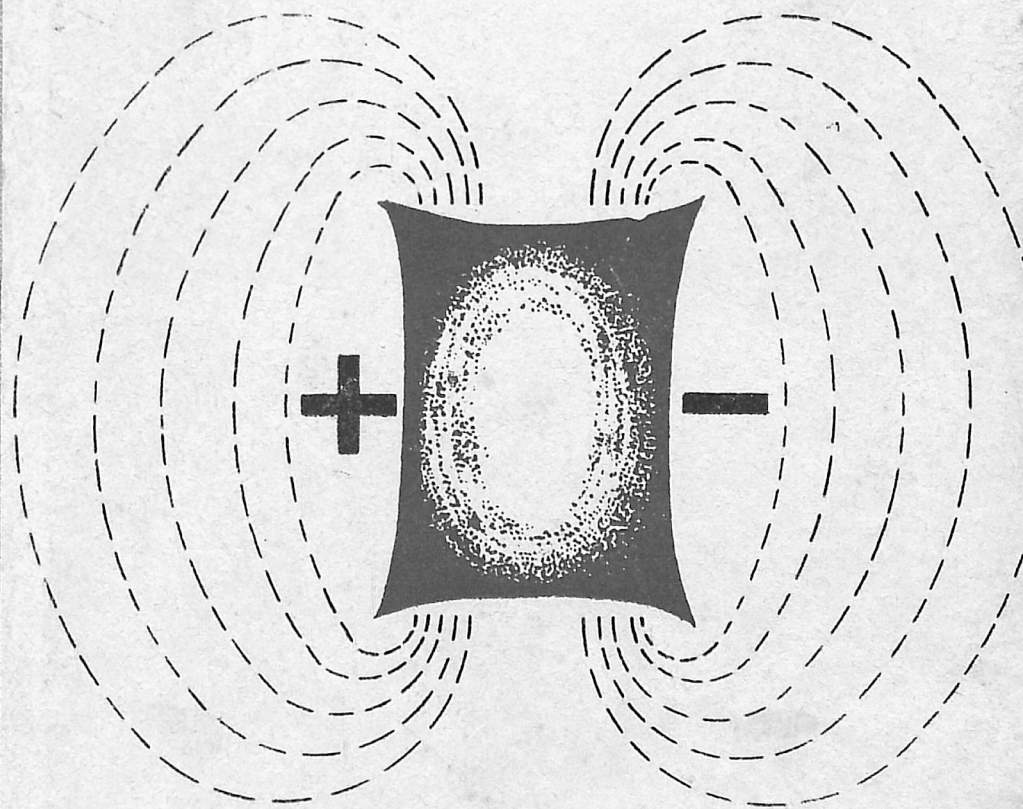


ОСНОВЫ ЭЛЕКТРО- ФЕРРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ

Е. Г. Коновалов,
Ф. Ю. Сакулевич

Издательство «Наука и техника»



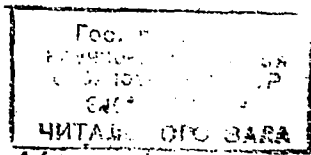
АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР
Физико-технический институт

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРО- ФЕРРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ

Е. Г. КОНОВАЛОВ, Ф. Ю. САКУЛЕВИЧ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА И ТЕХНИКА»
МИНСК 1974

ВУ
22805



74-11141

К64

УДК 621.728, 621.795, 669.019.25

Коновалов Е. Г., Сакулевич Ф. Ю. Основы электроферромагнитной обработки. Минск, «Наука и техника», 1974, стр. 272.

В монографии в систематизированном виде изложены теоретические и технологические вопросы электроферромагнитной обработки материалов. Рассматриваются кинематика, динамика и энергоемкость процесса, особенности ориентированного резания и механизм износа зерен ферромагнитного порошка, а также приведены данные о ферромагнитных материалах, используемых в качестве режущих элементов и сердечников электромагнитов.

Дано описание применяемого оборудования. Приведены некоторые данные по методике расчета и проектирования рабочего органа электромагнитной системы станков и установок, выбору формы и размеров сердечников магнитов, а также по производительности и технико-экономической эффективности метода электроферромагнитной обработки.

Таблиц 30. Рисунков 86. Библиография — 104 названия.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся чистовой обработкой деталей и проектированием оборудования, может быть также полезна аспирантам, студентам технических вузов и новаторам производства.

6ПЧ

К $\frac{03125-022}{M316-74}$ 215-73

Рецензенты:

доктор технических наук М. Н. Бодяко,
кандидат технических наук Ю. А. Сидоренко

© Издательство «Наука и техника», 1974.

ВВЕДЕНИЕ

В многообразии конструктивных и технологических схем, способов и средств обработки деталей свободным, не закрепленным неподвижно в связующем веществе порошком с ферромагнитными, абразивными или комбинированными свойствами в магнитных полях наиболее отчетливо просматриваются два направления:

1) убыточная обработка, т. е. удаление с поверхности изделия слоя материала заданной толщины и получение заданного класса шероховатости;

2) наращивание — увеличение геометрических размеров, легирование поверхности изделия материалом порошка с целью изменения ее физико-механических свойств путем образования прочного и износоустойчивого слоя, по химическому составу идентичного порошку.

Очевидно, что оба направления имеют самостоятельное значение и свои физико-технологические особенности. Общим для них является наличие порошка, без которого невозможен описываемый процесс, и магнитного поля, удерживающего этот порошок в зоне обработки.

В настоящей работе рассматриваются только вопросы, связанные с убыточной обработкой изделий в магнитном поле порошками с ферромагнитными и абразивными свойствами.

Магнитно-абразивной (убыточной) обработке могут быть подвергнуты изделия любой геометрической формы и размеров из диамагнитных, парамагнитных и ферромагнитных материалов. Наиболее изученным в настоящее время является процесс обработки изделий из последней группы материалов.

В качестве рабочих элементов при магнитно-абразивной обработке используются порошки ферросплавов, железа и его соединений, керметов, обычного абразива и других веществ. Порошки в зависимости от материала изделия, состояния обрабатываемой поверхности и технологических параметров процесса обработки подбираются заданного химического состава, механических и физических свойств, концентрации, плотности и дисперсности. Подробно вопрос о подборе

порошков рассмотрен ниже. Здесь следует, однако, заметить, что одна из принципиальных особенностей магнитно-абразивной обработки заключается в абразивном инструменте.

Известны абразивные инструменты, у которых режущие элементы (абразивные зерна) неподвижно закреплены в различного рода связке (керамической, вулканитовой, бакелитовой и др.). При этом ориентация зерен и правка абразивного инструмента производятся принудительно.

Абразивный же инструмент для магнитно-абразивной обработки отличается от обычного тем, что для осуществления процесса резания элементы (зерна) порошка, обладающие ферромагнитными и абразивными свойствами или состоящие из абразивных и ферромагнитных компонентов, помещаются в магнитное поле, выполняющее в данном случае роль связки, и ориентируются своими наибольшими осями к полируемой поверхности.

Таким образом, осуществляется процесс ориентированного резания инструментом, допускающим непрерывную переориентацию и нивелирование режущих зерен относительно изделия в процессе обработки и исключаяющим необходимость правки (периодической переточки). По мере износа и затупления вершин зерна порошка самостоятельно поворачиваются своими вновь образовавшимися наибольшими осями по направлению магнитных силовых линий, направляя острые грани режущих элементов к обрабатываемой поверхности.

Магнитное поле, выполняющее роль эластичной связки, позволяет распределить усилие резания-царапания пропорционально величине каждого зерна (или величине ферромагнитной составляющей в двухкомпонентных зернах), что исключает перегрузку отдельных зерен, резкие колебания температур и напряжений в зоне обработки, а следовательно, уменьшает вероятность изменения микроструктуры поверхностных слоев изделия, появления прижогов и других температурных дефектов и способствует увеличению износостойкости и долговечности изделия.

Магнитно-абразивная обработка ведется, как правило, с подачей в рабочую зону (зону контакта элементов порошка и обрабатываемой поверхности изделия) смазывающе-охлаждающей жидкости. Однако при кратковременности процесса обработки ($t_{\text{мах}} = 3-5 \text{ сек}$) полирование может осуществляться без подачи СОЖ (всухую).

Применяемое при магнитно-абразивной обработке оборудование комплектуется из следующих основных систем:

1. Магнитной, состоящей из постоянных или электрических магнитов на постоянном, переменном или выпрямленном (одно- или двухполупериодном) токе и предназначенной для удержания элементов ферромагнитного порошка в рабочей

зоне, а также сообщения им необходимых относительных перемещений в пространстве.

2. Механической, обеспечивающей крепление изделия в зоне обработки или сообщение последнему относительных движений.

3. Электрической, предназначенной для подвода электрического тока в зону действия рабочих элементов порошка, питания магнитной системы и управления механизмами станков.

Для получения на заготовке, обрабатываемой магнитно-абразивным способом, заданной чертежом и техническими условиями поверхности необходимо, чтобы режущие кромки элементов порошка и сама заготовка перемещались относительно друг друга определенным образом, обеспечивая съем с поверхности припуска в виде стружки. Требуемые относительные перемещения могут совершаться либо инструментом (зернами порошка), либо заготовкой, или сочетанием движений обрабатываемой детали и инструмента. Для получения заданной геометрической поверхности эти движения должны быть согласованы между собой, т. е. связаны определенной закономерностью (или закономерностями).

В соответствии с этим магнитная и механическая системы станков для магнитно-абразивной обработки должны иметь устройства и механизмы, посредством которых осуществляются основные, рабочие и вспомогательные движения.

К рабочим движениям в данном случае относятся движения резания и продольной подачи, а также движения осцилляции порошка или заготовки в одной или нескольких плоскостях. В ряде случаев в зависимости от геометрической формы заготовки механические системы станков для магнитно-абразивной обработки должны иметь два (или более) различных движения подачи.

Скорости главного движения (движения резания), движений подачи и осцилляции определяются требуемой производительностью процесса магнитно-абразивной обработки, техническими условиями чертежа, шероховатостью поверхности и точностью формы изделия, т. е. требуемой макро- и микрогеометрией обрабатываемой поверхности.

Наряду с основными (рабочими) движениями станки имеют еще и вспомогательные движения, которые, не участвуя непосредственно в процессе магнитно-абразивной обработки, необходимы для подачи порошка в зону резания, загрузки заготовок, демагнитизации изделий, автоматического подвода полюсных наконечников электромагнита на заданную величину, их фиксации на рабочей позиции и обратного отвода, движения приборов и инструментов для автоматического контроля размеров в процессе обработки и т. д.

В станках и установках для магнитно-абразивной обработки встречается в основном вращательное движение (движение резания), которое сообщается либо обрабатываемой заготовке, либо режущему инструменту (магнитной системе или только элементу порошка). Движение подачи может сообщаться как заготовке, так и магнитной системе (элементам порошка). В большинстве случаев если движение резания сообщается заготовке, то движение подачи — порошку и наоборот.

Однако существуют такие способы магнитно-абразивной обработки и устройства для их применения, в которых оба движения совершает ферромагнитный порошок, а заготовка в процессе полирования остается неподвижной.

Процесс магнитно-абразивной обработки может осуществляться при двух относительных движениях заготовки и инструмента: движении резания и подаче. Однако для улучшения качества обработанного изделия и повышения производительности процесса заготовке или элементам порошка сообщается дополнительное возвратно-поступательное (осциллирующее) движение в направлении продольной подачи или под некоторым углом к ней.

Движения осцилляции могут быть прямолинейными, круговыми (крутильными) или со сложной траекторией.

Впервые метод магнитно-абразивной обработки был предложен в СССР в 1938 г. [1]. Однако опытно-промышленное опробование и первое внедрение в производство он получил в 1962—1973 гг. после изучения физических и технологических особенностей процесса [2—12].

Новый метод обладает следующими преимуществами:

1. Процесс обработки не связан условиями жесткости с технологической системой СПИД.

2. Режущий инструмент способен обрабатывать поверхности любой конфигурации (при разности высот кривых в пределах 3—4 мм). При этом отпадает необходимость в целом ряде операций по изготовлению абразивного инструмента и его периодической правке (заточке).

3. Параметры процесса могут изменяться в соответствии с заданными условиями.

4. Процесс позволяет локализовать концентраторы напряжений, полученные при операциях предшествующей механической обработки, и повысить усталостную прочность металла. Вследствие незначительного выделения тепла в зоне резания и интенсивного теплообмена обработанная поверхность не имеет прижогов и других тепловых дефектов.

При магнитно-абразивной обработке ферромагнитными порошками происходит не только полирование поверхности детали, но и упрочнение поверхностного слоя металла — из-

меняется его структура, повышается твердость, а также другие параметры, оказывающие влияние на ее износостойчивость.

5. Внедрение метода позволяет механизировать процесс чистовой обработки деталей сложной конфигурации из магнитных и немагнитных материалов, значительно сократить трудоемкость и повысить производительность труда.

6. Установки для магнитно-абразивной обработки могут иметь самостоятельную станину или быть смонтированы на металлообрабатывающих станках.

Настоящая монография — первая попытка обобщить и систематизировать накопленную по методу магнитно-абразивной обработки информацию, описать опыт исследований физики и технологии процесса, созданное оборудование и устройства. Вопросы кинематики движения режущих элементов ферромагнитного порошка в магнитном поле, механизма съема металла и давления порошка на обрабатываемую поверхность при полировании изложены по данным исследований В. И. Ждановича, а вопросы выбора оптимальной схемы механизма осциллирующей детали и магнитной системы при обработке крупногабаритных деталей — по данным работ Б. П. Борисова, выполненных под научным руководством авторов.

Авторы будут благодарны читателям за присланные замечания.

СУЩНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ПОРОШКАМИ

1. Сущность метода магнитно-абразивной обработки

Известные методы чистовой (финишной) обработки деталей можно сгруппировать в три разновидности [6]:

механические — резание лезвийным и абразивным инструментом, свободным порошком, которому сообщается кинетическая энергия, без снятия стружки путем тонкого пластического деформирования микронеровностей;

электрофизические — электрохимическая, электроэрозионная, ультразвуковая, электролучевая, электронская и другие методы обработки;

электромеханические — анодно-механическая, магнитно-абразивная и другие методы обработки, сочетающие физические и механические методы диспергирования (удаления) металла с обрабатываемой поверхностью.

В настоящее время первые две разновидности достаточно изучены и нашли широкое применение в промышленности, однако их использование не решает проблемы повышения точности геометрической формы и размеров деталей, улучшения их микро- и макрогеометрии, улучшения физико-механических свойств обработанной поверхности, повышения долговечности изделий при одновременном увеличении производительности финишных операций.

Сущность метода магнитно-абразивной обработки можно уяснить из рис. 1.1, на котором деталь 1 помещена между полюсами электромагнита 2 с требуемым рабочим зазором. Катушки 3 включены так, что возбуждаемый в сердечниках магнита поток пронизывает деталь в диаметральном направлении. Электромагниты питаются пульсирующим (выпрямленным) током. В зазоры между деталью и сердечниками подается ферромагнитный порошок (например, ферробор, бористый чугун с высоким содержанием бора, ферровольфрам, белый чугун, кермет и др.), а деталь приводится в сложное движение: вращательное вокруг оси и осциллирующее вдоль нее. При этом для успешного течения процесса обработки предпоч-

тительной является подача в рабочие зазоры охлаждающей жидкости. Участвующие в процессе частицы ферромагнитного порошка представляют собой обыкновенные абразивные зерна (рабочие элементы). Каждый рабочий элемент в магнитном поле ориентируется известным образом, а именно устанавливается своей наибольшей осью по направлению магнитных силовых линий. Следовательно, в рассматриваемой схеме к детали и сердечнику обращены наиболее острые режущие кромки. В процессе обработки режущие кромки притупляются, прежняя наибольшая ось рабочего элемента уменьшается. Вследствие износа (уменьшения длины рабочего элемента в заданном направлении) всегда появляются две новые наиболее удаленные точки, которые являются геометрическим местом новой наибольшей оси. В дальнейшем происходит переориентация ферромагнитного элемента таким образом, что его новая наибольшая ось совпадает с направлением магнитных силовых линий, в результате чего обработка поверхности детали производится всегда острыми кромками. Эту особенность метода обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками называют процессом ориентированного абразивного резания.

В противоположность рассматриваемому процессу при обработке деталей обыкновенным абразивным порошком каждое его зерно производит резание любой из возможных кромок, острой или тупой, расположенных перпендикулярно к вектору скорости резания. Причем резание выполняют лишь наиболее выступающие зерна, на которые в основном распределяется общее давление при обработке. Мелкие зерна в резании не участвуют, что снижает производительность обработки.

При магнитно-абразивной обработке все ферромагнитные рабочие элементы участвуют в процессе резания при определенной силе нормального давления и магнитного притяжения, что позволяет интенсифицировать процесс съема металла.

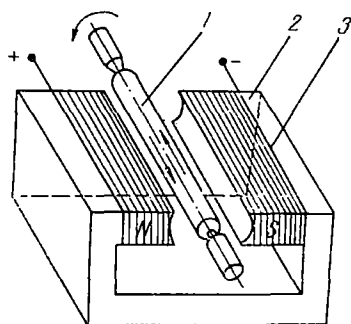


Рис. 1.1. Принципиальная схема обработки в магнитном поле

Процесс съема металла при магнитно-абразивной обработ-ке является наименее изученным из всех существующих мето-дов абразивной обработки. Это объясняется сложностью явлен-ний, происходящих в зоне обработки, а также сравнительно небольшим количеством исследований по этому вопросу. Вы-двинутые гипотезы не охватывают всех явлений, сопутствующ-их процессу, и не раскрывают его сущности.

В [6] съем металла объяснялся абразивным действием ферромагнитных зерен и оплавлением обработанной поверх-ности микротоками, генерируемыми в ферромагнитных зернах при их колебательном движении в рабочем зазоре. Считалось, что значимость фактора оплавления микротоками возрастает с увеличением скорости относительного перемещения ферро-магнитного порошка по рабочему зазору. Таким образом, уве-личение рабочего зазора вдоль магнитных силовых линий при постоянной величине индукции должно было приводить к уве-личению съема металла, так как подвижность ферромаг-нитного порошка в этом случае возрастает. Однако проведен-ные в дальнейшем исследования показали, что увеличение ра-бочего зазора уменьшает величину удельного съема металла.

Ю. М. Барон [1] считает, что съем металла осуществляется пугем механического резания под действием нормальных и тангенциальных сил магнитного происхождения.

Нормальные силы, необходимые для внедрения зерен в об-рабатываемую поверхность, возникают в средней части рабоче-го зазора. Тангенциальные магнитные силы, необходимые для резания, возникают только в зоне выхода из рабочего зазора и передаются остальной массе зерен порошка механически.

Гипотеза [1], на наш взгляд, достаточно реально объясня-ет процесс съема металла при использовании в качестве по-рошка кермета, однако она не учитывает всех факторов, сопут-ствующих процессу.

Во-первых, здесь не учитывается возникновение сил давле-ния ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверх-ность за счет механического заклинивания зерен в узкой части рабочего зазора, а также вследствие появления тангенциаль-ных сил за счет градиента магнитной индукции на границе участков с различным магнитным сопротивлением. Эти участ-ки возникают за счет неравномерного распределения ферро-магнитного порошка в зазоре. Кроме того, они могут быть искусственно созданы концентраторами магнитного поля, вы-полненными в виде рифлений на рабочей поверхности полюс-ных наконечников.

Во-вторых, автор [1] рассматривает введение химически или поверхностно-активных охлаждающих жидкостей в рабо-чую зону как фактор, изменяющий величину сил, необходимых для резания, и на этой основе интенсифицирующий процесс.

На наш взгляд, интенсификация в этом случае в значительной большей степени происходит за счет образования на обрабатываемой поверхности и удаления окисных пленок, а также за счет электрохимического растворения обрабатываемой поверхности.

Известно [5], что слой окислов толщиной 14 Å образуется на железе за 0,05 сек, на свинце — за 0,42 сек, на меди — за 1,11 сек. На стали этот процесс протекает значительно интенсивнее.

В специфических условиях магнитно-абразивной обработки происходит значительная активизация окислительных процессов, вызванная воздействием пульсирующего магнитного поля. С другой стороны, ферромагнитные материалы при воздействии на них магнитного поля изменяют свои линейные размеры и объем. Это явление носит название магнитострикции. Различают линейный и объемный магнитострикционные эффекты. Мерой магнитострикционного эффекта является относительное изменение линейных размеров ферромагнетиков, которое может быть описано уравнением

$$h = \frac{\Delta l}{l}, \quad (1.1)$$

где Δl — изменение размеров тела; l — размер тела до внесения в магнитное поле; h — константа, характеризующая интенсивность магнитострикции; h может быть положительной (удлинение тела) и отрицательной (уменьшение размеров тела).

Количественные характеристики констант ферромагнетиков при воздействии магнитных полей в области насыщения следующие [2]: для сплавов железа $h = +32 \cdot 10^{-6}$; для Fe_3O_4 $h = -15,3 \cdot 10^{-6}$.

Различают самопроизвольную и истинную магнитострикцию.

Самопроизвольная магнитострикция, связанная с нарушением равновесия между углами кристаллической решетки, проявляется при условии намагничивания кристаллов в целом.

Истинная магнитострикция представляет собой изменение длин ферромагнетиков в результате воздействия на них внешнего магнитного поля. В связи с возбуждением магнитных эффектов при обработке магнитно-абразивным способом деталей из ферромагнетиков в последних возникают оба вида магнитострикции.

Под влиянием внешнего магнитного поля в пределах насыщения сплавов Fe происходит изменение объема материала обрабатываемых деталей. Согласно теории магнитострикции, разработанной Кирхгофом, связь между объемным измене-

нием тел в направлении трех осей и намагничиванием этих тел может быть выражена

$$M = [(N - N')(\lambda_x + \lambda_y) - N''\lambda_z] H_x, \quad (1.2)$$

где N — магнитная восприимчивость ферромагнетика; N' , N'' — новые постоянные; λ_x , λ_y , λ_z — линейные изменения по направлениям осей; $M = HN$ — намагниченность; H — напряженность магнитного поля.

По этой теории внутри намагниченного тела действуют силы «всестороннего сжатия» (подобно гидростатическому), которое может быть определено из уравнения

$$P_1 = \frac{BH}{8\pi} - \frac{N'H^2}{2}. \quad (1.3)$$

Кроме того, действует натяжение P_2 по направлению линий осей:

$$P_2 = \frac{BH}{4\pi} + \frac{N'H^2}{2}. \quad (1.4)$$

Из уравнений (1.3) и (1.4) очевидно, что поверхностное давление P_2 , направленное внутрь ферромагнетика, несравненно больше давления P_1 , действующего изнутри. Это приводит к возникновению внутренних дополнительных напряжений, изменяющих характеристики обрабатываемого материала и, возможно, являющихся одной из причин увеличения износостойкости поверхностного слоя металла детали после магнитно-абразивной обработки.

Исследуя влияние циклического знакопеременного нагружения образцов на скорость протекания окислительных процессов, Бернар [2] установил, что цикл растяжение — сжатие приводит к растрескиванию окислов и ускорению реакции окисления.

Исследования [2, 5] также показывают, что окислы обладают повышенной хрупкостью.

Противонаправленный характер деформации основного металла и окисной пленки под воздействием магнитного поля приводит к возникновению срезающих усилий на поверхности их раздела. По абсолютной величине деформация ферромагнитных тел незначительна (несколько микрон на 100 мм), однако она приводит к возникновению напряжений в окисных пленках и растрескиванию их, что облегчает удаление окислов с обрабатываемой поверхности и образование ювенильных поверхностей.

Работами ряда ученых установлено, что смазочно-охлаждающие жидкости имеют сильную химическую агрессивность

по отношению к свежееобразованным поверхностям, поэтому образование окисных пленок происходит весьма интенсивно.

При магнитно-абразивной обработке процесс удаления и образования новых окисных пленок носит дискретный характер. Окисные пленки, образовавшиеся на обрабатываемой поверхности в определенный момент времени, разрушаются, срываются, а затем образуются вновь. Последнее позволяет утверждать, что окислительные процессы, происходящие на обрабатываемой поверхности, являются одним из значимых факторов, влияющих на съем металла при магнитно-абразивной обработке.

Вторым фактором, который не учитывается выдвинутыми ранее гипотезами, является электрохимическое растворение обрабатываемой поверхности. Это явление сводится к следующему.

Процессы магнитно-абразивной обработки сопровождаются индуцированием вихревых токов, которые создают, согласно закону Ленца, переменный магнитный поток, противоположный по направлению внешнему магнитному полю. Суммарный магнитный поток внешнего поля и поля вихревых токов в зазоре между обрабатываемой поверхностью и полюсными наконечниками изменяется пропорционально скорости вращения детали и скорости осцилляции. Анализ осциллограмм и данных измерения магнитного поля в зазоре показывает, что эти колебания в десятки раз превосходят переменную составляющую магнитного поля, создаваемого пульсирующим электрическим током, питающим катушки электромагнитов, при неподвижном положении детали между полюсными наконечниками.

Наличие переменного магнитного поля в зоне обработки вызывает индуцирование электродвижущей силы в контуре ферромагнитный порошок — обрабатываемая деталь, что влечет за собой появление электрического тока в этом контуре, направление которого зависит от положения контура в рабочем зазоре. Так как ферромагнитный порошок в зазоре может перемещаться, то появляется вероятность разрыва контура порошок — деталь, что приводит к возникновению электрохимического растворения обрабатываемой поверхности или поверхности ферромагнитного порошка. Процесс электролиза, как известно, сопровождается выделением атомарного кислорода, обладающего сильной химической активностью, что способствует энергичному образованию окисных пленок на поверхностях детали и ферромагнитного порошка. Электролитическое растворение и окисление обрабатываемой поверхности играет также определенную роль при съеме металла. Это подтверждается исследованиями Ю. М. Барона [1], использовавшего в качестве СОЖ раствор NaCl, являющийся

хорошим электролитом и использующийся при анодно-механической обработке.

Анодное растворение и окисление периферийных слоев ферромагнитной основы зерен кермета обеспечивает вскрытие глубинной абразивной фракции ферромагнитного порошка и введение в контакт с обрабатываемой поверхностью новых режущих зерен, что интенсифицирует процесс съема металла. Последнее условие подтверждается возрастанием режущей способности ферромагнитного порошка после его работы в течение 45 сек. Однако для детального изучения явления необходимы дальнейшие исследования.

В проведенных ранее исследованиях не рассмотрен характер явлений в зоне контакта абразивных зерен и обрабатываемой поверхности и не определен удельный вес абразивного воздействия ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность. Вместе с тем известно, что для удаления следов предшествующей обработки на деталях, шлифованных до 8-го класса чистоты, и получения обработанной поверхности 11-го класса необходимо снять припуск, равный 16—20 мкм.

Характерной особенностью процесса магнитно-абразивной обработки является возможность достижения этой же чистоты поверхности при удалении значительно меньшего припуска, равного 4—6 мкм.

Для объяснения указанной особенности авторами проведено исследование характера деформации поверхностного слоя при обработке единичным ферромагнитным зерном, так как по характеру явлений в зоне единичного контакта ферромагнитного зерна с обрабатываемой поверхностью можно судить о явлениях процесса в целом.

Работами Н. И. Богомолова [3] установлено, что критерием оценки характера деформации, происходящей вследствие воздействия абразивного зерна на обрабатываемую поверхность, может служить коэффициент диспергирования, представляющий собой отношение веса диспергированного (удаленного) металла к теоретическому весу объема царапины:

$$K = \frac{G_d}{G_t}, \quad (1.5)$$

где K — коэффициент диспергирования; G_d — вес диспергированного металла; G_t — теоретический вес объема металла царапины.

При величине коэффициента диспергирования, равном 0, происходит только пластическое деформирование металла. С увеличением коэффициента K возможно снятие стружки. Если $K=1$, происходит только срезание металла без его пластического деформирования. Однако коэффициент дисперги-

рования не может принять значение, равное 1, так как всегда наряду со снятием металла будет происходить и его пластическая деформация.

Для подтверждения наличия пластических деформаций В. И. Жданович [10] провел экспериментальные исследования съема металла и определение коэффициента диспергирования при магнитно-абразивной обработке. Исследование включало определение характера деформирования профиля микроцарапин при магнитно-абразивной обработке и установление их количественных характеристик.

Теоретический вес удаленного металла

$$G_{\text{ц}} = S_{\text{ц}} l g, \quad (1.6)$$

где $S_{\text{ц}}$ — площадь царапины; l — длина царапины; g — удельный вес металла.

Проведенные исследования и расчеты [10] показали, что коэффициент диспергирования при магнитно-абразивной обработке образцов из закаленной стали 45 составляет величину 0,45—0,90.

Анализ профилограмм микроцарапин позволил установить, что процесс удаления металла сопровождается не только отделением микростружек. В некоторых условиях происходит перемещение металла на края микронеровностей, что также говорит о наличии пластического деформирования обрабатываемой поверхности.

А. А. Маталли [9] считает, что при обработке абразивными зёрнами, имеющими более закругленную вершину, усиливается полирующее действие и увеличивается степень пластической деформации поверхностного слоя, которая вызывает появление в нем значительных по величине остаточных напряжений сжатия.

При обработке керметом ЭБМ40+80%Fe, имеющем в своем составе абразивные частицы электрокорунда с оплавленными при спекании режущими кромками, создаются условия, благоприятные для возникновения пластического деформирования поверхностного слоя. Кроме того, в наших исследованиях зафиксированы остаточные напряжения сжатия, достигающие до 128 кг/мм^2 , что также свидетельствует о значительном деформировании поверхностного слоя.

Следовательно, на основании вышесказанного можно утверждать, что при магнитно-абразивной обработке керметом имеет место пластическое деформирование поверхностного слоя, а это значит исключается оплавление обрабатываемой поверхности микротоками, так как оплавленный поверхностный слой характеризуется совершенно другими закономерностями своего формирования.

Кроме того, абразивное воздействие частиц электрокорунда на обрабатываемую поверхность включает микрорезание, сопровождающееся отделением стружек металла.

Е. Н. Маслов [8] установил, что микроразрушение металла при царапании закаленной стали возможно при величине коэффициента $K=0,25$. С повышением пластичности деформируемого металла величина коэффициента диспергирования понижается. У относительно хрупких металлов и сплавов (закаленная сталь, чугун) $K=0,8-0,9$, у вязких (отожженная сталь, армо-железо) $K=0,3-0,5$.

По существующим в настоящее время представлениям, пластическое отеснение металла по краям царапины происходит при деформировании его округленными остриями до некоторой глубины $h_{кр}$, а разрушение, скалывание и стружкообразование — при глубине деформирования $h_{кр}$ и более.

Известно [8], что процесс снятия стружки зависит от фактического переднего угла резания зерна (рис. 1.2), определяемого формулой

$$\gamma_x = \arcsin \frac{\rho - a_x}{\rho}, \quad (1.7)$$

где γ_x — передний угол в точке \bar{X} ; a_x — толщина снимаемого слоя в этой точке; ρ — радиус округления вершины зерна. При $a_x \rightarrow 0$ величина γ_x стремится к $\frac{\pi}{2}$. В этом случае сдвиг элемента становится невозможным.

Преобразуя формулу (1.7) и заменяя a_x на a_d и γ_x на γ_d , получаем толщину снимаемого слоя по всей длине контакта

$$a_d = \rho (1 - \sin \gamma_d), \quad (1.8)$$

где γ_d — величина переднего угла резания, при которой начинается процесс стружкообразования.

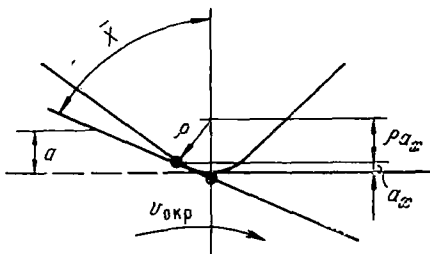


Рис. 1.2. Определение фактического переднего угла при снятии стружки абразивным зерном

2. Кинематика движения ферромагнитных элементов в магнитном поле

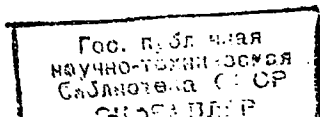
Характер относительного перемещения ферромагнитных зерен по обрабатываемой поверхности при магнитно-абразивной обработке наружных цилиндрических поверхностей определяется вращением и осциллирующим движением детали, перемещением ферромагнитного порошка в направлении вектора ее окружной скорости и скорости осцилляции, а также перемещением отдельных зерен из контактирующих с обрабатываемой поверхностью слоев в глубинные.

Ферромагнитные зерна порошка в рабочем зазоре за счет сил магнитного поля прижимаются друг к другу и образуют упругую уплотненную массу, в которой можно выделить явно выраженные цепочки зерен. Ферромагнитный порошок перемещается по рабочему зазору общей массой, кроме того, отдельные зерна переносятся из зоны входа порошка в рабочий зазор в зону выхода. Перемещение зерен по зазору происходит вследствие выноса их из массы порошка силами резания, возникающими в зоне динамического контакта порошка с обрабатываемой поверхностью, а также силами трения. Отделившиеся от общей массы зерна прижимаются силами магнитного поля к обрабатываемой поверхности и переносятся по рабочему зазору, а также из одного зазора в другой. Эти зерна вследствие незначительной скорости относительного перемещения по обрабатываемой поверхности не производят съема металла. Процесс переноса способствует быстрому заполнению ферромагнитным порошком обоих рабочих зазоров.

В процессе обработки ферромагнитные зерна разрушаются и изменяют свою форму. Ориентированное резание можно рассматривать при этом как результат введения в контакт с обрабатываемой поверхностью абразивных частиц из глубинных слоев зерна кермета, а также переориентации изношенных зерен, расположенных на поверхности, или введения в работу зерен кермета из глубины рабочего зазора.

Неопределенность положения ферромагнитных зерен в рабочем зазоре и абразивных частиц в отдельном зерне кермета при наличии их направленного перемещения из контактирующего слоя в глубину рабочего зазора определяет дискретный характер взаимодействия режущих элементов и обрабатываемой поверхности детали.

Особенностью кинематики процесса является отличие траектории перемещения единичных ферромагнитных зерен и полуспрессованной массы порошка. Это обусловлено граничным трением зерен, а также возникновением зон механического



заклинивания порошка в рабочем зазоре. Очевидно, что закономерности, полученные при исследовании кинематики единичного ферромагнитного элемента в работе [6], не отражают течения процесса в реальных условиях обработки. Поэтому в наших исследованиях кинематика процесса изучалась в условиях, идентичных процессу обработки. Для исследования был использован известный принцип обобщенных координат, заключающийся в том, что взаимное расположение ферромагнитных зерен или их цепочек и обрабатываемой поверхности определяется положением ферромагнитного зерна в зазоре по радиусу, углу поворота и расстоянию между элементами в данный момент времени. Эти координаты можно привести к обобщенной геометрической величине q , которая определяет положение центра тяжести ферромагнитного зерна в данный момент. Следовательно, изменение обобщенных координат ферромагнитных зерен определяет относительное перемещение порошка в рабочем зазоре. Исследование включало определение изменения обобщенных координат зерен в зависимости от изменения технологических параметров процесса: магнитной индукции, величины рабочего зазора, окружной скорости вращения детали и исходной шероховатости обрабатываемой поверхности.

Методика проведения экспериментов. Определение изменения обобщенных координат ферромагнитных зерен в рабочем зазоре производилось путем кино съемки процесса обработки образцов скоростью кино съемочной камерой СКС-1М на экспериментальной установке. Скорость кино съемки составляла 1100 кадров в секунду. Для определения углового перемещения ферромагнитных зерен по рабочему зазору на торце образцов и полюсных наконечников была нанесена угловая шкала с ценой деления по центральному углу 3° . Анализ кинограмм производился на монтажном столе типа «Экран-8». Скорость углового перемещения ферромагнитных зерен определялась по рабочему зазору путем подсчета количества кадров кинограммы за время перемещения центра тяжести зерна на одно деление по угловой шкале. Кроме того, угловое перемещение зерна по рабочему зазору определялось путем наложения углового шаблона на экран монтажного столика, а время прохождения одного кадра — по отметчику времени. Скорость относительного перемещения ферромагнитных зерен в направлении вектора скорости осцилляции определялась по кинограммам процесса обработки образцов на станке мод. МАС-1. Отсчет величин перемещения производился по шкале с ценой деления 1 мм, нанесенной на плоскости скоса полюсного наконечника.

Траектория движения зерна по поверхности детали. Траектория относительного перемещения зерен ферромагнитного

порошка и обрабатываемой поверхности в направлении вектора скорости осцилляции описывается уравнением синусоиды

$$S(t) = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.9)$$

где φ — фаза синусоиды; t — время; ω — угловая частота; A — амплитуда осцилляции детали.

Угловая частота ω связана с периодом колебания T выражением

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (1.10)$$

Величина амплитуды равна половине длины хода детали за цикл:

$$A = \frac{h}{2}, \quad (1.11)$$

где h — размах колебания детали за цикл осцилляции.

Так как при магнитно-абразивной обработке ферромагнитные зерна перемещаются в направлении вектора скорости осцилляции, то действительная амплитуда перемещения их по обрабатываемой поверхности A_3 отличается от амплитуды колебания детали на величину ΔA

$$A_3 = A - \Delta A. \quad (1.12)$$

Подставив значение A из выражения (1.11), получим

$$A_3 = \frac{h}{2} - \Delta A, \quad (1.13)$$

где ΔA — величина отставания, которую можно выразить как функцию от изменения обобщенной координаты в направлении вектора скорости осцилляции, т. е.

$$\Delta A = \frac{dq_{\text{осц}}}{dt}. \quad (1.14)$$

Уравнение искомой кривой после замены A и ω их значениями имеет вид

$$S(t) = \left[\frac{h}{2} - \Delta A \right] \sin \left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi \right). \quad (1.15)$$

Уравнение (1.15) решается как функция времени t . Оно описывает траекторию движения ферромагнитных зерен и обрабатываемой поверхности в направлении вектора скорости осцилляции.

Траекторию движения ферромагнитных зерен по обрабатываемой поверхности можно установить из приведенного ниже анализа. Известно, что уравнение вращения детали имеет вид

$$y = vt, \quad (1.16)$$

где v — скорость вращения детали, $м/мин$; t — время, $мин$.

При магнитно-абразивной обработке ферромагнитные зерна в рабочем зазоре перемещаются не только в направлении вектора скорости осцилляции, но и в направлении вектора окружной скорости, поэтому с учетом относительного перемещения зерен уравнение (1.16) имеет вид

$$y' = vt - v_{\text{отн}}, \quad (1.17)$$

где $v_{\text{отн}}$ — скорость относительного перемещения ферромагнитных зерен в направлении вектора окружной скорости детали.

Но скорость $v_{\text{отн}}$ можно выразить как функцию изменения обобщенной координаты положения зерна в направлении вектора окружной скорости

$$v_{\text{отн}} = \frac{dq_{\text{окр}}}{dt}, \quad (1.18)$$

где $dq_{\text{окр}}$ — изменение обобщенной координаты положения ферромагнитного зерна за время dt .

Тогда уравнение вращения детали с учетом перемещения ферромагнитных зерен

$$y' = vt - \frac{dq_{\text{окр}}}{dt}. \quad (1.19)$$

Отсюда

$$t = \frac{\Delta A + y'}{v}. \quad (1.20)$$

Подставив в выражение (1.15) значение t из уравнения (1.20) и обозначив $S(t)$ через x , а ΔA — через его значение из уравнения (1.14), получим уравнение траектории движения ферромагнитного зерна на поверхности детали с учетом реальных условий обработки

$$x = \left[\frac{h}{2} - \frac{dq_{\text{осц}}}{dt} \right] \sin \left[\frac{2\pi}{T} \left(\frac{\frac{dq_{\text{окр}}}{dt} + y'}{v} \right) + \varphi \right]. \quad (1.21)$$

Скорость относительного перемещения зерна. От скорости относительного перемещения ферромагнитных зерен и обрабатываемой поверхности зависит скорость микрорезания абразивными частицами, поэтому ее определение имеет не только теоретическое, но и практическое значение. Продифференцировав уравнение движения (1.21) по соответствующим параметрам, получим скорость каждого движения:

$$v_{\text{окр}} = \frac{dy}{dt}, \quad (1.22)$$

$$v_{\text{осц}} = \frac{dx}{dt}, \quad (1.23)$$

$$v_{\text{отн}} = \frac{dz}{dt}. \quad (1.24)$$

Но $v_{\text{окр}}$ можно выразить и зависимостью

$$v_{\text{окр}} = \frac{\pi D n}{1000} \text{ м/мин}, \quad (1.25)$$

где D — диаметр обрабатываемой детали, мм; n — число оборотов детали, мин.

Скорость осцилляции

$$v_{\text{осц}} = v_{\text{окр}} \operatorname{tg} \alpha, \quad (1.26)$$

где α — угол между направлением вектора окружной скорости и вектором мгновенной скорости осцилляции за цикл обработки.

Скорость осцилляции можно выразить и другими величинами:

$$v_{\text{осц}} = 2Af, \quad (1.27)$$

где A — величина амплитуды колебаний детали по отношению к ферромагнитным зернам; f — частота колебания.

Следовательно,

$$v_{\text{окр}} \operatorname{tg} \alpha = 2Af.$$

Тогда

$$f = \frac{v_{\text{окр}} \operatorname{tg} \alpha}{2A} \cdot 1000 \text{ дв. ход/мин}, \quad (1.28)$$

где 1000 — коэффициент, учитывающий перевод метров в миллиметры.

Так как скорость осцилляции за период T изменяется от 0 до максимального значения, то средняя величина

$$v_{\text{осц}} = \frac{1}{T} \int_0^T v'_{\text{осц}} dt. \quad (1.29)$$

Подставив в уравнение (1.29) значение $v_{\text{осц}}$ из (1.27) и значение A_3 из (1.13), получим

$$v_{\text{осц}} = \frac{1}{T} \int_0^T 2f \left(\frac{h}{2} - \Delta A \right) dt, \quad (1.30)$$

откуда

$$v_{\text{осц}} = 2f \left(\frac{h}{2} - \Delta A \right). \quad (1.31)$$

Уравнение (1.24) определяет относительное перемещение ферромагнитных зерен по рабочему зазору в направлении вектора окружной скорости. Но это перемещение определяется и как величина изменения обобщенной координаты за время dt , т. е., как и следует из (1.18),

$$v_{\text{окр}} = \frac{dq_{\text{окр}}}{dt}.$$

Действительная окружная скорость

$$v'_{\text{окр}}q = v_{\text{окр}} - v_{\text{отн}}. \quad (1.32)$$

Подставив в уравнение (1.32) значение $v_{\text{окр}}$ из уравнения (1.25) и значение $v_{\text{отн}}$ из уравнения (1.18), получим

$$v'_{\text{окр}}q = \frac{\pi Dn}{1000} - \frac{dq_{\text{окр}}}{dt}. \quad (1.33)$$

При осцилляции детали со скоростью $v_{\text{осц}}$, которая имеет тот же порядок, что и $v_{\text{окр}}$, следует рассматривать относительную скорость перемещения ферромагнитных зерен и обрабатываемой поверхности $v_{\text{рез}}$ как геометрическую сумму двух составляющих — $v_{\text{осц}}$ и $v_{\text{окр}}$:

$$v_{\text{рез}} = \sqrt{v_{\text{окр}}^2q + v_{\text{осц}}^2}. \quad (1.34)$$

Подставив значение указанных скоростей из уравнений (1.33), (1.31) в уравнение (1.34), получим

$$v_{\text{рез}} = \sqrt{\left[\frac{\pi Dn}{1000} - \frac{dq_{\text{окр}}}{dt} \right]^2 + \left[2f \left(\frac{h}{2} - \Delta A \right) \right]^2}. \quad (1.35)$$

Уравнение (1.35) определяет скорость относительного перемещения ферромагнитных зерен и обработанной поверхности в общем виде.

Анализ кинограмм движения ферромагнитных зерен по рабочему зазору в процессе магнитно-абразивной обработки показал, что величина этих перемещений ΔA в направлении вектора скорости осцилляции значительно меньше величин $v_{\text{окр}}$, $v_{\text{осц}}$ и $v_{\text{отн}}$ и, следовательно, для практических расчетов ею можно пренебречь. Тогда скорость относительного перемещения определится

$$v_{\text{рез}} = \sqrt{\left(\frac{\pi Dn}{1000} - \frac{dq_{\text{окр}}}{dt} \right)^2 + (2Af)^2}. \quad (1.36)$$

В уравнении (1.36) все параметры, за исключением $dq_{\text{окр}}/dt$, определяются технологическими особенностями процесса, а $dq_{\text{окр}}/dt = v_{\text{отн}}$ выражает величину относительного пе-

ремещения порошка по зазору. Определение ее значения и входило в задачу настоящего исследования.

В результате скоростной киносъемки реальной картины процесса магнитно-абразивной обработки и расшифровки кинограмм методами математической статистики с привлечением ЭВМ «Минск-22М» по стандартной программе многофакторного корреляционного анализа получено уравнение, характеризующее и адекватно описывающее изменение скорости относительного перемещения зерен порошка в зависимости от величины рабочего зазора δ (мм), магнитной индукции B (тл), окружной скорости вращения детали $v_{\text{окр}}$ (м/мин) и исходной шероховатости обрабатываемой поверхности R_a (мкм)

$$v_{\text{отн}} = 0,169 - 0,08B - 0,089\sigma - 0,091R_a - 0,004v_{\text{окр}} \text{ м/мин.} \quad (1.37)$$

Коэффициент множественной корреляции, полученный при математической обработке результатов, равен 0,896. Следовательно, эмпирическое уравнение (1.37) описывает процесс с большой степенью точности.

Дисперсный анализ показал, что наиболее значимыми факторами в уравнении (1.37) являются величина магнитной индукции B и исходная шероховатость поверхности обрабатываемой детали R_a .

3. Механизм съема металла

Процесс магнитно-абразивной обработки ферромагнитным порошком — керметом следует рассматривать как сочетание дискретного массового микроцарапания поверхностного слоя абразивными компонентами ферромагнитных зерен с абразивным износом, протекающим в зоне обработки, а также физическими и химическими явлениями, сопутствующими формообразованию поверхностного слоя.

В настоящем исследовании устанавливается значимость каждого отдельного фактора и их количественные характеристики.

Влияние абразивного резания. Доминирующими факторами в процессе формирования поверхностного слоя являются резание-микроцарапание абразивными компонентами ферромагнитных зерен, а также абразивный износ поверхности в результате трения ферромагнитных и абразивных частиц о деталь.

Абразивные частицы, внедряясь под действием сил магнитного поля в обрабатываемую поверхность, производят съем мельчайших стружек металла, а скольжение ферромагнитных

зерен по поверхности микроцарапания сопровождается упруго-пластическим деформированием металла.

Однако резание-микроцарапание не всегда сопровождается отделением стружек. В некоторых условиях происходит только перемещение металла на края микроцарапины или в углубление микронеровности.

Несовпадение вектора скорости резания при магнитно-абразивной обработке и следов предшествующего шлифования обеспечивает энергичное «смыкание» (заглаживание) микротрещин, которые остались на обрабатываемой поверхности от шлифования.

Для установления количественных характеристик процесса были проведены экспериментальные исследования съема металла (диспергирования) и определение коэффициента диспергирования при магнитно-абразивной обработке.

Известно, что истинный вес удаленного металла отличается от теоретического, подсчитанного по объему царапины. Критерием, характеризующим это явление, как указывалось выше, служит коэффициент диспергирования K , представляющий собой отношение веса удаленного металла к теоретическому весу металла царапины:

$$K = \frac{G_{\Delta}}{G_{\Pi}}$$

Для исследований применялись специальные зерна кермета длиной $\Delta = 1$ мм. Эксперименты проводились на станке мод. МАС-1.

Зерна помещались на обрабатываемую поверхность образцов, предварительно доведенных до 13-го класса чистоты, и при включенной магнитной системе (величина магнитной индукции 1,2 тл) деталь вручную проворачивалась на два оборота. Вручную проворачивался и механизм осцилляции детали, благодаря чему на образцах оставался след от зерна в виде винтовой линии. Теоретический вес удаленного металла G_{Π} определялся как произведение площади царапины на длину пути и на удельный вес металла.

Вес диспергированного металла определялся путем тщательного взвешивания образцов с точностью до 0,1 мг до и после обработки.

Замеры глубины царапины производились с помощью профилографа.

Выше отмечалось, что процесс снятия стружки зависит от фактического переднего угла резания зерна и было получено уравнение, позволяющее установить толщину срезаемой стружки,— формула (1.8). По этой формуле можно определить глубину внедрения абразивной фракции зерен, начиная

от которой происходит процесс стружкообразования, при известном переднем угле резания γ_d или наоборот, по глубине риски можно определить этот угол (см. рис. 1.2). При определенной толщине стружки величина коэффициента K достигает максимального значения, приближаясь к единице. Однако всегда $K < 1$, поскольку наряду со съемом металла при магнитно-абразивной обработке происходит его упругая и пластическая деформация.

Для получения количественных характеристик абразивного воздействия ферромагнитных зерен и установления значимости микрорезания при магнитно-абразивной обработке проведены эксперименты по определению величины удельного вольного съема металла при обработке порошками армко-железа и кермета с наложением и без наложения магнитного поля на образцах из термообработанной (твердость HRC 60—62) стали 20X. Эксперименты проводились при помощи специального устройства, смонтированного на магнитно-абразивном станке мод. МАС-3.

Ранее было установлено, что величина удельного давления ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность в зазоре 0,3 мм при $V = 1,1$ тл составляет 24,5 кг/см².

В применяемом приспособлении такое давление создавалось двумя тарированными пружинами через штоки и текстолитовые колодки. Зазор между деталью и охватываемыми полюсными наконечниками составлял 0,2—0,3 мм, что при величине ферромагнитных зерен $\Delta = 0,1$ мм исключало выброс последних из рабочей зоны. Достаточная длина пружин (свыше 300 мм) обеспечивала стабильность давления на протяжении всего цикла обработки. Угол охвата детали полюсными наконечниками составлял 50°. Следовательно, условия проведения опыта были максимально приближены к условиям обычной магнитно-абразивной обработки. По результатам экспериментов сделан вывод о значимости абразивного резания в процессе съема припуска металла.

Изменение производительности процесса при обработке без наложения магнитного поля в начальной стадии (первые 5—10 сек) существенно не отличается от обработки в магнитном поле. Однако при большей продолжительности процесса (до 30 сек) съем металла в первом случае к концу цикла обработки составлял примерно 85% производительности при полировании порошком в магнитном поле.

На наш взгляд, потеря производительности при обработке без наложения магнитного поля объясняется, во-первых, потерей режущих свойств ферромагнитного порошка вследствие уменьшения количества абразивной фракции в ферромагнитных зернах. Кроме того, абразивные компоненты ферромагнитных зерен, участвовавших в резании, теряют свои режущие

свойства вследствие притупления и разрушения режущих кромок. Во-вторых, снижение производительности происходит также из-за засаливания абразивной «щеточки» стружкой и продуктами разрушения ферромагнитных зерен. И наконец, при обработке без наложения магнитного поля затруднен процесс переориентации ферромагнитных зерен, так как режущий инструмент представляет в этом случае спрессованную твердую массу и отдельные зерна занимают одно положение на протяжении всего цикла обработки.

Проведенные эксперименты показывают, что наиболее эффективно можно интенсифицировать процесс путем улучшения режущей способности ферромагнитных зерен.

Эти выводы подтверждаются регрессионным анализом результатов магнитно-абразивной обработки ферромагнитным порошком, прошедшим предварительную приработку по несколько циклов в течение 15 сек и, следовательно, имевшем в своем составе различное количество абразивной фракции.

После математической обработки результатов экспериментов получено эмпирическое уравнение зависимости съема металла в весовых единицах G с заданной площади от количества абразивных компонентов Z в ферромагнитном зерне

$$G = 0,52 + 0,035Z. \quad (1.38)$$

Из уравнения (1.38) следует, что производительность процесса магнитно-абразивной обработки функционально связана с количеством абразивных компонентов, участвовавших в резании.

Исследования показали, что обработка производится отдельными ферромагнитными зёрнами, имеющими в своем составе до нескольких десятков абразивных включений в виде измельченных частиц исходного абразивного материала, а поэтому контакт абразивной фракции ферромагнитных зерен с обрабатываемой поверхностью дискретен — взаимодействуют отдельные частицы за элементарное время dt .

Время взаимодействия зависит от формы абразивных частиц, степени их закрепления и мест расположения в ферромагнитном зерне, расположения ферромагнитного зерна в зазоре, характера и величины действующей нагрузки.

Результаты экспериментов (рис. 1.3) показывают, что величина удельного весового износа при обработке без наложения магнитного поля и в магнитном поле функционально зависит от времени обработки. С наложением магнитного поля съем металла увеличивается для обоих порошков, но степень влияния магнитного поля при обработке керметом меньше, чем при обработке армко-железом.

На наш взгляд, возрастание удельного весового износа при обработке в магнитном поле как керметом, так и армко-желе-

зом имеет одну природу и объясняется влиянием физических и химических явлений, сопутствующих процессу магнитно-абразивной обработки.

Из рис. 1.3 видно, что при обработке керметом прирост съема через 10—15 сек работы монотонно уменьшается. Это, очевидно, происходит за счет снижения режущей способности ферромагнитного порошка. Увеличение времени обработки приводит к затуплению и выкрошиванию из ферромагнитной основы абразивных частиц электрокорунда. Интенсивность микрорезания при этом снижается вследствие частичного вымывания эмульсией и выброса центробежными силами свободных абразивных частиц. В контакт с обрабатываемой поверхностью вступают зерна кермета, периферийные слои которых состоят в основном из ферромагнитной основы — зерен порошка железа. Поэтому на последней стадии происходит снижение микрорезания.

Съем металла при обработке порошком армко-железа без наложения магнитного поля (рис. 1.3, кривая 4) объясняется износом обрабатываемой поверхности за счет трения.

Абразивный износ обрабатываемой поверхности. Наряду со снятием припуска за счет микроцарапания в процессе магнитно-абразивной обработки происходит изнашивание обрабатываемой поверхности в результате трения о нее ферромагнитных и абразивных частиц.

И. В. Крагельский [7] отмечает, что износ контактирующих тел наблюдается даже при полном отсутствии твердых посторонних частиц.

Для установления количественных характеристик износа обрабатываемой поверхности нами были проведены исследования обрабатываемости образцов из стали 20Х, имевших твердость $HRC\ 58-62$, ферромагнитным порошком зернистостью 0,1 мм из армко-железа. Твердость армко-железа значи-

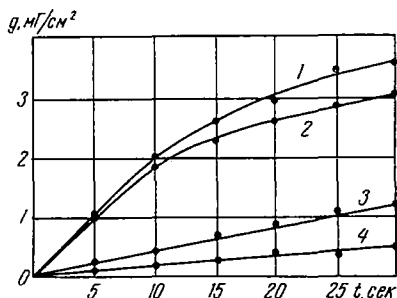


Рис. 1.3. Изменение удельного съема металла g в зависимости от времени обработки: 1 и 2 — ферромагнитным порошком кермета ЭБМ 40+80% Fe в магнитном поле и без наложения поля; 3 и 4 — порошком армко-железа в магнитном поле и без наложения поля

тельно ниже, чем обрабатываемых образцов, и, следовательно, процесс резания исключался.

Результаты экспериментов показывают, что производительность обработки без наложения магнитного поля функционально зависит только от времени обработки.

Введем понятие удельного весового абразивного износа, который представляет собой вес металла, удаляемый с единицы номинальной площади контакта за единицу пути трения,

$$g_a = \frac{G_a}{S}, \quad (1.39)$$

где g_a — удельный абразивный износ, $мг/см^2$; G_a — вес удаленного в результате износа металла, $мг$; S — площадь обрабатываемой поверхности, $см^2$.

Результаты экспериментов (рис.1.3) показывают, что величина удельного весового износа при обработке без наложения магнитного поля функционально зависит от времени обработки. Изменение производительности в этом случае представляет собой прямую линию, угол подъема которой к оси абсцисс определяется уравнением

$$tg \alpha = \frac{g_a}{t}, \quad (1.40)$$

где t — время обработки, $сек$.

При обработке с наложением магнитного поля величина износа не может быть однозначно определена в зависимости от времени обработки. Характер изменения ее аналогичен предыдущему случаю, однако абсолютная величина почти в два раза больше.

Роль абразивного резания и действия микротоков. Опыты проводились на станке МАС-1А при $B=1,5 тл$; $t=2 мин$; $\delta=5 мм$ для шариков и $3 мм$ для ферритов. Образцами служили кольца подшипника № 984905 ($HRC 58-60$).

В качестве рабочих элементов использовались стальные шарики диаметром 1 и 1,5 мм и порошки ферритов, которые обладают высоким удельным электросопротивлением. Поверхность детали и шариков до и после полирования осматривалась на микроскопе типа МИМ-7. Кроме того, записывались профилограммы поверхности детали, а съем материала фиксировался на весах типа ВИА-200М.

Исследования показали, что индуцированные в замкнутом контуре деталь — шар — полюсный наконечник микротоки практически на съем металла не влияют. При обработке же порошками феррита съем металла в зависимости от скорости вращения детали изменяется от 10 до 25 мг.

Роль абразивного и токового факторов в процессе съема металла с теоретической точки зрения может быть оценена

так: эффекты действия микротоков возникают за счет отклонения и срыва ферроэлемента. Поэтому для установления их величины можно воспользоваться дифференциальным уравнением движения элемента из [6]

$$m \frac{dv}{dt} = F_{\text{дв}}, \quad (1.41)$$

где $F_{\text{дв}}$ — сила, заставляющая двигаться зерно порошка,

$$F_{\text{дв}} = P_z(\varphi) - P_y(\varphi) \frac{f_{\text{тр}}(\operatorname{tg} \alpha \pm 1)}{\operatorname{tg} \alpha - f_{\text{тр}}};$$

$f_{\text{тр}}$ — коэффициент трения элемент — деталь; α — угол между вектором силы $P_y(\varphi)$ и плоскостью микронеровности; $P_y(\varphi)$; $P_z(\varphi)$ — нормальная и тангенциальная силы, действующие на рабочий элемент; φ — угол смещения ферромагнитного элемента.

С другой стороны, при срыве элемента во время обратного перескока в равновесное положение он может приобрести некоторую скорость. При ударах о микровыступы детали движущийся элемент может привести к их деформации и срезу. В последнем случае имеет место перераспределение энергии между ферроэлементом и обрабатываемой поверхностью.

Энергетическую оценку описанного эффекта можно получить, предположив, что съем металла идет за счет механизма микродеформации, аналогичного тому, который лежит в основе определения твердости материала по методу Мартенса [4].

В этом случае ширина царапины алмазного конуса линейно связана с глубиной погружения в материал.

Тогда по определению

$$(\Delta h)^2 = k \frac{P}{H_M}, \quad (1.42)$$

где Δh — глубина царапины; k — коэффициент; P — нагрузка; H_M — твердость по Мартенсу.

Работа разрушения будет пропорциональна величине разрушенной поверхности S , которая в свою очередь пропорциональна глубине царапины. Следовательно, работа

$$A = cS = c_1 (\Delta h)^2 = c_1 k \frac{P}{H_M}, \quad (1.43)$$

где c , c_1 — коэффициенты пропорциональности.

Тогда отношение работы, затраченной на разрушение элемента порошка, к работе, идущей на диспергирование металла деталл, обратно пропорционально отношению их твердости:

$$\frac{A_{\text{элемент}}}{A_{\text{мет}}} = \frac{H_{\text{мет}}}{H_{\text{элемент}}} = \text{const.}$$

Для определения работы разрушения имеем систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{mv^2}{2} = A_{\text{эле}} + A_{\text{мет}}, \\ \frac{A_{\text{мет}}}{A_{\text{эле}}} = \frac{H_{\text{эле}}}{H_{\text{мет}}} = \text{const.} \end{cases} \quad (1.44)$$

Решая систему (1.44), получаем

$$A_{\text{мет}} = \frac{c}{c+1} \cdot \frac{mv^2}{2}. \quad (1.45)$$

Оценим скорость перескока ферромагнитного элемента в равновесное положение, используя известные экспериментальные значения требуемых величин. Считаем движение ускоренным. Так как при отклонении режущего элемента от равновесного состояния сила $P_z(\varphi)$ возрастает, а $P_y(\varphi)$ падает, при быстром вращении детали образуется перепад сил.

Тогда

$$S = \frac{\varphi}{360^\circ} \cdot 2\pi R_{\text{дет}} = \frac{aI^2}{2}; \quad (1.46)$$

$$v = aI; \quad F_{\text{дв}} = ma = P_z(\varphi) - bP_y(\varphi),$$

где

$$b = \frac{f_{\text{тр}}(\text{tg } \alpha + 1)}{\text{tg } \alpha - f_{\text{тр}}}.$$

Отсюда получаем выражение для искомой работы

$$A = \frac{c}{c+1} \pi R \frac{\varphi}{180^\circ} [P_z(\varphi) - bP_y(\varphi)]. \quad (1.47)$$

Подставив в формулу (1.47) значения из [6] $c=2$, $R_{\text{дет}} = 10 \text{ мм}$, $\varphi = 10^\circ$, $P_z(\varphi) = 57 \text{ Г}$, $P_y(\varphi) = 11 \text{ Г}$, $b = 2,53$, получим, что элемент способен выполнить механическую работу, затрачиваемую на процесс резания, равную $2 \cdot 10^{-3} \text{ дж}$. Измеренная же в [6] величина индуцированных токов составляла 300 мкА , а возможное значение выделенной при микроразряде энергии — $6,75 \cdot 10^{-9} \text{ дж}$.

Таким образом, в зоне обработки одним элементом возможно следующее соотношение энергетических вкладов эффекта механической обработки и токового фактора:

$$A_{\text{мех}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ дж},$$

$$A_{\text{ток}} = 6,75 \cdot 10^{-9} \text{ дж}.$$

Очевидно, что энергия, идущая на процесс механического разрушения, значительно превосходит энергию, обусловлен-

ную эффектом прохождения тока. Если при этом учесть, что при воздействии тока материал может разрушаться только проходя стадию плавления, что требует затрат энергии, больших, чем при механическом разрушении, то токовый эффект в процессе обработки станет еще менее значительным.

С целью обнаружения воздействия микроразрядов изучалось также состояние поверхности образца и самих шариков при увеличении до 500 раз. Поскольку площадь соприкосновения шариков с обрабатываемой поверхностью мала, это неизбежно должно приводить к большим плотностям тока в контакте, обуславливая эрозионное действие. Однако при изучении поверхности как шариков, так и обрабатываемой детали никаких эрозионных следов обнаружено не было, что еще раз говорит в пользу абразивного механизма съема металла.

Приведенная оценка и данные экспериментов позволяют считать, что основным фактором процесса магнитно-абразивной обработки является эффект механического разрушения материала.

4. Давление ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность

Давление ферромагнитных зерен на обрабатываемую поверхность определяет динамику процесса и является важнейшим параметром, влияющим на интенсивность съема металла и формирование поверхностного слоя.

Результаты исследования этого параметра, опубликованные в работах [1, 6], не дают однозначного представления о его качественных и количественных характеристиках. К области неисследованного относится и вопрос о распределении давления ферромагнитного порошка по длине рабочего зазора.

Первая попытка определить давление ферромагнитных зерен на обрабатываемую поверхность была предпринята в [6], однако при этом не учитывалась неоднородность магнитного поля в зазоре в радиальном направлении, а также монотонное изменение градиента индукции вдоль силовых линий. Кроме того, применяемый для экспериментов ферромагнитный элемент имел соотношение между массой и опорной поверхностью, на несколько порядков отличающееся от значения, которое имеют ферромагнитные зерна, применяемые в реальных условиях магнитно-абразивной обработки. Поэтому полученные значения удельного давления оказались значительно завышенными.

Автор [1] считает, что давление ферромагнитных зерен на обрабатываемую поверхность вызвано только силами магнитного поля, и не учитывает возрастания давления вследствие механического взаимодействия ферромагнитных зерен

в рабочем зазоре. Кроме того, выводы [1] не имеют достаточного экспериментального подтверждения.

Поэтому для определения количественных характеристик давления ферромагнитных зерен на полируемую поверхность в процессе обработки и распределения его по рабочему зазору нами было проведено экспериментальное и теоретическое исследование.

Методика проведения эксперимента. Исследование давления ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность проводилось на экспериментальной установке для обработки наружных цилиндрических поверхностей магнитно-абразивным способом.

По своим техническим данным установка обеспечивала параметры процесса в необходимом диапазоне. Магнитная система позволяла изменять величину магнитной индукции в зазоре в диапазоне от 0 до 1,8 тл, а механизмы — окружную скорость вращения детали от 0 до 180 м/мин и скорость осцилляции до 10 м/мин. Диапазон изменения амплитуды осцилляции составлял 0—12 мм. Привод вращения и осцилляции осуществлялся от электродвигателей постоянного тока установленной мощностью 2,1 квт.

Для экспериментального определения удельного давления ферромагнитного порошка применялась специальная динамометрическая оправка (рис. 1.4), обеспечивающая фиксацию величины давления в рабочем зазоре.

Измерение давления ферромагнитного порошка производилось при обработке специальных сменных втулок 12, изготовленных из стали 20Х и имевших твердость после цементации и закалки HRC 58—60. Втулки имели измерительный элемент 11, выполненный в виде планки сечением 1×20 мм с наклеенными на нее тензорезисторами.

Динамометрическая система (рис. 1.4) состояла из натяжного устройства 1 и 2, токосъемных колец из латуни, которые фиксируются от проворота винтом 13, оправки 4, несущей втулку — образец, тензорезисторов 5 и 6, тарировочного рычага 8 с грузом 9. При работе сигнал от тензорезисторов поступал на соответствующее кольцо 3, а затем по проволочным струнам — на усилитель осциллографа, фиксировался его шлейфами или записывался.

При тарировке системы рычаг 8 устанавливался на ось 7 и своим большим плечом упирался в образец 12. На меньшем плече рычага 8 закреплялся трос для грузов 9. Для большей достоверности образец 12 при тарировке находился в зоне действия магнитной системы 10.

Ферромагнитный порошок воздействует на периферийную часть измерительной пластины, которая ориентирована таким образом, что давление порошка направлено вдоль боль-

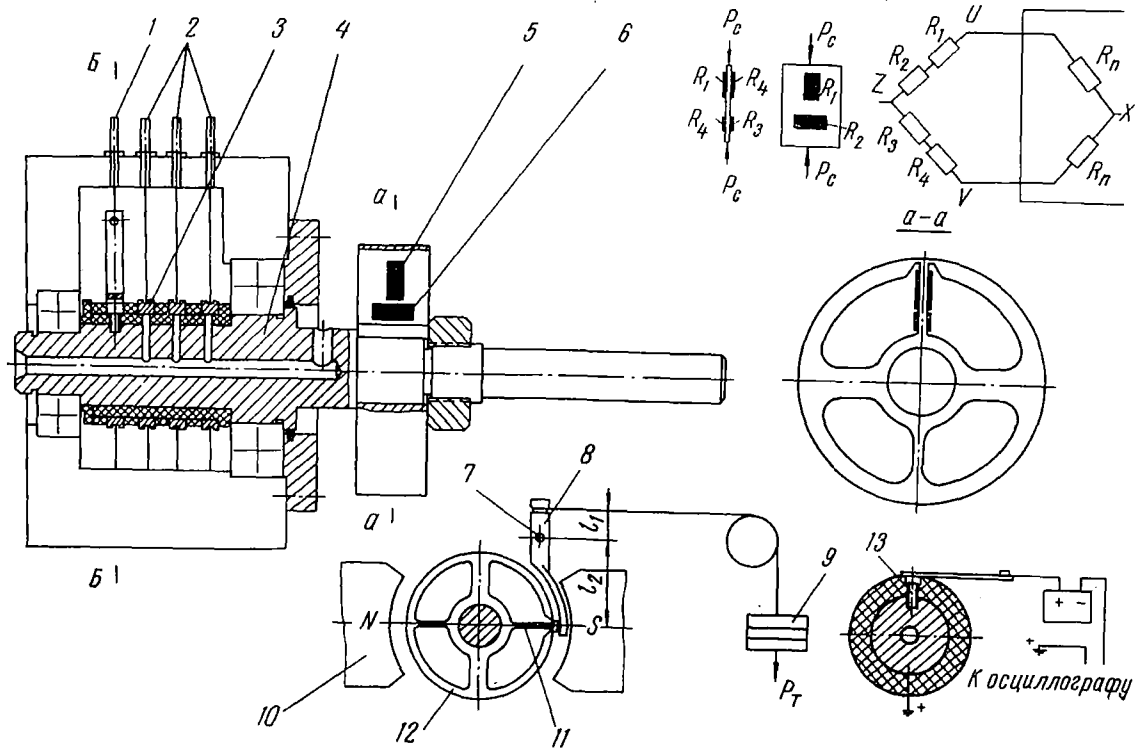


Рис. 1.4. Динамометрическая оправка и схема ее тарировки

шей ее оси. Под действием силы давления ферромагнитного порошка в процессе обработки пластина испытывает деформацию продольного изгиба и сжатия. Для исключения влияния изгиба пластины на результаты определения давления применена схема наклейки тензорезисторов, фиксирующая только деформацию сжатия. В качестве измерительных элементов использовались проволочные тензорезисторы, соединенные по полумостовой схеме с двумя активными и двумя компенсирующими резисторами.

При наклейке тензорезисторов по выбранной схеме работают два активных (R_1 и R_2) и два компенсирующих (R_3 и R_4) резистора. Компенсация воздействия составляющей изгиба на показания приборов достигается тем, что активный и компенсирующие тензорезисторы наклеиваются друг против друга.

Для исключения составляющей давления от изгиба на граничных с измерительной планкой участках втулки 12 сделаны узкие глубокие надрезы. При обработке этих участков на измерительную планку передается только сила давления ферромагнитного порошка. Составляющая изгиба в этом случае не фиксируется измерительной схемой.

Возмущения сопротивлений тензорезисторов, вызванные действием магнитного поля, скомпенсированы путем тарировки динамометрической оправки в магнитном поле, имеющем величину магнитной индукции, эквивалентную величине индукции в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке.

Величина магнитной индукции составляла 1,1 тл. Тарировка производилась при 600 об/мин. Для исключения влияния магнитного поля на силу давления наконечника рычага 8 на втулку 12 все детали приспособления для тарировки были выполнены из диамагнитного материала.

Согласно схеме тарировки (рис. 1.4), давление наконечника рычага 8 на обрабатываемую поверхность определится как

$$P = \frac{P_T l_1}{l_2}, \quad (1.48)$$

где P_T — вес тарировочного груза, кг; $l_1 = 46$ мм — расстояние от нити до оси рычага; $l_2 = 120$ мм — расстояние от оси рычага до оси оправки.

Тарировка производилась для каждого из пяти образцов, применявшихся при определении давления. Для каждого образца по результатам тарировки (табл. 1.1) строился тарировочный график.

Угловое положение измерительной планки в зазоре определялось отметчиком, который образовывал с проволочными токосъемниками, применяемыми для передачи сигнала от тензорезисторов, цельную конструкцию.

Таблица 1.1

Расчет давления по тарифовочным характеристикам динамометрической оправки ($h_{\text{сигн}}$ — величина сигнала на осциллограмме, мм; P — общее давление, кг; p — удельное давление, кг/см²)

Тарифовочная нагрузка, кгс	Образец № 1			Образец № 2			Образец № 3			Образец № 4			Образец № 5		
	$h_{\text{сигн}}$	P	p	$h_{\text{сигн}}$	P	p	$h_{\text{сигн}}$	P	p	$h_{\text{сигн}}$	P	p	$h_{\text{сигн}}$	P	p
2,07	7,0	0,80	4,00	7,20	0,82	4,06	7,0	0,80	4,00	7,5	0,84	4,12	7,1	0,81	4,04
4,11	12,8	1,57	7,84	12,7	1,55	7,82	12,9	1,60	7,90	13,0	1,62	7,94	12,8	1,57	7,84
8,06	21,5	3,12	15,5	21,5	3,12	15,50	21,2	3,09	15,40	21,5	3,12	15,50	21,4	3,10	15,48
10,02	28,4	3,82	19,9	28,3	3,80	19,29	28,4	3,82	19,30	28,2	3,85	19,35	28,3	3,85	19,35
12,06	33,1	4,60	23,0	33,4	4,64	23,20	33,2	4,62	23,10	33,1	4,62	23,10	33,2	4,62	23,10
16,01	44,8	6,20	30,6	44,6	6,19	30,52	44,9	6,21	30,62	44,6	6,18	30,50	44,7	6,18	30,50
20,00	58,1	7,62	38,2	58,4	7,68	38,40	58,7	7,68	38,40	58,9	7,69	38,42	58,4	7,68	38,40

Отметчик положения выполнен в виде подвижного контакта, который вращается совместно с обрабатываемой втулкой 12 (рис. 1.4). Замыкание подвижного и неподвижного контактов фиксируется смещением контрольного сигнала на осциллографе Н-700. Подвижный контакт выполнен строго в одной оси с измерительной планкой 11. Один оборот оправки отметчик положения измерительной планки фиксирует двумя смещениями сигнала — в начале и в конце цикла. Таким образом, зная положение на осциллограмме сигнала от отметчика, определяем положение измерительной планки (т. е. полученного контрольного сигнала от тензорезисторов).

Распределение удельного давления ферромагнитного порошка в зависимости от времени обработки в течение 12-минутного цикла получено периодическим включением записи: первые 2 мин работы, а затем по 5 сек через каждую минуту. Сравнение сигнала, записанного дискретно в течение 5 сек, и сигнала, записанного непрерывно, показывает, что существенного отличия в осциллограммах нет.

Для питания полумоста и усиления сигнала был использован тензометрический усилитель ТА-5. Измерения записывались на фотобумагу. По результатам анализа осциллограмм строились эпюры давления. Величина магнитной индукции в зазоре измерялась милливеберметром М-119 и, кроме того, контролировалась тесломером (относительная ошибка не более 0,5%). Число оборотов детали и частота осцилляции контролировались тахометром часового типа. Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности втулок 12 определялась на профилографе-профилометре. Величина удельного давления и характер его распределения по зазору определялись путем сравнения величины контрольного сигнала на осциллограммах с результатами тарировки. По среднему значению из пяти опытов строилась эпюра давления. Была принята следующая методика построения эпюр.

На тарировочном графике по оси $O-x$ откладывалось значение ординаты $y_{\text{ср}}$. Место пересечения кривой тарировки и величины $y_{\text{ср}}$ определяло величину удельного давления в искомой точке.

Положение этой точки на дуге окружности образца определяли исходя из показания отметчика положения измеряемого сигнала. Измерив расстояние между средней линией двух отметок (в мм) и разделив полученную величину на 360° , определяли величину поворота контрольного сигнала в градусах, соответствующую 1 мм линейной величины на осциллограмме. Умножив затем эту величину на ординату искомой точки, получали ее угловое положение на дуге окружности в градусах. По этой методике были построены все эпюры давления порошка в зазоре.

Определение составляющих давления ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность. Давление ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность при магнитно-абразивной обработке определяется взаимодействием между деталью и порошком при их намагничивании во внешнем магнитном поле, а также силами, возникающими при механическом взаимодействии зерен в рабочем зазоре:

$$P = F_M + F_3, \quad (1.49)$$

где F_M — давление, обусловленное силами магнитного поля; F_3 — давление, вызванное силами механического заклинивания порошка в рабочем зазоре.

Кроме того, на ферромагнитные зерна действует сила тяги. Однако действие этой силы незначительно по сравнению с силами резания, возникающими при обработке, и ею можно пренебречь.

Рассмотрим возникновение сил магнитного поля, действующих на ферромагнитное зерно в радиальном направлении по рабочему зазору.

При заполнении рабочего зазора ферромагнитным порошком пространство между обрабатываемой поверхностью и рабочей поверхностью полюсного наконечника можно рассматривать как область внешнего магнитного поля напряженностью H , в котором расположены два ферромагнитных тела: обрабатываемая деталь и ферромагнитное зерно (для удобства будем считать, что зерно свободно размещено в пространстве зазора). Согласно законам электромагнетизма, между ними возникает сила взаимодействия, которая стремится прижать ферромагнитное зерно к детали.

Магнитное поле в рабочем зазоре в радиальном направлении неоднородно, и вектор магнитной индукции направлен по нормали к рабочей поверхности полюсного наконечника и обрабатываемой детали. При этом ферромагнитное зерно наибольшей осью l_{\max} может быть расположено как вдоль силовых линий, так и под углом α к ним. Рассмотрим общий случай, когда ферромагнитное зерно расположено под углом α к магнитным силовым линиям (рис. 1.5).

Находясь во внешнем магнитном поле, ферромагнитное зерно намагничивается. При этом наибольший магнитный момент будет в плоскости, проходящей через наибольшую ось зерна. Если напряженность в точке 1 (рис. 1.5) будет H_1 , то напряженность в точке 2, где расположен противоположный полюс,

$$H_2 = H_1 + \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) x, \quad (1.50)$$

$(\Delta H/\Delta x)$ — градиент магнитного поля.

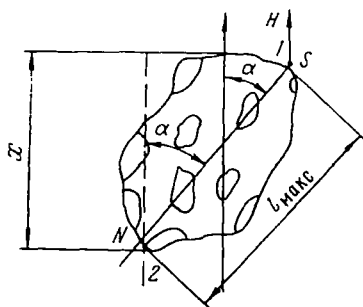


Рис. 1.5. Схема сил, действующих на зерно и ориентирующих его в магнитном поле

Силы, действующие на зерно, соответственно будут равны

$$P_{M_1} = mH; \quad (1.51)$$

$$P_{M_2} = mH + m \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) x, \quad (1.52)$$

где m — магнитная масса ферромагнитного зерна.

При положительном градиенте

$$P_{M_2} > P_{M_1}$$

на ферромагнитное зерно действует пара сил с моментом

$$M = F_s l \sin \alpha = M_3 H \sin \alpha, \quad (1.53)$$

где $M_3 = ml$ — магнитный момент ферромагнитного зерна.

Следовательно, ферромагнитное зерно в неоднородном магнитном поле, действующем в радиальном направлении рабочего зазора, будет поворачиваться, стремясь занять такое положение, при котором его наибольшая ось будет параллельна внешнему магнитному полю.

Кроме того, на зерно будет действовать сила, направленная вдоль поля. Величина этой силы определится из уравнения

$$P_{M_3} = P_{M_1} - P_{M_2} = m \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) x. \quad (1.54)$$

Так как

$$x = l_{\text{макс}} \cos \alpha,$$

то

$$P_{M_3} = ml_{\text{макс}} \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) \cos \alpha. \quad (1.55)$$

Заменяя ml через магнитный момент M_z , получаем

$$P_{M_z} = M_{M_z} \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) \cos \alpha. \quad (1.56)$$

Магнитный момент ферромагнитного зерна зависит от размеров последнего и магнитных свойств материала. С учетом того что ферромагнитные зерна по форме в первом приближении представляют собой эллипсоиды вращения, их магнитный момент равен

$$M_z = \frac{4}{3} \pi ab^2 k_M H, \quad (1.57)$$

где $a = l_{\text{макс}}/2$, $b = l_{\text{мин}}/2$ — полуоси эллипсоида ($l_{\text{макс}}$ и $l_{\text{мин}}$ — наибольший и наименьший размеры зерна); k_M — магнитная восприимчивость; H — напряженность магнитного поля.

Подставив значение M_z в формулу (1.56), получим уравнение для расчета силы, действующей на зерно кермета вдоль магнитного поля, в окончательном виде:

$$P_{M_z} = \frac{4}{3} \pi ab^2 k_M \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) \cos \alpha. \quad (1.58)$$

Следует отметить, что величина давления ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность, рассчитанная по формуле (1.58), не может быть определена для всего пространства рабочего зазора, а только для элементарных участков ΔS , которые имеют одинаковую магнитную проницаемость и на которых зерна расположены только в граничном слое. По этой формуле можно рассчитать давление единичных зерен. Образование цепочек из плотно прижатых между собой ферромагнитных зерен изменяет характеристики давления в зазоре вследствие изменения магнитного момента зерен, сорентированных в цепочку.

Рассмотрим образование цепочки зерна.

Внешнее магнитное поле, создаваемое катушками электромагнитной системы, наводит в ферромагнитных зернах свое локализованное магнитное поле, которое взаимодействует с магнитными полями детали и полями ферромагнитных зерен.

Магнитный поток, созданный локализованным магнитным полем, стремится замкнуться через контур, имеющий наименьшее магнитное сопротивление. Если по соседству окажутся два ферромагнитных зерна, то их магнитные поля замкнутся взаимно через эти зерна. Если же ферромагнитное зерно окажется возле обрабатываемой детали, то его локализованное поле

замкнется через обрабатываемую поверхность. В первом случае зерна окажутся прижатыми друг к другу, а во втором ферромагнитное зерно прижмется к обрабатываемой детали.

В прижатых друг к другу ферромагнитных зернах наводится новое магнитное поле и соответственно возрастает магнитный момент. Наведенное новое локализованное поле взаимодействует с полями новых ферромагнитных зерен, и таким образом происходит формирование цепочек зерен. Цепочки, обладая значительно бóльшим по сравнению с единичным зерном магнитным моментом, занимают в зоне обработки устойчивое положение. Они не разрушаются вследствие излома или износа граничного с обрабатываемой поверхностью ферромагнитного зерна. Это объясняется тем, что удаление одного зерна из цепочки незначительно изменяет магнитный момент всей цепочки, поэтому она остается сорпентированной вдоль силовых линий и после разрушения граничного с обрабатываемой поверхностью зерна.

Итак, на ферромагнитные тела, помещенные в магнитное поле, действует сила, направленная в сторону положительного градиента магнитной индукции, т. е. нормально к поверхности. Под действием этой силы ферромагнитные зерна втягиваются в рабочий зазор и скапливаются в зоне выхода из зазора. При этом происходит формирование цепочек и уплотнение массы порошка.

Так как радиус закругления режущих кромок абразивных частиц ферромагнитных зерен меньше ширины микронеровностей, то зерна входят во впадины последних и, перемещаясь вместе с вращающейся деталью, скапливаются в зоне выхода порошка из рабочего зазора. Это приводит к уплотнению порошка в этой зоне и механическому заклиниванию зерен. В последнем случае ферромагнитные зерна испытывают силы взаимодействия, направленные нормально к поверхности контакта их с граничными ферромагнитными зёрнами. Поэтому граничные с обрабатываемой поверхностью ферромагнитные зерна способны выдержать до существенного изменения своего положения (по отношению к соседним зернам и полюсным наконечникам) некоторую силу, направленную в сторону вектора окружной скорости вращения детали (рис. 1.6), и силу давления всей массы зерен на обрабатываемую поверхность. Следовательно, сила механического воздействия на граничные с поверхностью зерна

$$P_3 = P_{\text{вд}} + P_{\text{дз}}, \quad (1.59)$$

где $P_{\text{вд}}$ — воздействие вращающейся детали; $P_{\text{дз}}$ — давление вышележащих зерен.

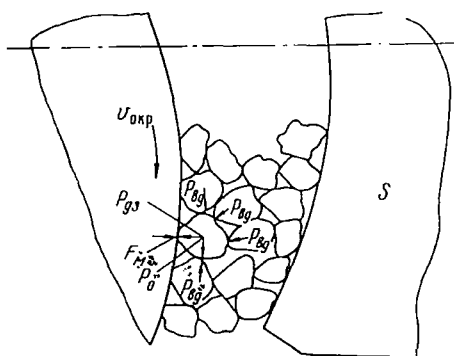


Рис. 1.6. Схема сил, действующих на зерна порошка при заклинивании их в рабочем зазоре

Наличие эффекта заклинивания в зазоре подтверждает анализ осциллограмм давления, записанных при величине рабочего зазора 0,3 мм. На осциллограммах отмечены отдельные максимумы, появление которых носит несистематический характер.

На наш взгляд, мгновенное возрастание давления происходит за счет заклинивания зерен между обрабатываемой поверхностью детали и полюсными наконечниками. Отмечено, что на осциллограммах давления, записанных при обработке с зазорами более $(10 \div 12) l_{\text{макс}}$ (в нашем случае с зазором более 1 мм), хаотические максимумы исчезают, так как при данном соотношении величин зерна и рабочего зазора заклинивание не происходит. Кроме того, при исследовании фотографий поверхности, обработанной магнитно-абразивным способом (увеличение в 290 раз), отмечено наличие отдельных следов ферромагнитных зерен, значительно превышающих по глубине следы, характерные для данных режимов обработки. Характерно, что глубина следа возрастает в направлении вектора скорости резания и след обрывается в точке, где его глубина достигает максимального значения. Очевидно, появление подобных следов обработки обусловлено внедрением отдельных зерен под действием экстремальных сил давления, вызванных заклиниванием ферромагнитного порошка в зазоре, а описанный выше характер изменения глубины следа можно объяснить разрушением внедрившегося зерна под действием этих сил. Следует отметить, что эти следы обработки соответствуют по глубине шероховатости 11-го класса по ГОСТ 2789-59, поэтому интенсификация процесса за счет уменьшения зазора при обработке деталей до 11-го класса включительно себя оправдывает.

На основании изложенного определена оптимальная форма рабочего зазора (рис. 1.7) в виде серповидного клина,

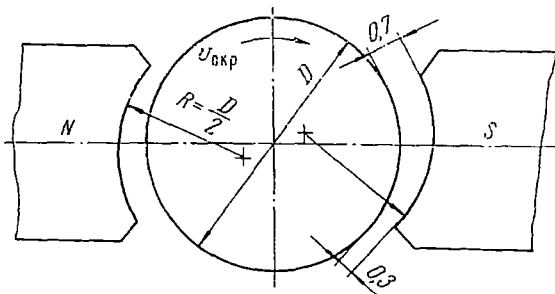


Рис. 1.7. Форма рабочего зазора в виде серповидного клина

которая обеспечивает наибольшую производительность процесса, и сделан вывод, что при магнитно-абразивной обработке с зазором порядка $\delta = 3l_{\text{макс}}$ происходит совокупное перемещение всей массы ферромагнитного порошка в рабочем зазоре. Это перемещение будет иметь место при условии граничного трения зерен между собой и обрабатываемой поверхностью в плотной массе, поэтому переориентация ферромагнитного зерна происходит за счет его поворота вокруг оси силами резания, а также за счет воздействия граничных зерен.

Распределение давления по рабочему зазору. В процессе экспериментальных исследований давления ферромагнитных зерен на обрабатываемую поверхность были установлены количественные характеристики и характер распределения давления по рабочему зазору в зависимости от величины магнитной индукции, формы рабочего зазора, величины рабочего зазора, а также от продолжительности цикла обработки и степени заполнения зазора ферромагнитным порошком.

Наибольшее значение имеет определение изменения удельного давления ферромагнитного порошка в зависимости от продолжительности цикла обработки (рис. 1.8).

Анализ кривой рис. 1.8 показывает, что максимальное удельное давление соответствует начальному периоду обработки (первые 30 сек). Максимум давления в начальной стадии

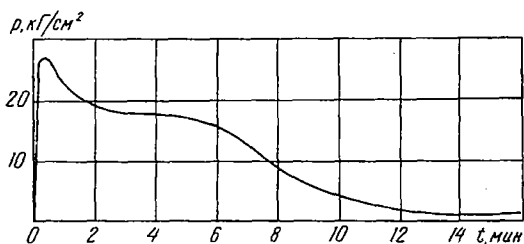


Рис. 1.8. Изменение экстремального удельного давления порошка в рабочем зазоре за цикл обработки

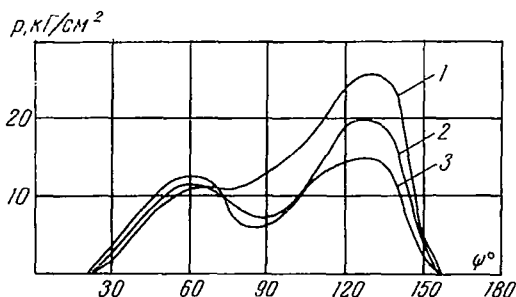


Рис. 1.9. Изменение удельного давления в зависимости от формы рабочего зазора (ψ — угол отклонения порошка от центра магнитной системы):
1 — серповидный клин; 2 — серповидный; 3 — концентрический

обработки объясняется воздействием больших масс порошка, не успевших распределиться равномерно в зазоре, на обрабатываемую поверхность. Вследствие этого, кроме сил магнитного поля, прижимающих ферромагнитные зерна к обрабатываемой поверхности, возникают экстремальные силы давления, обусловленные механическим заклиниванием зерен в рабочем зазоре.

По мере стабилизации процесса происходит монотонное затухание давления, и после 6 мин обработки оно резко падает. Это является следствием разрушения зерен в зазоре, а также уменьшения количества ферромагнитного порошка вследствие его выброса центробежными силами из рабочего зазора.

Для выяснения физических явлений, лежащих в основе механизма съема металла, значительный интерес представляет исследование давления в зависимости от формы рабочего зазора.

Результаты его (на рис. 1.9 приведены средние значения из пяти замеров) показывают, что при постоянстве величины

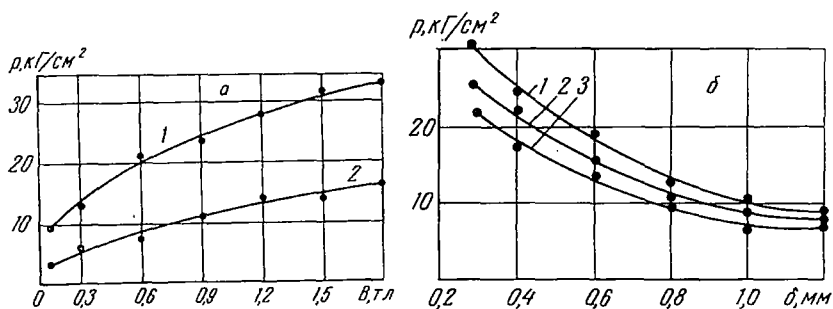


Рис. 1.10. Зависимость удельного давления порошка от магнитной индукции a (1 — $\delta=0,3$ мм; 2 — $0,8$ мм) и от величины рабочего зазора $б$ (1 — $B=1,6$ тл; 2 — $1,2$ тл; 3 — $0,8$ тл)

зазора и магнитной индукции в нем давление изменяется в большом диапазоне в зависимости от угла отклонения порошка φ от центра магнитной системы, т. е. от места расположения порошка в зазоре.

Следует отметить, что увеличение давления при обработке с рабочим зазором в форме серповидного клина больше изменения величины магнитной индукции за счет уплотнения ферромагнитного порошка. Поэтому с достаточным основанием можно утверждать, что давление ферромагнитного порошка в зазоре обусловлено как силами магнитного поля, так и механическим заклиниванием ферромагнитных зерен в зазоре. Эти данные хорошо согласуются с результатами определения удельного давления в зависимости от изменения величины магнитной индукции и величины рабочего зазора (рис. 1.10).

ПОРОШКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ МАГНИТНО- АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Существенное влияние на качество поверхности изделия, подвергнутой обработке, и производительность магнитно-абразивного метода полирования оказывают химический состав, а также физические и химические свойства порошков, выполняющих в данном случае роль абразивного инструмента и осуществляющих основную работу резания. В связи с этим к порошкам, применяемым при магнитно-абразивной обработке, предъявляются повышенные требования. Они должны обладать следующими основными свойствами:

1) способностью удерживаться в рабочих зазорах между полюсами магнита и изделием под действием магнитных полей напряженностью от 100 до 1000 э, т. е. хорошей магнитопроводностью;

2) способностью осуществлять процесс резания и снимать с поверхности изделия, имеющего значительную твердость (*HRC* 45—65 единиц), заданный объем металла при высокой производительности операции, т. е. высокими абразивными свойствами;

3) низким электрическим сопротивлением, позволяющим образовывать при контакте гранул порошка между собой, изделием и полюсами электромагнита замкнутые электрические цепи и возбуждать в рабочих зазорах термоэдс и микротоки;

4) значительной твердостью и сопротивляемостью процессу истирания граней зерен, т. е. высокой износостойкостью;

5) высокой теплопроводностью;

6) сопротивляемостью разрушению под действием химически активных сред, электролитов и электрических микрозарядов;

7) способностью измельчаться под механическим воздействием, т. е. высокой хрупкостью;

8) сравнительно небольшой отпускной стоимостью.

На рис. 2.1 приведены основные группы материалов, применяемых для получения порошков при магнитно-абразивной обработке.

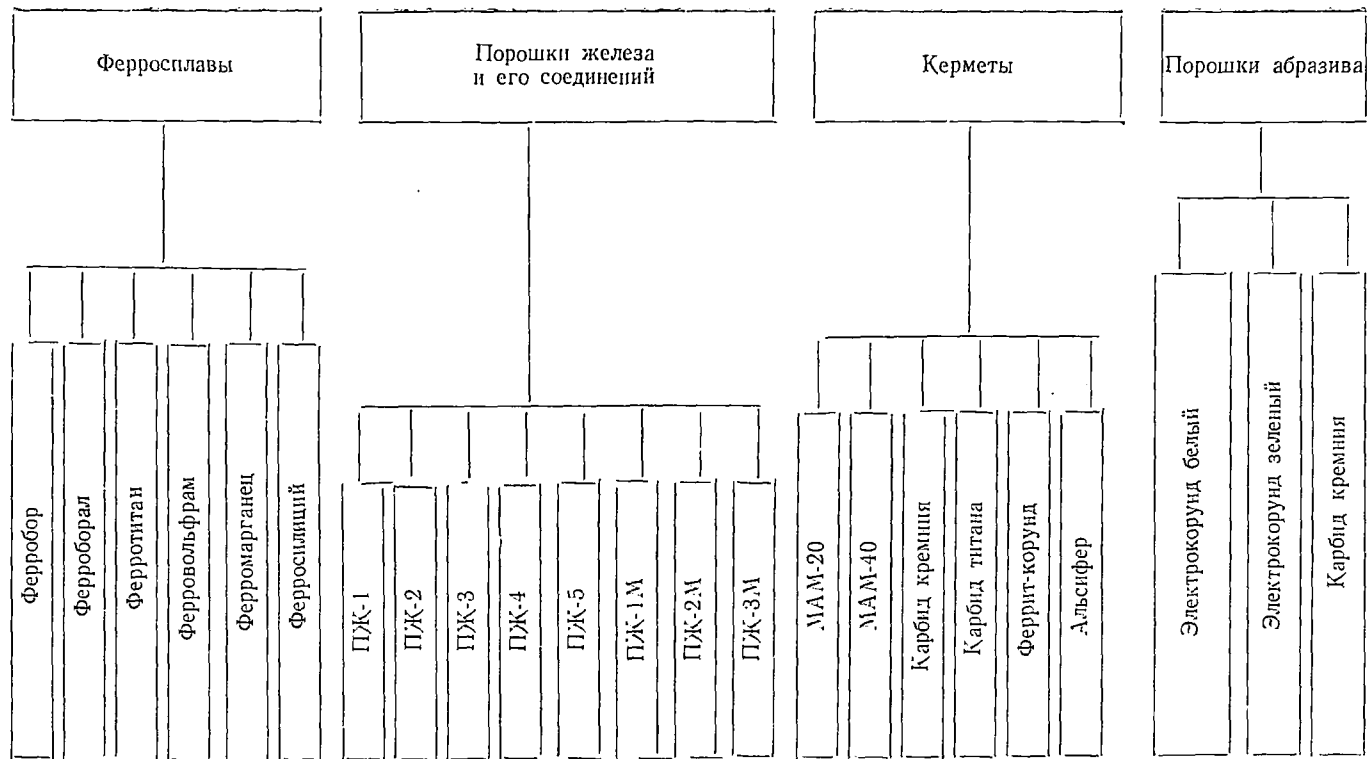


Рис. 2.1. Материалы для порошков, применяемых при магнитно-абразивной обработке

О поведении порошковых частиц в магнитном поле рабочего зазора можно судить по их магнитной проницаемости и индукции насыщения.

Численное значение градиента магнитной индукции в зазоре между обрабатываемой деталью и полюсным наконечником магнитной системы в значительной мере зависит от магнитной проницаемости порошка, находящегося в зазоре.

Очевидно, что необходимо стремиться к достижению возможно большего численного значения магнитной проницаемости и индукции насыщения магнитно-абразивных материалов, так как это ведет к возрастанию усилия прижима режущих частиц к обрабатываемой детали.

Рассмотрим подробнее зависимость магнитных свойств порошков от их химического состава. Наличие того или иного элемента в количестве до 1% от веса основного металла будем считать примесью, а более 1% — легирующей добавкой. В качестве основного компонента магнитно-абразивных материалов выбираем железо, так как другие ферромагнитные материалы — никель, кобальт, гадолиний — значительно дороже первого и уступают ему по магнитным свойствам.

Установлено [10], что наличие неметаллических примесей понижает магнитную проницаемость ферросплавов и незначительно влияет на величину индукции насыщения. Особенно вредное влияние на магнитную проницаемость оказывают включения углерода, кислорода и серы.

Магнитные свойства ферросплавов зависят также от вида термической обработки. Отжиг, например, значительно повышает магнитную проницаемость сплавов. Для магнитомягких материалов желательнее производить отжиг в защитной среде или вакууме, предохраняющих их от загрязнения вредными примесями и исключающих возможность окисления металлов. Закалка же, наоборот, понижает магнитную проницаемость.

При уменьшении размеров зерен порошка наблюдается ухудшение магнитных свойств, так как в этом случае увеличивается удельная поверхность раздела между частицами порошка, что увеличивает его магнитное сопротивление и ведет к дополнительным затратам энергии магнитного поля при намагничивании.

Абразивные свойства порошка во многом определяются его микротвердостью, величина которой для порошковых частиц зависит от содержания в основном металле различных примесей и легирующих элементов, а также от вида термической обработки.

Следует отметить, что влияние отжига и закалки на абразивные свойства порошков из ферросплавов противоположно влиянию этих видов термообработки на их магнитные свойства.

Форма частиц также определенным образом влияет на режущую способность режущих элементов [2]. В этом плане существенным является не только наименьший размер абразивной частицы, но также и отношение длины зерна к его ширине, значение радиусов закругления граней зерен и величина углов между гранями. Наиболее предпочтительной для ферромагнитных элементов является удлиненная осколочная форма порошковых частиц. Это объясняется тем, что частицы порошка наибольшей своей осью ориентируются вдоль силовых линий магнитного поля и, таким образом, всегда обращены к поверхности детали своими острыми гранями. При затуплении этих граней вследствие абразивного износа появляется новая наибольшая ось ферромагнитного элемента, и он занимает новое положение в магнитном поле.

1. Методы получения порошков

Качественные характеристики порошков в значительной степени определяются методом их изготовления. От способа получения зависят величина и форма частиц, химический состав, спекаемость порошков и их магнитные свойства.

Методы получения металлических порошков можно условно разделить на две основные группы: механические и физико-химические [13].

При применении механических методов исходный материал измельчается в порошок без изменения химического состава. К этим методам относятся: получение порошковых частиц обработкой металлов резанием; размол металлов в шаровых и молотковых мельницах; измельчение в вихревых мельницах. К этой же группе относится процесс размельчения струн расплавленного металла путем грануляции и распыления его газом (или водой) либо ударами лопаток вращающегося диска.

Общий недостаток указанных методов — относительно высокая стоимость порошков, поскольку в последнюю входит стоимость изготовления исходных литых металлов и сплавов.

К физико-химическим процессам получения порошков относятся такие технологические процессы, у которых получение порошка связано с изменением химического состава исходного сырья или его агрегатного состояния в результате химического или физического (но не механического) воздействия на исходный продукт.

Основные методы получения порошков сведены в табл. 2. 1.

Наибольшее промышленное применение в настоящее время получили методы восстановления окислов, электролиз, термическая диссоциация, размол в шаровых и вихревых мельницах, распыление.

Методы получения порошков

Методы получения	Материал
<i>Механические</i>	
Обработка металлов резанием и дробление и размол в шаровых, вибро- и молотковых мельницах; распыление расплавленного металла сжатым газом или дробление струи лопатками вращающегося диска. Грануляция (литье в воду). Прессование, спекание и размол керметов	Сталь, малокремнистый чугун. Стали и сплавы с невысокой температурой плавления
<i>Физико-химические</i>	
Восстановление окислов и солей	Различные сплавы и тугоплавкие соединения
Электролиз водных растворов Диссоциация карбониллов Электроэрозия	Любые металлы и сплавы
Межкристаллитная коррозия	Нержавеющая сталь

Способ механического измельчения. Размол в различного рода мельницах применяется не только как самостоятельный метод получения порошков, но широко распространен как дополнительная операция в производстве порошков, основанном на физико-химических методах. Часто операции размола совмещают со смешиванием шихты.

Размол материалов производят в шаровых, вибрационных, молотковых и вихревых мельницах. Наиболее распространены шаровые мельницы.

Сущность метода измельчения и смешивания порошков в шаровых мельницах заключается в том, что частицы порошков измельчаются или дробятся в результате столкновения с шарами мельницы и перемешивания между собой под влиянием перекатывающихся шаров и вращения барабана мельницы [6].

Существенным недостатком измельчения в шаровой мельнице является то, что помол частиц доводится только до величины 50—60 мк, при более тонком помоле экономичность и производительность шаровых мельниц резко снижается.

Тонкодисперсное измельчение производится в вибромельницах и осуществляется путем воздействия на шихту частопеременных периодических силовых импульсов.

Сравнивая два основных метода—измельчения и смешивания порошков в шаровых и вибрационных мельницах, можно отметить следующее:

1) применение вибромельниц повышает производительность измельчения порошков в 10—20 раз по сравнению с шаровыми мельницами;

2) измельчение в вибромельнице обеспечивает получение высокодисперсных порошков, которые не могут быть получены в шаровых мельницах;

3) преимуществом применения шаровой мельницы является получение более однородного перемешивания компонентов порошка, поскольку использование вибромельницы в известной степени способствует расслоению компонентов по их удельным весам.

Разрушение (или диспергирование) твердых тел в значительной степени определяется природой среды, в которой происходит размол. Измельчение и смешивание может быть сухим, в среде воздуха, или мокрым, в среде жидкости.

Жидкая среда способствует лучшему измельчению и смешиванию частиц, так как в деформируемом теле в процессе деформации зарождаются и накапливаются микротрещины, которые образуют новые поверхности раздела с окружающей средой, и наличие в окружающей среде поверхностно-активных веществ приводит к интенсификации процесса размола.

Исходным сырьем для получения порошков методом механического измельчения являются компактный металл или сплав, стружка, сечка проволоки.

Метод восстановления. В промышленности широко применяется для получения порошков железа, никеля и сплавов на их основе. Это объясняется как экономичностью метода, так и относительной простотой процесса и возможностью получения заданных размеров и формы частиц порошка.

Известны следующие методы получения порошка: а) восстановление оксидов металла, руды и окалины водородом; б) восстановление руды и окалины конвертированным природным газом; в) восстановление руды и окалины твердым углеродом.

Общая продолжительность процесса восстановления при производстве железного порошка составляет 2—3 час. Температура процесса 1100 °С. Восстановленный порошок представляет собой пористую, слегка спекшуюся губку, которая дробится на куски и размалывается [13].

В качестве сырья при изготовлении железного порошка методом восстановления твердым углеродом применяют железную руду и прокатную окалину.

Сырьем для получения восстановленного никелевого порошка являются углекислые и щавелевокислые соли никеля. Продолжительность восстановления 1—2 час, температура 700—750 °С. После восстановления никелевая губка легко дробится и поступает на рассев.

Легированные порошки производят методом совместного восстановления окислов. Сплавы Ni—Fe, Ni—Fe—Mo получают путем восстановления смеси окислов этих металлов водородом при температуре 800—900 °С в течение нескольких часов [12].

Метод электролиза. Среди физико-химических методов получения порошков электролитический способ по промышленному распространению занимает второе место после восстановления.

Важнейшим преимуществом электролитического метода является высокая чистота продукта в результате очистки от примесей в процессе электролиза. Основной недостаток процесса — высокая стоимость порошков из-за низкой производительности и больших затрат энергии.

В основе процесса лежит разложение водных растворов металлических соединений, а также расплавленных солей при пропускании электрического тока.

Электролизом можно получить порошки сплавов Fe—Ni, Fe—Mn, Fe—Mo, Fe—Br, Ni—Mo, Ni—Fe—Mo, Ni—Fe—Mo—Mn.

Карбонильный метод. В основе карбонильного метода лежит способность некоторых металлов (Fe, Co, Ni и др.) под воздействием окиси углерода образовывать комплексные соединения — карбонилы, которые в определенных условиях могут диссоциировать с образованием тонких порошков металлов.

Карбонилы представляют собой химические соединения металлов с группами CO, например $\text{Fe}(\text{CO})_5$, $\text{Ni}(\text{CO})_4$.

Карбонильные порошки, как правило, тонкодисперсны, отличаются высокой химической чистотой и хорошей спекаемостью. Однако этот метод получения порошков дороже, чем метод восстановления.

Распыление жидких металлов и сплавов. Метод распыления, или пульверизации, является одним из наиболее производительных методов получения порошков. В его основе лежит распыление струи жидкого металла с помощью воздуха, инертного газа, пара или ударов лопаток вращающегося диска. Метод приподен для получения порошков легкоплавких металлов и сплавов чугуна, железа, стали, ферросплавов.

Недостатками метода являются низкая чистота порошков, необходимость наличия плавильных агрегатов.

2. Ферриты, их свойства и технология изготовления

Ферриты — неметаллические магнитные материалы, представляющие собой твердые растворы окиси железа Fe_2O_3 с окислами двухвалентных металлов (Ni, Mn, Zn, Mg, Cu и др.).

Основной особенностью ферритов является сочетание высоких магнитных свойств с чрезвычайно высоким удельным электрическим сопротивлением, в миллионы раз превышающим удельные сопротивления металлических материалов.

Практически индукция насыщения для магнитно-мягких ферритов составляет несколько тысяч гаусс (табл. 2.2).

Вследствие высокого удельного электрического сопротивления в ферритах чрезвычайно малы потери на макровихревые токи.

После термической обработки (обжиг) ферриты обладают высокой твердостью (возможна обработка только алмазным инструментом [11]).

Микротвердость прессованных ферритов, измеренная на приборе ПМТ-3, составляет 500—645 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ [5].

Необходимо иметь в виду, что магнитные свойства того или иного феррита в основном определяются его химическим составом. Однако, применяя различные методы изготовления при неизменном химическом составе, можно получить ферриты с различными магнитными свойствами.

В качестве исходного сырья для изготовления ферритов используются либо непосредственно окислы металлов, либо их соли.

В производственных условиях в качестве исходного сырья используются непосредственно окислы металлов, которые при правильном технологическом процессе обеспечивают изготовление ферритов с требуемыми магнитными свойствами.

Технологический процесс в этом случае протекает по этапам [5]:

а) дробление, измельчение, смешивание и сушка окислов металлов;

б) предварительное спекание при температуре несколько ниже, чем температура окончательного спекания; применяется для повышения однородности графита и улучшения повторяемости магнитных свойств;

Таблица 2.2

Магнитные свойства и химический состав ферритов [5]

Марка феррита	μ_0	$\mu_{\text{макс}}$	B_s , зс	Весовой состав, %		
				Fe_2O_3	MnO	ZnO
М-6000	До 7200	До 10000	4700	70,4	15,5	14,1
М-4000	4800	8000	4500	70,4	15,5	14,1
М-3000	3500	6000	3500	70,4	15,5	14,1
М-2000	2500	4000	5000	71,4	19,2	9,4
М-1000	1200	3500	3200	71,4	19,2	9,4

в) измельчение, смешивание и просеивание через набор сит смеси окислов;

г) окончательное спекание в тех же печах, что и предварительное, при температуре 1100—1350 °С в течение 2—10 час с последующим охлаждением на воздухе (закалка);

д) размол и рассеивание на фракции.

Второй способ получения порошков ферритов применяется в основном в лабораторных условиях, так как при использовании солей в качестве исходного сырья процесс производства ферритов очень трудоемкий и требует специального химического оборудования и рабочих высокой квалификации. Суть метода в следующем: исходное сырье — смесь солей в количествах, необходимых для получения заданных составов окислов, расплавляется в кристаллизационной воде (или с добавкой воды), затем вода выпаривается.

Обезвоженная смесь солей при дальнейшем нагревании разлагается на улетучивающиеся газы и окислы, в момент их образования вступающие в химические соединения.

Размол и смешивание окислов производится в вибромельнице.

Обжиг смеси окислов в виде порошка, свободно насыпанного в керамические тигли электропечи, производится при температуре 1000 ± 25 °С в течение 4 час.

Смесь окислов после отжига охлаждается вместе с выключенной печью до температуры 300 °С, после чего выгружается из тиглей и поступает на вторичный размол и рассеивание.

3. Керметы, их свойства и технология изготовления

Известные в технике керамикометаллические материалы — керметы представляют собой композиции из металлов и окислов, получаемые методами порошковой металлургии. Керметы характеризуются соединением компонентов, присущим гетерогенным системам. Они образуются в процессе прессования и спекания в твердом состоянии с последующим механическим дроблением и рассевом в порошки заданной зернистости.

Различают керметы, изготовленные на базе твердых тугоплавких соединений, и окисные. К первой группе относят спеченные материалы, состоящие из твердых тугоплавких соединений (карбиды, бориды, силициды) и металлической связки, так называемые твердые сплавы и им подобные материалы.

Окисные керметы состоят из окислов и связующих металлов.

В качестве компонентов для керметов типа глинозем — металл пригодны Ni, Co, Fe, Cr. Однако из всех изученных ком-

позиций типа железо — окись металла наиболее высокую твердость дает кермет, полученный путем спекания железа с 10% (по объему) Al_2O_3 . Поэтому в настоящее время для использования в качестве ферромагнитных порошков при магнитно-абразивной обработке наиболее широкое применение получили керметы, предложенные группой авторов [1].

Кермет [1] в обозначение включает марку и номер исходного абразива, а также весовое (процентное) содержание и марку ферромагнитной составляющей. Например, марка ЭБМ40+80% Fe означает, что кермет изготовлен из порошка электрокорунда белого зернистостью М40 и содержит в своем объеме 80% порошка железа.

Технология изготовления керметов [1] следующая:

1. Порошки железа ПЖ1М или ПЖ2М с насыпным весом 2,2—2,6 $кг/см^3$ просеиваются через сито № 250 (размер ячейки 250 $мкм$) с целью удаления различных загрязнений и комков, присутствующих в порошках в состоянии поставки.

2. Абразивные и ферромагнитные компоненты смешиваются в смесителях, например, типа «пьяная бочка» в течение 3 час. Для предотвращения сегрегации смеси, улучшения ее однородности и условий последующей операции прессования в смесь добавляется 2% (по весу) машинного масла.

3. Полученная шихта прессуется в пресс-формах при давлении $P = 1800—2200$ $кг/см^2$.

В процессе прессования происходит заполнение пустот между частицами смеси, их более плотная укладка, упругая и пластическая деформация мягких частиц и частичное дробление крупных гранул.

Механическое соединение гранул железа и абразива прессованием не обеспечивает необходимой прочности композиции. Зерна керметов, полученные только прессованием, легко разрушаются при размоле и рассеиваются на железную и абразивную фракции. Поэтому за прессованием последующей операцией должно быть спекание брикетов.

4. Брикеты спекаются в защитной среде водорода для предотвращения окисления железа и восстановления уже окислившихся пленок при температуре 1200 °С с выдержкой 25—30 мин.

Спекание брикетов кермета значительно увеличивает прочность соединения составляющих композиции за счет протекания при высоких температурах самодиффузионных процессов, более прочного закрепления абразивных частиц между зернами порошка железа, зарастивания внутренних пор, увеличения плотности и восстановления окислов на границе раздела металлических зерен.

5. Брикеты размалываются на шаровых, вибрационных и другого типа мельницах.

6. Полученные порошки рассеиваются на составляющие по фракциям.

Исследования показали, что с увеличением процентного содержания железа улучшаются магнитные характеристики порошка кермета, увеличивается прочность закрепления зерен абразива в зернах композиции, но, с другой стороны, при этом уменьшается количество режущих кромок, что снижает режущие способности порошка. Оптимальным по режущим способностям является кермет композиции ЭБМ40+80% Fe. Керметы с содержанием 80% Fe проявляют меньшую склонность к разделению на составляющие фракции абразива и железа при размоле брикетов. Керметы с содержанием более 80% Fe обладают повышенной пластичностью, что затрудняет их размол и приготовление порошка из спеченных брикетов.

Определенный интерес при изготовлении ферромагнитных порошков кермета по технологии, предложенной выше, представляет вопрос выбора зернистости его абразивной фракции. При этом различают понятия «зернистость абразива» и «зернистость порошка кермета». Если «зернистость абразива» характеризует геометрию режущих кромок его зерен, то величина зерна кермета — прочность закрепления режущих элементов абразива в зерне кермета и его магнитную массу, определяющую силу, прижатия элементов порошка к обрабатываемой поверхности, т. е. силу резания.

Более чистую (по высоте гребешков микропрофиля R_a) поверхность при одинаковой зернистости порошка дают керметы, содержащие более мелкую фракцию исходного абразива, так как чем меньше зерно абразива, тем больше оно содержит острых углов [2]. Мелкие абразивные зерна обладают более благоприятной геометрией режущих кромок, но и меньшей их прочностью. Кроме того, чем меньше зерно абразива, тем менее прочно оно закрепляется в порошке железа при спекании брикетов и тем меньше оно выступает из гранул железа, обрабатывающих основу кермета.

Из опыта порошковой металлургии известно, что прочность изделий снижается при прессовании более мелких порошков. Указанное явление имеет место и при изготовлении керметов на основе железо—абразив. Зерна ЭБМ7+80% Fe, полученные при одинаковом с ЭБМ40+80% Fe давлении прессования, легко разрушаются на составляющие железо и абразив. Однако в процессе магнитно-абразивной обработки железная основа зерен керметов, изготовленных с использованием мелких абразивных порошков, трется о поверхность изделия, выглаживает (заполировывает) ее и способствует получению более высоких классов шероховатости.

С другой стороны, с увеличением зерен исходной фракции абразива увеличивается их сцепление с порошком железа и

повышается прочность композиционного материала, что способствует повышению производительности процесса магнитно-абразивной обработки.

Из сказанного следует, что выбор зернистости абразивного порошка для изготовления керметов имеет важное значение и в каждом конкретном случае определяется стоящей задачей: если требуется получение высоких классов шероховатости, то используется более мелкий абразив, и, наоборот, при необходимости обеспечения значительного съема материала с поверхности изделия применяется порошок абразива зернистостью М40 и выше.

При изготовлении керметов большое значение имеет образовавшаяся структура композиционного материала, оказывающая влияние на механическую прочность гранул.

Замерять твердость кермета рекомендуется на приборе Роквелла алмазным наконечником при нагрузке 30 кг. В табл.

Таблица 2.3

Изменение высоты микронеровностей во времени при обработке различными керметами

Кермет	№ опыта	Высота шероховатости R_a при длительности обработки, мин			
		0,5	1,0	2,0	3,0
ЭБМ7 + 80% Fe	1	0,637	0,343	0,360	0,275
	2	0,830	0,685	0,346	0,387
	3	0,575	0,680	0,335	0,387
	4	0,725	0,585	0,368	0,348
	5	—	0,299	—	0,424
	6	0,692	0,518	0,352	0,364
ЭБМ20 + 80% Fe	1	0,582	0,318	0,223	0,165
	2	0,546	0,257	0,214	0,253
	3	0,605	0,317	0,260	0,217
	4	—	—	0,195	0,205
	5	—	—	0,283	0,206
	6	0,578	0,297	0,235	0,209
ЭБМ40 + 80% Fe	1	0,626	0,272	0,302	0,324
	2	0,690	0,280	0,253	0,330
	3	0,588	0,229	0,315	0,212
	4	0,398	0,220	0,260	0,263
	5	0,470	0,306	0,235	0,280
	6	0,554	0,261	0,273	0,282
ЭБМ6 + 80% Fe	1	0,680	0,406	0,374	0,347
	2	0,655	0,314	0,389	0,368
	3	0,583	0,320	0,310	0,367
	4	—	—	—	0,310
	5	0,639	0,347	0,358	0,348

Таблица 2.4

Изменение величины съема металла во времени при
обработке различными керметами

Кермет	№ опыта	Величина съема металла G, мг, при длительности обработки, мин			
		0,5	1,0	2,0	3,0
ЭБМ7 ÷ 80% Fe	1	13,4	29,9	52,7	69,0
	2	11,5	24,3	61,8	72,7
	3	17,4	23,2	46,4	77,4
	4	12,4	20,8	48,2	65,1
	5	—	23,4	—	77,9
	6	13,9	24,3	52,3	72,4
ЭБМ20 ÷ 80% Fe	1	19,7	30,1	64,8	88,5
	2	15,6	32,7	59,9	95,8
	3	16,1	31,9	54,3	87,0
	4	—	—	61,0	92,0
	5	—	—	61,1	91,8
	6	17,1	31,6	60,2	91,0
ЭБМ40 ÷ 80% Fe	1	16,3	30,2	57,0	81,1
	2	16,9	32,4	63,9	94,1
	3	15,0	31,4	54,5	80,4
	4	18,0	32,2	60,2	93,4
	5	17,8	34,8	64,6	93,9
	6	16,8	32,2	60,0	88,6
ЭБМ6 ÷ 80% Fe	1	13,0	24,6	48,2	91,5
	2	16,8	25,2	48,2	76,2
	3	14,3	28,5	31,6	74,7
	4	—	—	—	81,9
	5	14,1	26,1	42,7	81,1

2.3 и 2.4 приведены данные исследований Ю. М. Барона об изменении съема материала при магнитно-абразивной обработке изделий из стали керметами зернистостью 100—160 мкм.

4. Режущая способность и магнитно-геометрические параметры кермета

Эффективность процесса магнитно-абразивной обработки в значительной степени зависит от режущих и магнитных свойств ферромагнитного порошка, применяемого в качестве режущего инструмента.

Режущие свойства порошка определяются способностью зерен противостоять силам резания, а также силам магнитного поля, прижимающим ферромагнитные зерна к обрабатываемой поверхности. Кроме того, режущие свойства должны со-

храняться в течение всего периода обработки, т. е. период стойкости должен быть достаточно большим.

Силы магнитного поля, действующие на ферромагнитные зерна, определяются магнитными свойствами порошка. Основной величиной, характеризующей магнитные свойства материала порошка, является магнитная проницаемость, которая выражает связь между вектором индукции и вектором напряженности магнитного поля:

$$B = \mu H, \quad (2.1)$$

где B — магнитная индукция; H — напряженность магнитного поля; μ — относительная магнитная проницаемость среды.

Проведенные исследования и анализ опубликованной литературы по магнитно-абразивной обработке показали, что наиболее эффективным ферромагнитным материалом из всех исследованных и выпускаемых промышленностью являются порошки керметов. Отдельные зерна кермета состоят из ферромагнитной основы — спрессованных и спеченных зерен порошка железа с размещенными в ней абразивными частицами — осколками кристаллов электрокорунда. По структуре они представляют собой пористые тела. Удельный вес одного элемента порошка кермета ЭБМ40 + 80% Fe зернистостью 0,1 мм равен 3,0—3,1 г/мм³. Исследования механических свойств зерен кермета показали, что связь между частицами ферромагнитной основы значительно прочнее, чем связь между зернами ферромагнитной основы и абразивными частицами. Разрушение зерен кермета в процессе обработки происходит по граничным слоям между абразивом и зёрнами железа.

Есть основания предполагать, что силы сцепления абразивных частиц с ферромагнитной основой меньше сил резания. Поэтому в процессе обработки происходит выкрошивание абразивных частиц из зерен кермета.

Исследованиями В. И. Ждановича (рис. 2.2) установлено, что в процессе обработки происходит частичное разрушение зерен кермета и изменение количества абразивных частиц электрокорунда, содержащихся в зернах ферромагнитного порошка. Однако разрушение зерен не приводит к потере режущих свойств ферромагнитного порошка (рис. 2.3). Это можно объяснить тем, что свободные абразивные частицы удерживаются в зоне обработки вследствие создания магнитным полем ячеистой структуры из прижатых друг к другу отдельных ферромагнитных частиц с размещенными между ними свободными частицами электрокорунда. Следовательно, основное преимущество керметов как материала для режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке состоит в том, что абразивные частицы равномерно распределены по всему объе-

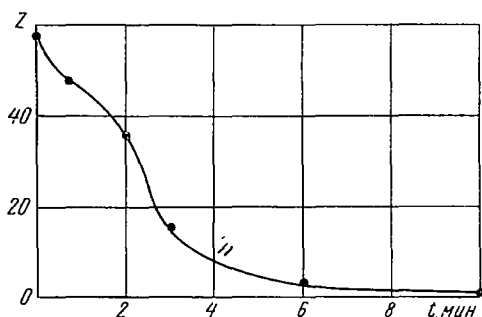


Рис. 2.2. Изменение количества абразивных частиц за время работы ферромагнитного порошка кермета

му зерен и разрушение последних не приводит к потере режущих свойств порошка.

Для подтверждения этого предположения была проведена обработка образцов смесью порошка железа, электрокорунда и связывающей основы—минерального масла с парафином. При этом связь между отдельными компонентами смеси была достаточна лишь для их совместного транспортирования в зону обработки. Результаты экспериментов показали, что эффективность обработки смесью зависит от количества абразива в ней. При процентном соотношении в смеси компонентов железа и абразива, близком к соотношению в кермете, эффективность обработки смесью лишь незначительно уступает по производительности обработке керметом (ниже в среднем на 5%).

На основании этого можно сделать вывод, что эффективность процесса магнитно-абразивной обработки порошком кермета зависит от количества частиц абразива, содержащегося в ферромагнитных зернах.

В опубликованной литературе не имеется сведений о подробных исследованиях режущей способности и линейно-

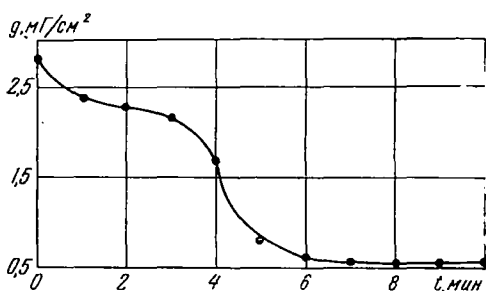


Рис. 2.3. Изменение режущей способности ферромагнитного порошка кермета (g —удельный сьем) в зависимости от периода его работы

геометрических параметров ферромагнитных порошков, применяемых при магнитно-абразивной обработке. Есть лишь попытка классифицировать их по относительной режущей способности [1, 2]. Поэтому основной задачей наших исследований было определение количества абразивных частиц в ферромагнитных зернах в зависимости от продолжительности цикла работы порошка и измерение линейно-геометрических параметров зерен.

В соответствии с поставленной задачей был выбран для исследования наиболее производительный ферромагнитный материал — кермет ЭБМ40+80% Fe зернистостью 0,1 мм, позволяющий обрабатывать детали до 12-го класса чистоты поверхности.

Методика проведения исследований. На предметное стекло биологического микроскопа МБР-1 помещалось ферромагнитное зерно, на которое наносилась капля раствора соляной и азотной кислот. Ферромагнитная основа, вступая в реакцию с кислотой, переводилась в раствор, и абразивные частицы становились отчетливо видны под микроскопом, что позволяло производить их подсчет.

Для определения линейных размеров абразивных частиц, углов вершин и радиусов округления их применялся способ зарисовки зерен в одной проекции, который при относительно невысокой трудоемкости позволяет достигать требуемой точности. Для этой цели использовался рисовальный аппарат РА-4, встроенный в систему биологического микроскопа МБР-1.

Измерение высоты абразивных частиц H производилось при помощи нониуса тонкой настройки биологического микроскопа МБР-1 путем введения в фокус последовательно нижних и верхних кромок зерен. Благодаря тому что глубина резкости при увеличении в 1250 раз составляет величину менее 0,1 мкм, погрешность измерения размера H достаточно мала. Контрольные замеры размеров зерен проводились на биологическом микроскопе с установкой вместо верхнего тубуса винтового окулярного микроскопа МОВ-1—5× с ценой деления шкалы барабана микрометрического винта 0,01 мм. Замеры производились при увеличении в 120 раз.

Измерения радиусов округления и углов заострения производились при помощи шаблонов. Точность измерения углов $\pm 1^\circ$, радиусов $\pm 0,2$ мм, что в принятых масштабах увеличения соответствует $\pm 0,001$ мм действительного размера. Для подсчета среднего количества абразивных частиц в ферромагнитных зернах и изменения его в зависимости от времени работы порошка было протравлено по 221 зерну кермета ЭБМ40+80% Fe на стадиях обработки 0,15, 30, 45, 60, 120, 150, 180, 360, 600 и 720 сек. Для определения длины A , ширины

В и высоты H замерено 330 абразивных частиц ферромагнитных зерен. Измерено более 560 углов заострения вершин зерен и столько же соответствующих им радиусов округления. Результаты всех измерений (в общей сложности более 3000) были обработаны методами математической статистики.

Определение количества абразивных частиц в ферромагнитных зернах. Исследование включало определение среднестатистического количества абразивных частиц в зернах кермета ЭБМ40+80% Fe и изменения его в зависимости от времени работы ферромагнитного порошка, а также изучение влияния этого фактора на производительность процесса.

Комплекс работ по математической обработке результатов наблюдений включал анализ поставленной задачи, разработку алгоритма и составление рабочей программы с кодированием результатов в машинном языке по разработанному алгоритму. Анализ задачи сводится к выбору метода вычислений.

Наблюденные значения числа абразивных частиц объединялись в разряды, подсчитывалось, сколько раз встречаются данные значения в каждом разряде, определялись x_{\max} и x_{\min} . Для определения величин разрядов C разность между x_{\max} и x_{\min} делилась на выбранное количество разрядов N :

$$C = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{N}. \quad (2.2)$$

Затем составлялись рабочие таблицы распределений, в одной строке которых записывались значения случайных величин, а во второй — соответствующие частоты.

Анализ кривых экспериментального распределения количества абразивных частиц в зерне в зависимости от времени работы порошка показывает, что оно не противоречит закону нормального распределения [9], поэтому выравнивание кривых произведено по этому закону.

Программа оценки различий эмпирического распределения от распределения по нормальному закону составлена применительно к ЭВМ «Минск-22М». Программа предусматривала построение интервального ряда эмпирического распределения, вычисление относительных частот и вероятности его ($\hat{f}_x; \hat{F}_x$); выборочного среднего \bar{x} ; дисперсии S_x^2 ; среднеквадратичного отклонения S_x ; выборочных коэффициентов: вариации \hat{V} , асимметрии $\hat{\beta}_1$ и эксцесса $\hat{\beta}_2$. По этим характеристикам выборки вычислялись следующие величины: плотность вероятности нормального закона распределения f_x с параметрами a_x , σ_x , оценка различий между теоретическим и эмпирическим распределениями λ и средние квадратичные отклонения для асимметрии и эксцесса S_{β_1} , S_{β_2} .

Анализ статистических характеристик (табл. 2.5) дает основание утверждать, что в пределах периода стойкости до 6 мин распределение количества абразивных частиц в ферромагнитных зернах (рис. 2.4) с достаточной степенью точности описывается кривой нормального распределения. Получено уравнение

$$X = 51,386 - 8,644t + 0,0027t^4, \quad (2.3)$$

где X — математическое ожидание среднего количества абразивных частиц электрокорунда в зависимости от времени работы ферромагнитного порошка; t — время работы порошка, мин.

Относительная погрешность подсчитана по формуле

$$\eta = \frac{\Delta x}{X} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

где η — относительная погрешность, %; Δx — абсолютная погрешность, равная разности между \bar{x} фактическим и X теоретическим.

Погрешность для X , подсчитанная по уравнениям, полученным с ЭВМ, составляла не более 12%.

Чтобы оценить вероятность соответствия между исследуемыми параметрами, нужно установить тесноту связи при криволинейной корреляции. Для этого использован коэффициент корреляции, который представляет собой положительное число от 0 до 1. Если коэффициент $\rho=0$, то связи не существует,

Таблица 2.5

Статистические характеристики

Время приработки порошка, сек	Математическое ожидание среднего количества абразивных частиц X	Дисперсия S_x^2	Среднее квадратическое отклонение S_x	Коэффициент вариации V	Коэффициент асимметрии B_1	Коэффициент эксцесса B_2	Критерий Колмогорова—Смирнова λ	Среднее квадратическое отклонение асимметрии S_{B_1}	Среднее квадратическое отклонение эксцесса S_{B_2}
0	58,6	893,72	29,90	0,51	1,13	1,10	0,78	0,46	0,32
15	48,7	820,68	28,64	0,59	0,96	0,61	0,74	0,46	0,32
30	46,3	797,20	28,24	0,58	0,97	0,65	0,99	0,46	0,32
45	45,6	716,90	27,76	0,67	0,98	0,75	0,75	0,46	0,32
60	45,3	688,00	26,72	0,70	1,01	0,83	0,85	0,46	0,32
120	37,1	460,30	26,23	0,71	1,08	0,89	0,98	0,46	0,32
150	20,7	293,07	21,45	1,04	1,45	1,83	1,09	0,46	0,32
180	14,8	263,07	17,12	1,15	1,32	1,05	1,69	0,46	0,32
360	4,6	123,34	11,83	1,05	1,59	2,26	2,01	0,46	0,32
600	0,99	2,23	1,49	1,51	2,07	4,77	3,08	0,46	0,32
720	0,24	0,30	0,55	2,29	2,69	8,22	7,29	0,46	0,32

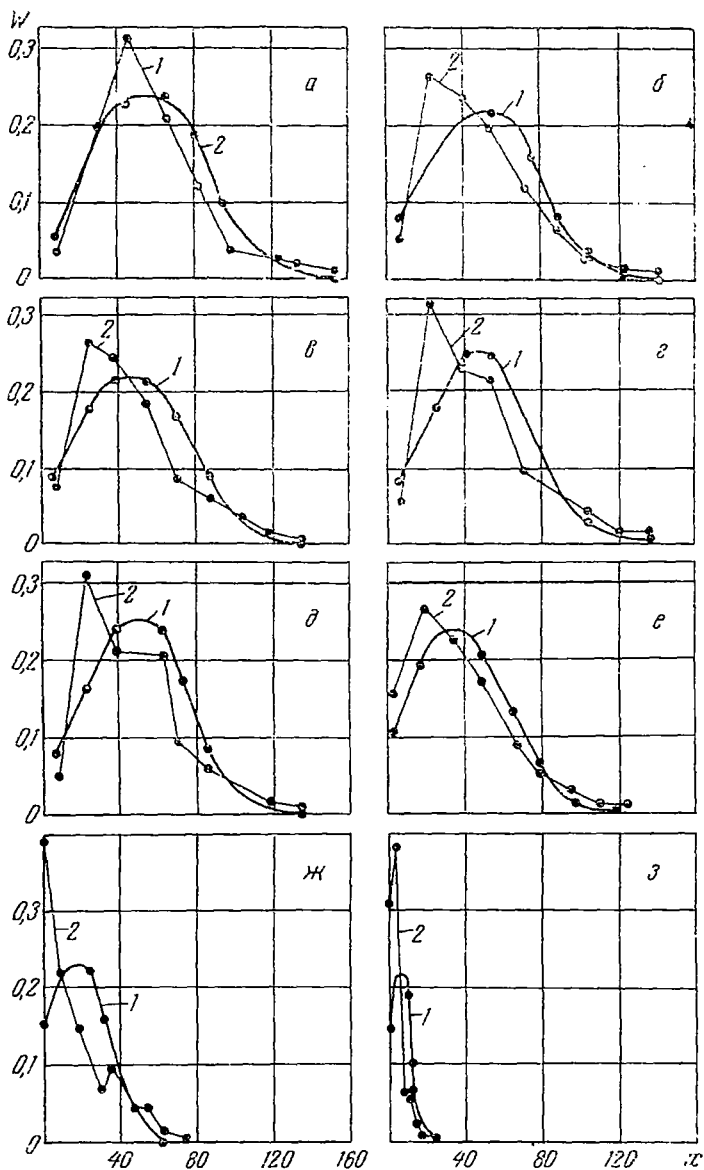


Рис. 2.4. Распределение количества абразивных частиц (x — количество частиц; W — частость) в зернах оксида циркония ЭВМ40 + 80% Fe в зависимости от времени работы порошков: а — $t = 0$; б — 15 сек; в — 30; г — 45; д — 60; е — 120; ж — 180; з — 360 сек. 1 — теоретическая; 2 — экспериментальная кривые

если $\rho=1$, то связь функциональная. При обработке экспериментальных данных для нахождения величины ρ был составлен алгоритм на ЭВМ «Минск-22М». Расчеты показали, что в данном случае $\rho=0,890$. Следовательно, между исследуемыми параметрами существует тесная связь.

Определение режущей способности ферромагнитного порошка. Исследование включало определение удельного съема металла за цикл обработки 15 сек машинного времени ферромагнитным порошком, прошедшим предварительную приработку за 0, 15, 30, 45, 60, 120, 150, 180, 360, 600, 720 сек.

Обработка результатов экспериментов по методике, описанной выше, позволила установить корреляционное уравнение, адекватно описывающее зависимость величины удельного съема металла от периода работы ферромагнитного порошка

$$Q = 2,047 - 0,003t, \quad (2.5)$$

где Q — съем металла, мГ; t — время, отработанное ферромагнитным порошком.

Изменение режущей способности ферромагнитного порошка в зависимости от количества абразивных частиц электрокорунда, содержащихся в зернах кермета, описывается корреляционным уравнением

$$Q = 0,52 - 0,035X, \quad (2.6)$$

где Q — съем металла, мГ; X — математическое ожидание среднего количества абразивных частиц в ферромагнитных зернах.

Значимость полученных уравнений состоит в том, что можно подсчитать средневероятное количество абразивных частиц, участвующих в работе на протяжении всего цикла обработки.

Определение линейно-геометрических параметров абразивных частиц. Исследование линейно-геометрических параметров абразивных частиц ферромагнитных зерен включало определение длины A , ширины B , высоты H , углов при вершине ξ и радиусов ее округления ρ . Для обработки экспериментальных данных были разработаны программы выравнивания наблюдаемых частот по кривым Пирсона и алгоритм, предусматривающие определение средних значений и пределов изменения исследуемых параметров.

Длина абразивных зерен. Распределение размеров длины абразивных зерен описывается уравнением кривой Пирсона типа 1. Математическое выражение этой кривой записывается

$$\tilde{n}_j = \tilde{n}_0 \left(1 + \frac{x}{l_1}\right)^{q_1} \left(1 - \frac{x}{l_2}\right)^{q_2}. \quad (2.7)$$

Математическая обработка полученных данных позволила установить, что распределение длины абразивных частиц описывается уравнением

$$\tilde{n}_1 = 34,2 \left(1 + \frac{\tilde{A}}{0,75}\right)^{c,12} \left(1 - \frac{\tilde{A}}{19,25}\right)^3, \quad (2.8)$$

где \tilde{A} — текущее значение длины (см. рис. 2.5, а).

Ширина абразивных зерен. Распределение размеров ширины абразивных частиц ферромагнитных зерен также описывается уравнением кривой Пирсона типа 1 (рис. 2.5, б). Анализ кривых экспериментального распределения показывает, что поле рассеивания довольно большое. Это объясняется измел-

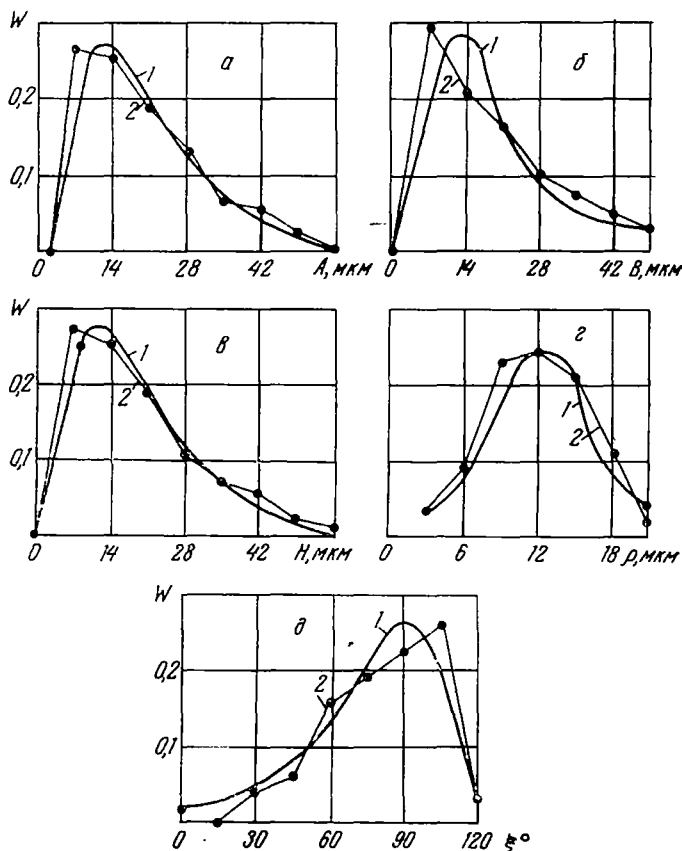


Рис. 2.5. Теоретическое (1) и экспериментальное (2) распределение длины (а), ширины (б), высоты (в), угла заострения вершины (г) и радиуса округления вершин (д) ферромагнитного порошка ЭБМ40+80% Fe зернистостью 0,1 мм

чением абразивных зерен электрокорунда в процессе изготовления керметов, а также не слишком высокими требованиями к технологии их изготовления, так как имеются абразивные зерна значительно больших размеров, чем величина исходной фракции.

Распределение ширины абразивных частиц описывается уравнением

$$\bar{n}_2 = 34,2 \left(1 + \frac{\bar{B}}{1,2} \right)^{0,95} \left(1 - \frac{\bar{B}}{16,3} \right)^{1,3}, \quad (2.9)$$

где \bar{B} — текущее значение ширины.

Высота абразивных зерен. Размеры высоты абразивных частиц ферромагнитных зерен также подчиняются закону распределения, описываемому уравнением кривой Пирсона типа 1.

Анализ экспериментальной кривой распределения высоты H показывает, что она тождественна кривой распределения ширины B (рис. 2.5, в).

Математическое выражение выравнивающих частот распределения H :

$$\bar{n}_3 = 36 \left(1 + \frac{\bar{H}}{0,85} \right)^{0,16} \left(1 - \frac{\bar{H}}{18} \right)^{3,45}, \quad (2.10)$$

где \bar{H} — текущее значение высоты.

Углы заострения вершин зерен и радиусы их округления. Абразивные частицы являются многогранниками неопределенной формы. Известно, что углы при вершинах многогранников и соответствующие им радиусы округления определяются свойствами материала абразивных частиц.

Анализ кривых распределения (рис. 2.5, г) показывает, что углы при вершине абразивных частиц ферромагнитных зерен существенно не отличаются от этого же параметра у абразивных зерен электрокорунда соответствующей зернистости, применяемого для изготовления керметов.

Что касается радиуса округления режущих кромок абразивных частиц ферромагнитных зерен, то анализ показал, что в процессе изготовления кермета вследствие высокой температуры (1000—1300 °С) при спекании происходит оплавление их и увеличение радиуса ρ (среднестатистический радиус округления равен 12 мкм при значении этого параметра 2—5 мкм у зерен электрокорунда соответствующей фракции в состоянии поставки).

Установлено, что при резании абразивными зернами с большими отрицательными передними углами образуется значительный наклеп поверхностного слоя металла.

В процессе магнитно-абразивной обработки порошком кермета, имеющим в своем составе абразивные частицы с

большими радиусами округления, происходит увеличение фактических передних углов резания и создаются условия для наклепа и значительного пластического деформирования металла.

В результате математической обработки экспериментальных данных (рис. 2.5, *з*) установлено, что распределение углов заострения вершин абразивных частиц и радиусов округления их (рис. 2.5, *д*) описывается уравнениями кривой Пирсона типа 1.

Математическое выражение выравнивающих частот для угла заострения

$$\tilde{n}_4 = 46,7 \left(1 + \frac{\tilde{\xi}}{6,2} \right)^{1,9} \left(1 - \frac{\tilde{\xi}}{2,2} \right)^{0,7}, \quad (2.11)$$

где $\tilde{\xi}$ — текущее значение угла заострения ξ .

Для радиуса округления

$$\tilde{n}_5 = 32,2 \left(1 + \frac{\tilde{\rho}}{18} \right)^{13,2} \left(1 - \frac{\tilde{\rho}}{8,67} \right)^{6,37}, \quad (2.12)$$

где $\tilde{\rho}$ — текущее значение радиуса ρ .

Математическая обработка экспериментальных данных по разработанной программе позволила получить корреляционные уравнения связи между средневероятными значениями длины A , ширины B , высоты H , угла заострения вершин ξ , радиуса округления ρ , ферромагнитного порошка кермета марки ЭВМ40+80% Fe зернистостью 0,1 мм. Полученные корреляционные уравнения сведены в табл. 2.6.

Анализ полученных уравнений показывает, что связь между величинами \tilde{A} и \tilde{B} , \tilde{A} и \tilde{H} , \tilde{B} и \tilde{H} , $\tilde{\xi}$ и $\tilde{\rho}$ описывается линейными уравнениями.

Связь между параметрами \tilde{A} и $\tilde{\xi}$, \tilde{B} и $\tilde{\xi}$, \tilde{H} и $\tilde{\xi}$, \tilde{A} и $\tilde{\rho}$, \tilde{B} и $\tilde{\rho}$, \tilde{H} и $\tilde{\rho}$ описывается уравнениями четвертого порядка.

Относительная погрешность подсчитана по формуле

$$\eta = \frac{\Delta N}{N} \cdot 100\%, \quad (2.13)$$

где η — относительная погрешность, %; ΔN — абсолютная погрешность, равная разности между фактическим и теоретическим значением исследуемой величины; N — исследуемая величина.

Максимальная относительная погрешность, подсчитанная по уравнениям, полученным с ЭВМ, не превышала 11%. Ценность этих уравнений состоит в том, что, зная средневероятное значение только одного параметра, можно определить средневероятное значение остальных.

Корреляционная связь между исследуемыми параметрами

Исследуемые параметры	Корреляционное уравнение	Коэффициент корреляции
$\tilde{A} \text{ и } \tilde{B}$	$\tilde{A} = 1,115 + 1,151\tilde{B}$	0,924
$\tilde{B} \text{ и } \tilde{A}$	$\tilde{B} = 1,04 + 0,742\tilde{A}$	0,924
$\tilde{A} \text{ и } \tilde{H}$	$\tilde{A} = 2,395 + 1,400\tilde{H}$	0,848
$\tilde{H} \text{ и } \tilde{A}$	$\tilde{H} = 1,483 + 0,513\tilde{A}$	0,848
$\tilde{A} \text{ и } \tilde{\xi}$	$\tilde{A} = 27,153 - 0,399\tilde{\xi} + 0,003\tilde{\xi}^2$	0,084
$\tilde{\xi} \text{ и } \tilde{A}$	$\tilde{\xi} = 66,464 - 0,042\tilde{A} - 0,003\tilde{A}^2$	0,084
$\tilde{A} \text{ и } \tilde{\rho}$	$\tilde{A} = 19,381 + 0,513\tilde{\rho} - 0,187\tilde{\rho}^2 + 0,009\tilde{\rho}^3$	0,008
$\tilde{\rho} \text{ и } \tilde{A}$	$\tilde{\rho} = 11,102 + 0,033\tilde{A} - 0,008\tilde{A}^2$	0,008
$\tilde{B} \text{ и } \tilde{H}$	$\tilde{B} = 1,044 + 1,224\tilde{H}$	0,922
$\tilde{H} \text{ и } \tilde{B}$	$\tilde{H} = 0,713 + 0,694\tilde{B}$	0,922
$\tilde{B} \text{ и } \tilde{\xi}$	$\tilde{B} = 21,004 - 0,292\tilde{\xi} - 0,002\tilde{\xi}^2$	0,071
$\tilde{\xi} \text{ и } \tilde{B}$	$\tilde{\xi} = 66,974 - 0,191\tilde{B}$	0,071
$\tilde{B} \text{ и } \tilde{\rho}$	$\tilde{B} = 17,756 - 0,795\tilde{\rho} - 0,021\tilde{\rho}^2 + 0,003\tilde{\rho}^3$	0,015
$\tilde{\rho} \text{ и } \tilde{B}$	$\tilde{\rho} = 11,229 + 0,006\tilde{B}$	0,015
$\tilde{H} \text{ и } \tilde{\xi}$	$\tilde{H} = 13,086 - 0,140\tilde{\xi} + 0,001\tilde{\xi}^2$	0,005
$\tilde{\xi} \text{ и } \tilde{H}$	$\tilde{\xi} = 68,085 - 1,13\tilde{H} + 0,072\tilde{H}^2 - 0,001\tilde{H}^3$	0,005
$\tilde{H} \text{ и } \tilde{\rho}$	$\tilde{H} = 11,636 - 0,37\tilde{\rho} - 0,008\tilde{\rho}^2 + 0,002\tilde{\rho}^3$	0,063
$\tilde{\rho} \text{ и } \tilde{H}$	$\tilde{\rho} = 11,307 - 0,046\tilde{H} + 0,003\tilde{H}^2$	0,063
$\tilde{\xi} \text{ и } \tilde{\rho}$	$\tilde{\xi} = 3,018 + 5,438\tilde{\rho}$	0,821
$\tilde{\rho} \text{ и } \tilde{\xi}$	$\tilde{\rho} = 3,309 + 0,124\tilde{\xi}$	0,821

Особенно важно знать значение углов при вершинах радиуса округления режущих кромок, непосредственно влияющих на процесс резания и формообразования обработанной поверхности при магнитно-абразивной обработке. Анализ полученных коэффициентов корреляции показывает, что наиболее тесная связь существует между линейными параметрами, а также между углом заострения вершин и радиусами их округления, менее тесная — между линейными размерами и геометрическими параметрами ξ и ρ .

5. Определение удельного расхода ферромагнитного порошка

Определение необходимого количества ферромагнитного порошка, подаваемого в рабочую зону за один цикл обработки, является важным фактором, влияющим на технико-экономич-

ческие показатели процесса. В опубликованной литературе по магнитно-абразивной обработке рекомендации по этому вопросу не имеются. Настоящее исследование включало экспериментальное определение количества ферромагнитного порошка, необходимого для обработки единицы поверхности детали.

Оптимальным удельным расходом ферромагнитного порошка, необходимого для обработки 1 мм^2 поверхности, следует считать такую минимальную дозу, которая обеспечивает наилучшие результаты обработки: максимальный съём металла и наименьшую шероховатость обработанной поверхности.

Исследование включало определение удельного расхода ферромагнитного порошка для зазора $0,3$ и $0,8 \text{ мм}$. Кривые построены по средним результатам из пяти образцов для каждой точки.

Результаты исследования (рис. 2.6) показывают, что кривые изменения величины съёма металла в зависимости от количества ферромагнитного порошка в рабочей зоне имеют четыре характерных участка.

Участок $0-1$ характеризует интенсивность обработки при условии недостаточного заполнения рабочего зазора порошком.

Исследование давления ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность [4] показывает, что при этом количестве порошка давление определяется только силами магнитного поля. Абсцисса точки 1 определяет начало второго участка, который характеризует обработку с недостаточным количеством порошка. Увеличение дозы порошка до $0,004 \text{ г/мм}^2$ (абсцисса точки 2 кривой A) не приводит к заметному увеличению съёма металла. Это объясняется тем, что порошка недостаточно для формирования зон активной обработки.

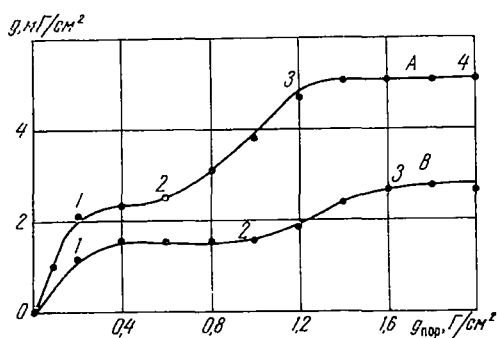


Рис. 2.6. Зависимость съёма металла g от расхода ферромагнитного порошка $g_{\text{пор}}$: A — при рабочем зазоре $\delta=0,3$; B — $0,8 \text{ мм}$

В точке 2 намечается второй участок пропорционального увеличения съема металла. Можно предположить, что в этом случае ферромагнитного порошка достаточно для возникновения зон механического заклинивания и активизации процесса обработки.

Начиная с точки 3, величина съема металла принимает постоянное значение.

Следовательно, величину удельного расхода порошка, определяемого абсциссой точки 3, можно считать оптимальной.

Характер изменения кривой для зазора 0,8 мм аналогичен, хотя абсцисса точки 3 имеет значительно большую величину. Это можно объяснить увеличением объема зазора.

Для удобства практического применения потребное количество ферромагнитного порошка выражено в отношении к величине поверхности обрабатываемой детали в граммах на квадратный миллиметр.

Следует отметить, что определение удельного расхода ферромагнитного порошка производилось для одного цикла обработки.

На практике отмечено, что рациональная конструкция магнитопровода, уменьшающая до минимума потоки рассеивания, позволяет удерживать ферромагнитный порошок в зазоре и обрабатывать до 15 деталей одной дозой порошка.

6. Некоторые магнитно-мягкие материалы на основе железа, их свойства и технология изготовления

Несомненный интерес представляют свойства металлокерамического материала на железной основе, важнейшие из которых приведены в табл. 2.7.

Исследования сплавов Fe — Si показали, что оптимальное состояние магнитных характеристик сплавов достигается при содержании 6,5% Si [3].

При содержании 6,5% Si в сплаве Fe — Si твердость сплава $HV = 325 \text{ кг/мм}^2$ [5].

Для изготовления сплава Fe — Si применяется порошок АПЖМ и порошок, приготовленный из ферросилиция с содержанием около 33% Si. Количество порошка ферросилиция вводится из расчета получения заданного содержания кремния в сплаве [5].

Порошок железа перед смешиванием подвергается восстановительному отжигу при температуре 700°C в среде водорода, а затем растирается и просеивается через сито с сеткой 105 мкм. Через это же сито просеивается и порошок ферросилиция.

Таблица 2.7

Свойства порошков железо—кремний

Состав, %		Твер- дость <i>HV</i>	$\mu_{\text{макс}}$	B_s , <i>гс</i>
Fe	Si			
96	4	165	1720	10400
94	6	300	3450	8900
92	8	320	1070	7900
90	10	340	840	5700

После тщательного смешивания шихту прессуют при давлении 9—10 $\tau/\text{см}^2$, а затем производят спекание при 1150—1300 °С в течение 2—3 час в осушенном водороде с последующим размолотом и рассевом на фракции.

Для порошков с магнитно-мягкими свойствами применяются сплавы на основе Fe—Al—Si, которые по магнитным свойствам близки к пермаллою. Сплав, содержащий 4—9% Al, 6—12% Si и 79—90% Fe, имеет высокое значение $\mu_{\text{макс}}$ и низкие потери на гистерезис [10].

Для приготовления сплава смешиваются порошки FeSi, AlSi с содержанием 45—55% Al и чистого железа. Смесь прессуется и спекается в среде водорода, гелия или в вакууме при $t=1000\text{—}1300$ °С. Сплав AlSi находится при температуре спекания в жидком состоянии.

Возможно также спекание свободно насыпанного порошка шихты.

Сплавы семейства альсифер с содержанием 5—6% Al, 8—10% Si, остальное Fe имеют твердость 45—55 *HRC* — достаточно хрупкие [5]. Сплав сендаст, или альсифер, с содержанием 85% Fe, 9,5% Si, 5,5% Al имеет $\mu=30000$, легко подвергается размолу в силу своей большой хрупкости [11].

Упомянутые выше сплавы получены методом порошковой металлургии путем прессования и спекания смесей порошков. Спекание осуществлено в среде чистого аргона при температуре 1650—2000 °С с выдержкой в течение 30 мин.

Порошки с магнитно-мягкими свойствами, близкими к свойствам пермаллоя, могут изготавливаться из порошков чистых металлов железа и никеля или из комплексных карбонильных или электролитических железо-никелевых порошков [3]. Прессование производится под давлением 5—8 $\tau/\text{см}^2$, спекание — в атмосфере водорода при температуре 1200—1300 °С в течение 2—3 час. Затем следует дробление, размол и рассев порошков.

С целью увеличения магнитной проницаемости предлагается вводить в железо фосфор в количестве, обеспечивающем обра-

зование монокристаллов (0,01—3% [10]). Лучшие свойства получены при добавлении 0,7% фосфора. При введении фосфора смесь порошков прессуется под давлением 3 т/см² и спекается сначала при температуре 1000 °С, а затем при 1200 °С.

7. Физические свойства порошков

К физическим свойствам порошков относятся: размер, форма и твердость частиц; магнитные и электрические их свойства.

По форме частиц металлические порошки можно условно разделить на группы [13]: сферическая (карбонильные порошки); каплеобразная и отчасти сферическая (распыленные порошки); губчатая (восстановленные порошки); дендритная (электролитические порошки); тарельчатая (вихревой разлом); осколочная (разлом в шаровых и вибротельниках); волокистая и лепестковидная (карбонильные порошки).

Основным методом исследования формы частиц является изучение их в оптическом и электронном микроскопах.

По гранулометрическому составу, металлические порошки подразделяются на ультратонкие (менее 0,005 мм); весьма тонкие (0,005—0,01 мм); тонкие (0,01—0,04 мм); средней тонкости (0,04—0,15 мм); крупные или грубые (0,15—0,5 и более).

По ГОСТ 9849-61 порошок железа разделяется по гранулометрическому составу на крупный (К) — размеры частиц более 0,25 мм; средний (С) — размеры от 0,16 до 0,45 мм; мелкий (М) — размеры от 0,071 до 0,025 мм; очень мелкий (ОМ) — размеры от 0,016 мм и менее.

Методы исследования гранулометрического состава [13]: просеивание порошка на ситах; микроскопический; седиментационный; рентгенографический; измерение коэзитивной силы.

В производственных условиях гранулометрический состав порошков чаще всего определяют методом просеивания на ситах. Ситовый анализ применяется для грубых и средних порошков.

В исследуемом наборе сит номер сетки соответствует номинальному размеру сторон ячейки в миллиметрах. Номера сетки по ГОСТ 3584-53—08, 05, 045, 0315, 025, 018, 016, 0125, 01, 008, 0063, 0056, 004. Зернистость порошка маркируется следующим образом: фракции порошка, оставшиеся на сите 01, но прошедшие через более крупное сито 0125, обозначаются — 0,125 + 0,1, т. е. фракция минус 0,125 плюс 0,1.

Для тонких и весьма тонких порошков гранулометрический состав определяется микроскопическим методом. Результаты ситового анализа записываются по определенной форме.

Микротвердость порошковых частиц определяется измерением диагонали отпечатка, полученного вдавливанием алмазной пирамиды в проверяемую частицу на приборе ПМТ-3 по следующей методике: исследуемый порошок смешивается с

бакелитом или оргцементом типа АКР. Смесь прессуется под давлением $1-2 \text{ т/см}^2$ в небольшие брикеты, которые затем нагреваются при $t=140^\circ\text{C}$ для полимеризации наполнителя. Брикеты шлифуются и полируются обычно при нагрузке 20--30 г (в зависимости от характера материала). Величина микротвердости в значительной степени зависит от содержания в основном металле различных примесей и легирующих элементов и искаженности кристаллической решетки.

При измерении микротвердости необходимо оценивать возможные пределы ошибок измерений, обращать особое внимание на технику приготовления образцов и учитывать роль таких факторов, как различия в структуре.

При выяснении влияния микроструктуры на зависимость глубины отпечатка от нагрузки необходимо считаться с тем обстоятельством, что очень большой объем отпечатка алмазного индентора окружен зоной наклепанного металла. Радиус такой зоны может в 10 раз превышать глубину отверстия. Если, например, выделения второй фазы могут образовывать препятствия для перемещения дислокаций, то возникающая под действием индентора зона наклепанного металла будет влиять на измеренные значения микротвердости. То же самое можно сказать и о других факторах, таких, как границы зерен и область сегрегации примесей или концентрации напряжений.

При измерении микротвердости составляющих структуры, характеризующихся высокой твердостью, как например карбид вольфрама, важно, чтобы диаметр отпечатка не превышал $1/5$ диаметра зерна этой составляющей. Однако очевидно, что толщина исследуемой частицы, как правило, неизвестна.

При очень низких нагрузках в качестве эталонов микротвердости могут быть использованы следующие материалы (в форме образцов стандартных размеров) согласно ГОСТ 9450-60: MoSi_2 , имеющий твердость, по Виккерсу, 1200—1300; Mo_2C — 1800—2000; WC —2300—2500; TiB_2 —3400—3700; Cu_5Zn_8 —450—500. Твердость наиболее употребляемых порошков [7] приведена в табл. 2. 8.

При магнитно-абразивной обработке важное значение имеют магнитные свойства применяемых порошков. В табл. 2. 9 приведена зависимость магнитных свойств магнитно-мягких порошков от различных влияний [11] (знак «+» указывает на увеличение, а знак «—» на уменьшение, ослабление этих свойств в зависимости от указанных факторов).

На магнитные свойства порошков оказывает влияние их химический состав. Так, например, в композиции Fe—Al при комнатной температуре алюминий уменьшает магнитную твердость железа (следовательно, присутствие Al и Si в железе для магнитно-мягких материалов желательно). Следует заме-

Таблица 2.8

Твердость порошков, кг/мм^2 [7]

Материал порошка	Микротвер- дость, кг/мм^2	Шкала	HR	HV	HB
Ti	150	B	64	100	80
Cr	250			108	90
Mo	190	B	95	160	160
W	350	B	105	< 350	< 460
Fe	< 70			62	< 120
Co	130				< 100
Ni	190				< 80
Al	25			< 30	< 25
ZrBe ₁₃				1650	
CrBe ₂				1288	
TiB ₂	3350		86		
CrB ₂	< 2000	A	91		
Co ₂ B		A	90		
NiB ₂	2575				
WC	1750	A	80	1600	
TiC	3000	A	95		
B ₄ C	4950				
SiC	3000				
CrN	1093	A	78		
Si ₃ N ₄	3337	A	99		
TiO	1800				
FeO	550				
NiO	440				
Al ₂ O ₃ (корунд)	2000				
SiO ₂	1200				
CrS ₂	900			< 1100	
B ₃ Si	5000				
BP	3500				
Электрокорунд белый	2350				
Fe—Si (6% Si)					3000
Fe—Si (8% Si)					320
Fe—Si (10% Si)					340
Порошок железный	114—156				
Ферриты	500—645				
Альсифер		C	45—55		
30ХГТ AlB ₁₂	3700				230

титить, что сплавы с содержанием Al более 16% неферромагнитны. Наличие в композиции порошка Fe—В очень малого количества бора (до 0,05%), не выходящее за пределы его растворимости в α -железе, несколько понижает коэрцитивную силу и повышает максимальную магнитную проницаемость. При более высоком содержании бора магнитная проницаемость сплавов его с железом все время падает по направлению к концентрации Fe₂B (16% В). Сам борид железа обладает свойствами парамагнетика. В композициях Fe—Со кобальт повышает магнитное насыщение железа; в Fe—Сг под влиянием хрома насыщение падает, а электросопротивление увеличивается; в Fe—Mn при увеличении содержания марганца до 8% насыщение падает сравнительно слабо, затем увеличивается, и при 14% Mn сплав становится немагнитным; в Fe—Р при содержании фосфора более 1,2% падает магнитная проницаемость; в Mn—В — борид марганца ферромагнитен незначительно и в поле 100 э имеет $B=500$ гс, а в поле 500 э $B=1900$ гс. При содержании в сплаве более 33% Si ферромагнитные свойства сплава теряются.

Влияние наклепа на магнитные свойства материала выражается в том, что магнитная проницаемость падает, а коэрцитивная сила и потери на гистерезис возрастают, вследствие чего для порошков, от которых требуется высокая магнитная проницаемость и малые потери на гистерезис, необходима операция отжига.

Магнитные свойства порошков (индукции насыщения и величин коэрцитивной силы) можно определить на установке, предложенной Б. Г. Лившицем [8]. При работе на этой установке величина магнитной индукции пропорциональна отклонению баллистического гальванометра при вталкивании образца через центральный канал сердечника электромагнита в

Таблица 2.9

Магнитные свойства магнитно-мягких порошков в зависимости от различных факторов [11]

Влияющий фактор	Магнитные свойства		
	μ_0	$\mu_{\text{макс}}$	B_s
Основной химический состав	+	+	+
Примесей 1%	—	—	+
Пластическая деформация сжатия	—	+	+
Температура	+	+	—
Воздушный зазор	—	—	—
Частота	—	—	+

измерительную катушку, помещенную между полюсами электромагнита и замыкаемую на баллистический гальванометр. Расчет насыщения $4\pi J_s$ производится по отношению отклонения баллистического гальванометра, даваемого образцом, к отклонению, даваемому эталоном, изготовленным из армкожелеза. Насыщение эталона принято 21420 гс.

Определение относительного магнитного насыщения порошков, выделенных из сплавов карбидов, производится следующим образом.

Карбидные осадки запрессовываются вручную в стеклянные трубки с внутренним диаметром 2 мм и проталкиваются обычным способом в катушку баллистической цепи измерительной установки. Запрессованные осадки взвешиваются, и определяется высота полученного столбика. Отклонения гальванометра приводятся к стандартной набивке плотности, за которую принимается набивная плотность порошка, полученного из стали У10 в отожженном состоянии. Измерения выполняются в магнитных полях около 800 гс.

Образец, следовательно, представляет собой стеклянную ампулу, запаянную с одного конца и набитую осадком, запрессованным вручную. Открытый конец ампулы закупоривался замазкой из графита на жидком стекле.

При испытании образец быстро проталкивался в катушку до упора, установленного таким образом, что ампула своей серединой останавливалась посередине катушки. При вталкивании наблюдается отклонение баллистического гальванометра.

Коэрцитивная сила определяется на этой же установке выдергиванием намагниченного до насыщения образца из замкнутой на баллистический гальванометр катушки, помещенной в размагничивающем поле в центре соленоида.

Полное размагничивание образца определяется по отсутствию отклонения гальванометра при выдергивании образца из катушки.

Наибольшая возможная погрешность определения магнитного насыщения составляет 4%, коэрцитивной силы — 2%.

МАТЕРИАЛЫ ДЕТАЛЕЙ МАГНИТНО-АБРАЗИВНЫХ СТАНКОВ

Магнитная система установок и приспособлений для магнитно-абразивной обработки деталей машин в подавляющем большинстве случаев состоит из магнита и магнитной арматуры, формирующей поле магнита в соответствии с назначением устройства или защищающей его от воздействия внешней среды. Как правило, рабочим органом упомянутых установок является электромагнит, магнитное поле которого создается катушками соленоидов. Количество катушек в системе зависит от характера обработки и габаритов изделия. Принято различать следующие основные элементы магнитной арматуры: полюсный наконечник, сердечник, ярмо, термомагнитный шунт, магнитный экран.

В дальнейшем изложении основное внимание уделено материалам, применяемым для изготовления магнитной арматуры системы.

1. Величины, характеризующие поведение тел в магнитном поле

Согласно существующим представлениям [7], всякое тело состоит из элементарных, неделимых магнитных диполей. Невозможно получить магнетизм только одного знака. Указанное обязательное условие наличия диполей называется поляризацией магнитного поля. Магнитное поле возбуждается движущимися электрическими зарядами, представляющими собой элементарные круговые токи. Круговые токи наводятся вращением электронов вокруг собственной оси и по орбите вокруг оси атома. Магнитное поле характеризуется силовым воздействием на движущиеся заряженные частицы, а следовательно, и на электрические токи. При внесении в магнитное поле тело намагничивается в результате взаимодействия его элементарных магнитов с внешним полем. За единицу магнитного заряда принимают такой заряд, который действует на равный себе, находящийся на расстоянии одного сантиметра, с силой одной дин. Мерой же намагниченности тела считается

величина его магнитного момента, равная произведению суммы элементарных магнитных зарядов в каждом полюсе m на расстояние между полюсами l . Для цилиндрического тела с большим соотношением $l : d$ намагниченность внутри этого тела практически однородна.

Магнитные свойства всякого материала характеризуются величиной магнитного момента M , интенсивностью намагничивания J , удельной намагниченностью σ , т. е. величиной магнитного момента, отнесенной к единице объема, и намагниченностью на один грамм-атом тела σ_A .

Указанные величины связаны между собой соотношениями:

$$M = ml = \sigma Sl = JV = JSl = \chi SIH; \quad (3.1)$$

$$\sigma_A = MA/m, \quad \chi = \sigma/H; \quad \chi_A = \sigma_A/H,$$

где S — площадь поперечного сечения намагничиваемого стержня, $см^2$; V — объем стержня магнита, $см^3$; A — атомный вес материала; χ_A — магнитная восприимчивость грамм-атомная, т. е. на 1 грамм-атом; χ — удельная восприимчивость единицы объема, т. е. $1 см^3$.

Между магнитной восприимчивостью 1 грамм-атома χ_A , 1 грамма χ_r и единицы объема материала χ существует следующая взаимосвязь:

$$\chi_r = \frac{\chi}{\delta}; \quad \chi_A = \chi V_A = \chi_r A,$$

где δ — удельный вес; V_A — атомный объем.

Анализ зависимостей (3.1) показывает, что магнитная восприимчивость материала зависит от степени его намагниченности и напряженности внешнего поля, в котором находится тело из данного материала, поэтому при расчетах магнитной системы и выборе материала для магнитопровода необходимо учитывать, кроме магнитной проницаемости материала μ , и магнитную индукцию B как сердечника, так и изделия.

Магнитная индукция магнитного поля — векторная величина, имеющая вполне определенное направление в пространстве. Количественное ее выражение установлено Био и Саваром в результате анализа и обобщения опытных данных и описано уравнением

$$\Delta B = K \frac{i \Delta l \sin \alpha}{r^2}, \quad (3.2)$$

где K — коэффициент, значение которого зависит от магнитных свойств окружающей среды и выбранной системы единиц измерения. В системе СГСМ, например,

$$K = \frac{\mu_0}{4\pi},$$

где μ — относительная магнитная проницаемость материала, т. е. коэффициент, показывающий, во сколько раз магнитная проницаемость данного материала больше магнитной проницаемости вакуума; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума. Магнитная проницаемость материала μ — величина переменная, зависящая от напряженности магнитного поля, температуры нагревания тела, вида термической обработки и зернистости данного материала.

Из уравнения (3.2) следует, что всякий элемент тока создает на некотором расстоянии от себя магнитное поле, у которого ΔB прямо пропорциональна длине l этого элемента, величине протекающего тока i , синусу угла α между направлением тока и радиус-вектором, соединяющим рассматриваемую точку поля с данным элементом тока, и обратно пропорциональна квадрату длины этого радиус-вектора r [9].

Для электромагнитов важными величинами являются также значение магнитного потока Φ , т. е. произведение магнитной индукции B на площадь S магнитопровода в сечении, перпендикулярном направлению магнитных силовых линий, и напряженности поля H , т. е. отношения магнитной индукции B к произведению магнитных проницаемостей $\mu\mu_0$. Напряженность магнитного поля, как и магнитная индукция, является векторной величиной определенного направления.

Если представить выражение магнитного потока в виде

$$\Phi = HS\mu\mu_0 = \frac{i\omega S\mu\mu_0}{l} = \frac{i\omega}{\frac{l}{\mu_0\mu S}} = \frac{F}{R_M}, \quad (3.3)$$

то станет очевидным, что магнитный поток пропорционален намагничивающей силе и обратно пропорционален магнитному сопротивлению.

В формуле (3.3) F — намагничивающая сила катушки соленоида, равная произведению протекающего тока в амперах на число витков обмотки; R_M — магнитное сопротивление, т. е. отношение расстояния между полюсами к площади сечения сердечника электромагнита, по которому проходит магнитный поток.

Магнитные свойства любого материала определяются путем непосредственного измерения величины интенсивности намагничивания J , а также значений параметров B , H , μ и χ . Связь между основными величинами магнитного поля описывается уравнениями, вид которых зависит от принятой системы единиц, так, например, Международная система единиц СИ требует применения формул в рациональном виде,

Основные величины, единицы и уравнения магнетизма

Величина	Основные уравнения		Единицы измерения		Соотношения единиц
	СИ	СГСМ	СИ	СГСМ	
Магнитный поток Φ	$\Phi = BS$	$\Phi = BS$	Вебер, <i>вб</i>	Максвелл, <i>мкс</i>	$1 \text{ вб} = 1 \text{ в} \cdot \text{сек} = 10^8 \text{ мкс}$ $1 \text{ мкс} = 10^{-8} \text{ вб}$
Магнитная индукция B	$B = \mu_0 (H + J)$	$B = H + 4\pi J$	Тесла, <i>тл</i>	Гаусс, <i>гс</i>	$1 \text{ тл} = 1 \text{ вб/м}^2 = 10^4 \text{ гс}$ $1 \text{ гс} = 10^{-4} \text{ тл}$
Напряженность магнитного поля H	$H = \frac{B}{\mu_0}$	$H = \frac{B}{\mu}$	Ампер на метр, <i>а/м</i>	Эрстед, <i>э</i>	$1 \text{ а/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ э} \approx 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ э}$ $1 \text{ э} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ а/м} \approx 80 \text{ а/м}$
Намагничивающая сила F	$F = i\pi l$	$F = 4\pi i l$	Ампер или ампер-виток, <i>а</i> или <i>ав</i>	Гильберт, <i>гб</i>	$1 \text{ а} = 0,4 \pi \text{ гб} \approx 1,25 \text{ гб}$ $1 \text{ гб} = \frac{10}{4\pi} \text{ а} \approx 0,8 \text{ а}$
Намагниченность J	$J = k_M H$	$J = \chi H$	Ампер на метр, <i>а/м</i>	Эрстед, <i>э</i>	$1 \text{ а/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ э}$
Абсолютная магнитная проницаемость $\mu_{\text{абс}}$	$\mu_{\text{абс}} = \frac{B}{H}$	$\mu_{\text{абс}} = \frac{B}{H}$	Генри на метр, <i>гн/м</i>	Безразмерная	—
Магнитная проницаемость (относительная) μ	$\mu = 1 + k_M$	$\mu = 1 + 4\pi\chi$	Безразмерная	«	—
Магнитная постоянная μ_0	$\mu_0 = \frac{\mu_{\text{абс}}}{\mu}$	$\mu_0 = 1$	Генри на метр, <i>гн/м</i>	«	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м}$ (по СИ) $\mu_0 = 1$ (по СГСМ)
Магнитная восприимчивость k_M (по СИ), χ (по СГСМ)	$k_M = \frac{J}{H}$	$\chi = \frac{J}{H}$	Безразмерная	«	$k_M = 4\pi\chi$
Магнитная проводимость G	$G = \frac{\Phi}{F}$	$G = \frac{\Phi}{F}$	Вебер на ампер, <i>вб/а</i> , или генри, <i>гн</i>	Максвелл на гильберт, <i>мкс/гб</i> , или см	$1 \text{ вб/а} = 1 \text{ гн} = 10^9/4 \pi \text{ мкс/гб}$ $1 \text{ мкс/гб} = 1 \text{ см} = 4\pi \cdot 10^{-9} \text{ вб/а}$
Объемная плотность энергии магнитного поля ω	$\omega = \frac{BH}{2}$	$\omega = \frac{BH}{8\pi}$	Джоуль на кубический метр, <i>дж/м³</i>	Эрг на кубический сантиметр, <i>эрг/см³</i>	$1 \text{ дж/м}^3 = 10 \text{ эрг/см}^3$ $1 \text{ эрг/см}^3 = 0,1 \text{ дж/м}^3$
Энергическое произведение BH	—	—	Тесла-ампер на метр, <i>тл·а/м</i>	Гаусс-эрстед, <i>гс·э</i>	$1 \text{ тл} \cdot \text{а/м} = 40 \pi \text{ гс} \cdot \text{э} \approx 125 \text{ гс} \cdot \text{э}$ $1 \text{ гс} \cdot \text{э} = 1/40 \pi \text{ тл} \cdot \text{а/м} \approx 8 \cdot 10^{-3} \text{ тл} \cdot \text{а/м}$

Таблица 3.2

Изменение коэффициента размагничивания
в зависимости от величины Δ [7]

Δ	N	Δ	N
10	0,1948000	80	0,0166000
20	0,0677700	100	0,0044700
25	0,0512500	200	0,0012950
30	0,0350600	500	0,0001760
40	0,0021650	1000	0,0000699
50	0,0148500	10 000	0,0695300
60	0,0108800	100 000	0,0712050

а система СГСМ — в нерациональном виде. Соотношения между единицами СИ и СГСМ приведены в табл. 3. 1.

При определении магнитных характеристик материала отношение истинной напряженности магнитного поля H_i к измеренной его величине H_e устанавливается из уравнения

$$H_i = H_e - NJ, \quad (3.4)$$

где H_e — измеренная напряженность внешнего магнитного поля, создаваемого электрическим током в обмотке катушки; N — коэффициент размагничивания, зависящий от формы сердечника электромагнита. Значения N при баллистических измерениях [7] в зависимости от отношения длины сердечника l к его поперечному сечению S , т. е. от $\Delta = l/S$ (цилиндр, $\mu \rightarrow \infty$, пермаллой, железо, листовая электротехническая сталь), приведены в табл. 3. 2.

2. Классификация магнитных материалов

Установлено, что различные материалы при помещении их во внешнее магнитное поле неодинаково на него реагируют: одни становятся менее проницаемыми по сравнению с воздухом и уменьшают напряженность внешнего магнитного поля, другие, наоборот, усиливают напряженность внешнего поля. Поэтому в зависимости от физических и магнитных свойств, технологии изготовления, сорта, марки и других характеристик все материалы подразделяются на диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные. В последнее время уже говорят о пяти, а не о трех типах магнетизма — к перечисленным выше добавились еще антиферромагнетизм и ферримагнетизм [11, 12].

К диамагнитным относят материалы, характеризующиеся слабой восприимчивостью, у которых магнитная проницаемость меньше единицы и не зависит от напряженности внешнего поля: это углерод, бериллий, мышьяк, селен, теллур, сурьма,

висмут, сильно ослабляющие магнитное поле, и медь, цинк, кадмий и другие материалы, слабо уменьшающие напряженность поля.

Диамагнитные материалы нейтральны в магнитном отношении из-за скомпенсированности их спиновых магнитных моментов. При внесении деталей из диамагнитных материалов в магнитное поле оно ослабевает. Последнее объясняет тот факт, что диамагнитные материалы менее проницаемы даже по сравнению с воздухом. Для этих материалов $J < 0$, $\mu < 1$, $\chi < 0$. намагниченность отрицательна по знаку, т. е. направлена навстречу внешнему полю, что особенно важно учитывать при исследованиях технологического процесса и определении оптимальных режимов магнитно-абразивной обработки деталей из меди, бронзы, латуни и тому подобных диамагнитных материалов, а также при расчетах магнитной системы установок.

Явление диамагнетизма с точки зрения современных представлений объясняется взаимодействием вращающихся электронов тела с намагничивающим полем, появлением в результате этого взаимодействия прецессии орбит вокруг направления указанного поля, обуславливающей возникновение дополнительного магнитного поля, направленного навстречу основному и снижающего величину напряженности внешнего поля электромагнита [6]. Известно, что явление диамагнетизма имеет место у всех материалов, однако у парамагнитных и ферромагнитных веществ оно незначительно по величине и не может оказывать существенного влияния.

Парамагнетизм возникает в тех случаях, когда атомы или молекулы являются элементарными магнитами, беспорядочно ориентированными лишь в отсутствие внешнего магнитного поля. Спиновые магнитные моменты у парамагнитных материалов некомпенсированы, в силу чего их атомы обладают собственными магнитными моментами. При внесении деталей из парамагнитных материалов во внешнее намагничивающее поле электромагнита наряду с диамагнитными явлениями происходит процесс переориентации магнитных полей атомов. В результате переориентации магнитное поле атомов материала детали поворачивается в направлении намагничивающего внешнего поля электромагнита, совпадает с последним по направлению и усиливает его. Однако это усиление напряженности внешнего магнитного поля, как правило, незначительно по размерам из-за малой магнитной проницаемости парамагнитных материалов (для алюминия, например, $\mu = 1,000023$). Магнитная проницаемость парамагнитных материалов — постоянная величина, не зависящая от намагничивающего поля H .

К парамагнитным относятся алюминий, хром, вольфрам, ванадий и другие материалы, у которых $J > 0$, $\mu > 1$, $\chi > 0$.

В соединениях, содержащих атомы группы железа, элементарные магнитные моменты суть электронные спины, поскольку орбитальные магнитные моменты, как правило, «заморожены» в поле кристаллической решетки этих соединений.

Во время как диамагнетизм и парамагнетизм могут, по крайней мере, приближенно описываться в рамках одноатомных моделей, остальные три типа магнетизма являются существенно коллективными явлениями. Ферромагнетизм обусловлен таким взаимодействием между элементарными магнетиками, при котором ниже точки Кюри они ориентируются параллельно друг другу, создавая в материале детали самопроизвольную намагниченность даже в отсутствие внешнего магнитного поля электромагнита. Антиферромагнетизм подобен ферромагнетизму, только с тем исключением, что ниже критической температуры, которую в этом случае принято называть точкой Нееля, а не точкой Кюри, атомные магнитные моменты ориентируются антипараллельно друг другу. Ферримагнетизм представляет собой случай нескомпенсированного антиферромагнетизма, когда элементарные магнетики различных магнитных подрешеток занимают неэквивалентные положения в кристалле, так что в упорядоченной конфигурации их антипараллельные магнитные моменты не скомпенсированы [10].

Выше точек Кюри и Нееля ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики становятся парамагнетиками. При низких температурах ферромагнетики и ферримагнетики имеют большую способность к самопроизвольному намагничиванию, наблюдаемую, например, в виде остаточной намагниченности. Свойства ферримагнетиков присущи ферритам — ферромагнитным веществам, не обладающим заметной электропроводностью. Большое электросопротивление ферритов позволяет избавиться от потерь на вихревые токи, поскольку их электроны — носители магнитного момента — остаются локализованными у своих атомов и не блуждают по кристаллу, как это имеет место у металлов. Ферриты применяются в трансформаторах, электро- и радиоустройствах и т. п. приборах. При изготовлении электромагнитных систем установок для магнитно-абразивной обработки применяются ферромагнитные материалы и сплавы на основе железа, никеля, кобальта и других веществ, поэтому в дальнейшем ограничимся рассмотрением именно этой группы материалов.

В кристаллах ферромагнитных веществ в связи с их магнитными свойствами имеем дело с тремя основными формами энергии взаимодействия: изотропной и анизотропной обменными энергиями и дипольной магнитной энергией. Главной и наиболее существенной, без которой не мог бы существовать ферромагнетизм, является изотропная обменная энергия, т. е.

энергия взаимодействия и миграции электронов, обуславливающая само существование самопроизвольной намагниченности. Энергия магнитной анизотропии (зависящая от ферромагнитного состояния вещества) связана с изменением направления ориентации намагниченности в кристаллах. Третьей формой энергии является классическая электромагнитная энергия взаимодействия между двумя диполями. Она играет ведущую роль в возникновении таких необратимых процессов, как магнитный гистерезис, остаточная намагниченность, но этой формой энергии можно пренебречь (в силу ее малости) при рассмотрении изотропной и анизотропной частей энергии.

Ферромагнитные материалы характеризуются высокой магнитной проницаемостью (до 10^6), зависимостью от напряженности магнитного поля и температуры, а также наличием гистерезиса, который графически выражается петлей гистерезиса. Кроме указанных выше железа, никеля и кобальта, к ферромагнитным материалам относится большое число их сплавов и соединений, некоторые сплавы и соединения хрома и марганца и редкоземельные металлы: гадолиний и диспрозий.

Наиболее существенными признаками ферромагнитных материалов являются: а) твердое кристаллическое состояние; б) относительная легкость намагничивания до насыщения в полях порядка сотен эрстед; в) исчезновение ферромагнетизма при температурах предела твердого состояния материала.

Первую попытку объяснить свойства ферромагнетизма сделал в 1892 г. русский ученый Б. Л. Розинг, допустивший возможность существования внутри материала дополнительных внутренних сил, способствующих намагничиванию ферромагнитных материалов.

Мысли Б. Л. Розинга были развиты французским физиком Вейссом.

В 1907 г. Вейсс, основываясь на теории температурной зависимости парамагнитного газа Ланжевена, применил идею самопроизвольного (спонтанного) намагничивания под действием внутреннего поля. Способность ферромагнитных материалов намагничиваться в слабых внешних полях объяснялась тем, что при определенных значениях температур (ниже точки Кюри) элементарные магнетики тела ориентируются в соответствующем направлении под воздействием мощного внутреннего молекулярного поля, противодействующего тепловому движению атомов. Вейсс, как и Розинг, считали это внутреннее поле магнитным. Изучая вопрос о внутренних добавочных силах, Я. И. Френкель [13] впервые в 1928 г. показал, что самопроизвольное намагничивание ферромагнитных материалов обуславливается не магнитными, а электрическими силами обменного взаимодействия между спинами (собственными маг-

нитными моментами электронов) соседних атомов, имеющими квантово-механическую природу. Выводы Френкеля подтверждаются тем обстоятельством, что если бы добавочное внутреннее поле имело магнитную природу, то для преодоления дезориентирующего действия тепловых колебаний атомов при комнатной и более высоких температурах величина силы этого поля должна была бы достичь десятков миллионов эрстед. В действительности же, согласно данным экспериментов [7], магнитное поле взаимодействия спиновых и орбитальных магнитных моментов достигает не более десятка тысяч эрстед.

Метод наблюдения доменов (области ферромагнитных монокристаллов, каждая из которых намагничена до насыщения) с помощью магнитного порошка, наносимого на шлифованную поверхность, был предложен Н. С. Акуловым [1]. Домены всегда намагничены в направлении легкого намагничивания при отсутствии внешнего поля. Соседствующие домены имеют антипараллельное расположение векторов намагниченности и разделены граничным слоем, в котором магнитные спины изменяют свое положение на противоположное. Толщина этого слоя различна для различных материалов. Как показали исследования С. В. Вонсовского, Л. Д. Ландау, Е. М. Лившица, А. С. Займовского [7], возникновение явления ферромагнетизма в том или ином материале возможно при условии, что каждый атом окружен не менее чем шестью близкими соседями. Железо, никель, кобальт, например, имеют такую структуру электронных оболочек, при которой интеграл обменной энергии положителен и имеет достаточную величину спонтанного намагничивания и связанного с ним ферромагнетизма. Сплавы указанных трех металлов друг с другом ферромагнитны. Соединения ферромагнитных металлов с неметаллами, а также с перечисленным ниже рядом металлов ферромагнитны. Так, например, ферромагнитны соединения [7]: FeBe_5 , FeB , FeCe , Fe_4N , Fe_3O_4 , $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3P , Fe_2P , FeS , FeSn_2 , Fe_2V , F_3C , Co_2B , Co_5As_2 , CoZr , Co_2Pt , CoPt , CoZn .

3. Требования к материалам арматуры магнитных систем

Арматура магнитных систем установок для магнитно-абразивной обработки подразделяется на магнитную и механическую.

К магнитной арматуре относится совокупность деталей, от выбора магнитных свойств материала которых зависит получение требуемых характеристик поля в рабочем зазоре (полосные наконечники, сердечники, ярмо), а также защита магнитной системы от воздействия внешних магнитных полей и защита окружающего установку пространства от поля магнита (магнитные экраны).

К механической арматуре относится совокупность узлов и деталей, служащих для монтажа магнитной системы (болты, втулки, кронштейны, нарезные гнезда и другие крепежные детали; ходовые винты и маточные гайки для перемещения системы в продольном и поперечном направлениях; плиты, прокладки, направляющие и другие детали, служащие основанием системы).

В зависимости от назначения деталей арматуры магнитной системы установок материалы, применяемые для их изготовления, подразделяются на материалы с большой максимальной магнитной проницаемостью — для сердечников, полюсных наконечников, ярма и других деталей магнитопровода; материалы с большой начальной и максимальной проницаемостью — для деталей, осуществляющих экранирование; материалы диамагнитные — для изготовления основания, плит, кронштейнов, ходовых винтов, маточных гаек, болтов, втулок и других деталей.

Наибольшее применение в рассматриваемом случае для магнитопроводов и экранов установок магнитно-абразивной обработки имеют материалы, приведенные в табл. 3.3. Техническое железо, малоуглеродистая сталь 10 применяются для изготовления деталей магнитопровода, а листовая электротехническая сталь и серый чугун — для экранов (стаппин, кожухов, плит, защитных стенок и т. д.) магнитной системы установок, работающих на постоянном токе. Если же используется энергия переменного тока (установки, например, с дискретным переключением полюсов или бегущим магнитным полем), то для исключения токов Фуко магнитопровод набирается из листовой электротехнической стали.

При выборе материалов для изготовления магнитных систем установок, работающих на постоянном токе, т. е. применяемых в постоянных магнитных полях, необходимо знание их магнитной проницаемости μ , индукции насыщения $B_{\text{макс}}$, остаточной индукции B_0 и коэрцитивной силы H_c .

Как упоминалось выше, магнитная проницаемость материала μ — величина переменная, поэтому качество магнитно-мягких материалов оценивается по начальной μ_a и максимальной $\mu_{\text{макс}}$ их проницаемости: μ_a оценивается в слабых полях, при которых между B и H имеет место прямая пропорциональная зависимость и намагниченность обуславливается смещением границ между доменами; $\mu_{\text{макс}}$ — наибольшая проницаемость, которая может быть получена для данного материала. Она соответствует зоне крутого подъема кривой намагничивания и может существенно изменяться в зависимости от вида термической обработки материалов. Например, для технически чистого железа, электротехнических низкоуглеродистых сталей, стали 10 и других углеродистых сталей, а также пермаллоев

Состав и свойства магнитно-мягких материалов [5]

Материал	Состав по главным элементам	Основные признаки по технологии и механическим свойствам	Основные требования к материалу
Технически чистое железо	Fe, а также С, Mn, Si, P, S и другие элементы в минимальных количествах	Мягкий, ковкий материал—лист, лента, проволока, сортовое литье	Высокая индукция во всем диапазоне полей, коэрцитивная сила малая
Мягкая сталь, углеродистая и легированная сталь, серый чугун	Fe, C=0,1÷0,3 %, Mn, Si, S, P, по палочку как в обычных легированных сталях и чугуне нормальном	Стали ковкие, термообработка—улучшение и нормализация, литье стальное и чугунное	То же
Листовая электротехническая сталь	Fe, C≤0,05%, Si=0,3—5%, Mn=0,1—0,3%, S, P, N—минимум, Co, Si особый сорт, Cr, Al—то же, Al до 16 %	Горячая или холодная прокатка (лист или лента) толщиной 1—0,5—0,35—0,2—0,1—0,05 мм	То же и малые потери на вихревые токи и гистерезис
Пермаллой—сплавы с высокой проницаемостью в слабых полях	Fe, Ni=36—82 %; Mo≤5 %; Cu≤14 %; Cr≤5 %; Mn≤10 %; S, P, C, O, N—минимум, Si до 2 %	То же	То же и особо высокая проницаемость в слабых полях
Альсифер	Fe, Si=9—11%; Al=5—7%; C, O, P, S—минимум	То же, фасонное литье	То же
Перминдюр, изоперм, т. е. листовой материал с высокой стабильностью и постоянством проницаемости	Ni = 40 %, Cu = 15 %; Ni = 40 %, Al=4 %; Ni=45 %, Co = 25 %; Ni = 45 %, Co = 25 %, Mo = 7 %	Тонкая холоднокатаная лента для аппаратов звуковой частоты	Постоянная проницаемость, высокая стабильность, малые потери в слабых полях
Немагнитный чугун	Fe, C=2,5—3,5 %; Si=2—3 %; Mn=0—10 %; Ni=0—15 %; Cu; Cr; Al; Si; P	Фасонное литье	Высокое электросопротивление, $\mu = 1$

максимальная проницаемость достигает предельного значения, если эти материалы подвергнуть высокотемпературному отжигу. Указанные выше магнитные характеристики металлов устанавливаются по кривым намагничивания и петлям гистерезиса, определяемым на постоянном токе и поэтому называемым статическими (в отличие от динамических кривых намагничивания и петель гистерезиса, определяемых при переменном токе).

Наиболее типичный вид кривой намагничивания и петли гистерезиса магнитного материала на постоянном токе изображен на рис. 3.1, где приняты следующие обозначения [7]: OA — основная кривая намагничивания, представляющая зависимость намагниченности (индукции) от напряженности магнитного поля; CA — кривая размагничивания; B_{\max} — индукция насыщения, т. е. наибольшее значение индукции, практически достижимое при намагничивании данного материала; B_0 — остаточная индукция, т. е. индукция, которая остается в магнитном материале после снятия напряжения магнитного поля; H_c — коэрцитивная сила, отрицательная по знаку величина напряженности магнитного поля, которая накладывается на ферромагнитный материал для полного его размагничивания.

Работы ряда ученых [1—7] показывают, что значение коэрцитивной силы зависит от структуры материала, величины внутренних напряжений и характера их распределения, а также от наличия посторонних включений, магнитной анизотропии, формы и размеров доменов. Величина H_c возрастает при усилении искажения кристаллической решетки, увеличении анизотропии, инородных включений и внутренних напряжений.

При проектировании и эксплуатации установок для магнитно-абразивной обработки особенно важно знание величин

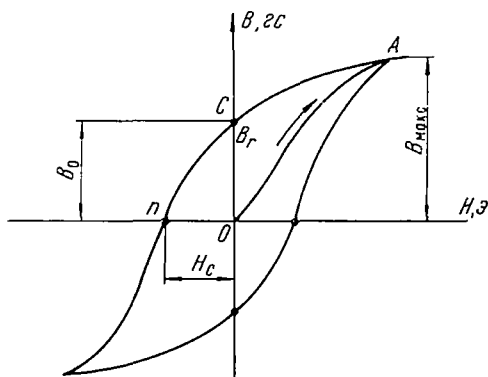


Рис. 3.1. Начальная кривая намагничивания и петля гистерезиса магнитного материала

начальной и максимальной проницаемости магнитного материала, используемого для изготовления сердечников электромагнита, а также индукции, остающейся на полюсах после снятия напряжения с катушки (удерживающей на полюсах ферромагнитный порошок), и силы, необходимой для размагничивания изделия, т. е. противодействующей напряженности поля.

Все ферромагнитные материалы делятся на магнитно-мягкие с малым значением H_c и большой магнитной проницаемостью и магнитно-твердые с большой коэрцитивной силой и сравнительно малой проницаемостью.

Материалы, применяемые при изготовлении деталей магнитопровода электромагнитов установок для магнитно-абразивной обработки, должны обладать высокой индукцией насыщения в умеренно сильных полях (порядка 20—50 тыс. гс) и минимальным значением остаточной индукции при однократном использовании ферромагнитного порошка и размагничивании изделий непосредственно на установке. В данном случае целесообразно применение магнитно-мягких материалов.

Во многих случаях, однако, экономически выгоднее многократное использование ферромагнитного порошка и размагничивание изделий на специальном демагнитизаторе. При этом для деталей магнитной арматуры магнитной системы установок целесообразнее применение материалов с магнитно-твердыми характеристиками, обладающих значительной остаточной намагниченностью и удерживающими ферромагнитный порошок в рабочем зазоре после снятия с катушек электромагнита внешнего напряжения тока.

При перемагничивании (размагничивании) изделий в переменных полях из ферромагнитных материалов непосредственно на установке после магнитно-абразивной обработки всегда наблюдаются потери энергии в форме тепла. Они обусловлены потерями на гистерезис — различную намагниченность ферромагнетиков при одних и тех же значениях напряженности магнитного поля, вызванную изменениями коэрцитивной силы, и динамическими потерями, вызываемыми вихревыми токами, индуцированными в массе материала. Потери на вихревые токи зависят от электрического сопротивления ферромагнетика (выше сопротивление, меньше потери).

Явления магнитного гистерезиса, по данным Н. С. Акулова, Е. И. Кондорского, С. В. Вонсовского и др. [1, 5, 6], обуславливаются: а) наличием больших и резко неоднородных внутренних напряжений в материале с большой коэрцитивной силой; б) задержкой возникновения зародышей перемагничивания (небольших доменов, ориентированных антипараллельно основному домену остаточной намагниченности), вызываемой недостаточным по величине размагничивающим полем

(размагничивающее поле должно быть больше так называемого «поля старта»); в) задержкой смещения границ между доменами, вызываемой неоднородностью внутренних напряжений и наличием посторонних включений.

Для вычисления потерь на гистерезис за один цикл в единице объема материала предложена эмпирическая формула [3]:

$$P = \eta B_{\text{макс}}^n, \quad (3.5)$$

где η — коэффициент, зависящий от материала; $B_{\text{макс}}$ — максимальная индукция, достигается в течение одного цикла; n — показатель степени в пределах 1,6—2.

Мощность, расходуемую на гистерезис, можно определить из уравнения

$$P_h = \eta f B_{\text{макс}}^n V, \quad (3.6)$$

где f — частота тока, $гц$; V — объем ферромагнетика, $см^3$.

Мощность, расходуемая на вихревые токи, определяется по формуле

$$P_f = \xi f^2 B_{\text{макс}}^n V, \quad (3.7)$$

где ξ — коэффициент, зависящий от удельного электрического сопротивления, а также типа и формы ферромагнетика.

Из уравнений (3.6)—(3.7) следует, что при работе магнитных материалов в переменных магнитных полях их характеристики находятся в зависимости от частоты переменного тока. К таким характеристикам, помимо индукции насыщения, остаточной индукции и коэрцитивной силы, относятся динамическая магнитная проницаемость μ_{\sim} , удельные потери (для низкочастотных материалов), а также коэффициенты потерь и тангенс угла магнитных потерь для высокочастотных материалов.

При синусоидальном изменении индукции динамическая магнитная проницаемость представляет собой магнитную проницаемость материала при переменном поле μ равна отношению амплитудного значения переменной составляющей индукции $B_{\text{макс}}$ к амплитудному значению эквивалентной синусоидальной напряженности магнитного поля ($H_{\text{мэ}}$) [6]

$$\mu_{\sim} = \frac{B_{\text{макс}}}{H_{\text{мэ}}}. \quad (3.8)$$

Для тороидального сердечника с намагничивающей обмоткой величина $H_{\text{мэ}}$ (э) может быть определена по формуле [6]

$$H_{\text{мэ}} = \frac{1,256W\sqrt{2}i}{l}, \quad (3.9)$$

где W — число витков обмотки; i — действующее значение тока, $а$; l — средняя длина сердечника, $см$.

Введение в формулу (3.8) значения $H_{\text{маг}}$ обуславливается несинусоидальным изменением напряженности магнитного поля при синусоидальном изменении индукции, что объясняется нелинейным характером кривой намагничивания. При одинаковых величинах напряженности поля динамическая проницаемость материала μ_{\sim} , как правило, меньше по величине в сравнении с μ того же материала, работающего при постоянном магнитном поле; по мере увеличения частоты тока μ_{\sim} уменьшается тем больше и быстрее, чем выше значение индукции и толще материал сердечника.

Удельные потери характеризуются суммарным значением мощности, затрачиваемой на гистерезис и вихревые токи в магнитном материале весом в 1 кг при низких частотах [6]. При этом учитываются два вида потерь из трех известных: на гистерезис, вихревые токи и последствие.

Потери на гистерезис — энергия, затрачиваемая на перемагничивание материала. Они растут с повышением частоты переменного тока и уменьшением толщины материала.

Потери на вихревые токи — потери энергии, создаваемые вихревыми токами, появляющимися в материале вследствие явления индукции. Эти потери растут с повышением частоты переменного тока и увеличением толщины материала.

Потери на последствие обуславливаются магнитной вязкостью материала, проявляющейся в запаздывании его намагниченности при быстрых изменениях внешнего магнитного поля и возникающей из-за замедления скорости передвижения границ между доменами. Потери на последствие зависят от структуры материала, его обработки и частоты переменного тока. При возрастании частоты тока потери увеличиваются.

Удельные потери выражаются в ваттах на килограмм материала. Для электротехнической стали толщиной 0,1—1,0 мм, работающей на промышленной частоте переменного тока (50 гц) и индукции 1,0—1,7 тл, удельные потери колеблются, например, от 0,8 до 13,4 вт/кг.

В литературе удельные потери обозначаются так: $P_{10/50}$, $P_{15/50}$ и т. д. Числитель индекса указывает величину индукции в тысячах гаусс, а знаменатель — частоту переменного тока в герцах, при которых определялись потери.

Тангенс угла магнитных потерь $\text{tg}\delta$ характеризует качество магнитного материала при работе в условиях переменного поля повышенной и высокой частоты. В условиях магнитно-абразивной обработки имеем дело в основном с промышленной частотой тока, поэтому предоставим читателю самостоятельно изучить вопрос о тангенсе угла и коэффициентах магнитных потерь на гистерезис γ_H , вихревые токи γ_B и последствие $\gamma_{\text{п}}$.

Материалы, применяемые для деталей магнитопроводов, деталей, осуществляющих магнитное экранирование,

и материалы для механической арматуры характеризуются следующим образом.

1. Технически чистое железо (армко-железо) обладает хорошими магнитными (высокой магнитной проницаемостью и индукцией насыщения $B_{\text{макс}} = 21800 \text{ гс}$, низкой коэрцитивной силой), механическими и техническими свойствами; имеет низкое удельное электрическое сопротивление ($\rho = 0,1 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$). Этим обусловлено применение железа преимущественно в устройствах, работающих на постоянном токе (чтобы избежать больших потерь на вихревые токи). Чем чище железо, тем выше его магнитная мягкость, т. е. меньше остаточная намагниченность после снятия напряжения. Этот материал имеет малое содержание углерода и минимальное количество марганца, кремния и других примесей. Наиболее вредные влияние на магнитные свойства железа оказывают углерод и кислород.

По магнитным свойствам к технически чистому железу приближаются низкоуглеродистые и кремнистые электротехнические стали и конструкционная качественная сталь 10 (табл. 3.4).

2. Сталь электротехническая — сплав железа с содержанием кремния 0,8—5,0%. Легирование кремнием повышает удельное электрическое сопротивление стали, снижает потери на вихревые токи, увеличивает магнитную проницаемость, уменьшает коэрцитивную силу и потери на гистерезис. Марки электротехнической стали регламентируют ГОСТ 802—58 (толщина листов 1,0—0,5 мм) и ГОСТ 9925-61 (толщина листов 0,15—0,05 мм).

Электротехнические стали с низким содержанием кремния применяют для изготовления магнитной системы установок, работающих на постоянном токе при высоких значениях магнитной индукции (выше 15000 гс), а стали с большим содержанием кремния — при необходимости малых потерь на гистерезис, вихревые токи и высокой проницаемости в слабых и средних полях.

3. Пермаллой — материалы с высокой магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях. Вследствие относительно высокой стоимости применение пермаллоев при изготовлении деталей магнитопроводов и магнитных экранов установок для магнитно-абразивной обработки ограничено изделиями небольших габаритов или деталями полюсных наконечников. Пермаллой хорошо обрабатывается резанием и штамповкой. По составу пермаллой принято делить на низконикелевые ($\text{Ni} = 40\text{—}50\%$) и высоконикелевые ($\text{Ni} = 72\text{—}80\%$). Основные марки железоникелевых сплавов выпускают (ГОСТ 10160-62) в виде лент толщиной 0,02—2,5 мм, листов толщиной 3—22 мм и прутков диаметром 8—100 мм. Материал поставляется в термически необработанном состоянии. Термическую обработку

Материалы для деталей магнитно-абразивных станков

Материал	Марка материала	Индукция насыщения B_s , кГс	Остаточная индукция B_r , кГс	Коэрцитивная сила H_c , а/см	Удельное электрическое сопротивление $\rho \cdot 10^6$, ом·см
Технически чистое железо (армо-железо)		21,6	10—13		9,6
Низкоуглеродистая электротехническая сталь	Э ЭА ЭАА	21,5	10—14	0,24—0,95	10—11
Качественная конструкционная углеродистая сталь, отожженная	Ст. 0,5 Ст. 10 Ст. 20	21,3	—	0,88—1,68	11—16
Кремнистая электротехническая (слаболегированная) сталь тонколистовая	Э8, Э8кп Э10, Э10кп Э11 Э12, Э12кп	21	9—12	0,4—0,64	25
Легированный серый чугун, отожженный	00	16,7	5,3	3,2—4,8	80—120

сплава производят после окончательного изготовления деталей.

Не менее важное значение имеет правильный выбор материала для механической арматуры, т. е. различных узлов и деталей, служащих для монтажа магнитной системы и ее перемещений относительно обрабатываемого изделия. После монтажа система не должна изменять характеристик поля электромагнита в рабочих зазорах, т. е. в зазорах между изделием и полюсными наконечниками. С этой целью детали механической арматуры должны изготавливаться из диамагнитных материалов. Из диамагнитных материалов в установках магнитно-абразивной обработки применяют немагнитные стали, различные немагнитные цветные металлы и сплавы (бронзу, латунь и т. д.), а также текстолит, винипласт, оргстекло.

Для обеспечения магнитного экранирования магнитная система установок помещается в станине. Материалом для изготовления станин в данном случае могут служить серый чугун с содержанием углерода 3,2—3,5%, а также ковкий чугун и сталь с содержанием от 0,08 до 0,3% углерода. Чугунные отливки и сварные стальные конструкции станин требуют термической обработки (отжига) для снятия внутренних напряже-

ний, оказывающих влияние на магнитные свойства материала. В тех случаях, когда наличие магнитных свойств в конструкционном материале может увеличить рассеивание магнитного потока магнитной системы, применяют немагнитные материалы. Например, для крышек, кожухов, оснований, плит, корпусов шпиндельных бабок, кронштейнов применяют немагнитный чугун, содержащий никель и марганец. Примерный состав такого чугуна: 2,6—3,0% С; 2,5% Si; 5,6% Mn; 9—12% Ni; остальное Fe [3].

Магнитная проницаемость немагнитного чугуна указанного состава $\mu = 1,03$, а удельное электрическое сопротивление $\rho = 1,4 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, что дает ему преимущество перед цветными сплавами в отношении снижения потерь на вихревые токи.

Немагнитные стали изготавливают путем введения в их состав никеля и марганца. Немагнитная никелевая сталь имеет химический состав: 0,25—0,35% С; 22—25% Ni; 2—3% Cr; остальное Fe. Эта сталь может применяться для изготовления ходовых винтов, шпинделей и других деталей установок магнитно-абразивной обработки и ввиду ее высоких механических свойств (предел прочности при изгибе 70—80 кг/мм², магнитная проницаемость $\mu \leq 1,2$) может служить заменой цветным металлам.

4. Влияние механической и термической обработки на свойства материалов

От правильного выбора технологического процесса механической и термической обработки деталей арматуры магнитной системы во многом зависят технические характеристики установок для магнитно-абразивной обработки. Операции механической обработки — резка, штамповка, ковка, изгиб, точение, сверление, фрезерование, шлифование — деталей магнитной арматуры вызывают внутренние изменения структуры материала и в большинстве случаев ухудшают его магнитные свойства: возрастает петля гистерезиса и магнитные потери, уменьшается магнитная проницаемость и увеличивается коэрцитивная сила. Кроме магнитных свойств, материал должен удовлетворять требуемым механическим свойствам и условиям электропроводности. Разумеется, выбор материала и назначение определенных операций его механической и термической обработки должны быть экономически оправданы.

Степень изменения магнитных и электрических свойств материала зависит от режимов резания, силы удара молота при ковке, сжимающего усилия пресса, а также от качества штампа или ножниц, углов резания резцов, фрез, сверл и других режущих параметров инструментов, зернистости и материала

шлифовального круга (чем больше усилие резания и меньше заострение режущего клина, тем выше остаточные напряжения в магнитном материале).

Степень изменения магнитных свойств зависит также и от размеров обрабатываемой детали. При небольших габаритах детали в результате механической обработки будет затронута значительная часть объема материала и, следовательно, произойдут большие изменения его структуры и свойств. Например, при резке или штамповке деталей из листовой стали, ее магнитные свойства особенно резко ухудшаются в зоне наибольшей деформации — на расстоянии 0,5—3,0 мм от края листа. Величина этой зоны зависит от качества штампа или ножниц, толщины и сортамента стали [7]. Для нарезанных пластин шириной 5 мм из стали Э41, например, потери на гистерезис увеличиваются примерно на 230%, а начальная магнитная проницаемость уменьшается на 300%, если же ширина нарезанных пластин составляет 30 мм и больше, то влиянием резки и штамповки можно пренебречь [7]. Набранные из нарезанных или штампованных пластин пакеты стягивают болтами или склепывают, что также ухудшает магнитные свойства стали. При этом электрическое сопротивление уменьшается, а потери возрастают. При стягивающем (сжимающем) усилии, равном, например, 100 кг/см², потери в стали Э42 возрастают на 200% [8].

Для снятия напряжений в магнитном материале после механической обработки все детали магнитной арматуры установок магнитно-абразивной обработки должны быть подвергнуты отжигу. Температура и условия отжига для разных материалов различны. Например, все виды деформации технически чистого железа и малоуглеродистой стали (стали 10, стали 20 и др.) снимают отжигом по режиму: нагрев без доступа воздуха при температуре 900—1200 °С с выдержкой 3—6 час и последующее медленное охлаждение вместе с печью до 600 °С. Для снятия внутренних напряжений и наклепа после нарезки заготовок из листовой электротехнической стали детали магнитопровода подвергают отжигу по режиму: нагрев до 750—800 °С в течение 2 час без доступа воздуха с последующим охлаждением в печи до 200—250 °С со скоростью 40—60 °С/час и далее с произвольной скоростью [7].

Железоникелевые сплавы (пермаллой) из-за большой чувствительности ко всевозможным деформациям поставляются потребителю в неотожженном виде после холодной прокатки. Детали из них отжигаются при температуре 1000—1200 °С в сухом очищенном воздухе или вакууме при охлаждении со скоростью 50—100 °С/час. Отожженные детали не должны подвергаться в процессе сборки изгибам, ударам, шлифовке и чрезмерной затяжке или сдавливанию обмоткой.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

По принципу действия известные устройства для магнитно-абразивной обработки можно разделить на следующие основные группы.

1. С принудительным движением детали (за счет механической энергии), неподвижным расположением электромагнитов и ферромагнитного порошка. При этом заготовке в зависимости от ее габаритов и конфигурации полируемой поверхности сообщают: а) вращение вокруг собственной оси и продольное осциллирующее либо качательное движение; б) осциллирующее движение в вертикальной плоскости.

2. С принудительным движением детали и электромагнитов (за счет механической энергии) и неподвижным расположением порошка относительно полюсов. При этом осуществляют: а) продольное возвратно-поступательное перемещение заготовки и вращение электромагнитов (метод наиболее часто применяется при обработке плоскостей); б) осциллирующее движение заготовки в вертикальной плоскости и вращение контейнера, несущего катушки электромагнита и ферромагнитный порошок; в) вращение заготовки вокруг собственной оси и качательное осциллирующее движение электромагнита вокруг вертикальной оси (метод применяется при полировании сфер и шаровых пят).

3. С неподвижным расположением детали и электромагнитов и пульсирующим движением ферромагнитного порошка за счет изменения полярности электромагнита.

4. С принудительным движением по кругу свободно взвешенной в среде порошка детали за счет создания «бегущего магнитного поля» и неподвижным электромагнитом. Абразивный диамагнитный порошок при этом либо неподвижен, либо принудительно перемещивается (метод применяется при чистовой обработке мелких деталей типа игл и роликов).

Анализ кинематики относительных движений, обеспечиваемых известными станками и установками для магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхно-

стей, например, показывает, что процесс возможно интенсифицировать, если сообщить заготовке осциллирующее движение не прямолинейное, совпадающее с направлением оси детали, а качательное в вертикальной плоскости. При этом за полный период одного колебания заготовка дважды пересекает магнитные силовые линии электромагнитной системы станка, механически уплотняет находящийся в рабочих зазорах ферромагнитный порошок, что в конечном итоге способствует повышению производительности процесса и улучшению качества поверхностного слоя изделия за счет изменения характера его перемещения.

Очевидно, что приведенный пример не является единственным и количественные изменения периода возникновения образующей поверхности на обрабатываемой заготовке путем комбинирования кинематических схем резания можно получить и в других сочетаниях относительных движений изделия и инструмента.

В 1962 г. предложен способ обработки цилиндрических изделий в магнитном поле порошками, обладающими ферромагнитными и абразивными свойствами [1].

Для исследования нового способа авторами его была создана экспериментальная установка [14]. Исследования в большинстве своем носили поисковый характер. Было установлено, что на процесс обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками наибольшее влияние оказывают следующие технологические параметры: число оборотов детали в минуту, число осцилляций в минуту, амплитуда осцилляций и напряженность магнитного поля, а также физико-механические и электромагнитные свойства обрабатываемого материала, рабочего элемента и среды. Поэтому в экспериментальной установке был осуществлен широкий диапазон регулирования указанных параметров. Она состояла из узлов вращательного и осциллирующего движения детали, магнитной системы, системы электропитания, контрольно-измерительной системы, систем смазки и подачи охлаждающей жидкости.

Подробно установка описана в книге [14]. Здесь следует только заметить, что ее создание позволило провести первые исследования физико-механических явлений, происходящих в процессе обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками, определить их закономерности и влияние на технологические параметры обработки.

Ниже приведено описание наиболее типичных схем устройств, позволяющих осуществлять метод чистой обработки деталей в магнитное поле ферромагнитным порошком.

1. Универсальный станок мод. МАС-1А для обработки наружных цилиндрических и сферических поверхностей

При создании универсального станка мод. МАС-1 и его модификации — станка мод. МАС-1А был реализован принцип осциллирующего движения с качанием заготовки в вертикальной плоскости.

Общий вид станка мод. МАС-1А, созданного в Физико-техническом институте АН БССР и изготовленного на Минском механическом заводе [23], показан на рис. 4.1.

Станок мод. МАС-1А состоит из сварной станины, на которой смонтированы механизмы главного движения, продольной подачи суппорта, несущего магнитную систему, качания стола с передней и задней бабками для крепления заготовки и узла охлаждения для подачи смазывающе-охлаждающей жидкости в зону резания. Взаимодействие механизмов станка в наладочном и рабочем режимах осуществляется электрической схемой, смонтированной автономно в электрошкафу.

На рис. 4.2 приведена принципиальная схема работы станка мод. МАС-1А [24].

При нажатии на кнопку «Пуск» пульта управления станком заготовка 2, зажатая в центрах стола 1, приводится во враще-

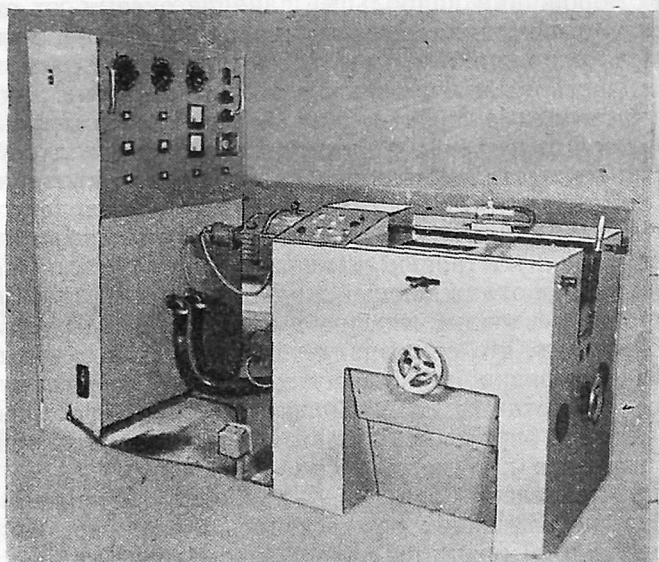


Рис. 4.1. Универсальный станок для магнитно-абразивной обработки цилиндрических деталей мод. МАС-1А

Высота центров над уровнем стола, мм	120
Диаметр обрабатываемой детали, наибольший, мм	230
Межцентровое расстояние, мм	240
Число оборотов изделия в минуту	$0 \div 5000$
Частота колебаний изделия в минуту	$0 \div 2500$
Амплитуда качания изделия, мм	$0 \div 15$
Длина продольного хода суппорта; мм	100
Мощность главного привода, кВт:	
при $n_3=1250$ об/мин.	1,5
при $n_3=5000$ об/мин.	0,76
Мощность привода осцилляции и продольного хода суппорта при $n_3=2500$ об/мин, кВт	0,76
Величина магнитной индукции в рабочих зазорах, тл	$0 \div 1,5$
Угол поворота суппорта, град	$0 \div 90$
Габаритные размеры станка без электрошкафа (длина \times ширина \times высота), мм	$1400 \times 1200 \times 1200$
Габаритные размеры электрошкафа (длина \times ширина \times высота), мм	$1100 \times 400 \times 1800$
Вес станка с электрошкафом, кг	1300

ние. Осциллирующее и качательное движение деталь получает от механизма 4 через кулису 5. Если длина заготовки 2 больше ширины полюсных наконечников 3, то суппорту с магнитной системой 6 сообщается возвратно-поступательное движение про-

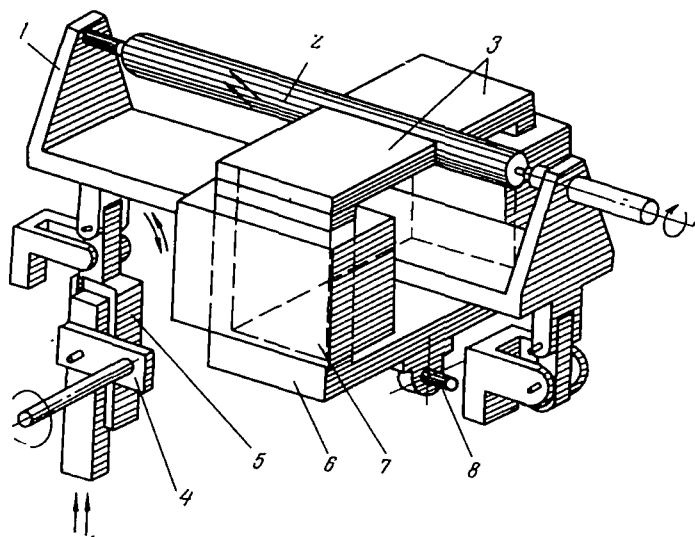


Рис. 4.2. Принципиальная схема работы станка мод. МАС-1А

дольной подачи от механизма 8. Наладка полюсных окончаний на заданный диаметр и требуемый рабочий зазор осуществляется перемещением полюсов 3 в направлении, перпендикулярном к оси детали. Магнитное поле наводится при помощи катушек 7.

Станок мод. МАС-1А имеет две ступени скоростей резания, позволяющие устанавливать оптимальные параметры главного движения в зависимости от диаметра заготовки: при диаметре изделия $d_3 = 50—320$ мм и длине изделия 210—240 мм в работу включается главный электродвигатель, имеющий параметры $N_3 = 1,5$ кВт, $n_3 = 1250$ об/мин, а при $d_3 = 10—50$ мм и $l_3 = 150$ мм вращение осуществляет электродвигатель с $N_3 = 0,76$ кВт, $n_3 = 2500$ об/мин через ременную передачу с передаточным отношением $i = 2 : 1$. Таким образом, при магнитно-абразивной обработке мелких изделий имеется возможность установить скорость резания $v_{рез} = 150—300$ м/мин.

На станке мод. МАС-1А все двигатели питаются от постоянного тока, что позволяет осуществлять плавную (бесступенчатую) регулировку скорости резания, частоты осцилляции и скорости продольного хода суппорта.

Величина амплитуды осцилляции устанавливается путем изменения эксцентриситета оси ползуна кулисного механизма 4 (рис. 4.2).

Длиной продольного хода суппорта 6 управляют два путевых конечных переключателя через систему регулируемых упоров.

Обработку сферических поверхностей типа шаровых пят и других деталей на станке мод. МАС-1А можно осуществить путем придания верхним салазкам суппорта с магнитной системой качательного движения вокруг вертикальной оси.

Станок мод. МАС-1А позволяет осуществлять экспериментальные исследования процесса магнитно-абразивной обработки в широком диапазоне геометрических параметров изделий. Для визуального наблюдения за ходом процесса станок оснащен электрическими приборами: счетчиками импульсов, счетчиками числа оборотов, реле времени и др.

При придании станку загрузочного механизма он может встраиваться в технологическую и автоматическую линию.

2. Опытно-промышленный станок-полуавтомат мод. МАС-3 для обработки поверхностей золотников

Значительная работа по исследованиям процесса магнитно-абразивной обработки применительно к деталям автомобильной промышленности проводится Минским СКБ-3. В 1968—1972 гг.

в СКБ-3 под руководством авторов проведены поисковые исследования процесса, созданы экспериментальные установки и универсальный станок мод. МАС-1, позволяющие осуществлять дальнейшее изучение особенностей метода и отрабатывать оптимальные его параметры применительно к конкретным деталям промышленности, а также создан первый опытно-промышленный станок-полуавтомат мод. МАС-3 [21].

Станок мод. МАС-3 предназначен для магнитно-абразивной обработки золотников четырех наименований (рис. 4.3). Он позволяет за 30—40 сек машинного времени стабильно получать 10—11-й класс шероховатости на поверхностях изделий из исходного 7-го класса при твердости заготовки *HRC* 56—62 единицы.

Рабочие поверхности полюсов электромагнита имеют форму секторов, охватывающих заготовку с двух сторон на всей длине обработки [21].

Станок мод. МАС-3 комплектуется из трех основных элементов: собственно станка, электрошкафа с пультом управления и механизма демагнетизации. Собственно станок состоит из сварной станины, на которой монтируются плиты суппортов с электромагнитной системой, механизм осцилляции, передняя и задняя центровые бабки для крепления заготовки, механизм подачи в зону резания порошка, пневмооборудование и в которой устанавливается насосная установка с магнитным сепаратором для подачи смазывающе-охлаждающей жидкости.

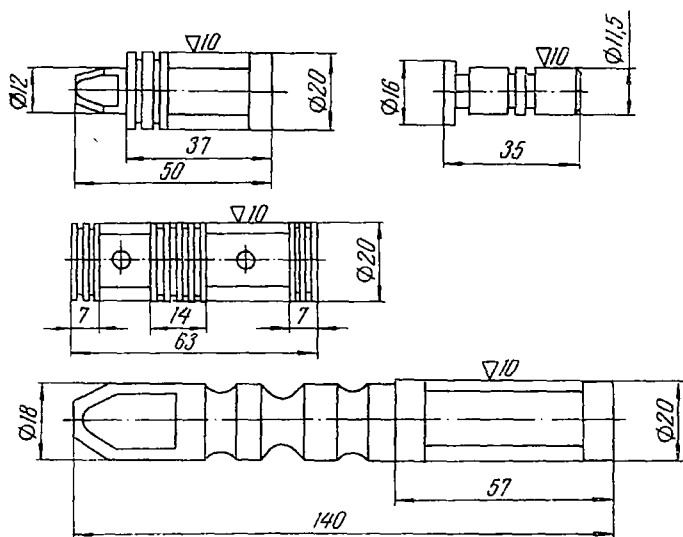


Рис. 4.3. Детали, обрабатываемые на станке мод. МАС-3

Взаимодействие механизмов станка в наладочном и автоматическом режимах работы осуществляется с помощью электрической схемы, смонтированной в специальном шкафу, и путевых переключателей типа БВК.

После обработки деталь размагничивается на демагнитизаторе, состоящем из соленоида, ленточного транспортера и привода перемещения ленты с деталями.

Конструкция станка. Обрабатываемая деталь 7 (рис. 4.4) с помощью специального приспособления устанавливается торцом с большим диаметром к передней бабке 4, при этом задний центр отводится рукояткой 11, чем обеспечивается установка детали в центрах.

Подвижные вдоль оси пиноли 5 и 9 передней 4 и задней 10 бабок соединены между собой двумя штангами 8. Посредством пружины сжатия 12, встроенной в заднюю бабку, обе пиноли приведены в «натянутое» справа налево состояние и прижимаются зубчатой нарезкой пиноли передней бабки 5 к зубчатому сектору 6 механизма осцилляции 20. Привод механизма осцилляции осуществляется от электродвигателя 16.

Шпиндель 3 передней бабки встроен в ее пиноль и опирается на две пары радиально-упорных подшипников. Шлицевый конец шпинделя помещен в шлицевой втулке 2 подшипниковой опоры приводного шкива 1. Привод вращения шпинделя осуществляется электродвигателем 17 через ременную передачу. Передний 14 и задний 2 суппорты (рис. 4.5) установлены подвижно в прямоугольных направляющих и имеют индивидуальные пневмоприводы 15. На подвижных плитах 3 суппортов закреплены электромагниты, на вертикальных сердечниках 4 которых установлены сменные полюсники 11. Между электромагнитами помещено корыто 12 для сбора охлаждающей эмульсии и ферроабразивного порошка. Над задним суппортом на шарнирно открывающейся крышке 5 смонтирован бункер для ферроабразивного порошка. Бункер имеет пневмопривод 6. В станине 14 (рис. 4.4) установлена насосная установка 15 с электронасосом ПА22 и магнитным сепаратором СМ2М.

Узел подготовки сжатого воздуха установлен на задней стенке станины. Электропанель и пульт управления выполнены в общем выносном блоке.

Смазка трущихся поверхностей осуществляется от ручного плунжерного насоса (С16-21) и посредством шприц-масленок.

Наладка и регулировка станка. Основными наладочными операциями в станке-полуавтомате мод. МАС-3 являются:

1) регулирование положения бункера и установленных на нем сменных пластин 9 (рис. 4.5) с целью попадания нужного количества порошка в рабочие зазоры; положение бункера ре-

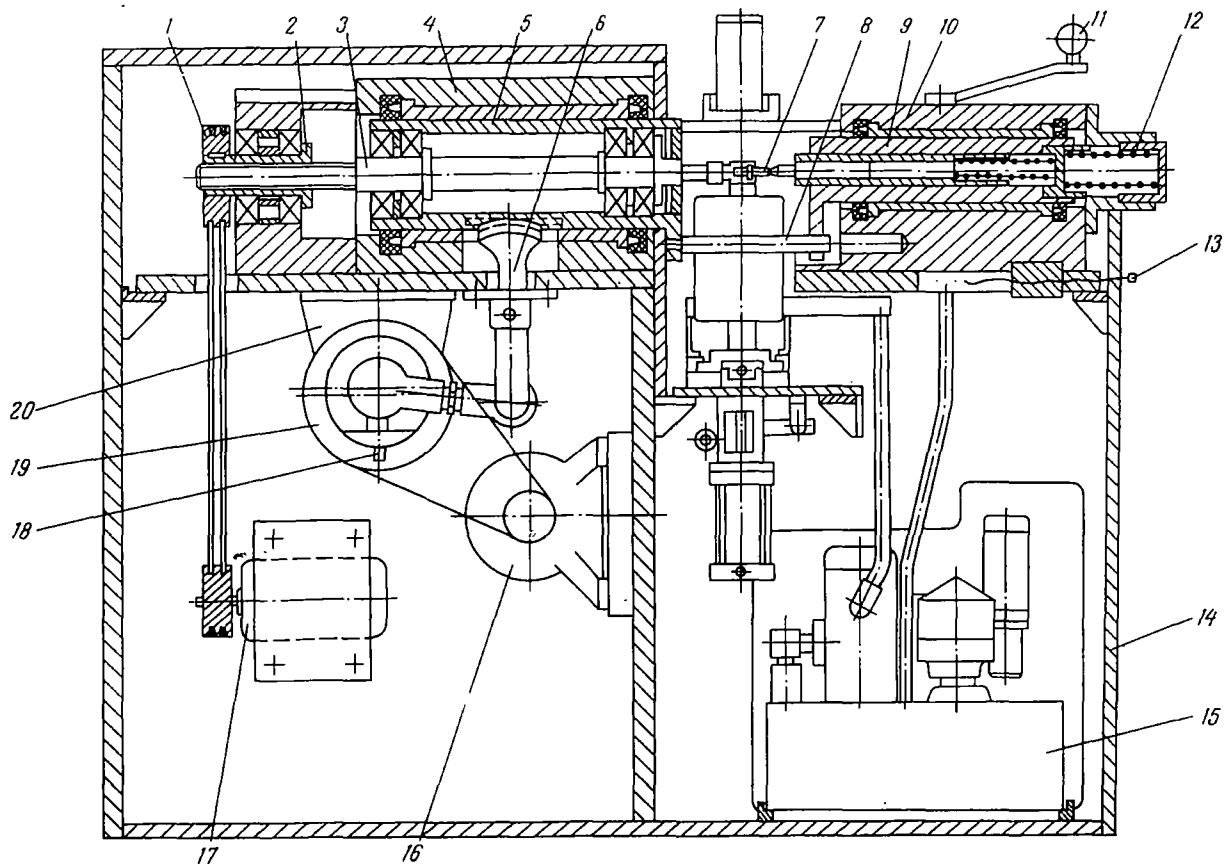


Рис. 4.4. Принципиальная схема работы полуавтомата мод. МАС-3 (вид спереди)

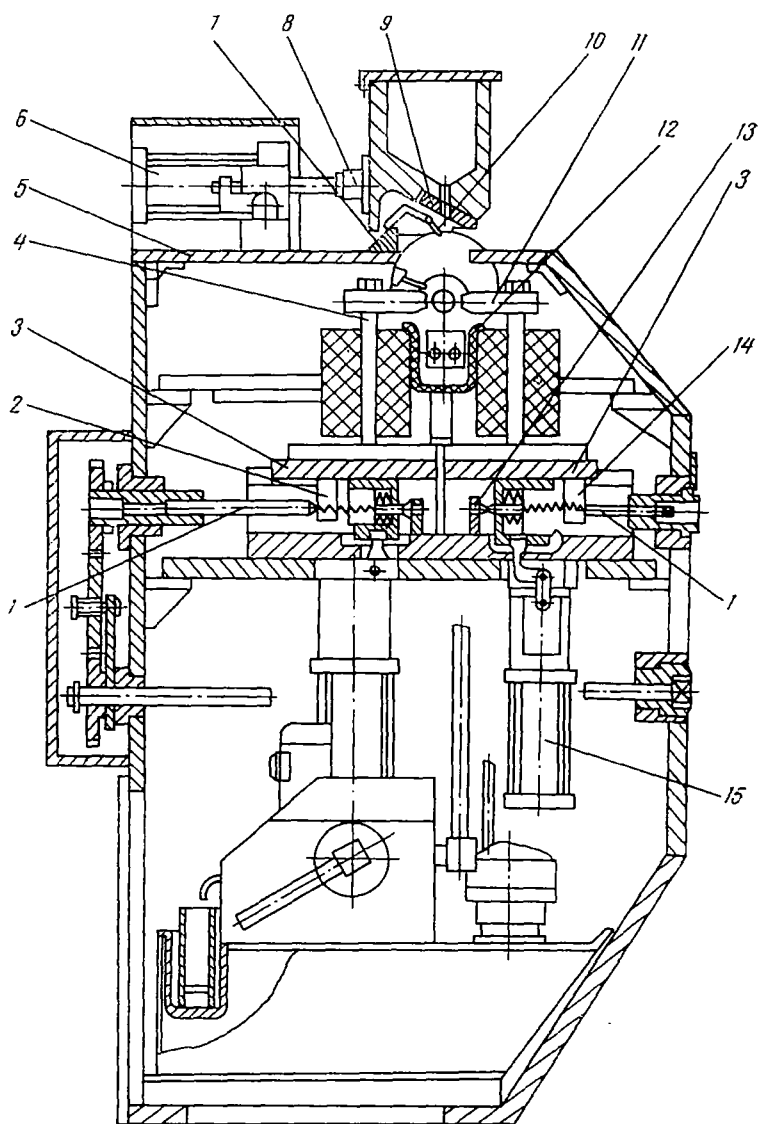


Рис. 4.5. Принциальная схема работы полуавтомата мод. МАС-3 (вид сбоку)

гулируется вращением втулки 8 за счет изменения положения штока пневмоцилиндра 6;

2) установка задней бабки в зависимости от длины обрабатываемой детали; регулирование положения задней бабки производится вращением винта 13 (см. рис. 4.4); предварительно отпускаются болты, с помощью которых штанги 8 крепятся к пиноли задней бабки 9, и болты, фиксирующие положение бабки после регулировки;

3) регулирование величины амплитуды осцилляции, которое производится вращением винта 18 (см. рис. 4.4); величина амплитуды определяется по шкале, нанесенной на кулисе 19 механизма осцилляции; цена деления шкалы 1 мм, что соответствует амплитуде осцилляции в 2 мм, значение которой можно проверить по индикатору поворотом вала электродвигателя 16 вручную;

4) регулирование рабочих зазоров между заготовкой и полюсами электромагнитов; производится по упорам 13 (рис. 4.5) за счет изменения положения штоков пневмоцилиндров 15; окончательная, тонкая регулировка величины зазоров производится при помощи микрометрических винтов 1; разница в ширине рабочих зазоров с обеих сторон изделия не должна превышать 0,03 мм, неперпендикулярность установки полюсных наконечников относительно оси центровых бабок и несоосность последних — 0,03 мм. Биение шпинделя передней бабки допускается не больше 0,01 мм.

На станке мод. МАС-3 установлены:

1) двухскоростной электродвигатель вращения детали: $N_3 = 1/1,4$ квт, $n_3 = 1400/2750$ об/мин;

2) электродвигатель осцилляции детали: $N_3 = 0,75/1,1$ квт, $n_3 = 955/1440$ об/мин;

3) электродвигатель системы охлаждения ПА-22;

4) электродвигатель магнитного сепаратора: $N_3 = 0,12$ квт, $n_3 = 1500$ об/мин;

5) конечные выключатели БВК-24М.

Напряжение питающей сети 380 в. Питание цепей управления осуществляется напряжением 127 и 24 в от трансформатора. Схемой предусмотрены полуавтоматический и наладочный режимы работы. Для работы в полуавтоматическом режиме тумблер на пульте управления устанавливается в положение «Автомат». После установки детали оператор нажимает на кнопку «Цикл», и станок работает по заданной программе.

Электрической схемой предусмотрены следующие блокировки:

1) включение в полуавтоматическом режиме электромагнита «Подвод бункера» возможно только при переднем положении полюсов;

2) при отключении магнитного поля в зоне обработки деталей прекращается вращение всех приводов станка.

Схемой предусмотрена световая сигнализация: наличия напряжения в сети, отключения магнитного поля и контроля тока в электромагнитах.

В станке предусмотрена защита силовых цепей электродвигателей от токов короткого замыкания и перегрузок, цепей управления станка и обслуживающего персонала от поражения электрическим током.

Пневмооборудование станка обеспечивает работу в полуавтоматическом и наладочном режимах механизмов подвода полюсов электромагнитов и подвода бункера. Пневмооборудование состоит из пневмопанели, двух дросселей с обратным клапаном, пневмоцилиндров, трубопроводов и соединительной арматуры. Пневмопанель включает узел подготовки воздуха и двух воздухораспределителей, а узел подготовки воздуха — влагоотделитель, регулятор давления, маслораспылитель и манометр.

Скорость подвода полюсов ограничивается демпферами. Нормальная работа пневмооборудования обеспечивается при давлении воздуха в заводской сети не ниже 4 кгс/см^2 .

Внешний вид станка МАС-3 отвечает современным требованиям (рис. 4.6).

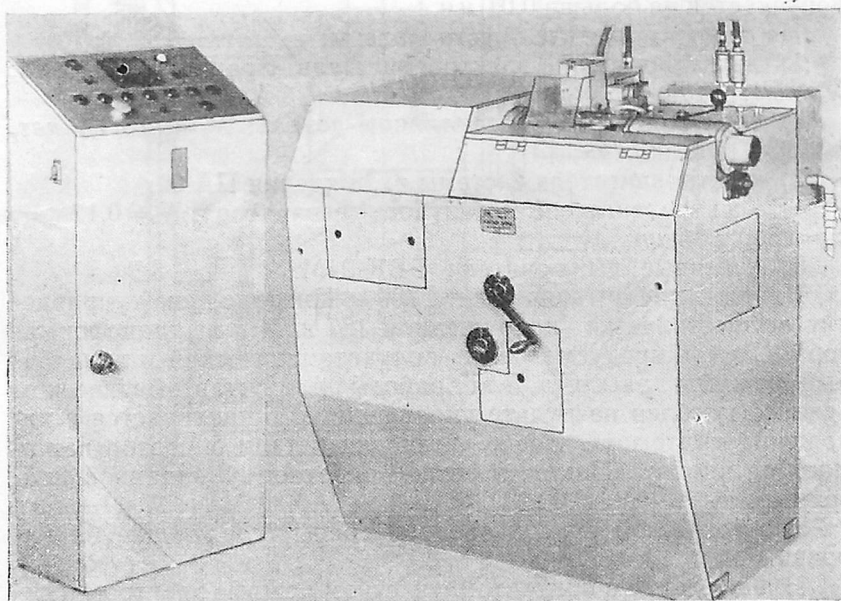


Рис. 4.6. Общий вид станка мод. МАС-3 для обработки золотников

Основные технические данные станка мод. МАС-3

Производительность, <i>дет/час</i>	90—120
Количество порошка, необходимое для обработки одной детали, <i>см³</i>	0,8
Емкость бункера для порошка, <i>см³</i>	410
Скорость вращения детали, <i>м/мин</i>	70—80
Частота осцилляций детали, двойных ходов в минуту	440—660
Амплитуда осциллирующих движений, <i>мм</i>	0—5
Напряжение питания электромагнитов, <i>в</i>	0—220
Ток в катушках электромагнитов, <i>а</i> :	
номинальный	1,5
максимальный	3
Число катушек, шт.	2
Магнитная индукция в рабочих зазорах, <i>тл</i>	0—1,4
Габаритные размеры собственно станка (длина × ширина × высота), <i>мм</i>	1300 × 850 × 1300
Общий вес, <i>кг</i>	1200

Работа станка. Работа на станке производится в следующем порядке. Обрабатываемая заготовка с помощью специального приспособления вводится в рабочую зону между полюсами магнитов и устанавливается в центрах передней и задней бабок. Затем включаются пневмоцилиндры 15 (рис. 4.5) суппортов 14 и 2, и полюса 11 магнитов с определенными зазорами охватывают деталь. В конце хода суппорта включается пневмоцилиндр 6 бункера. Последний перемещается на линию центров, автоматически от кулачка 7 открывает шибер 10 и подает порцию порошка в рабочую зону. Далее, после выдержки в 1,5—2,0 сек бункер возвращается в исходное положение, с помощью путевого выключателя в конце хода включает напряжение питания электромагнитов, что заставляет ферромагнитный порошок равномерно распределяться в рабочих зазорах между полюсными концевиками и заготовкой. Одновременно с подачей напряжения на катушки электромагнитов включаются электродвигатели вращения и осцилляции детали, насос охлаждения и магнитный сепаратор. Происходит обработка. Продолжительность обработки устанавливается по реле времени.

По окончании обработки последовательно от реле времени отключается питание электромагнитов, затем отводятся суппорты и прекращается вращение и осцилляция, отключаются насос охлаждения и магнитный сепаратор.

Расчет основных параметров станка. Для магнитно-абразивных станков с вращательным главным движением скорость резания рассчитывается по формуле

$$v_{\text{рез}} = \frac{\pi d_3 n_3}{1000} \text{ м/мин}, \quad (4.1)$$

для станков с прямолинейным главным движением

$$v_{\text{рез}} = \frac{L}{1000T} \text{ м/мин}, \quad (4.2)$$

где d_3 — диаметр обрабатываемой заготовки или диаметр магнитного индуктора, несущего ферромагнитный порошок, мм; n_3 — число оборотов шпинделя, мин. Продольная подача рассчитывается по формулам:

$$S = \frac{L}{n_x T} \text{ мм/об}; \quad (4.3)$$

$$S_x = \frac{B_n}{n_x T_m} \text{ мм/дв. ход}, \quad (4.4)$$

где L — длина хода стола или суппорта с магнитной системой, мм; n_x — число двойных ходов стола (суппорта), мин; B_n — ширина обрабатываемой поверхности (точнее, путь, пройденный магнитным индуктором или заготовкой в их движении подачи при обработке изделий шириной, большей, чем диаметр индуктора), мм; T — время рабочего хода стола (суппорта), мин; T_m — машинное время (время рабочих ходов), мин, затрачиваемое для обработки изделия шириной B_n , мм.

В станке мод. МАС-3 движение осцилляции заготовки при магнитно-абразивной обработке осуществляется от электродвигателя через ременную передачу, специальный механизм, состоящий из зубчатого сектора, рейки и пружины возврата. Потребная мощность электродвигателя в данном случае рассчитана из условия, что вес подвижных элементов пинолей передней и задней бабок $Q_1 = 15 \text{ кГ}$, $Q_2 = 10 \text{ кГ}$ соответственно; максимальное число двойных ходов в мин $n_{\text{макс}} = 690$ и размах $2A = 5 \text{ мм}$, т. е. отклонение точки D (рис. 4.7) $S_D = 2,5 \text{ мм}$; пиноли перемещаются в бронзовых направляющих втулках.

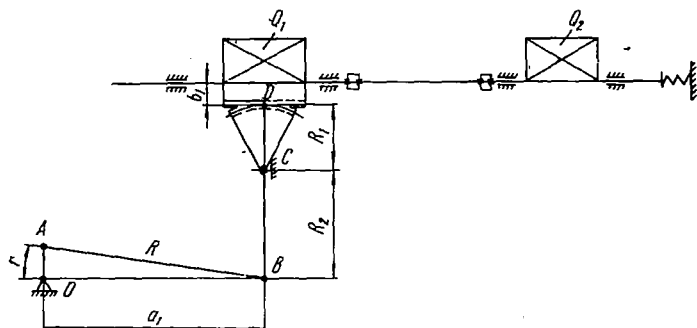


Рис. 4.7. Схема расчета пружины возврата для станка мод. МАС-3

Угол α отклонения рычага DCB от нейтрального положения определяется из уравнения

$$\alpha = \frac{S_D \cdot 180^\circ}{\pi R_1} = 1^\circ 54' 39'', \quad (4.5)$$

где $R_1 = 75$ мм — радиус рычага CD .

Смещение точки B по горизонтали в крайнее положение равно

$$x_B = R_2 \sin \alpha = 105 \cdot 0,0333442 = 3,5 \text{ мм}, \quad (4.6)$$

где $R_2 = 105$ мм — радиус рычага CB .

Смещение точки B по вертикали в крайнее положение

$$y_B = R_2 - R_2 \cos \alpha = R_2 (1 - \cos \alpha) = 0,0583 \text{ мм}, \quad (4.7)$$

т. е. практически равно нулю. Следовательно, перемещение точки B можно принять за плоскопараллельное, а механизм осцилляции станка мод. МАС-3 — за центровой кривошипно-шатунный механизм. Максимальная скорость ползуна в данном случае

$$v_{\max} = r \frac{\pi n}{30} (1 + \lambda^2) \sqrt{1 - \lambda^2} = 0,255 \text{ м/сек}, \quad (4.8)$$

где $r = 3,5$ мм — радиус AO ; $\lambda = r/R = 0,0227$; $R = 154$ мм — радиус рычага AB .

Наибольшая скорость рейки

$$v_{D_{\max}} = v_{\max} \frac{R_1}{R_2} = 0,182 \text{ м/сек}. \quad (4.9)$$

При поступательном движении пиноль с рейкой испытывает сопротивление P_c , слагающееся из силы трения $P_{тр}$, силы инерции $P_{и}$ и силы пружины возврата $P_{пр}$, т. е.

$$P_c = \Sigma (P_{тр} + P_{и} + P_{пр}). \quad (4.10)$$

Усилие пружины возврата определено из условия отсутствия зазоров в зубчатом зацеплении рейка — сектор. При движении пинолей слева направо зуб сектора давит на зуб рейки, принудительно преодолевая усилие пружины, силу трения пиноли по бронзовой втулке и инерционные силы. При движении пинолей в обратном направлении зуб сектора стремится оторваться от зуба рейки, а пружина, преодолевая силы трения и инерции, должна обеспечивать беззазорное зацепление. В последнем случае работу перемещения выполняет пружина возврата.

Если принять реакцию в реечном зацеплении $R_p = 0,2 P_{пр}$, то усилие пружины возврата определится из уравнения:

$$P_{пр} = \frac{\Sigma P_{тр} + \Sigma P_{п}}{0,8} = \frac{10,9 + 34,42}{0,8} \approx 60 \text{ кг}. \quad (4.11)$$

Сила инерции ползуна B соответственно будет определена из условия, что

$$\Sigma P_{п} = \Sigma m \ddot{x} = 34,42 \text{ кг}, \quad (4.12)$$

где Σm — сумма масс подвижных частей ползунов,

$$\Sigma m = \frac{\Sigma (Q_1 + Q_2)}{g} = \frac{25}{9,81} = 2,55 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м};$$

\ddot{x}_B — ускорение точки B ,

$$\ddot{x}_B = r\omega^2(1 + \lambda) = 3,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 (1 + 0,0227) = 18,67 \text{ м/сек}^2;$$

\ddot{x}_D — ускорение точки D ,

$$\ddot{x}_D = \frac{\ddot{x}_B R_1}{R_2} = \frac{18,67 \cdot 75}{105} = 13,5 \text{ м/сек}^2.$$

Сила трения тел, состоящая из сил трения пинолей о бронзовые втулки $P_{тр1}$ и в манжетах $P_{тр2}$ в данном случае будет равна

$$\begin{aligned} \Sigma P_{тр} &= P_{тр1} + P_{тр2} = \Sigma m f + (n_1 D_1 + n_2 D_2) \pi h \tau = \\ &= 0,16 \cdot 25 + 3,14 (2 \cdot 7,5 + 2 \cdot 10) \cdot 0,4 \cdot 2,2 = 4 + 6,9 = 10,9 \text{ кг}, \end{aligned} \quad (4.13)$$

где f — коэффициент трения; D_1 и D_2 — номинальный диаметр уплотняемых поверхностей, см; h — высота уплотнения, см; n_1 и n_2 — количество уплотнений; τ — удельная сила трения кг/см² (по данным [20] $\tau = 2,2$ кг/см²).

Усилие, необходимое для перемещения системы (при движении слева направо), равно

$$P = P_{тр} + P_{п} + P_{пр} = 10,9 + 34,42 + 60,0 = 105,3 \text{ кг}. \quad (4.14)$$

Статическая мощность осцилляции

$$N_{ст} = \frac{1,2 P v_{D_{\max}}}{102 \eta} = \frac{1,2 \cdot 105,3 \cdot 0,182}{102 \cdot 0,9} = 0,25 \text{ квт}. \quad (4.15)$$

В станке мод. МАС-3 на привод механизма осцилляции по конструктивным соображениям принято $N_{дв} > N_{ст}$ и установлен двухскоростной электродвигатель АО2-31-6/4 с характери-

кой $N_{дв1} = 0,75$ кВт, $n_{дв1} = 955$ об/мин, $N_{дв2} = 1,1$ кВт, $n_{дв2} = 1440$ об/мин.

Средняя скорость точек B и D рычага зубчатого сектора [27]

$$v_{Bcp} = \frac{2}{\pi} r\omega = \frac{2}{3,14} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{3,14 \cdot 690}{30} = 0,161 \text{ м/сек}, \quad (4.16)$$

$$v_{Dcp} = v_{Bcp} \frac{R_1}{R_2} = 0,161 \cdot \frac{75}{105} = 0,115 \text{ м/сек}, \quad (4.17)$$

а усилие, развиваемое электродвигателем при средней скорости ползуна,

$$P_{дв} = \frac{N_{дв} \cdot 102\eta}{N_{Dcp}} = \frac{2 \cdot 1,1 \cdot 102 \cdot 0,9}{0,115} = 1726 \text{ кг}. \quad (4.18)$$

Из уравнения (4.18) следует, что если в момент, когда скорость ползуна близка к нулевой, возникнет недеформируемое препятствие, то усилие сжатия $P_{дв}$ возрастет до критической величины, что может вызвать поломку механизмов. Поэтому в станке мод. МАС-3 предусмотрено предохранительное устройство в виде двух стяжек $d = 20$ мм (см. рис. 4.4, позиция 8).

Расчет необходимого количества стяжек произведен в данном случае из условия, что модуль упругости $E = 10500$ кг/мм², коэффициент устойчивости по принятой схеме крепления $\mu = 0,699$, радиус инерции $i_{мин} = r/2 \approx 1$ см, гибкость приводного стержня AB (рис. 4.7)

$$\lambda = \frac{\mu R}{i_{мин}} = \frac{0,699 \cdot 30}{1} = 20,9,$$

площадь одной стяжки $S = 3,14$ см², допустимое для одной стяжки усилие, исключаяющее ее поломку, $P_{доп} = 1205,7$ кг, а следовательно, количество стяжек

$$n = \frac{P_{дв}}{P_{доп}} = \frac{1726}{1205} = 1,43 \approx 2 \text{ шт.}$$

Кроме того, в приводе механизма осцилляции станка мод. МАС-3 установлена шариковая предохранительная муфта, пружины которой рассчитаны из условия, что наибольшая передаваемая муфтой мощность $N_{макс} = 0,5/1$ кВт, а скорость ее вращения $n_{макс} = 690$ об/мин. Передаваемый муфтой крутящий момент при этом условии равен

$$M_{мин} = 975 \frac{N_{мин}}{n_{макс}} = 975 \cdot \frac{0,5}{690} = 70,65 \text{ кг} \cdot \text{см}, \quad (4.19)$$

$$M_{макс} = 975 \frac{N_{макс}}{n_{мин}} = 975 \cdot \frac{1}{690} = 141,3 \text{ кг} \cdot \text{см}, \quad (4.20)$$

а расчетный крутящий момент, при котором муфта должна включаться в действие,

$$M_p = (1,21 \div 1,5) M_{II} = (88,312 \div 105,975) \text{ кг} \cdot \text{см}, \quad (4.21)$$

(M_{II} — нормальный крутящий момент), т. е. в среднем $M_p = 100 \text{ кг} \cdot \text{см}$.

Из уравнения (4.21) следует, что если для описанного выше условия принять шариковую муфту со следующими параметрами: $D_{ш} = 120 \text{ мм}$ — диаметр окружности гнезд под шарики; $i = 4$ шт. — количество шариков в муфте; $\alpha = 45^\circ$ — угол фаски гнезда под шарики; $d_{ш} = 10 \text{ мм}$ — диаметр шарика; $d_r = 6 \text{ мм}$ — диаметр гнезда под шарики; $\varphi = 10^\circ$ — угол трения; $f = 0,1$ — коэффициент трения; $H_0 = 25 \text{ мм}$ — высота пружины в свободном состоянии; $H_1 = 15 \text{ мм}$ — высота пружины под нагрузкой предварительного сжатия P_1 , где

$$P_1 = \frac{20M_p}{1,2D_{ш}i} \left[\operatorname{tg}(\alpha - \varphi) - \frac{4}{\pi} f \right] = 2 \text{ кг}, \quad (4.22)$$

то дополнительное сжатие пружины при включении муфты в работу, т. е. ее рабочий ход

$$h = \frac{d_{ш}}{2} (1 - \sin \alpha) = 1,46 \text{ мм}. \quad (4.23)$$

Расчет параметров пружины предохранительной шариковой муфты на передаваемую ею мощность $N_{мин} = 0,5 \text{ кВт}$ и $N_{макс} = 1 \text{ кВт}$ в станке мод МАС-3 произведен из условия, что $P_1 = 2 \text{ кг}$; наибольшее рабочее усилие $P_2 = 2,5 \text{ кг}$; рабочий ход $h = 1,5 \text{ мм}$; наружный диаметр $D_{II} = 9 \text{ мм}$; сила при максимальной деформации пружины $P_3 = 1,35 \cdot P_2 = 3,15 \text{ кг}$; диаметр проволоки $d_{II} = 1 \text{ мм}$; жесткость и максимальная деформация одного витка соответственно $z_1 = 1,953 \text{ кг/мм}$ и $f = 1,613 \text{ мм}$.

Общая жесткость пружины

$$z = \frac{P_2 - P_1}{h} = 0,333 \text{ кг/мм}. \quad (4.24)$$

Число рабочих витков

$$n = \frac{z_1}{z} = 5,86 \approx 6. \quad (4.25)$$

Полное число витков с поджатием по 1,25 витка с каждого конца пружины

$$n_1 = n + 2,5 = 8,5. \quad (4.26)$$

Шаг пружины в свободном состоянии t_1 и при рабочей нагрузке t_2 соответственно:

$$t_1 = f_3 + d = 3 \text{ мм}; \quad t_2 = t_1 - \frac{P_2}{P_3} f_3 = 1,72 \text{ мм}. \quad (4.27)$$

Высота пружины: в свободном состоянии $H_0=19,5$ мм, под нагрузкой $P_1H_1=13,5$ мм, $P_2H_2=12$ мм; вес одной пружины $Q=6,13 \cdot 10^6$ Лд²=0,0015 кг, где L — длина развернутой пружины.

Используя уравнения (4.22) — (4.27), можно рассчитать пружины шариковой муфты для случая, когда передаваемая ею мощность равна $N_{\text{макс}}=1$ квт. При этом $P_1=14$ кг; $P_2=5$ кг; $h=1,5$ мм; $z=0,67$ кг/мм; $h=9$; $n_1=11,5$; $t_1=2,5$ мм; $t_2=1,67$ мм; $H_0=24,6$ мм, $H_1=18,6$ мм, $H_2=17,1$ мм, $L=316,5$ мм, $Q=0,0028$ кг, диаметр контакта шарика с гнездом

$$d_{\text{к}} = \frac{d_{\text{ш}}}{\sqrt{2}} = \frac{10}{1,41} = 7,08 \text{ мм}, \quad (4.28)$$

наружный диаметр гнезда

$$D = d_{\text{к}} + 2h = 7,08 + 2 \cdot 1,46 = 10 \text{ мм},$$

а диаметр отверстия гнезда $d=5$ мм.

3. Опытный станок-автомат мод. ФАС-1 для обработки наружных поверхностей деталей типа колец

Опытный ферромагнитно-абразивный станок ФАС-1 [23] предназначен: для отработки технологии магнитно-абразивной обработки дорожек качения внутренних колец шарикоподшипников; для проверки работоспособности и надежности систем электро- и пневмоавтоматики в условиях воздействия сильных магнитных полей; для испытания отдельных узлов станка в условиях воздействия абразивного порошка.

Ферромагнитно-абразивный станок ФАС-1 (рис. 4.8) состоит из станины, механизма вращения, шпиндельной головки, механизма осцилляции, бункера порошка, механизма загрузки порошка и дозирующего устройства, магнитной системы с электромагнитами, лотка подачи обрабатываемых деталей, механизма подачи обрабатываемых деталей на рабочую позицию, механизма фиксации сердечника электромагнитов, механизма прижима обрабатываемых деталей на штоке в рабочем положении, насосной установки с магнитным сепаратором, пульта управления. Все узлы станка работают и взаимодействуют с помощью системы электро- и пневмоавтоматики. Привод механизмов вращения и осцилляции осуществляется от электродвигателей через клиноременные передачи.

Привод механизмов загрузки порошка, подачи обрабатываемых деталей и фиксации сердечников электромагнитов осуществляется от пневмоцилиндров диаметром 50, 100 и 100 мм соответственно. Привод лотка подачи деталей осуществляется от электромагнита.

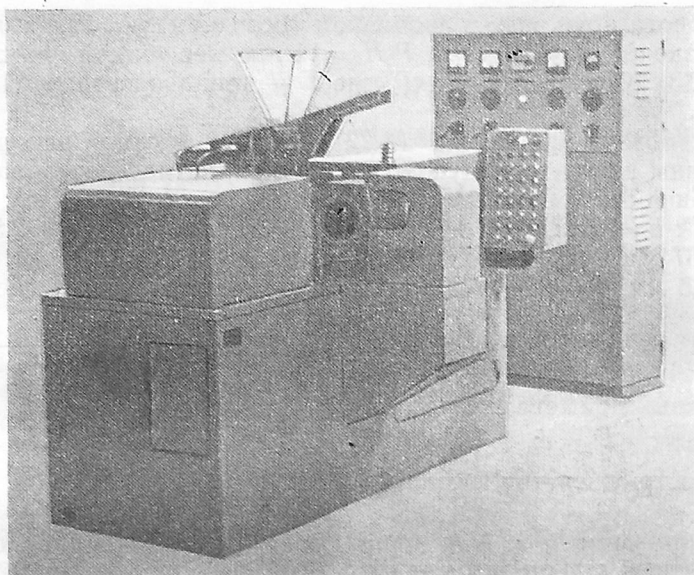


Рис. 4.8. Общий вид экспериментального станка-автомата мод. ФАС-1 для обработки колец, втулок и других деталей на оправке

Пневмопанель, электродвигатели привода и установка насосная с магнитным сепаратором смонтированы в станине.

Электросхема смонтирована в шкафу управления.

К рабочей части сердечников крепятся полюсные наконечники, в зазоры между наконечниками и обрабатываемой поверхностью деталей подаются ферромагнитно-абразивный порошок и эмульсия.

Станок имеет три режима работы: автоматический с разноименными полюсами; автоматический с одноименными полюсами; наладочный.

Техническая характеристика станка мод. ФАС-1

Обрабатываемые детали — внутренние кольца шарикоподшипников № 209 и 306	
Количество одновременно обрабатываемых колец, шт.	4
Подача колец на рабочую позицию — автоматическая из лотка	
Емкость лотков: кольцо подшипника № 209, шт.	120
кольцо подшипника № 306, шт.	200
Обрабатывающая среда — ферромагнитно-абразивный порошок	
Подача порошка в зону обработки — автоматическая из бункера	

Емкость бункера, $см^3$	4000
Регулировка дозы порошка, $см^3$	$0 \div 10$
Тип загрузочного устройства порошка — шиберный	
Магнитное поле создается двумя катушками, питаемыми постоянным током. Число витков каждой катушки	2000
Максимальный ток, a	6
Демагнизация осуществляется путем подачи на катушки электромагнитов переменного тока, $гц$	50
Максимальный ток демагнизации, a	2,5
Максимальная мощность, потребляемая каждым электромагнитом, $квт$	1,5
Число оборотов шпинделя, $мин$:	
максимальное	3000
минимальное	310
Амплитуда осцилляции, $мм$:	
максимальная	2,5
минимальная	0,15
Режимы работы станка — наладочный и автоматический	
Установленная мощность электродвигателей, $квт$	6,5
Давление в пневмосистеме, $кг/см^2$	5
Габариты станка (длина \times ширина \times высота), $мм$	$2300 \times 1300 \times 1750$
Масса станка, $кг$	3000

4. Станок для обработки крупногабаритных цилиндров мод. МАС-4

Минским СКБ-3 создан опытно-промышленный станок мод. МАС-4 [23] для магнитно-абразивной обработки наружных поверхностей крупногабаритных цилиндров ($d_3 = 150$ мм, $l = 1000$ мм) опрокидывающего механизма большегрузных автомобилей БелАЗа (рис. 4.9).

Техническая характеристика станка мод. МАС-4

Диаметр обрабатываемой детали, $мм$:	
наибольший	150
наименьший	50
Длина обрабатываемой детали, $мм$:	
наибольшая	1000
наименьшая	370
Число оборотов детали в минуту:	
наибольшее	500
наименьшее	160
Число колебаний шпинделя в минуту:	
наибольшее	310
наименьшее	50
Амплитуда осцилляции детали, $мм$	$0 \div 12$
Ход шноли задней бабки, $мм$	100
Диаметр цилиндра задней бабки, $мм$	150
Мощность электропривода, $квт$	17

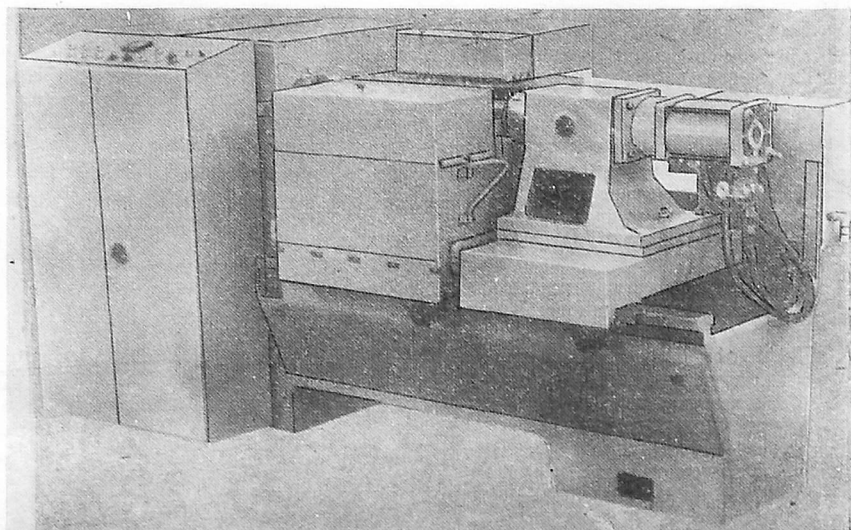


Рис 4.9. Общий вид станка мод. МАС-4 для обработки крупногабаритных цилиндров автомобиля

Ток в катушках электромагнита, а:	
номинальный	3
максимальный	6
Число катушек электромагнита, шт.	2
Магнитная индукция в рабочем зазоре $\delta=0,8$ мм,	
$B=1,470$ тл	
Габариты станка (длина×ширина×высота), мм	2514×1200×1340
Масса станка, кг	4500

5. Опытная установка мод. ЭУ-4 для обработки сложных поверхностей

В повседневной практике к сложным поверхностям принято относить все поверхности, не входящие в число правильных, классических (в том числе и так называемых фасонных). Примером таких деталей являются лопатки турбин и компрессоров, медицинские инструменты, кулачки и др.

Для изучения возможности и целесообразности магнитно-абразивной обработки деталей сложной геометрической формы была создана опытная установка мод. ЭУ-4.

Особенности конструкции. Установка ЭУ-4 состоит из механизма вращения детали вокруг собственной оси и по кольцевой ванне, механизма осциллирующего движения в вертикальной плоскости, кольцевой ванны, магнитной системы и электрооборудования.

Узел вращения деталей вокруг своей оси и вращения их по кольцевой ванне представляет собой простой эпициклический механизм, состоящий из солнечной шестерни 5 (рис. 4.10), приводимой в движение электродвигателем 13 через клиноременную передачу 14, дискового водила 3, на котором в подшипниках установлены четыре шпинделя 2, несущие планетарные шестерни 4 и приспособления для крепления обрабатываемых изделий 1. Дисковое водило жестко соединено с нижним концом центрального вала 6, смонтированного на подшипниках качения в ползуне 12. Верхний конец центрального вала через телескопическую муфту 9 соединен с червячным редуктором 8, приводимым в движение электродвигателем 7.

Механизм осциллирующего движения обрабатываемых деталей в вертикальной плоскости включает электродвигатель 10 и кривошипно-шатунное устройство 11, соединенное с ползунком, в котором покоится центральный вал.

Кольцевая ванна 16, изготовленная из диаманитного материала, помещается между полюсами электромагнитов и в рабочем состоянии заполняется ферромагнитным порошком.

Магнитная система состоит из магнитопровода 15, на котором установлены электромагнитные катушки 17 — восемь боковых и одна центральная и полюсные наконечники 18, позволяющие регулировать рабочий зазор. Сами полюсные наконечники равномерно распределены по окружности и радиально расположены.

Электрооборудование установки смонтировано в специальном шкафу. Оно обеспечивает привод механизмов установки и создание постоянного магнитного поля электрического тока.

В состав силового электрооборудования входят три двигателя постоянного тока типа МИ-32Ф мощностью $N_3 = 0,76 \text{ квт}$ при числе оборотов $n_3 = 2500 \text{ об/мин}$. Двигатели имеют плавное изменение скорости вращения путем регулирования напряжения в цепи якоря и, кроме того, снабжены реверсивными магнитными пускателями для изменения направления вращения. Защита силовых цепей и цепи управления осуществляется автоматами АБЗ-М и предохранителями ПРС-6/П. Электросхема обеспечивает независимую последовательность включения механизмов установки.

Работа установки мод. ЭУ-4 осуществляется следующим образом: закрепленные в приспособлении детали опускаются в кольцевую ванну с рабочей средой, подается ток на катушки электромагнитов и в зазоре между всеми парами полюсных наконечников наводится постоянное магнитное поле заданной напряженности, затем последовательно включаются в работу электродвигатели, сообщающие обрабатываемым деталям вращение вокруг собственной оси, вращение по кольцевой ванне, а также осциллирующее движение в вертикальной плоскости.

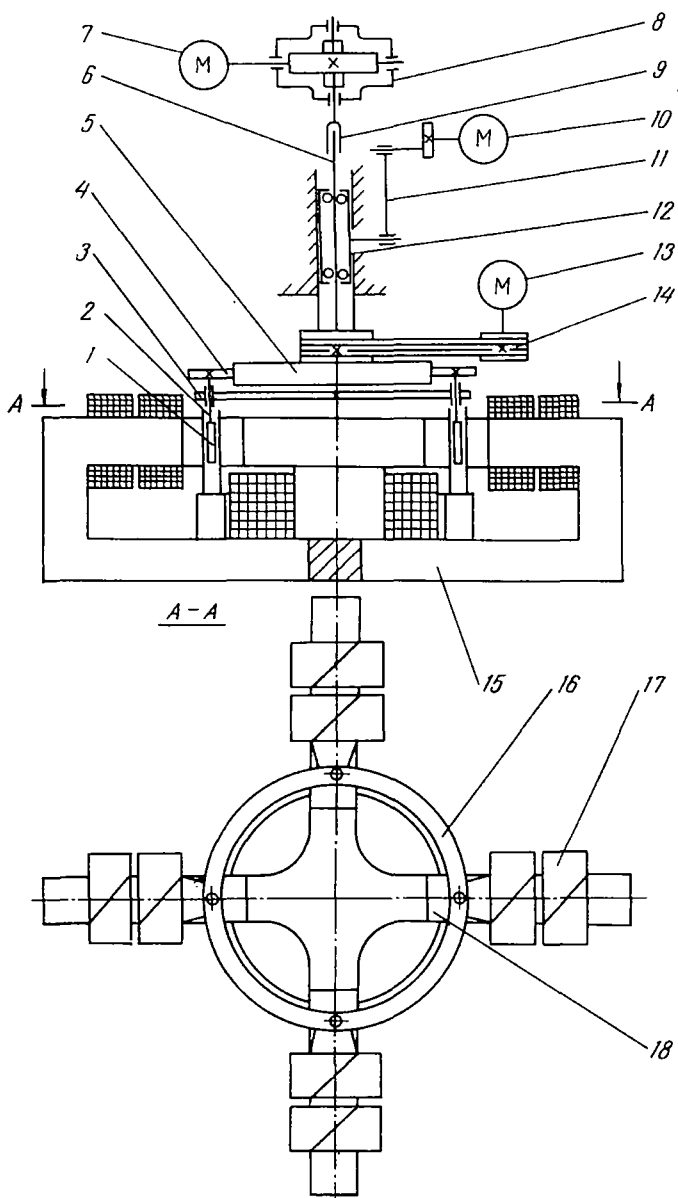


Рис. 4.10. Принципиальная схема работы установки мод. ЭУ-4

При этом вращательное движение вокруг оси кольцевой ванны сообщается электродвигателем через муфту, центральный вал и водило, несущее на своей плоскости подшипниковые узлы шпинделей с приспособлениями для крепления изделий, а вращение вокруг собственной оси передается деталям от электродвигателя через ременную передачу и солнечную шестерню, находящуюся в зацеплении с планетарными шестернями. Изменяя направления вращения и число оборотов электродвигателей, можно получать разноименное или одноименное направление двух вращательных движений деталей, регулировать скорость их движений относительно полюсов электромагнитов и, следовательно, изменять режимы обработки. Осциллирующее движение детали получают от электродвигателя через кривошипно-шатунное устройство, которое соединено с ползуном. Ползун передает движение центральному валу, а последний — дисковому водилу с обрабатываемыми деталями.

При включении катушек электромагнитов образуется магнитное поле, в котором режущие частицы (зерна ферропорошка) обрабатывающей среды уплотняются, ориентируются своей большей осью вдоль магнитных силовых линий и прижимаются острыми гранями к обрабатываемой поверхности детали. При относительном движении последней режущие частицы осуществляют обработку поверхности. Жидкость, подаваемая в зону обработки, создает благоприятные условия для протекания процесса.

6. Экспериментальный станок для обработки плоскостей мод. ЭУ-5

Принципиально новая схема обработки плоских поверхностей, основанная на замкнутой магнитной системе, разработана в ФТИ АН БССР. Схема позволяет увеличить индукцию в зазоре и обеспечить ориентированное резание. При этом увеличиваются производительность и стабильность процесса, улучшается качество поверхности. Станок, реализующий эту схему, создан также в ФТИ АН БССР (рис. 4.11).

Станок состоит из трех основных систем:

- 1) магнитной, состоящей из электрических магнитов, работающих на выпрямленном токе, предназначенной для удержания в рабочей зоне порошка и сообщения ему необходимых относительных перемещений в пространстве;
- 2) механической, обеспечивающей крепление изделия в зоне обработки и сообщающей ему относительное движение;
- 3) электрической, служащей для подвода тока в рабочую зону.

Магнитная система включает магнитопровод, состоящий из ярма 8 и двух сердечников — верхнего 9 и нижнего 15. На сердечниках устанавливаются электромагнитные катушки 10. В зависимости от обрабатываемого материала и режимов процесса меняется конфигурация полюсных наконечников 11, которые устанавливаются на верхнем сердечнике. Оба сердечника могут вращаться вместе с катушками 10 либо самостоятельно (катушки в этом случае стопорятся на ярме), что уменьшает инерционные нагрузки.

Обрабатываемая деталь крепится на столе 12, состоящем из диамагнитной плиты и закрепленной на ней ферромагнитной вставки 13 с Т-образными пазами. Нижний сердечник 15 магнитопровода вплотную подходит к вставке 13, обеспечивая минимальные потери магнитного поля. Магнитная система с приводами и стол с приводом монтируются на станину 14, представляющую собой сварную конструкцию. При монтаже магнитная система изолируется от станины и других узлов диамагнитными прокладками. Верхний сердечник 9 имеет привод вращения 5 от двигателя 4 и привод вертикального перемещения 7 от двигателя 6. Привод стола осуществляется от

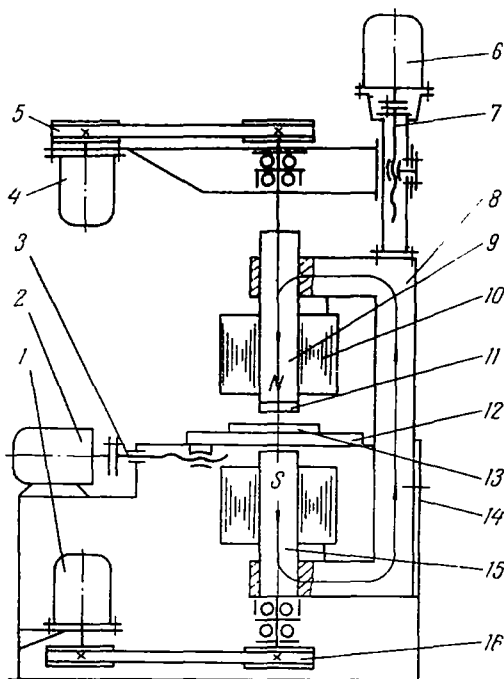


Рис. 4.11. Принципиальная схема работы станка мод. ЭУ-5

двигателя 2 через винтовую передачу 3, а привод сердечника 15 — от двигателя 1.

Работа установки осуществляется следующим образом. Изделие закрепляется на вставке 13. На катушки 10 подается напряжение, и в зазоре между полюсным наконечником 11 и нижним сердечником 15 наводится постоянное магнитное поле заданной напряженности. В зазор между полюсным наконечником и обрабатываемой поверхностью подаются ферропорошок и СОЖ. Затем последовательно включаются в работу электродвигатели 4, 1, 2, сообщающие сердечникам 9 и 15 вращение через приводы 5 и 16, а столу 12 со вставкой 13 — возвратно-поступательное движение через привод 3.

Вертикальное перемещение сердечника 9 с полюсным наконечником 11 осуществляется от двигателя 6 через привод 7 и служит для регулировки рабочего зазора между полюсным наконечником 11 и деталью.

При наведении магнитного поля в рабочем зазоре режущие зерна ориентируются своей большой осью вдоль магнитных силовых линий и прижимаются острыми гранями к обрабатываемой поверхности. При вращении полюсного наконечника 11 и поступательном движении стола режущие частицы осуществляют обработку поверхности изделий.

Проведенная работа показала целесообразность магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей изделий из различных материалов.

Изучение картины движения абразивных цепочек в рабочем зазоре и различных схем обработки позволило найти возможность повышения производительности процесса, улучшения качества поверхности и выбрать оптимальную схему магнитно-абразивной обработки плоскостей. С учетом влияния времени обработки и магнитной индукции на производительность процесса можно рекомендовать оптимальные режимы: $\delta = 0,5 \text{ мм}$; $V = 1,8\text{--}2,2 \text{ тл}$; $2 \leq T \leq 4 \text{ мин}$.

7. Установки на базе универсальных станков для обработки поверхностей тел вращения

Экономическая эффективность внедрения метода магнитно-абразивной обработки в промышленность зависит от стоимости применяемого для этой цели оборудования. Изготовление опытных и опытно-промышленных станков, как правило, обходится в 2—3 раза дороже универсального металлорежущего оборудования (типа токарных, шлифовальных, фрезерных и других станков), которое производится серийно. Поэтому в ряде случаев, особенно при использовании метода магнитно-абразивной обработки в индивидуальном, мелкосерийном и

серийном производстве, где необходимы частые переналадки оборудования, экономичнее целесообразнее использовать не специальные станки, а отдельные их узлы, позволяющие путем модернизации универсальных станков выполнять операцию полирования без значительных затрат.

Ниже рассматривается ряд конструкций установок для магнитно-абразивной обработки, позволяющих осуществить эту задачу.

Установка к токарно-винторезному станку мод. ТВ-4 для обработки деталей типа колец. В Физико-техническом институте АН БССР создано устройство для финишной обработки ферромагнитными порошками в магнитном поле наружных поверхностей стальных деталей типа колец, втулок и др. Устройство крепится на токарный станок ТВ-4 и состоит из механизма осциллирования обрабатываемой детали, магнитной системы и электрооборудования. Производительность установки 70—100 деталей в час, наибольший диаметр обрабатываемой детали 70 мм, ток электромагнитов выпрямленный, величина тока 3,5 а, число витков каждой катушки 1700, величина магнитной индукции в рабочих зазорах 1,0—1,4 тл.

Механизм осциллирования обрабатываемой детали монтируется на плите 6 (рис. 4.12), установленной на направляющих станины, и включает ползун 5, помещенный между направляющими. Механизм осцилляции связан с электродвигателем 15 через клиноременную передачу 3, кривошипно-шатунный механизм 4 и кронштейн. Деталь 9, закрепленная на оправке 8, получает вращение от КПП станка через шпindel 1, муфту 2 и фортуну 7. Магнитная система устанавливается на плиту 13, крепится к суппорту станка и имеет ярмо 14, две катушки 11, сменные полюсные наконечники 12, прикрепленные к торцам ярма планками 10. Электрооборудование установки ЭУ-1 смонтировано на отдельном щите.

Полирование деталей на установке осуществляется следующим образом: заготовка 9 помещается между полюсами электромагнита 12 и получает вращательное и осциллирующее движение.

Пространство между обрабатываемой поверхностью и полюсами (рабочий зазор) заполняется порошком, обладающим магнитными и абразивными свойствами. Магнитное поле удерживает зерна порошка в рабочем зазоре и прижимает их к обрабатываемой поверхности. Операция ведется в воздушной среде (всухую) или с подачей в рабочую зону жидкости (эмульсия, керосин, вода и др.). Движение осцилляции исключает совпадение траектории перемещения режущих зерен и следов предшествующей обработки, что позволяет интенсифицировать процесс и получить меньшую шероховатость поверхности.

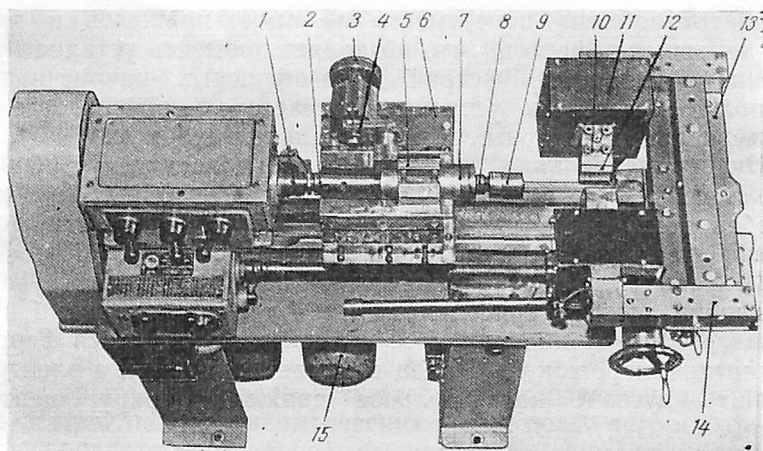


Рис. 4.12. Общий вид токарно-винторезного станка мод. ТВ-4 с устройством для магнитно-абразивной обработки мод. ЭУ-1

Ферромагнитный порошок распределяется по направлению магнитных силовых линий, благодаря чему в процессе обработки к детали обращены наиболее острые кромки. По мере их затупления происходит переориентация зерен в магнитном поле, что способствует «самозатачиванию» кромок. Жидкость в рабочей зоне разупрочняет поверхностный слой обрабатываемой детали и создает благоприятные условия для процесса съема металла.

Величина припуска, снимаемого при обработке с применением устройства, пропорциональна времени и не превышает 0,02—0,01 мм на диаметр. Точность макрогеометрии обрабатываемой поверхности должна обеспечиваться на предыдущих операциях.

Для получения чистоты поверхности 12-го класса на деталях из стали ШХ15, У10 с твердостью HRC 58—62 рекомендуется следующий режим обработки: окружная скорость изделия 150 м/мин, скорость осциллирующего движения 6 м/мин, амплитуда осцилляции 5 мм, величина магнитной индукции в рабочем зазоре 1,2 тл, ширина рабочего зазора 2 мм, материал для ферромагнитного порошка — кермет, продукт спекания электрокорунда с порошком железа в соотношениях 20 и 80% соответственно, зернистость порошка 160 мк, жидкость — 10%-ный раствор эмульсола Э2 в воде.

Устройство за 20—30 сек машинного времени обеспечивает снижение шероховатости закаленных наружных поверхностей цилиндрических деталей с 8-го до 12-го класса. Вследствие незначительного выделения тепла в зоне резания и интенсив-

ности теплообмена поверхность не имеет прижогов и других тепловых дефектов, что позволяет повысить усталостную прочность металла. Быстрая смена полюсных наконечников позволяет применять устройство в массовом производстве на универсальных токарных и шлифовальных станках.

Экспериментальная и опытно-промышленная установки для обработки сферической поверхности шаровых пальцев. Особенности обработки сферической поверхности шарового пальца поясняются схемой, показанной на рис. 4.13 [30].

Шаровой палец 3 установлен в центрах, а его сфера помещена между сердечниками 2 и 4 электромагнитов 1 и 5. В зазоры между пальцем и сердечниками засыпается ферромагнитный порошок 6. Палец получает вращение, а электромагнит — дуговое колебательное движение вокруг центра сферы.

Для исследования процесса чистовой обработки пальцев в магнитном поле сначала была изготовлена экспериментальная установка на базе круглошлифовального станка ЗБ12М, снабженного магнитной системой и механизмом ее осцилляции.

Целью экспериментальных исследований являлось установление оптимальных технологических параметров обработки: магнитной индукции, скорости вращения детали, частоты колебаний сердечников, состава ферромагнитного порошка, конфигурации торцов сердечника и влияния их на производительность процесса и качество получаемой поверхности.

По ранее полученным экспериментальным данным для исследований были взяты дешевые, легко доступные и обладающие достаточной производительностью ферромагнитные порошки: ферробор, ферропорошок, полученный путем скле-

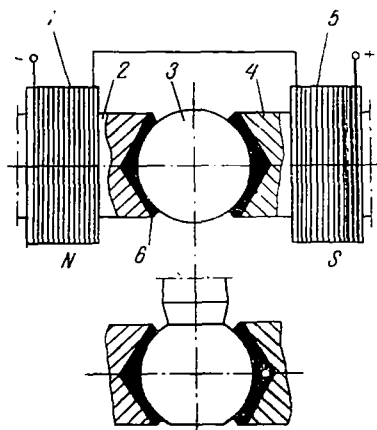


Рис. 4.13. Схема обработки сферических поверхностей шарового пальца

ванья стальных опилок с электрокорундом, и белый чугун. Грануляция порошка находилась в пределах 0,25—0,5 мм. Торцы рабочих сердечников сферической формы и негативны по отношению к обрабатываемой детали. Рабочий зазор между деталью и торцом сердечников электромагнитов устанавливался $\delta \geq 3l_{\text{макс}}$, где $l_{\text{макс}}$ — максимальный размер частицы ферромагнитного порошка. Для данного зазора определялась магнитная индукция в гауссах в зависимости от тока в катушках электромагнита. Установлено, что максимальная магнитная индукция для экспериментальной установки составляет 5500 гс.

Для исследований брались шаровые пальцы реактивной штанги автомобиля, прошедшие операцию шлифования сферы. Перед опытами все детали тщательно промывались в бензине и взвешивались на аналитических весах, после чего на сферической поверхности пальцев замерялись исходные твердость по Бринеллю и шероховатость поверхности, которая находилась в пределах 6-го класса. Время обработки выбрано $t_{\text{маш}} = 60$ сек исходя из годовой программы завода.

После измерения деталь закреплялась на установке в центрах. В рабочие зазоры засыпался ферромагнитный порошок в количестве 10 г. В качестве охлаждающей жидкости подавалась эмульсия. Для каждого отдельного эксперимента бралось от 3 до 5 деталей в зависимости от величины рассеивания результатов опыта.

На обработанных деталях замерялись получаемая шероховатость сферической поверхности, ее твердость и вес.

Результаты экспериментов представлены на рис. 4.14. Как видно из рисунка (кривая 2), получаемая шероховатость сферической поверхности при всех значениях магнитной индукции ниже исходной: от 0 до 3600 гс наблюдается плавное снижение шероховатости, а от 3600 до 5500 гс происходит более резкое ее снижение. При 5100 гс величина шероховатости укладывается в 8-й класс, а при 5500 гс приближается к 9-му классу.

Полученная зависимость шероховатости от скорости вращения детали (см. рис. 4.14, кривая 1) позволяет установить оптимальную скорость. Возрастание скорости от 0 до 75 м/мин вызывает резкое снижение шероховатости поверхности, минимальное значение которой приближается к 9-му классу. Дальнейшее возрастание скорости ухудшает качество поверхности, но до 150 м/мин значение шероховатости находится в границах 8-го класса.

Частота колебаний сердечников электромагнитов в значительной мере оказывает влияние на качество поверхности. Как видно из рис. 4.14 (кривая 3), наблюдается почти прямо пропорциональная зависимость между получаемой шероховатостью и числом колебаний сердечников до значения 120 коле-

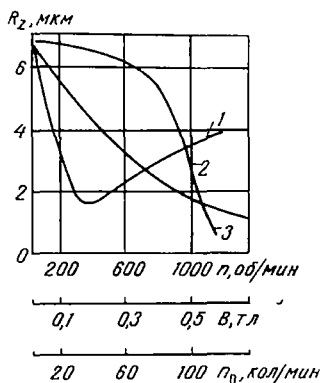


Рис. 4.14. Зависимость шероховатости поверхности от числа оборотов детали (1), магнитной индукции (2) и частоты колебаний сердечников электромагнита (3)

баній в минуту. Дальнейшее повышение частоты оказывает меньшее влияние на снижение шероховатости, значение которой при 150 колебаниях в минуту приближается к границе 9-го класса.

Производительность процесса обработки оценивалась в граммах снятого металла за единицу времени. Исследования показали, что в интервале времени обработки от 0 до 30 сек наблюдается резкое увеличение производительности, которая затем плавно снижается, что объясняется постепенным уменьшением шероховатости. Увеличение магнитной индукции способствует росту производительности.

Дальнейшие исследования проводились с целью установления оптимальной конфигурации торцов рабочих сердечников электромагнитов. Исследовались четыре основных конфигурации: сферическая, цилиндрическая с осью, перпендикулярной оси вращения детали, цилиндрическая с осью, параллельной оси вращения детали, коническая с внутренним конусом. При оптимальных режимах обработки было установлено, что наилучшее качество поверхности достигается при коническом торце сердечника. В этом случае поверхность контакта обрабатываемой сферы с ферромагнитным порошком получается в виде кольца, что способствует неравномерному распределению плотности порошка. Наибольшая плотность получается на наименьших радиусах обрабатываемой поверхности, где скорость резания наименьшая. Следовательно, качество поверхности получается более равномерным по рабочим участкам сферы. Кроме того, указанная конфигурация торца наиболее технологична в изготовлении.

Анализ результатов исследований позволяет установить следующие рекомендации по промышленному применению

обработки сферы шарового пальца в магнитном поле ферромагнитными порошками:

- 1) время обработки — 40 сек;
- 2) окружная скорость детали $v_d = 60—90$ м/мин;
- 3) число угловых колебаний $n_y = 100—150$ кол/мин;
- 4) магнитная индукция в рабочих зазорах $B = 6000$ гс;
- 5) вид тока в электромагнитах: выпрямленный, пульсирующий;
- 6) диаметр сердечников электромагнита $D = 50$ мм;
- 7) материал применяемого ферромагнитного порошка — белый чугун;
- 8) размер зерна ферромагнитного порошка $\Delta = 0,25—0,5$ мм;
- 9) строение ферромагнитного зерна — желательно игольчатое с соотношением $l/\Delta_{\max} = 3$, где l — длина зерна, Δ_{\max} — наибольший поперечный размер зерна;
- 10) величина рабочего зазора между деталью и сердечником $\delta \geq 3l_{\max}$ (l_{\max} — максимальный размер отдельного ферромагнитного зерна);
- 11) конфигурация торца сердечника электромагнита — конусная с внутренним конусом;
- 12) охлаждающая среда — эмульсия;
- 13) количество ферромагнитного порошка, расходуемого на одну операцию, 10 г;
- 14) расход охлаждающей жидкости 2 л/мин.

По результатам исследований технологических параметров процесса обработки шаровых пальцев в магнитном поле была изготовлена промышленная установка на базе токарного станка. Модернизация станка заключалась в следующем:

- а) суппорт заменен магнитной системой;
- б) на ходовом валу установлен рычажно-эксцентриковый механизм осцилляции (дугового колебательного движения) магнитной системы;
- в) изменена кинематика коробки подач;
- г) на станине установлены бункерное загрузочное устройство для ферромагнитного порошка и выпрямитель для питания катушек электромагнита постоянным током.

Опытная установка для обработки поршневых пальцев дизелей. Поршневые пальцы судовых двигателей изготавливают, как правило, из сталей 20 и 12ХН2, цементируются и калятся до $HRC\ 56—62$.

В ряде случаев до настоящего времени чистовая обработка данных деталей состоит из двух шлифовальных и полировальной операций, причем полирование производится на токарном станке притирочной пастой при помощи деревянных обжимок.

Проведенные технико-экономические расчеты показали целесообразность замены второй шлифовальной и полировальной операцией чистовой обработкой в магнитном поле ферромагнитными порошками.

Для осуществления данного процесса изготовлена опытная установка (рис. 4.15), у которой привод главного движения и осцилляции осуществляется от одного электродвигателя переменного тока, установленного внутри станины. Шпиндель вращается от электродвигателя через клиноременную передачу. От кулачка, сидящего на шпинделе, получает возвратно-поступательное движение (осцилляции) каретка 9, которая перемещается в направляющих типа «ласточкин хвост». На каретке имеются жестко закрепленные передняя и задняя бабки с центрами 3 для установки обрабатываемых деталей. Так как момент сил резания при чистовой обработке ферромагнитными порошками в магнитном поле невелик, крутящий момент передается на деталь только за счет сил трения между передним центром и деталью. Для удобства закрепления и снятия детали на установке предусмотрен автоматический отвод и подвод сердечников с обеспечением необходимого рабочего зазора. В момент включения питания катушек 4 электромагнита сердечники под действием магнитного поля сходятся до упора и удерживаются в рабочем положении до окончания процесса обработки. При выключении питания катушек электромагнита сердечники расходятся под действием пружин 1, упирающихся одним концом в кронштейны 6, закрепленные на яре 8, другим — в гайки 2, накрученные на шпильки 5. Регулировка величины рабочего зазора осуществ-

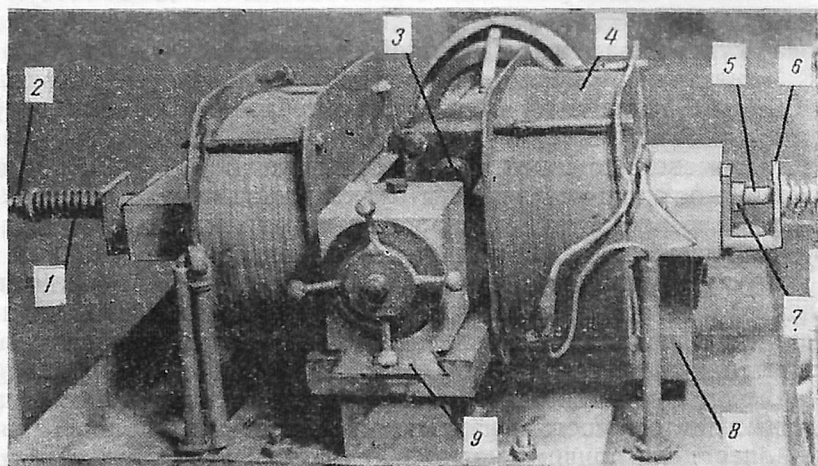


Рис. 4.15. Установка для обработки поршневых пальцев

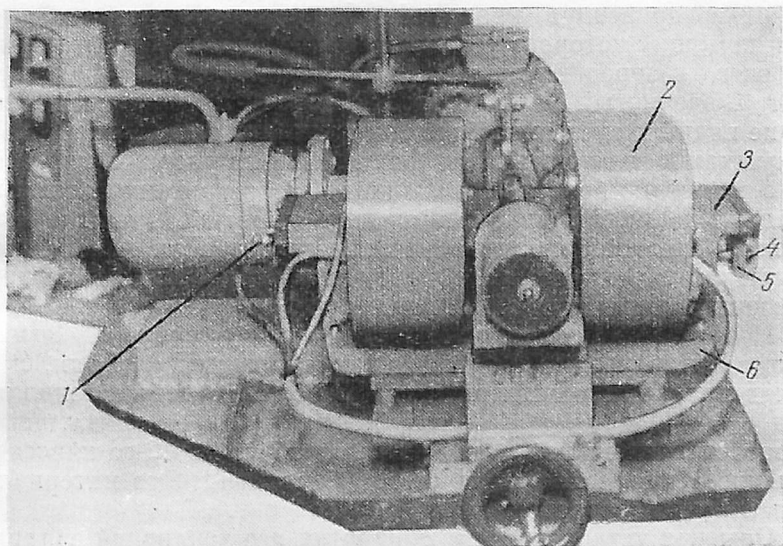


Рис. 4.16. Установка для обработки плунжеров топливной аппаратуры

вляется при помощи шпилек 5 и гаек 7. Установка имеет узел охлаждения, в котором использован стандартный центробежный насос, применяемый в металлорежущих станках.

Время обработки поршневого пальца с габаритными размерами $d_3 = 70$ мм и $l = 150$ мм при применении в качестве ферромагнитного порошка стальной стружки грануляцией $\Delta = 0,6 - 1,2$ мм составляет 4 мин. Обработка осуществляется на следующих режимах: магнитная индукция $B = 0,48$ тл; скорость вращения $v_d = 132$ м/мин; частота осцилляции $\nu_0 = 600$ кол/мин; амплитуда осцилляции $A = 4,5$ мм.

Съем металла во время обработки составляет 2—4 мк/мин. Шероховатость поверхности при этом уменьшается с 7-го до 9-го класса. Твердость поверхностного слоя в результате обработки увеличивается в среднем на 40 единиц по Виккерсу. В процессе обработки исправляются огранка и эллипсность, получаемые при бесцентровом шлифовании.

Опытная установка для обработки плунжеров топливных насосов. Плунжеры топливных насосов судовых двигателей изготавливаются из стали ХВГ и закалываются до $HRC\ 60 - 62$. Обработка их до 12-го класса чистоты представляет известные трудности. Установка для чистовой обработки плунжеров в магнитном поле ферромагнитными порошками (рис. 4.16) предложена в [14].

Сердечники 3 (рис. 4.16) смонтированы на направляющих типа «ласточкин хвост», закрепленных на яме 6. К торцу сер-

дечника привернут кронштейн 5 с регулируемым упором 4, при помощи которого устанавливают необходимую величину рабочего зазора. Через отверстие в кронштейне 5 пропущен болт 1, ввернутый в ядро 6. Под действием пружин (на рисунке не видны), одетых на болт 1, сердечники при выключенных катушках 2 электромагнита расходятся до упора кронштейна 5 в головки болтов 1, увеличивая зазоры между полюсами сердечников и заготовкой. Благодаря этому облегчается установка и снятие обрабатываемых заготовок. При включенных катушках магнитное поле перемещает сердечники к центру, уменьшая зазоры до рабочей величины.

Исследования, выполненные на данной установке, позволили установить, что при магнитной индукции $B=0,35$ тл, скорости вращения плунжера $n_a=1420$ об/мин, частоте осцилляции $n_c=1420$ кол/мин и амплитуде осцилляции $A=4$ мм шероховатость поверхности уменьшается с 7-го до 12-го класса в течение 5 мин, если в качестве ферромагнитного материала используется ферробор.

Опытная установка для обработки игл топливной аппаратуры. Иглы топливной аппаратуры, изготавливаемые из стали ХВГ с твердостью HRC 61—63, должны иметь 12-й класс чистоты.

В Калининградском техническом институте рыбной промышленности и хозяйства была спроектирована и изготовлена установка для чистовой обработки игл в магнитном поле ферромагнитными порошками, выполненная в виде небольшого настольного станка [14].

В установке (рис. 4.17) принята схема осцилляции детали 5 совместно с кареткой 14, имеющей переднюю 4 и заднюю 12 бабки. Деталь приводится во вращение от электродвигателя переменного тока 2 через шпиндель 3, смонтированный на подшипниках качения в передней бабке. Деталь крепится в обратных центрах шпинделя 3 и вращающегося заднего центра 9. Крутящий момент на деталь передается только за счет сил трения между коническими поверхностями центров детали и шпинделя. Задний вращающийся центр смонтирован на подшипниках качения в гильзе 11, имеющей на наружной цилиндрической поверхности винтовой паз, в который входит гладкой цилиндрической частью винт 10. При повороте гильзы за рукоятку 13 она перемещается вдоль оси, обеспечивая зажим детали в обратных центрах.

Каретка перемещается в направляющих типа «ласточкин хвост» и приводится в осциллирующее движение от электродвигателя постоянного тока 19 через эксцентриковую втулку 16 с посаженным на ней шарикоподшипником 15.

Ядро 18 магнитопровода закреплено неподвижно на основании 17. Размеры сердечников 8 электромагнита выбраны

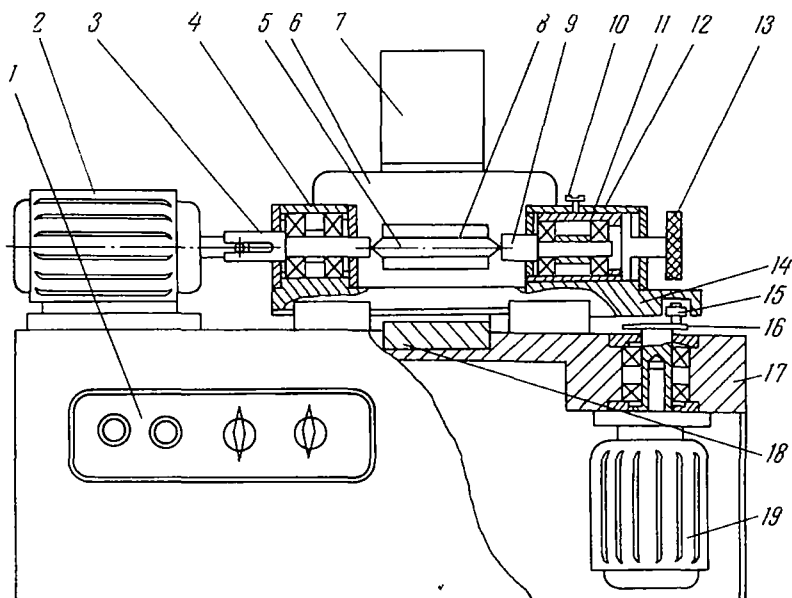


Рис. 4.17. Установка для обработки игл топливной аппаратуры

такими, что обрабатываемая поверхность иглы по длине полностью находится в зоне обработки. Катушки 6 электромагнита питаются выпрямленным пульсирующим током.

Для дозированной подачи ферромагнитного порошка в зону обработки служит бункер 7. На боковой стенке основания имеется панель 1 с выключателями электрических цепей установки. Блок питания и регулирования электрических параметров смонтирован в отдельном корпусе. Для охлаждения игл в процессе обработки применялась вода от магистрального водопровода.

При длительной работе максимально допустимый ток в электромагнитных катушках 7 а при $U=32$ в. Мощность двигателя вращения $N_3=125$ вт. Мощность двигателя осцилляции $N_0=76$ вт.

В результате проведенных экспериментов для получения 12-го класса чистоты с исходного 9-го класса установлены следующие режимы обработки: магнитная индукция $B=0,8$ тл; число оборотов шпинделя $n_3=2850$ об/мин; частота осцилляции $n_0=2000$ дв. ход/мин, амплитуда осцилляции $A=3$ мм; материал ферромагнитного порошка — ферробор грануляцией $\Delta=0,25-0,3$ мм; время обработки $t_{\text{ман}}=40$ сек.

Опытная установка для обработки зубчатых колес. В Калининградском техническом институте изготовлена и успешно прошла испытания установка для отделочной обработки ис-

полнительных поверхностей цилиндрических зубчатых колес с прямолинейным зубом в магнитном поле ферромагнитными порошками. Установка выполнена в качестве приспособления к горизонтально-фрезерному станку модели ТГ2 (рис. 4.18).

На станине 1, выполненной из неферромагнитного материала, расположены направляющие 2 и стопорная планка 3 для перемещения фиксации подвижных валов 4 и 10 на нужном расстоянии от среднего вала 11. Валы 4, 10 и 11 оснащены находящимися в зацеплении между собой сменными зубчатыми колесами 5, 6 и 9, что обеспечивает возможность обработки колес 14 с различными модулями и числом зубьев. Конструкция зубчатых инструментов 13 и 16 сходна с обрабатываемыми зубчатыми колесами и отличается от них лишь толщиной зуба для создания необходимого рабочего зазора. На валах 4 и 10 свободно посажены неподвижные катушки электромагнитов 12 и 17, сердечниками которых служат сами эти валы и закрепленные на них сменные зубчатые инструменты 13 и 16. В систему магнитопровода также входят сменные колеса 5, 6 и 9. Вал 11 имеет механизм для приведения его совместно с обрабатываемым зубчатым колесом 14 в осциллирующее движение, состоящий из кулачка 7 и закрепленного на корпусе 1 толкателя 8. Для подачи ферромагнитного порошка в рабочую зону служит бункер-дозатор 15. Вал 11 получает вращение от шпинделя станка.

При настройке приспособления валы 4 и 10 фиксируются в корпусе на расстоянии от вала 11, равном сумме диаметров обрабатываемого зубчатого колеса 14, двух радиусов зубчатых инструментов 13 и 16 и двух рабочих зазоров между ними

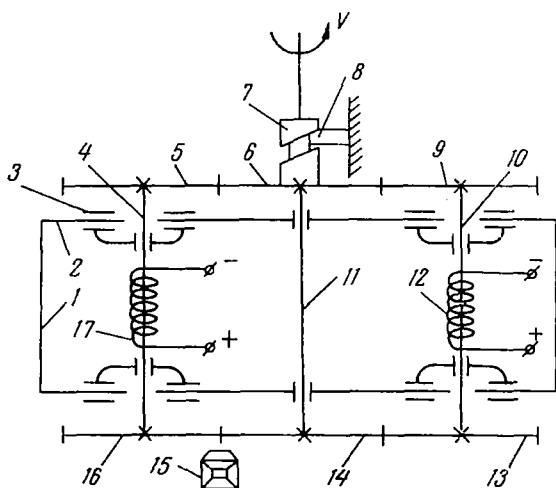


Рис. 4.18. Установка для магнитно-абразивной обработки шестерен

и обрабатываемым колесом. При вращении валов зубчатыми колесами зубья инструментов входят во впадины между зубьями обрабатываемого колеса, но не вступают в непосредственный контакт.

Применение отделочной обработки исполнительных поверхностей зубчатых колес в магнитном поле ферромагнитными порошками вместо операции шлифования обеспечивает положительный эффект, заключающийся в следующем: исключается потребность в дорогостоящих зубошлифовальных станках; исключается шаржирование обработанной поверхности зернами абразивного материала, неизбежное при обработке корундовыми и алмазными инструментами; наряду с высокой чистотой — до 12-го класса обеспечивается упрочнение обработанной поверхности вследствие воздействия на нее магнитного поля; ускоряется процесс обработки, так как при двух инструментах одновременно обрабатываются до 6 зубьев, а не 1—2 зуба, как на зубошлифовальных станках; уменьшается стоимость обработки ввиду того, что ферромагнитные порошки во много раз дешевле корундовых и алмазных кругов, а также потому, что зубчатые инструменты, выполненные незакаленными из дешевых сортов стали, лишь заносят зерна ферромагнитного порошка в рабочий зазор между самими зубцами и обрабатываемыми зубьями, но сами в контакт с обрабатываемой поверхностью не вступают, а потому очень долговечны.

8. Варианты конструкции магнитных систем установок для обработки поверхностей тел вращения

Магнитные системы, применяемые для магнитно-абразивных станков, отличаются от типовых рядом особенностей.

1. Часто по конструктивным соображениям, особенно при использовании известных универсальных станков, возникает необходимость в увеличении длины магнитопроводов. В этом случае важно знать влияние месторасположения катушек на ярме на напряженность поля в рабочем зазоре.

2. Применяются в ряде случаев магнитные системы, на оба полюсных наконечника которых подается напряжение, создающее одноименное по знаку поле $N-N$ или $S-S$.

3. Для деталей типа колец, втулок и т. д. могут применяться оправки из немагнитного материала. В этом случае пространство отверстия нельзя считать общим воздушным зазором, так как магнитные силовые линии могут огибать его по сечению колец.

Для выяснения характера влияния каждой из указанных выше особенностей в Физико-техническом институте АН БССР были проведены специальные исследования.

На рис. 4.19, а показан общий вид станка 1 с установленной на нем магнитной системой 2 и деталью 3, применявшегося для описанных исследований, а на рис. 4.19, б дан чертеж с габаритными размерами магнитной системы 2. Катушки имели размеры $160 \times 160 \times 100$ мм и $160 \times 160 \times 200$ мм с числом витков 1700 и 4600 соответственно при постоянном сечении провода диаметром 1,31 мм и коэффициенте его заполнения 0,95.

Материал деталей — сталь ШХ15, а материал оправок — сталь 10 и алюминий АЛ9.

Исследовались 17 вариантов конструкции магнитной системы по трем основным схемам.

На рис. 4.20 показаны варианты конструкций магнитных систем, а в табл. 4.1 приведены их особенности. Не обозначенные на схемах элементы ярма выполнены из стали 10.

Расчеты, проведенные с использованием известных методов, показывают, что для создания магнитного поля насыщения, равного для элементов ярма и детали со стальной оправкой по варианту 8 (см. рис. 4.20 и табл. 4.1) магнитной индукции 2 тл. достаточно иметь катушки $F_0 = 11\,500$ ав.

Применяемые же в исследованиях катушки при токе $I = 6$ а создавали: большие катушки $F_0 = 2IW_1 = 2 \cdot 6 \cdot 4600 = 55200$ ав, малые катушки $F_0 = 2IW_2 = 2 \cdot 6 \cdot 1700 = 20400$ ав.

Замеры магнитной индукции производились при помощи милливольтметра М-119 датчиком ($H = 12$ мм, $l = 35$ мм, диаметр провода $d = 0,31$ мм, количество витков $W = 35$), положения которого при замерах представлены на рис. 4.21 (точки 1—4).

Так как для исследований были важны лишь относительные величины, датчик не тарировался, и приведенные результаты замеров магнитной индукции для схем $N-N$ и $N-S$ характеризуют только показания датчика при четырех положениях каждого из 17 вариантов. Сравнение вариантов 9 и 10, 8 и 11, отличающихся только количеством витков катушки, дает возможность сопоставить варианты, построенные с катушками $F_0 = 4600$ ав, с теми, в которых использовались катушки $F_0 = 1700$ ав.

Результаты обработки данных замеров сведены в табл. 4.2 и 4.3, где выбранные критерии представлены следующими условными коэффициентами: $K_B = B_i / B_{\max}$ — показатель, характеризующий индукцию в данной точке; B_i — индукция магнитного поля при заданном положении данного варианта; B_{\max} — максимальное значение индукции, полученное в исследованиях данной полюсности ($N-N$ или $N-S$).

K_c — показатель сложности конструкции магнитной системы. За эталон сложности принята схема, соответствующая варианту 6, у которой восемь элементов ярма (четыре нако-

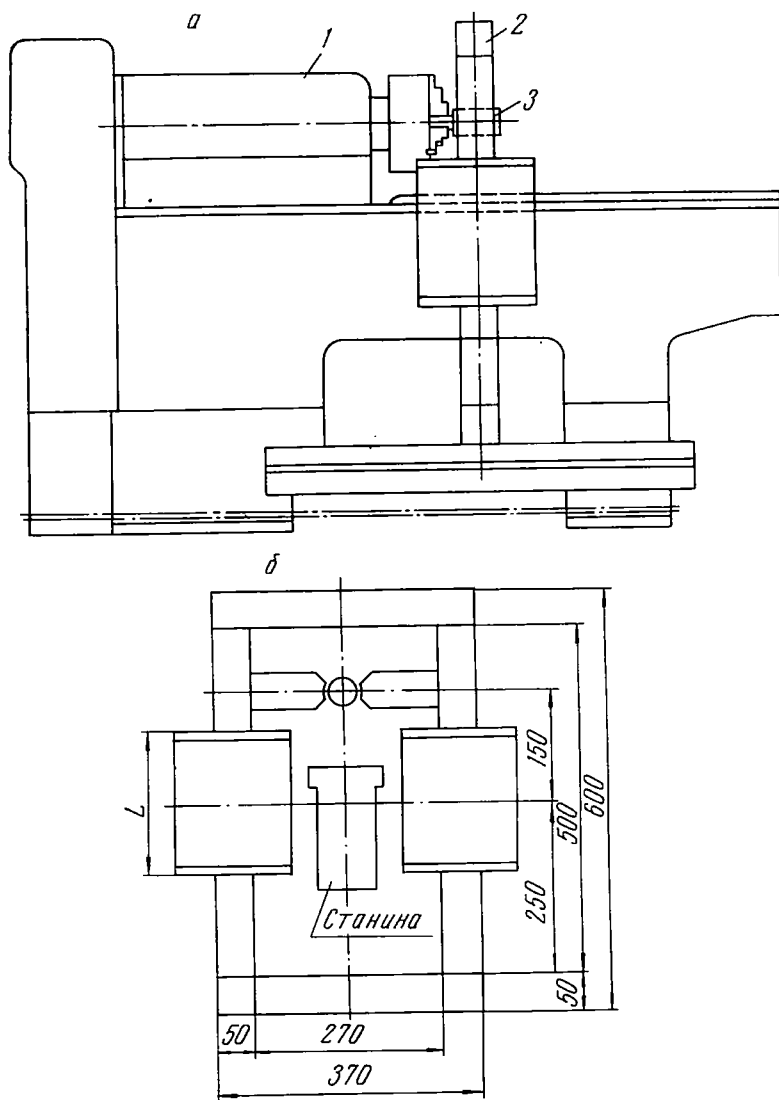


Рис. 4.19. Схема монтажа магнитной системы на станке

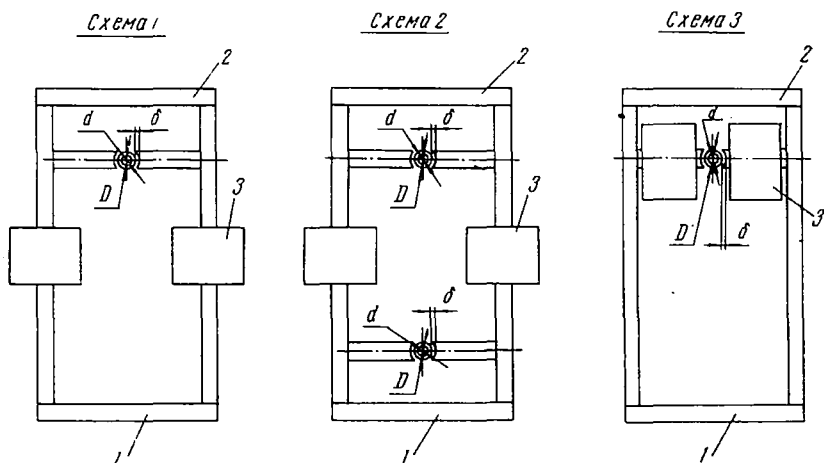


Рис. 4.20. Варианты магнитных систем

нечника и четыре стальных бруса). Для этой системы $K_c=4$. Отсутствие одного элемента ярма или замена его текстолитом в условиях опыта уменьшает K_c на единицу.

$K_p = B_i/B_3$ — показатель равномерности, где B_i — индукция магнитного поля при данном положении датчика данного варианта; B_3 — индукция поля при положении датчика 3 в данном варианте; $K_n = B_{ia}/B_{ic}$ — показатель независимости от магнитопроводности оправки; B_{ia} , B_{ic} — магнитная индукция в

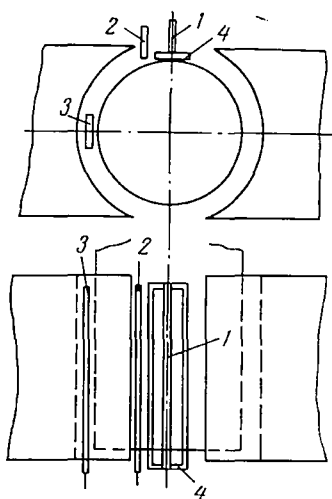


Рис. 4.21. Местоположения датчиков измерения магнитной индукции в рабочем зазоре

Таблица 4.1

Варианты схем, принятых при исследованиях конструкций
магнитных систем (сила тока в катушках 6 а)

№ схемы	№ варианта	Диаметр, мм		Рабочий зазор δ , мм	Элементы ярма электромагнита		Количество витков катушки W , шт.
		детали d_3	оправки d		1	2	
1	1	52,0	42	4,55	Сталь 10	Сталь 10	4600
1	2	52,0	42	2,25	«	Текстолит	4600
1	3	52,0	42	2,25	«	Сталь 10	4600
1	4	56,4	40	2,30	«	«	4600
1	5	56,4	40	2,30	«	Текстолит	4600
2	6	35,3	25	1,85	«	Сталь 10	4600
2	7	35,3	25	1,85	«	Текстолит	4600
1	8	35,3	25	1,85	«	Текстолит	4600
1	9	35,3	25	1,85	«	Сталь 10	4600
1	10	35,3	25	1,85	«	«	1700
1	11	35,3	25	1,85	«	Текстолит	1700
1	12	35,3	25	1,85	Текстолит	«	1700
1	13	35,3	25	1,85	«	Сталь 10	1700
3	14	35,3	25	1,85	Текстолит	Текстолит	1700
3	15	35,3	25	1,85	Сталь 10	«	1700
3	16	35,3	25	1,85	Текстолит	Сталь 10	1700
3	17	35,3	25	1,85	Сталь 10	«	1700

Сравнительные оценки вариантов системы (для схемы $N - S$)

№ схемы	№ вариан- та	Критерии оптимальности													
		Основные				К _с	Дополнительные								
		К _В при положении датчика					К _Р при положении датчика			К _И при положении датчика				К _У	
		1	2	3	4		1	2	3	1	2	3	4		
1	1	0,016*	0,063*	0,15*	0	2	0,11*	0,45*	∞*	—	—	—	—	+	
1	2	0,047*	0,167*	0,33*	—	3	0,143*	0,5*	—	—	—	—	—	+	
1	3	0,016*	0,08*	0,19*	0	2	0,082*	0,41*	∞*	—	—	—	—	+	
1	4	0	0,08*	0,19*	0	2	—	0,41*	0*	—	—	—	—	+	
1	5	0,047*	0,19*	0,36*	0	3	0,13*	0,52*	0*	—	—	—	—	+	
2	6 ^В	0,016*	0,11*	0,33*	—	0	0,05*	0,33*	—	1,00	1,00	0,95	—	+	
2	6 _И	0,016	0,048	0,27	—	0	0,060	0,175	—	1,00	1,30	0,94	—	+	
2	7 ^В	0,047	0,210	0,71	—	1	0,070	0,290	—	1,67	0,85	0,78	—	+	
2	7 _И	0,016	0,100	0,30	—	1	0,050	0,320	—	1,00	0,83	0,90	—	+	
1	8	0,047	0,210	0,70	—	3	0,068	0,300	—	1,67	1,23	0,68	—	+	
1	9	0,016	0,095	0,32	—	2	0,050	0,300	—	1,00	1,00	0,95	—	+	
1	10	0,016	0,063	0,22	—	2	0,070	0,280	0	1,00	0,90	1,00	—	+	
1	11	0,032	0,175	0,52	0	3	0,060	0,330	0	1,50	1,10	0,90	—	+	
1	12	0,024	0,175	0,48	0,010	4	0,050	0,33	0,020	2,0	0,91	0,90	0,0	+	
1	13	0,008	0,063	0,18	0,000	3	0,040	0,35	0,000	2,0	1,00	0,96	—	+	
3	14	0,063	0,250	0,89	0,018	4	0,070	0,28	0,030	2,0	1,10	0,61	0,3	—	
3	15	0,055	0,300	0,92	0,016	3	0,060	0,33	0,017	2,1	0,90	0,64	1,0	—	
3	16	0,063	0,300	0,94	0,550	3	0,070	0,32	0,060	2,0	0,63	0,60	0,3	—	
3	17	0,072	0,370	1,00	0,032	2	0,072	0,37	0,032	1,9	0,78	0,63	1,0	—	

* Опыты и сравнения проводились только для немагнитной оправки.

Таблица 4.3

Сравнительные оценки вариантов магнитной системы (для схемы $N - N$)

№ схемы	№ вариан- та	Критерии оптимальности												
		Основные				Дополнительные								
		K_B при положении датчика				K_C	K_D при положении датчика			K_H при положении датчика				K_Y
		1	2	3	4		1	2	3	1	2	3	4	
1	1	0,0	0,18*	0,36*	0,018*	2*	0	0,5*	0,05*	—	—	—	—	+
1	2	0,0	0,36*	0,63*	0,018*	3	0	0,55*	0,28*	—	—	—	—	+
1	3	0,0	0,18*	0,45*	0,028*	2	0	0,4*	0,06*	—	—	—	—	+
1	4	0,0	0,18*	0,36*	0,018*	2	0	0,5*	0,05*	—	—	—	—	+
1	5	0,0	0,36*	0,54	0,018*	3	0	0,67*	0,33*	—	—	—	—	+
2	6 ^B	0,0	0,18*	0,73	—	0	0	0,25	—	—	1,00	0,70	—	+
2	6 _H	0,1	0,36	0,82	—	0	0,1	0,45	—	∞	0,50	0,50	—	+
2	7 _H	0,0	0,27	0,73	—	1	0	0,38	—	∞	0,33	0,44	—	+
2	7 ^B	0,0	0,18	0,91	—	1	0	0,50	—	—	1,00	0,90	—	+
1	8	0,0	0,27	0,73	—	3	0	0,37	—	—	1,00	0,75	—	+
1	9	0,0	0,18	0,54	—	2	0	0,33	—	—	1,00	1,00	—	+
1	10	0,0	0,10	0,36	—	2	0	0,25	—	—	1,00	0,75	—	+
1	11	0,0	0,14	0,41	0,1	3	0	0,33	0,22	—	0,66	0,66	1	+
1	12	0,000	0,20	0,41	0,05	4	0,00	0,50	0,10	—	0,90	0,66	3	+
1	13	0,000	0,18	0,32	—	3	0,00	0,57	0,00	—	0,50	0,70	—	+
3	14	0,100	0,50	0,91	0,23	4	0,10	0,55	0,25	1	0,80	0,60	1,40	—
3	15	0,045	0,23	0,91	0,27	3	0,05	0,25	0,30	2	1,00	0,75	1,00	—
3	16	0,100	0,41	0,95	0,45	3	0,10	0,43	0,48	1	0,78	0,78	1,00	—
3	17	0,050	0,27	1,00	0,36	2	0,05	0,27	0,36	2	0,67	0,81	0,89	—

* Опыты и сравнения данных проводились только для немагнитной оправки.

данном положении датчика при алюминиевой и стальной оправке соответственно; K_y — показатель, характеризующий конструктивную способность варианта к подключению второй пары полюсов с общей осью вращения деталей (K_y принимает значение «+» или «-»).

Выполненные исследования показали, что, несмотря на принципиальное различие схем $N-N$ и $N-S$, они обладают весьма сходными зависимостями магнитной индукции в рабочих зазорах от различных факторов. Следовательно, при проектировании станков с магнитными системами, работающими по схеме $N-N$, можно пользоваться имеющимися в литературе данными и рекомендациями для наиболее часто применяемых и исследованных схем $N-S$.

Вместе с тем эксперименты показали, что схема подключения катушек электромагнитов $N-S$ позволяет получить в рабочих зазорах магнитную индукцию в 2—8 раз большую, чем при схеме $N-N$. Последнее положение справедливо для всех 17 вариантов схем и всех четырех положений датчиков. Меньшая разность получена для вариантов, у которых при наличии параллельных магнитных потоков абсолютная величина индукции для схемы $N-S$ мала. Для вариантов конструкций магнитных систем, которые близки к оптимальным (варианты 14—17), отношение $B_{N-S}/B_{N-N}=5,4-6,5$ при положении датчика 3.

Определенный интерес для практики представляют характер и картина магнитного поля в рабочих зазорах для схем $N-N$ и $N-S$. Анализ показывает, что заготовка, помещенная в магнитное поле с разноименными полюсами электромагнита, в своем поперечном сечении представляет магнит с полюсами, противоположными по знаку полюсным наконечникам системы.

Если же заготовку поместить в магнитное поле системы $N-N$, то ее поперечное сечение окажется намагниченным, как четырехполюсный ротор.

Из сопоставления двух указанных условий очевидно, что при схеме $N-S$ участок периферийных слоев изделия за каждый оборот перемагничивается один раз, а при схеме $N-N$ — два раза.

Если учесть, что от количества циклов перемагничивания зависит изменение микроструктуры поверхностного слоя изделия, подвергнутого магнитно-абразивной обработке, то становится очевидным преимуществом схемы $N-N$. Следовательно, если метод магнитно-абразивной обработки применяется для получения высоких классов шероховатости поверхности изделия, то целесообразно применять схему $N-S$, обеспечивающую при равных параметрах магнитной системы большую производительность, и, наоборот, если основной задачей мето-

да является улучшение качественных показателей поверхностного слоя изделия, то следует отдать предпочтение схеме $N-N$.

Максимальное значение магнитной индукции в рабочих зазорах получено для вариантов 14—17 схемы 3 (см. рис. 4.20 и табл. 4.1). Однако если необходимо по конструктивным соображениям обеспечить более свободный доступ в рабочую зону, что особенно важно в универсальных станках с ручной загрузкой заготовок, то вполне удовлетворительными можно признать варианты 8, 11, 13 схемы 1.

Определенный интерес как перспектива для создания многопозиционных станков представляют варианты 6 и 7 схемы 2. Замеры магнитной индукции в рабочих зазорах верхних 6_n и 7_n и нижних полюсов 6_n и 7_n показали, что в ряде случаев схема 2 дает более высокие показатели даже по сравнению со схемой 1.

Магнитопроводность оправки оказывает различное действие на магнитные системы схем $N-S$ и $N-N$.

С х е м а $N-N$. Наименьшее влияние магнитопроводности оправки на значение магнитной индукции в зазоре наблюдается в тех вариантах (варианты 6_n , 7_n , 8, 9, 17), где меньше возможность рассеивания магнитного поля в пространстве. Будучи сохранено в пределах ярма, магнитное поле незначительно уменьшается в зазоре при включении в него добавочного сопротивления (в условиях опыта — оправка из алюминия вместо оправки из стали). Это легко проверить, сопоставив данные вариантов 14 и 17. При стальной оправке индукция в точке 3 (рис. 4.21) варианта 14 на 9% меньше, чем при варианте 17, а при алюминиевой — на 22%.

С х е м а $N-S$. Влияние магнитопроводности оправки в этом случае пропорционально индукции в зазоре. Это объясняется, очевидно, тем, что при намагниченных до насыщения детали и наконечников дальнейшее повышение индукции возможно только за счет уменьшения немагнитного зазора — введения стальной оправки вместо алюминиевой.

Данные экспериментов подтвердили предположение, что увеличение размеров обрабатываемой детали, сопровождающееся увеличением площади зазора, вызовет уменьшение магнитной индукции. Более сильно на увеличение размера детали реагирует система $N-S$. Это обусловлено присущими данной схеме более сильными магнитными полями в зазоре, близкими к полям насыщения материала детали и материала наконечников.

Подключение второй пары полюсов (как указано на рис. 4.20, схема 2) следует рассматривать как введение в ярмо элемента, падение м.д.с. в котором равно падению м.д.с. в паре наконечников с помещенной между ними деталью. К этому

выводу можно прийти, сравнивая данные вариантов 6 и 9, 7 и 8 и анализируя данные табл. 4.2.

Однако, как указывалось выше, для схемы $N-N$ при отсутствии замкнутого ярма, сохраняющего магнитное поле в его пределах, дополнительная пара полюсных наконечников, вводимая вместо сплошного элемента ярма, служит источником рассеивания магнитного потока, уменьшая индукцию в рабочих зазорах.

Вторая серия экспериментов проводилась с использованием малых катушек ($W=1700$ витков) и элементов ярма магнитной системы, представленной на рис. 4.19. Все исследования этой серии выполнены при постоянных зазорах $\delta=1.85$ мм, габаритах и материале деталей ($d_3=35.3$ мм) и стальных оправках ($d_0=25$ мм), которые соответствуют вариантам 8—17 первой серии. Магнитная индукция замерялась только при положении датчиков 3 (рис. 4.21). Материал ярма — сталь 10 (рис. 4.19).

Сравнение данных вариантов 14—17 приводит к выводу, что при замыкании ярма перекладинами увеличение индукции сравнительно мало (5—10%) при значительном усложнении конструкции магнитной системы. Предположение, что снимаемые перекладки компенсируются магнитным пространством «станок», подвергалось проверке во второй серии экспериментов.

Эксперименты во второй серии проводились с использованием магнитных систем, представленных на рис. 4.22 и 4.23: влияние магнитопроводной массы станка на величину индукции в рабочих зазорах — с помощью схемы, представленной на рис. 4.22, а ($I=2$ а, $IW=1700$ ав, материал ярма — сталь 10, линейные размеры магнитопровода по рис. 4.19, б); влияние подключения второй пары полюсов на индукцию в зазоре — по схеме рис. 4.22, б (для которой принято $I=6$ а, $IW=1700$ ав, размеры магнитопровода по рис. 4.19, б); зависимость магнитной индукции в рабочих зазорах от местоположения катушек на магнитопроводе — с помощью магнитной системы, представленной на рис. 4.22, в; зависимость величины магнитной индукции в рабочих зазорах от конструктивных особенностей ярма магнитопровода — с помощью схем, представленных на рис. 4.23.

Анализ результатов второй серии экспериментов показал:

1. Величина магнитной индукции в рабочих зазорах при замене одной пары полюсных наконечников сплошным стальным брусом (рис. 4.22, а) практически не изменяется (табл. 4.4).

2. Магнитопроводная часть станка, расположенная внутри контура ярма магнитной системы, оказывает незначительное влияние на показания датчика (табл. 4.5), если катушки рас-

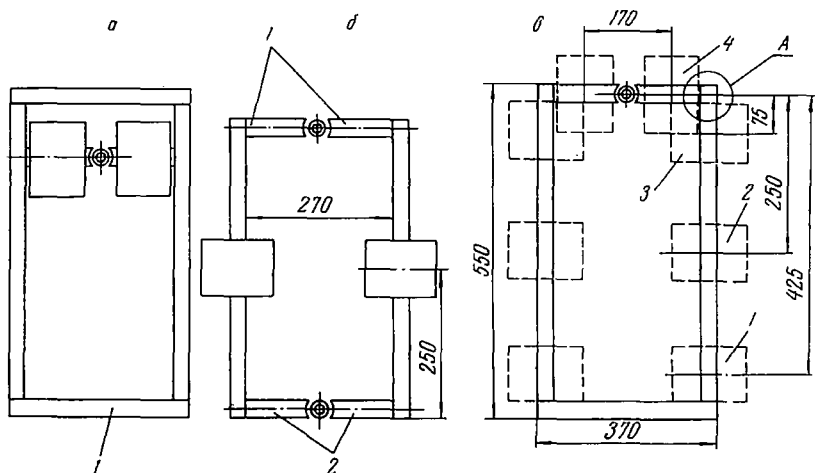


Рис. 4.22. Возможное размещение катушек на ярме магнитной системы

положены, как показано на рис. 4.22, а. Влияние магнитопроводного пространства «станок» по данным рис. 4.22, б и вариантов 7^в и 7^и, 6^в и 6^и (см. табл. 4.2) тем значительнее, чем ближе к станку находятся рабочие зазоры. Для схемы $N-S$ это влияние составляет 5—7%, а для схемы $N-N$ —20—30%.

3. Оптимальным с точки зрения напряженности магнитного поля в рабочих зазорах является расположение катушек вблизи полюсных наконечников, как показано на рис. 4.22, в (позиция 4); расположение катушек на вертикальных стойках магнитопровода уменьшает напряженность поля в рабочих зазорах на 20—40% (табл. 4.6).

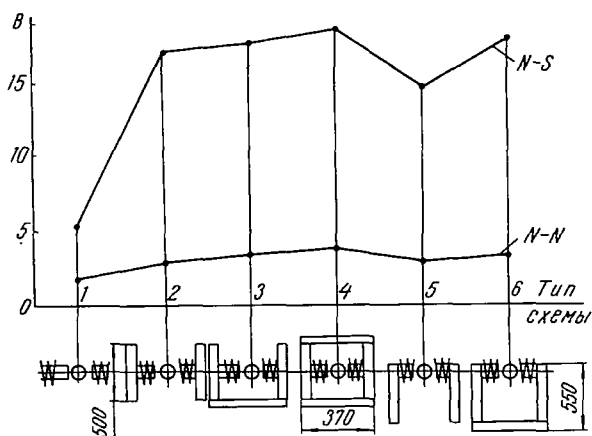


Рис. 4.23. Изменение магнитной индукции в зависимости от расположения катушек на ярме и материала элементов ярма

Характер изменения величины магнитной индукции при различных схемах магнитной системы

Элемент 1-й магнитной системы	Элемент 2-й магнитной системы	Показания датчика при схеме			
		верхняя деталь		нижняя деталь	
		N-S	N-N	N-S	N-N
Полюсные наконечники	Полюсные наконечники	17	2	19	2
Полюсный наконечник	Стальной брус	18	4	—	—
Стальной брус	Полюсные наконечники	—	—	18	3,5

Таблица 4.5

Влияние положения станины станка на величину магнитной индукции в рабочем зазоре

Местоположение магнитной системы	Материал элемента	Показания датчика при схеме	
		N-S	N-N
На станке	Сталь 10	21,0	4,0
	Воздушный зазор	20,5	4,0
Вне станка	Сталь 10	20,5	3,5
	Воздушный зазор	20,0	3,0

Таблица 4.6

Влияние местоположения катушек на магнитопроводе на величину магнитной индукции в рабочем зазоре

Положение катушек на магнитопроводе	Показания датчика для схемы	
	N-S	N-N
1	15	1,00
2	17	1,75
3	20	2,50
4	25	4,25

4. Наибольшего значения магнитная индукция в рабочих зазорах достигает при реализации 2, 3, 4 и 6-го типов схем магнитопровода (рис. 4.23). Из рис. 4.23 следует, что при использовании боковин магнитной системы из ферромагнитного материала возможно построить систему по типу схем 2 или 5 без замыкающего звена ярма. При этом потери магнитной индукции по сравнению со схемой 6 составляют 20—25%, что можно компенсировать размерами катушек.

9. Установки для обработки плоскостей на базе фрезерных станков

Установка на базе горизонтально-фрезерного станка. В 1961—1962 гг. был предложен принципиально новый способ полирования изделий из немагнитных материалов на модернизированном горизонтально-фрезерном станке [29], основанный на использовании режущих свойств ферромагнитных материалов (стружки из стали и перлитного чугуна, стальной дроби, измельченной проволоки и т. д.) в виде порошков, которые удерживались и совершали заданные движения с помощью системы электромагнитов, объединенной в общий контур (несущий барабан).

Принципиальная схема установки показана на рис. 4.24. На универсальный станок с горизонтальной осью вращения шпинделя, например горизонтально-фрезерный, монтируются все узлы и механизмы электромагнитной установки для магнитно-абразивной обработки. Кинематика станка используется для сообщения основным движениям заготовке 1 и режущему инструменту — электромагнитному барабану, несущему на своей периферийной цилиндрической поверхности элементы ферромагнитного порошка.

Несущий барабан 3 (рис. 4.24) состоит из двух концентрично расположенных колец, между которыми радиально установлены шесть электромагнитов 2, образующих шесть пар полюсов. Каждый электромагнит состоит из сердечника, изготовленного из ферромагнитной стали, на котором находятся катушки-соленоиды. Сердечник может иметь П-образную форму и нести на себе две катушки либо иметь вид прямоугольных пластин (для каждой катушки отдельно), которые торцами крепятся к внутреннему кольцу несущего барабана 3.

В наружном кольце барабана имеется двенадцать симметрично расположенных прямоугольных отверстий для выхода рабочей плоскости сердечников. Торцовые поверхности барабана с двух боковых сторон закрываются герметично крышками. Внутренняя поверхность барабана по периферийной и торцовой поверхности изолируется листом текстолита толщиной 1 мм. Катушки электромагнитов наматываются проводом марки ПЭЛ, ПЭВ-1 или ПЭВ-2 диаметром 0,8 мм и должны иметь не менее 3000 витков каждая. Намотка катушек и их последовательное соединение между собой должны быть такими, чтобы один торец сердечника был северным полюсом, а другой — южным. Катушки каждого электромагнита соединены между собой последовательно, а катушки всех электромагнитов — параллельно. Концы проводов от каждого электромагнита выводят на две шины токосъемного устройства, смонтированного на торце несущего барабана. Для надежной

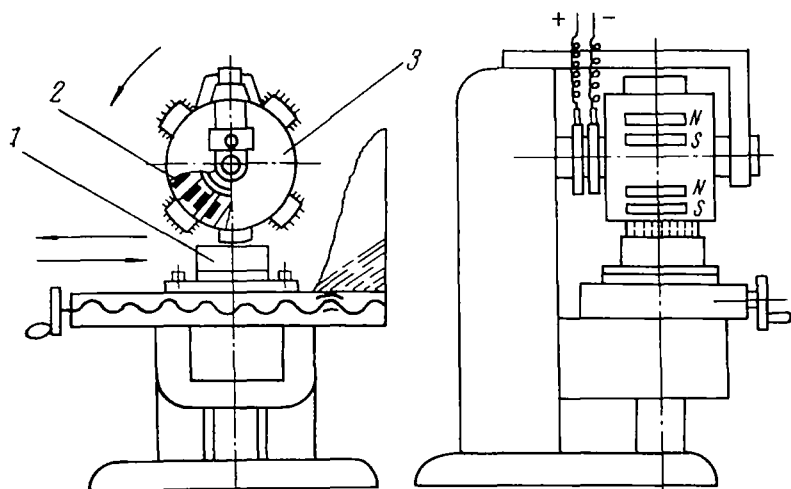


Рис. 4.24. Схема станка с магнитным барабаном

фиксации катушек на сердечниках и предохранения их от действия центробежной силы в местах крепления электромагнитов устанавливаются закладки из диамагнитного материала в виде тонких пластин или набора пластин. Несущий барабан с системой электромагнитов и токосъемным устройством крепится болтами к хвостовику и устанавливается на шпindelь станка. В собранном виде барабан статически балансируется с помощью грузиков, закрепленных на его торцовой поверхности. Радиальное биение барабана по периферии наружного кольца не должно превышать 1 мм.

Для размещения и дозировки порошка на станине станка монтируется бункер. Он выполняется из диамагнитного материала и имеет емкость 15—20 л. В нижней части бункера имеется щель высотой 5—8 мм, перекрытая специальной заслонкой. В процессе работы ферромагнитный порошок через дозирующую щель подается на внешнюю периферийную поверхность несущего барабана и удерживается на ней силами магнитного поля, образуя эластичную щетку.

Для сбора отлетающего во время вращения несущего барабана порошка служат защитные щитки высотой 700—800 мм из диамагнитного материала, установленные по контуру рабочей части стола станка, и кожух, перекрывающий барабан в его верхней части подобно кожуху круга на шлифовальных станках. Зазор между кожухом барабана и его периферией должен быть не больше 100 мм.

Подвижные части и механизмы станка защищаются от попадания в них порошка. Для этого стол станка накрывают во время работы резиной толщиной 2 мм.

Для предотвращения электромагнитов от перегрева к несущему барабану подается сжатый воздух. Подача последнего и степень интенсивности охлаждения электромагнитов регулируется запорным вентилем, располагаемым в удобном для управления месте.

Обрабатываемая заготовка устанавливается и закрепляется на столе станка. Требуемый рабочий зазор между заготовкой и барабаном устанавливается подъемом стола в вертикальной плоскости или опусканием несущего барабана (в зависимости от используемой конструкции станка).

Питание электромагнитов постоянным или выпрямленным током осуществляется с помощью токосъемного устройства через щеточный коллектор. Кольцевые шины токосъемника, изолированные между собой и от несущего барабана текстолитовыми прокладками и шайбами, соприкасаются с подпружиненными графитовыми щетками, установленными в специальных держателях. Щеткодержатели крепятся на двух рычагах, имеющих возможность шарнирного поворота для изменения силы прижима щеток к шинам.

Описанная установка для магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей из диамагнитного материала имеет следующие технические характеристики:

Диаметр несущего барабана, мм	500
Ширина несущего барабана, мм	220
Напряженность тока в катушках электромагнитов, в	120—150
Количество электромагнитов	6
Допускаемая температура нагрева катушек, град	60—70
Емкость бушера, л	15—20
Ширина поверхности, обрабатываемой за один проход, мм	130
Оптимальное число оборотов барабана в минуту	180—300
Оптимальная продольная подача заготовки, мм/мин	190—480
Рабочий зазор между заготовкой и барабаном, мм	5—15

Максимальная длина, толщина и ширина обрабатываемых деталей лимитируются возможностями используемого станка.

Производственные испытания описанной установки показали, что она позволяет осуществлять магнитно-абразивную обработку с помощью гранулированного ферромагнитного порошка плоских, радиусных, выфрезерованных и вытравленных поверхностей из большинства применяемых в машиностроении материалов типа алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей, а также других диамагнитных материалов. Кроме того, метод позволяет обрабатывать труднодоступные поверхности деталей, которые известными способами полирования обработать затруднительно или вообще невозможно, напри-

мер овалы, несквозные и некруглые отверстия, ребра решеток и т. д.

Установка для обработки крупногабаритных плоскостей со сложной конфигурацией. Значительную трудность представляет чистовая обработка больших плоских поверхностей, имеющих различной конфигурации углубления и радиусные переходы. В работе [9] описан способ и установка, позволяющие механизировать процесс полирования указанного типа деталей, заменив ручные операции обработкой металлической щеткой, сформированной из гранул ферромагнитной крошки, помещенной в магнитное поле. Указанная щетка, обладая значительной эластичностью и перемещаясь вслед за магнитным полем относительно поверхности листа, может заполнять неровности и оказывать шлифующее действие. На рис. 4.25 приведена принципиальная схема установки. Заготовка 2 размещается между сердечниками симметрично и соосно расположенных электромагнитов 1 и 3. Нижний электромагнит 3 устанавливается с минимальным воздушным зазором δ к поверхности заготовки, а верхний 1 — на расстоянии 20—25 мм от обрабатываемой поверхности. Рабочий зазор между верхним электромагнитом 1 и заготовкой 2 заполняется крошкой из ферромагнитного материала, образующей своеобразный режущий инструмент в виде металлической щетки и оказывающей нормальное давление на обрабатываемую поверхность. Нижний электромагнит 3 вращается принудительно, а верхний 1 синхронно с ним под действием магнитного поля. Для обработки листа ему сообщается возвратно-поступательное движение $S_{\text{п}}$ в продольном направлении.

Производительность и качество магнитно-абразивной обработки зависят от величины нормального давления, остроты граней порошка, скоростей вращения электромагнитов и продольного перемещения заготовки. При описанной схеме расположения электромагнитов гранулы ферромагнитного порошка обязательно будут ориентироваться наибольшими осями (острыми кромками) к поверхности листа и «самозатачиваться» в процессе обработки. Давление порошка на поверхность заготовки зависит от силы тока, питающего электромагнит, — чем больше сила тока, тем жестче столбик порошка и больше его давление на дегаль.

Преимуществом показанной на рис. 4.25 установки является наличие двух противоположно расположенных электромагнитов, концентрирующих и суммирующих магнитный поток и не позволяющих рассеиваться магнитным силовым линиям. Установка позволяет обрабатывать листы из диамагнитного материала толщиной до 10 мм.

При магнитно-абразивной обработке на описанной установке магнитное поле соединяет частицы ферромагнитного по-

рошка в абразивный инструмент, транспортирует этот инструмент по поверхности заготовки и автоматически формирует профиль инструмента в соответствии с профилем обрабатываемой поверхности.

Основной трудностью при чистовой обработке листов переменного сечения является полирование впадин, карманов, несквозных фасонных отверстий, отфрезерованных или вытравленных на предшествующих операциях. Наружные поверхности требуют значительно меньшей дообработки. Метод магнитно-абразивной обработки как раз и обеспечивает более высокую интенсивность полирования углублений в заготовке, так как на участках последних толщина листа уменьшается, а магнитный поток, пронизывающий поверхность заготовки, усиливается, что, следовательно, увеличивает силу нормального давления порошка на поверхность, вызывая рост интенсивности съема материала. В качестве ферромагнитного материала на установке рис. 4.25 используются стальные иглы, изготовленные из проволоки $\varnothing 0,3$ мм длиной 3 мм, и чугунная крошка следующего химического состава: С 3,0—3,5%; Si 1,5—2%; Mn 0,4—0,7%; S 0,12%; P 0,8%. Твердость чугунной крошки HRC 54—58 единиц. Зернистость крошки 0,3—1,5 мм, объемный вес 4,0—4,5 т/м³.

Представленная на рис. 4.25 установка состоит из станины, каретки стола, на которой закрепляется заготовка, нижнего магнита, редуктора, привода главного рабочего движения, траверсы, подвески, верхнего электромагнита, привода продольной подачи каретки стола, пульта управления. Электро-

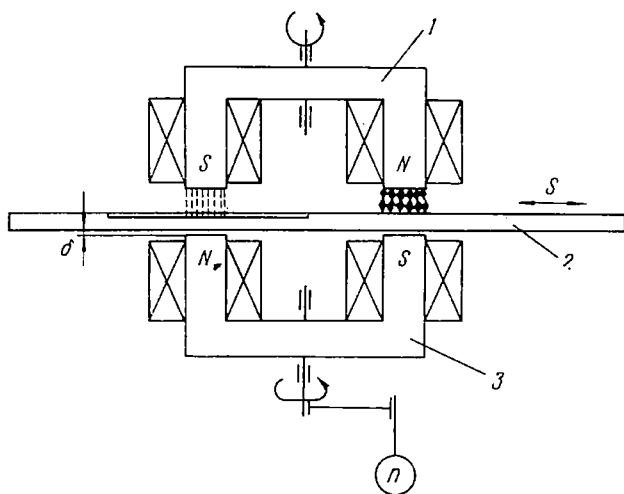


Рис. 4.25. Схема установки для обработки крупногабаритных листов

схема установки обеспечивает следующие рабочие и вспомогательные движения ее механизмов: главное рабочее движение — вращение магнитов; движение продольной подачи — перемещение стола; движение поперечной подачи — перемещение магнита.

Одним из основных элементов установки являются катушки электромагнитов, создающие в рабочих зазорах необходимое магнитное поле и формирующие из ферромагнитного порошка режущий инструмент. В данном случае каждая катушка имеет цилиндрическую форму и состоит из четырех параллельно включенных секций. Катушки питаются постоянным током от трех селеновых выпрямителей типа ВКГ 100, которые включаются последовательно. На обмотки каждой катушки подается ток $I = 40—50$ а.

Техническая характеристика установки

Магнитная индукция в рабочих зазорах, гс	5000—6000
Рабочий зазор между верхним магнитом и поверхностью детали, мм	20—25
Максимальное давление порошка, кг	18—20
Удельное давление порошка на лист толщиной 3 мм, Г/см ²	270
Оптимальное число оборотов электромагнитов, об/мин	150
Оптимальная продольная подача листа, мм/мин	180
Ток, подаваемый на катушки, а	40—50

Установка на базе вертикально-фрезерного станка. Сотрудниками Ленинградского инженерно-экономического института и объединения «Электросила» создано устройство, позволяющее осуществлять магнитно-абразивную обработку плоскостей на модернизированном вертикально-фрезерном станке [5].

В шпинделе 3 вертикально-фрезерного станка (рис. 4.26) с помощью конической оправки 4 из днамагнитного материала устанавливается электромагнитный индуктор 6, несущий магнитную систему с внутренним S и наружным N полюсами. Постоянный ток к обмотке 7 катушки электромагнита поступает через контактные кольца 5 и щетки 1 токосъемного устройства, закрепленного на кронштейне 2. Обрабатываемые заготовки 11 закрепляются на столе станка в приспособлении 9 из ферромагнитного материала. Плита приспособления, несущая трафарет 10 для мелких заготовок, изолируется от корпуса стола станка прокладкой из днамагнитного материала 8. Рабочий зазор δ между торцом индуктора 6 и обрабатываемой заготовкой 11 обеспечивается механизмами вертикально-фрезерного станка.

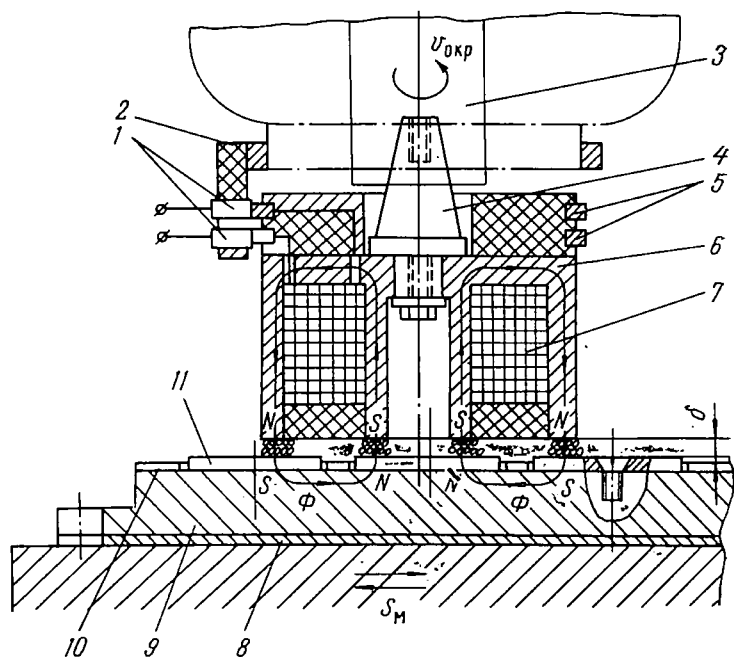


Рис. 4.26. Схема устройства для обработки плоскостей торцом магнитного барабана

Процесс магнитно-абразивной обработки на модернизированном вертикально-фрезерном станке осуществляется следующим образом: при включении индуктора магнитный поток Φ замыкается через рабочий зазор, заготовку и корпус приспособления.

Перед началом обработки в рабочий зазор подается порция ферромагнитного порошка. Шпинделю станка с закрепленным в его конусе индуктором сообщается вращение со скоростью $v_{окр}$, а заготовкам вместе со столом станка — продольная возвратно-поступательная подача s_M . Процесс осуществляется как всухую, так и с применением смазывающе-охлаждающей жидкости СОЖ (5—10%-ного раствора товарного эмульсола Э2 в воде).

В описанном индукторе существенное влияние на результаты обработки оказывает конфигурация рабочих поверхностей полюсов. Если полюса индуктора представляют собой непрерывные кольцевые плоскости, то поверхность каждого из них и находящаяся под индуктором поверхность заготовки являются эквипотенциальными. Магнитное поле в пространстве между полюсами равномерно в направлении дуги окружности. Сила, действующая на каждое зерно ферромагнитного порошка

в магнитном поле, при определенных допущениях может быть выражена следующей формулой [5]:

$$\bar{F}_m = \frac{9\mu^2}{\mu_0(\mu + 2\mu_0)^2} - \nu B \nabla \bar{B}, \quad (4.29)$$

где ν — объем порошка в рабочем зазоре; μ , μ_0 — магнитная проницаемость порошка и воздуха соответственно; B , ∇B — величина магнитной индукции и ее градиент в данной точке поля.

При равномерном магнитном поле градиент и сила, действующая на зерно порошка со стороны поля, равны нулю. Казалось бы, при вращении индуктора из-за того, что $\bar{F}_m = 0$, зерна порошка не должны испытывать магнитных сил в направлении вращения полюсов. В действительности же зерна порошка при вращении индуктора удерживаются на его полюсах и следуют за последним. Это происходит в результате неравномерности магнитного поля в рабочем зазоре и в радиальном по отношению к оси индуктора направлении. Кроме того, определенное противодействие выбрасыванию порошка с пространства рабочего зазора оказывают возникающие при описываемой схеме магнитно-абразивной обработки радиальные $F_{рм}$ и нормальные $F_{нм}$ магнитные силы [5]. Силы $F_{рм}$ противодействуют центробежным силам, стремящимся оторвать вращающиеся зерна порошка от поверхности полюсов индуктора, а $F_{нм}$ усиливают давление порошка, интенсифицируя процесс съема металла. Повышению производительности магнитно-абразивной обработки по схеме (рис. 4.26) способствует разделение полюсов индуктора радиальными пазами, усиливающими неравномерность поля и вызывающими появление тангенциальных сил $F_{тм}$. При этом увеличивается скорость перемещения зерен порошка относительно обрабатываемой поверхности изделия и уменьшается скорость их скопления по полюсам, что повышает долговечность последних.

Размеры индуктора и оптимальные параметры процесса

Диаметр наружного полюса, мм	- 150
Толщина стенки наружного полюса, мм	10
Диаметр внутреннего полюса, мм	75
Толщина стенки внутреннего полюса, мм	20
Напряженность магнитного поля в зазоре, тл	1,05
Число оборотов в минуту	160—400
Скорость продольной подачи стола, мм/мин	80—300
Высота рабочего зазора, мм	1,5

10. Расчет элементов магнитной системы станков для обработки плоскостей

Под магнитной цепью понимают совокупность тел и среду, по которым замыкается магнитный поток, образуемый электромагнитными катушками.

Вокруг проводника или катушки с электрическим током всегда возникает магнитное поле, которое характеризуется напряженностью. Напряженность H магнитного поля является векторной величиной. Магнитное поле, создаваемое катушкой, тем больше, чем больше ток и число витков IW . Единицей измерения напряженности магнитного поля в системах МКСГ и СИ является ампер на метр (a/m). Произведение Hl_i (где l_i — длина элемента магнитной линии) в магнитных цепях называется магнитным напряжением, а по всей длине линии магнитной индукции — намагничивающей силой (н. с.) F_m .

Намагничивающая сила измеряется в амперах. В практике применяется название «ампер-виток», чем подчеркивается то, что F_m пропорциональна току и числу витков.

Полярность магнитного поля катушки определяется правилом буравчика. Если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока, то направление вращения рукоятки буравчика укажет направление магнитных линий.

Важное значение при проектировании и изготовлении магнитных систем имеет выбор материала сердечника, так как одинаковая по величине напряженность магнитного поля вызывает в разных материалах разную магнитную индукцию.

Напряженность магнитного поля вызывает в материале с магнитной проницаемостью μ магнитную индукцию

$$B = \mu H = \mu_0 \mu H, \quad (4.30)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума ($\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-8}$ гн/см).

Зависимость B и H для ферромагнитных материалов выражается графически с помощью кривой намагничивания.

Магнитная система предназначена для создания магнитного поля в рабочих зазорах между сердечником и деталью. Основными частями ее являются магнитопровод и электромагнитные катушки.

Для магнитных систем станков магнитно-абразивной обработки часто применяются описанные выше ферромагнитные материалы с содержанием углерода до 0,2%, так как дальнейшее увеличение углерода в стали значительно ухудшает ее ферромагнитные свойства.

Для улучшения магнитных свойств после механической обработки с элементов магнитопровода снимается остаточное напряжение путем отжига.

Существующие методы расчета магнитных цепей [2, 6—12, 16, 17, 22, 26, 28] исходят из наличия двух основных типов задач: так называемых прямой и обратной. В первом случае необходимо определить значение намагничивающей силы F_M (т. е. число ампер-витков IW), нужное для поддержания в магнитной цепи индукции B и потока Φ . Иногда приходится, наоборот, по заданной намагничивающей силе определять магнитный поток Φ и магнитную индукцию B , которые эта сила обеспечивает.

Принцип и последовательность расчета магнитных цепей по известным методикам заключается в следующем: при решении прямой задачи — на основании заданной величины магнитной индукции по кривым намагничивания выбирают ферромагнитный материал ярма для принятого в конструкции магнитопровода системы, а затем, учитывая предел насыщения материала ярма и обрабатываемого изделия, расчетным путем определяют значение магнитодвижущей силы; при решении обратной задачи — по заданному значению магнитодвижущей силы F_M и суммарной площади рабочих зазоров определяют магнитный поток Φ , по величине магнитного потока и площади поперечного сечения элементов ярма рассчитывают магнитную индукцию, напряженность поля и падение МДС в отдельных элементах ярма. Суммарное падение МДС в элементах ярма и рабочих зазорах системы равняется количеству ампер-витков катушек IW . При этом положение катушек на ярме не учитывается.

Для однородной магнитной цепи прямая и обратная задачи решаются аналитически, исходя из закона полного тока:

$$F_M = Hl_{cp} = IW, \quad (4.31)$$

где H — напряженность магнитного поля, a/cm ; l_{cp} — длина средней магнитной линии, cm ; I — сила тока, a ; W — число витков на катушке.

Если же задан магнитный поток, то магнитную индукцию B определяют по формуле

$$B = \frac{\Phi}{S} \text{ г.с.}, \quad (4.32)$$

где S — площадь поперечного сечения магнитопровода.

Определив из кривой намагничивания по величине B значение H и умножив ее на длину средней линии магнитопровода l_{cp} , находим намагничивающую силу F_M .

При решении обратной задачи значение H определяется, если заданную намагничивающую силу разделить на длину средней линии магнитопровода l_{cp} , т. е.

$$H = \frac{IW}{l_{cp}} \text{ а/с.м.} \quad (4.33)$$

Затем по величине H и кривой намагничивания определяется искомое значение магнитной индукции B .

В цепях постоянного тока, который в большинстве случаев используется для питания катушек магнитных систем станков для магнитно-абразивной обработки, электрическая мощность оценивается как работа по перемещению электрических зарядов, производимая в единицу времени силами электрического поля, и выражается как произведение напряжения, приложенного к зажимам цепи, на ток в этой цепи:

$$P = UI \text{ вт.} \quad (4.34)$$

В данном случае из-за постоянства электрического и магнитного полей при протекании тока имеет место только процесс преобразования электрической энергии в тепловую, световую, механическую и химическую.

Полученная при включении цепи энергия электрических и магнитных полей сохраняется этими полями. При изменении тока в цепи энергия магнитного поля меняется в момент изменения тока, оставаясь затем снова постоянной. Поэтому для цепей постоянного тока обычно достаточно одного понятия мощности как энергии, получаемой цепью за единицу времени. Величины мощности P и энергии W_a оказываются в данном случае связанными между собой соотношением

$$W_a = Pt \text{ Дж,} \quad (4.35)$$

откуда

$$P = \frac{W_a}{t} \text{ вт.} \quad (4.36)$$

Для расчета проектируемой магнитной системы станков магнитно-абразивной обработки ниже приводятся основные теоретические зависимости.

Сила притяжения f подковообразного электромагнита определяется по формуле

$$f = \frac{B^2 S}{\mu_0^2} \text{ кг.} \quad (4.37)$$

Магнитный поток Φ определяется по зависимости

$$\Phi_{\text{макс}} = BS. \quad (4.38)$$

Для каждого элемента цепи значение напряженности будет

$$H_1 = \frac{\Phi}{\mu_1 S_1}; H_2 = \frac{\Phi}{\mu_2 S_2}; \dots; H_n = \frac{\Phi}{\mu_n S_n}. \quad (4.39)$$

Закон полного тока

$$IW = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n, \quad (4.40)$$

где W — суммарное количество витков в катушках электромагнита; I — сила тока, а; l_i — длина участка магнитной цепи, см.

Подставив в уравнение (4.40) значения из (4.39), получаем

$$IW = \frac{\Phi}{\mu_1 S_1} l_1 + \frac{\Phi}{\mu_2 S_2} l_2 + \dots + \frac{\Phi}{\mu_n S_n} l_n. \quad (4.41)$$

Магнитный поток Φ , пронизывающий всю цепь, равен

$$\Phi = \frac{F_M}{R} = \frac{IW}{\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \dots + \frac{l_n}{\mu_n S_n}}, \quad (4.42)$$

где R — сопротивление магнитной цепи,

$$R = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \dots + \frac{l_n}{\mu_n S_n}. \quad (4.43)$$

Электрическое сопротивление проводника выражается зависимостью

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ ом}, \quad (4.44)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление, ом (для меди $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8}$ ом·м); S — площадь проводника, м²; l — длина проводника, м.

Таким образом, в соответствии с законом полного тока расчет магнитной цепи электромагнитных систем станков магнитно-абразивной обработки производится в следующем порядке:

1) магнитная цепь магнитной системы разбивается на участки с одинаковым поперечным сечением из однородного материала;

2) для каждого участка определяется магнитная индукция;

3) по кривым намагничивания [$B = f(H)$] материала, из которого изготовлены или намечается изготовить ярмо, полюсные наконечники и другие элементы магнитной цепи, находится величина напряженности магнитного поля H по известному значению B для каждого участка;

4) зная длину участка магнитопровода и значение H , определяем падение магнитодвижущей силы, т. е. число ампервитков (HI) для каждого участка цепи;

5) суммируя полученные произведения HI , находим общую магнитодвижущую силу $F_M = IW$, необходимую для создания в рассматриваемой магнитной цепи заданного магнитного потока Φ ;

6) задавшись допустимым нагревом провода катушки, ее габаритами, подаваемым на катушку напряжением тока, по

рассчитанному суммарному значению падения магнитодвижущей силы определяем диаметр провода обмотки катушек электромагнита;

7) определяем число витков каждой катушки и общее число витков всех катушек электромагнитной системы;

8) по допустимому току для выбранного диаметра провода проверяем соответствие расчетного числа ампер-витков катушки допустимому их значению;

9) определяем расход меди на одну магнитную систему.

Порядок расчета параметров магнитной системы рассмотрен на приведенном ниже конкретном примере по данным станка мод. МАС-1А.

Основные допущения при расчете магнитопровода:

1) магнитный поток полностью проходит через сечение магнитопровода, т. е. потоки рассеивания не учитываются;

2) рабочие зазоры принимаются воздушными, хотя на самом деле они заполнены ферромагнитным порошком;

3) все остальные воздушные зазоры на стыках элементов магнитопровода считаем равными нулю, хотя из-за неплоскостности поверхностей в элементах магнитопровода могут иметь место воздушные зазоры определенной величины.

Ниже в качестве примера приведен порядок расчета магнитной системы станка мод. МАС-1А (рис. 4.27).

1. Площадь рабочего зазора

$$S_6 = m_1 A = 8 \cdot 230 = 1,84 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

где m_1 — высота полюсного наконечника. Высота полюсного наконечника выбирается исходя из диаметра обрабатываемого изделия. Эмпирически установлено, что оптимальный угол охвата полюсным наконечником изделия 2α (рис. 4.27, б) равен 120° . Большой угол охвата не обеспечивает попадания порошка в центр рабочего зазора, а меньший приводит к уменьшению количества порошка в зазоре и снижению производительности. В рассматриваемом случае при $d_3 = 11 \text{ мм}$, $m_1 = 8 \text{ мм}$ A — ширина полюсного наконечника (ширина всех элементов магнитопровода постоянна).

2. Ширина воздушного зазора между поверхностью изделия и поверхностью полюсного наконечника $l_6 = 2,0 \text{ мм}$.

3. Значение магнитной индукции насыщения для сталей (по кривым намагничивания, приведенным на рис. 4.28) равно 2 тл .

4. Параметры магнитопровода по конструктивным соображениям для станка мод. МАС-1А установлены: $l_1 = l_6 = 2 \text{ мм}$; $l_2 = 25 \text{ мм}$; $l_3 = 165 \text{ мм}$; $l_4 = 190 \text{ мм}$; $l_5 = 395 \text{ мм}$; $A = 230 \text{ мм}$; $m_3 = 30 \text{ мм}$, где l_2, l_3, l_4, l_5 — длина элементов магнитопровода; A — ширина магнитопровода, одинаковая для всех элементов

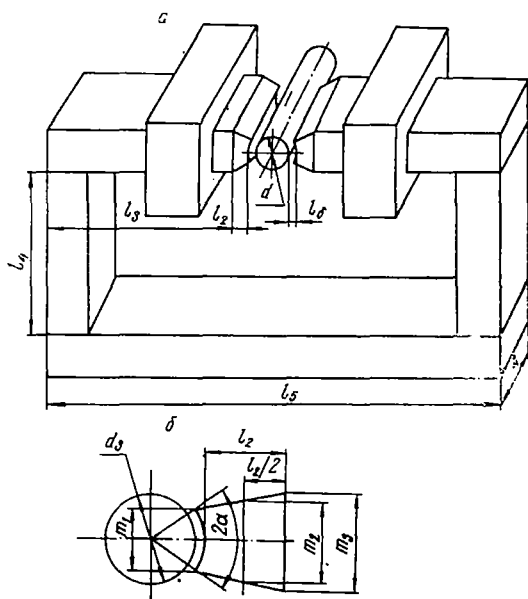


Рис 4.27. Схема магнитной системы

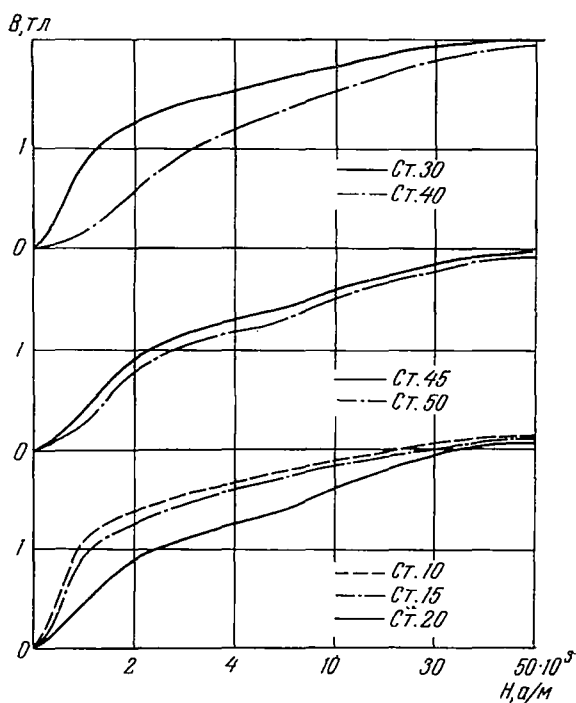


Рис. 4.28. Кривые намагничивания

его сечения; m_3 — высота элементов магнитопровода. Диаметр изделия $d_3 = 11$ мм.

Последовательность расчета принята следующая:

1. Магнитный поток Φ для участка рабочих зазоров

$$\Phi_{\delta} = BS_{\delta} = 2 \cdot 1,84 \cdot 10^{-3} = 3,68 \cdot 10^{-3} \text{ вб.}$$

2. Напряженность магнитного поля в рабочем зазоре

$$H_{\delta} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 0,1595 \cdot 10^7 \text{ а/м.}$$

3. Падение магнитодвижущей силы на участке рабочего зазора, если $l_{\delta} = 2$ мм,

$$F_{\delta} = 2H_{\delta}l_{\delta} = 2 \cdot 0,1595 \cdot 10^7 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 6400 \text{ ав.}$$

4. Площадь среднего сечения полюсного наконечника (см. рис. 4.27, б):

$$S_{\text{пн}} = m_2 A = \frac{m_1 + m_3}{2} A = \frac{8 + 30}{2} \cdot 230 = 4,37 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

5. Значение средней магнитной индукции в полюсном наконечнике

$$B_{\text{пн}} = \frac{\Phi}{S_{\text{пн}}} = \frac{3,68 \cdot 10^{-3}}{4,37 \cdot 10^{-3}} = 0,84 \text{ вб/м}^2.$$

6. Напряженность поля в полюсном наконечнике при $B_{\text{пн}} = 0,84$ вб/м² (по кривым намагничивания для стали 3, рис. 4.28, $H_{\text{пн}} = 940$ а/м).

7. Падение магнитодвижущей силы в двух полюсных наконечниках

$$F_{\text{пн}} = 2H_{\text{пн}}l_2 = 2 \cdot 0,94 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 47 \text{ ав.}$$

8. Площадь сечения магнитопровода на всех остальных участках

$$S = 30 \cdot 230 \cdot 10^{-6} = 6,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

9. Величина магнитной индукции на всех остальных участках магнитопровода

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{3,68 \cdot 10^{-3}}{6,9 \cdot 10^{-3}} = 0,534 \text{ вб/м}^2.$$

10. Напряженность поля на всех остальных участках (по кривым намагничивания для стали 3 исходя из $B = 0,534$ вб/м²)

$$H = 680 \text{ а/м.}$$

11. Падение магнитодвижущей силы на двух участках l_3

$$F_3 = 2Hl_3 = 2 \cdot 0,68 \cdot 10^3 \cdot 165 \cdot 10^{-3} = 156,4 \text{ ав.}$$

12. Падение магнитодвижущей силы на двух участках l_4

$$F_4 = 2Hl_4 = 2 \cdot 0,68 \cdot 10^3 \cdot 190 \cdot 10^{-3} = 258,4 \text{ ав.}$$

13. Падение магнитодвижущей силы на участке l_5

$$F_5 = 2Hl_5 = 0,68 \cdot 10^3 \cdot 395 \cdot 10^{-3} = 268,6 \text{ ав.}$$

14. Площадь сечения участка магнитопровода, который представляет изделие диаметром d_3 при угле охвата $2\alpha = 120^\circ$

$$S_{\text{д}} = m_1 A = 8 \cdot 230 \cdot 10^{-3} = 1,84 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

15. Значение магнитной индукции на участке магнитопровода, который представляет изделие высотой m_1 ,

$$B = \frac{\Phi}{S_{\text{д}}} = \frac{3,68 \cdot 10^{-3}}{1,84 \cdot 10^{-3}} = 2 \text{ тл.}$$

16. Напряженность магнитного поля на участке изделия высотой m_1 (по кривым намагничивания для случая $B = 2$ тл, если изделие изготовлено из стали 45) $H_{\text{д}} = 50000$ а/м.

17. Падение магнитодвижущей силы на участке изделия высотой m_1

$$F_{\text{д}} = Hd_3 = 50 \cdot 10^3 \cdot 11 \cdot 10^{-3} = 550 \text{ ав.}$$

18. Суммарное падение магнитодвижущей силы во всей магнитной цепи системы

$$F_0 = \Sigma F_i = F_6 + F_{\text{пн}} + F_3 + F_4 + F_5 + F_{\text{д}} = 7680 \text{ ав.}$$

По значению падения магнитодвижущей силы произведем расчет элементов катушек магнитной системы.

1. Определяем диаметр намоточного провода [16]

$$d_{\text{п}} = \sqrt{\frac{4\rho_l F_0 L_{\text{ср}} \cdot 10^{-3}}{\pi c v_{\text{п}}}},$$

где $\rho_l = \rho_{20} [1 + \alpha(t - 20)]$ — удельное сопротивление меди (если удельное сопротивление меди при температуре $t = 20^\circ\text{C}$, $\rho_{20} = 0,0175$, $\alpha = 0,004$ и максимальный нагрев провода у катушек магнитной системы станков принят не более 50°C , то $\rho_l = 0,0196 = 1,96 \cdot 10^{-2}$); $C = 0,85$ — коэффициент, учитывающий возможное снижение напряжения; $L_{\text{ср}}$ — ориентировочная средняя длина витка. Для магнитной системы станка мод. МАС-1А по конструктивным соображениям приняты габариты катушек, показанные на рис. 4.29, поэтому в данном случае

$$\begin{aligned} L_{\text{ср}} &= 2 [(0,5h_{\text{н}} + H_{\text{п}} + 0,5h_{\text{н}}) + (0,5b_{\text{н}} + B_{\text{п}} + 0,5b_{\text{н}})] = \\ &= 2 [(30 + 230 + 30) + (30 + 30 + 30)] = 760 \text{ мм;} \end{aligned}$$

$v_{\text{п}} = 220$ в — напряжение, подаваемое на катушки.

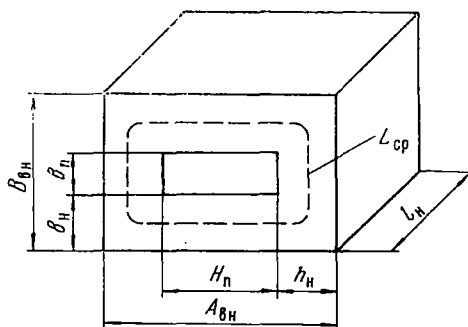


Рис. 4.29. Схема катушки электромагнита

Подставив значение ρ_t , c , L_{cp} , F_0 , v_H в приведенное выше уравнение, определяем диаметр намоточного провода для катушки

$$d_H = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,96 \cdot 10^{-2} \cdot 7,68 \cdot 10^3 \cdot 7,6 \cdot 10^2 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,85 \cdot 2,2 \cdot 10^2}} = \\ = \sqrt{0,7776} = 0,88 \text{ мм.}$$

Принимаем $d_H = 1 \text{ мм}$.

2. Определяем коэффициент заполнения намоточного пространства каркаса катушки

$$f_H = \frac{q_M}{d_i \left(d_i + \frac{\delta}{m} \right)} K_y = \frac{0,78 \cdot 1}{1,23 (1,23 + 0,05)} = 0,5,$$

где

$$q_M = \frac{\pi d_H^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} = 0,78 \text{ мм}^2;$$

$d_i = 1,03 \text{ мм}$ — диаметр провода в изоляции; $\delta = 0,05 \text{ мм}$ — толщина прокладочной бумаги; $m = 1$ — число слоев провода между прокладочной бумагой; $K_y = 1$ — коэффициент укладки.

3. Число витков одной катушки

$$W = f_H \frac{h_H l_H}{q_M} = 0,5 \cdot \frac{60 \cdot 100}{0,78} = 3846.$$

4. Общее число витков на две катушки

$$W_{\text{общ}} = 2 \cdot 3846 = 7692 \text{ витка.}$$

5. Определяем примерный расход меди на две катушки магнитной системы станка мод. МАС-1А

$$Q = L_{cp} q_M W_{\text{общ}} \delta_M = 760 \cdot 0,78 \cdot 7692 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} \approx 40 \text{ кг,}$$

где δ_M — удельный вес меди.

11. Намотка катушек электромагнитной системы установок магнитно-абразивной обработки

Характеристики и конструктивные особенности катушек. Среди разнообразных операций в производстве катушек электромагнитной системы установок большое место занимает намотка провода. От качества выполнения этой трудоемкой и ответственной технологической операции зависят электрические характеристики, надежность работы катушек и точность их геометрических размеров. Операция намотки провода на каркас катушки выполняется, как правило, на механизированных или даже автоматизированных приспособлениях и станках (принципиальные схемы работы подобных станков описаны в [3]), так как ручной труд характеризуется не только низкой производительностью, но и приводит к нестабильности характеристик получаемых обмоток. Следует также иметь в виду, что для намотки катушек электромагнитов установок магнитно-абразивной обработки используется провод диаметром 1—2 мм, который весьма затруднительно вручную с достаточным натяжением уложить на каркас.

Катушки электромагнитной системы установок характеризуются следующими электрическими параметрами: сопротивлением, мощностью, индуктивностью и пр. Катушки электромагнита определяют параметры и основные рабочие характеристики станков и установок для магнитно-абразивной обработки.

Обмотки делятся на открытые, кольцевые и пазовые:

открытая — намотка провода на вращающийся вокруг собственной оси каркас, имеющий дополнительное движение подачи для раскладки витков;

кольцевая (торондальная) образуется вращением самого провода вокруг оси кольцеобразного каркаса, который медленно поворачивается относительно этой же оси, обеспечивая раскладку витков;

пазовая — провод, уложенный в пазу пакета ротора или статора.

На рис 4.30, а показана рядовая однослойная обмотка с шагом P_n , имеющая малую величину собственной емкости. Сопротивление и длина одного витка обмотки определяются уравнениями:

$$R = \rho \frac{L}{S} = \frac{4\rho L}{\pi d_n^2}; \quad (4.45)$$

$$l_b = \frac{2b + 2a + \pi d_{из}}{\cos \alpha}, \quad (4.46)$$

где R — общее сопротивление обмотки, ом; ρ — удельное сопротивление, ом·мм²/м; L — длина провода, м; S — площадь

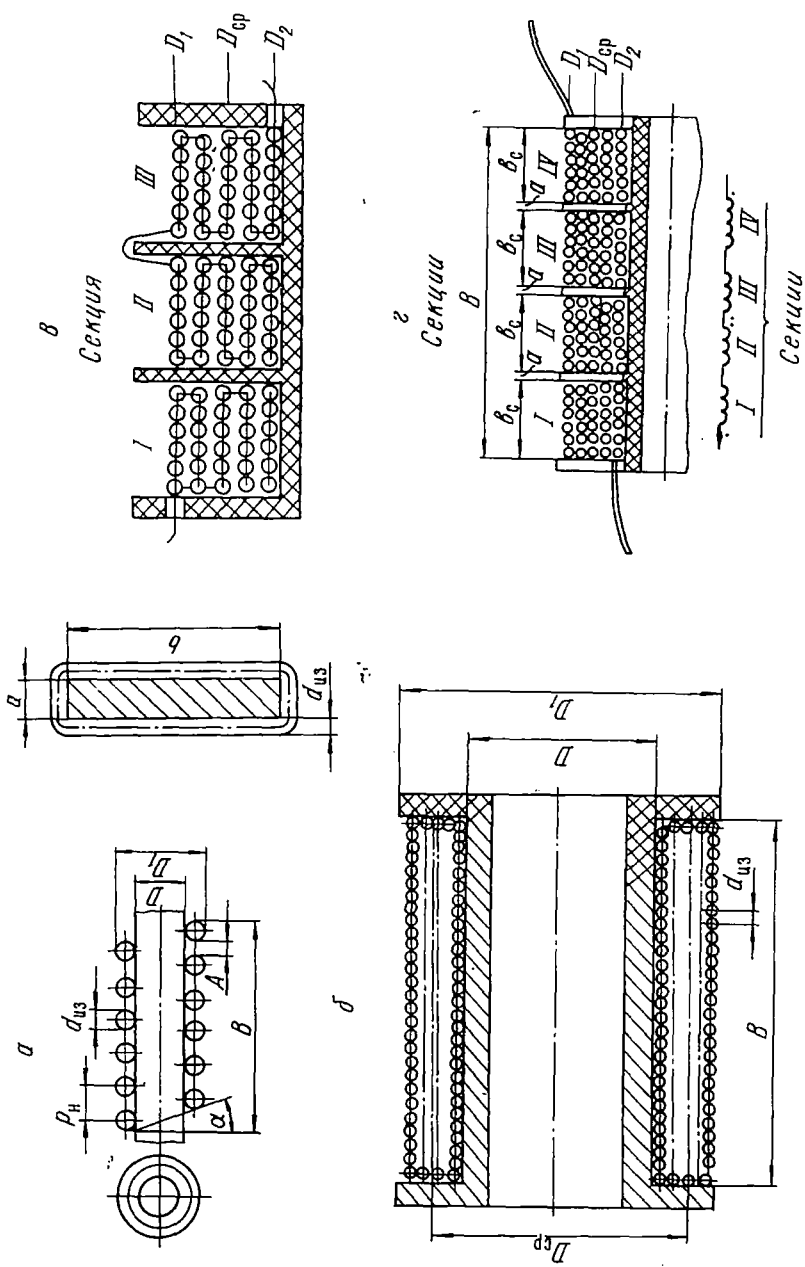


Рис. 4.30. Виды обмоток для катушек электромагнита

поперечного сечения провода, мм^2 ; $l_{\text{в}}$ — длина одного витка, мм ; b — высота витка, мм ; a — ширина витка, мм ; $d_{\text{п}}$ — диаметр провода без изоляции, мм ; $d_{\text{из}}$ — диаметр провода с изоляцией, мм ; α — угол подъема витка, град .

На рис. 4.30, б рядовая многослойная обмотка, имеющая большую индуктивность и собственную емкость. У такой обмотки несколько понижен срок службы из-за повышенной разности потенциалов между витками, расположенными в соседних рядах по краям обмотки. Наибольшая разность потенциалов между витками в данном случае характеризуется уравнением

$$V = 2\omega \frac{E}{W}, \quad (4.47)$$

а средняя длина одного витка

$$l_{\text{вср}} = \frac{2b_{\text{ср}} + 2a_{\text{ср}} + \pi d_{\text{из}}}{\cos \alpha} = \frac{785Rd_{\text{п}}^2}{\rho \omega k}, \quad (4.48)$$

число витков

$$\omega = \frac{785Rd_{\text{п}}^2}{\rho l_{\text{вср}} k}, \quad (4.49)$$

где ω — число витков обмотки в одном ряду; W — общее количество витков в обмотке; E — напряжение на концах обмотки, в ; k — число рядов; $b_{\text{ср}}$ — средняя высота обмотки, мм ; $a_{\text{ср}}$ — средняя ширина обмотки, мм ; $l_{\text{вср}}$ — средняя длина витка, мм .

На рис. 4.30, в показана трехсекционная индукционная обмотка. Применяется для снижения разности потенциалов и увеличения коэффициента заполнения. Количество секций в обмотке может быть любое. Число рядов нечетное. Укладка провода в отдельной секции производится при различном направлении вращения шпинделя намоточного станка.

Для данного вида обмоток средняя длина одного витка $l_{\text{вср}}$ и число витков в секции W_1 определяются из уравнений:

$$l_{\text{вср}} = \frac{10^3 L}{\omega k} = \frac{785Rd_{\text{п}}^2}{\rho \omega k}; \quad (4.50)$$

$$W_1 = \frac{10^3 L}{2(b_{\text{ср}} + a_{\text{ср}})k} = \frac{785Rd_{\text{п}}^2}{\rho l_{\text{вср}} k}. \quad (4.51)$$

На рис. 4.30, г представлена четырехсекционная (т. е. с четным количеством секций) безындукционная обмотка с нечетным числом рядов, допускающая большую величину падения напряжения на один виток. Провод в секциях подобных обмоток укладывается в противоположных направлениях путем поворота каркаса на оправке на 180° .

Конструктивно применяемые в магнитных системах станков катушки различаются по характеру выводов (с гибкими выводами, выполненными монтажным или намоточным проводом, и жесткими, выполненными с помощью лепестка); по числу секций — одно-, двух- и трехсекционные и др.; по выполнению внешней изоляции — с изоляцией из тонкого листового материала (кабельной бумаги, лакоткани, хлопчатобумажной ленты), с литой изоляцией (залливка катушек) и пр.

Габаритные размеры и качество намотки катушек характеризуются коэффициентом заполнения обмоточного пространства каркаса k_3 , определяемого из уравнения

$$k_3 = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{во}}} = \frac{WS}{ab}, \quad (4.52)$$

где $V_{\text{п}}$ — объем, занимаемый проводом, без учета размеров изоляции; $V_{\text{во}}$ — объем, занимаемый всей обмоткой, включая изоляционные материалы и толщину изоляции провода; W — число витков; S — сечение провода без изоляции, мм^2 ; a — ширина обмоточного пространства с изоляцией, мм ; b — высота обмотки с изоляцией.

Иными словами, k_3 — отношение суммарной площади сечения всех витков провода без изоляции к площади поперечного сечения обмоточного пространства, т. е. пространства каркаса, занимаемого проводом в изоляции, с учетом внутренней, прослойной и внешней изоляции. На величину k_3 влияют марка, форма и размеры сечения провода с учетом толщины его изоляции, форма и размеры каркаса катушки, тип намотки (строго рядовая, внавал и пр.), величина натяжения провода при намотке, конструкция, техническое состояние и настройка намоточного станка.

Чертежи катушек электромагнита должны содержать сведения о форме, размерах, чистоте поверхности, покрытии и марке материала каркаса и провода; габаритных размерах изделия до и после пропитки и залливки; установочных и присоединительных размерах, а также электрической схеме с нумерацией выводов и отводов. Кроме того, в технических условиях на поле чертежа должны быть приведены электрические параметры катушки (частота тока, напряжение и сопротивление в ее обмотках на входе и выходе); намоточные данные с указанием марки и размеров провода (длина и сечение), размещение обмоток, тип намотки, межслойной и междуобмоточной изоляции, число витков в обмотке и в одном слое, конструкция и расположение выводов; указание о пропитке, окраске, маркировке и контроле; сведения о типе и размерах магнитопровода.

Материалы, применяемые для изготовления катушек. В качестве токопроводящего материала используется, как прави-

ло, медный провод круглого сечения, который в зависимости от свойств и размеров характеризуется следующими электрическими параметрами: удельной электропроводностью γ , удельным электрическим сопротивлением ρ , температурным коэффициентом сопротивления α_R , температурным коэффициентом удельного электрического сопротивления α_ρ . Указанные параметры определяются из уравнений:

$$\gamma = \frac{L}{RS}; \quad (4.53)$$

$$\rho = \frac{RS}{L} = \frac{1}{\gamma}; \quad (4.54)$$

$$\alpha_R = \frac{R_{t_2} - R_{t_1}}{R_{t_1} R_{t_2}}; \quad (4.55)$$

$$\alpha_\rho = \frac{\rho_{t_2} - \rho_{t_1}}{\rho_{t_1} \rho_{t_2}}, \quad (4.56)$$

где t_1 и t_2 — начальное и конечное значения температуры; R_{t_1} , R_{t_2} , ρ_{t_1} , ρ_{t_2} — значения сопротивлений и удельных электрических сопротивлений соответственно при температурах t_1 и t_2 .

По механическим свойствам проводниковые материалы характеризуются пределом прочности при растяжении (σ_p) и относительным удлинением (Δl), т. е.

$$\sigma_p = \frac{P}{S}; \quad \Delta l = \frac{l_p - l_0}{l_0}, \quad (4.57)$$

где P — растягивающая нагрузка, $\kappa\Gamma$; S — сечение проводника, мм^2 ; l_0 — первоначальная длина проволоки, мм ; l_p — длина проволоки после приложения нагрузки P , мм .

Медную проволоку изготавливают из электролитической меди марки М1 по ГОСТ 859-66, содержащей не менее 99,9% чистой меди. По механическим свойствам различают медную проволоку марки ММ и твердую — марки МТ. Электрические и механические свойства медной проволоки различных марок приведены в табл. 4.7.

Важными характеристиками намоточных проводов являются их нагревостойкость, характеризуемая предельной температурой, при которой провод может еще надежно работать в течение длительного времени, эластичность и электрическая прочность. В табл. 4.8 приведена классификация проводов по их нагревостойкости [3].

Эластичность эмалевых покрытий у проводов диаметром до 0,38 мм определяется плавным растяжением провода до удлинения на 10% или до его разрыва. При этом изоляционная

Таблица 4.7

**Электрические и механические свойства медной
проволоки различных марок**

Материал проволоки	Предел прочности при растяжении не менее, кг/мм ²	Относительное удлинение не менее, %	Удельное электрическое сопротивление не более, ом·мм ² /м
Медь МТ	36—39	0,5—2,5	0,0179—0,0182
Медь ММ	26—28	18—35	0,01754

Таблица 4.8

Допустимая температура нагрева провода

Класс нагревостойкости	Длительно-допустимая рабочая температура, °С	Материал изоляции провода
A	105	Масляная, масляно-смоляная, поливинил-ацеталевая изоляция, полиамидно-резальная изоляция. Полиэтилен низкого давления, отдельные сорта полихлорвиниловых компаудов
E	120	Полнуретановая изоляция
B	130	Полиэфирная, полиэтилентерефталатная изоляция
F	155	Полиимидная изоляция. Лавсан (полиэтилентерефталат)
H	180	Полиимидная изоляция
C	Свыше 180	Фторопластовая изоляция (политетрафторэтилен) в сочетании со стекловолокном. Стекловолокнистая, дельтаасбестовая изоляция, пропитанная кремнийорганическими смолами

пленка не должна растрескиваться. Для проводов диаметром больше 0,38 мм эмалевое покрытие считается эластичным, если оно не растрескивается при навивании провода на стержень, диаметр которого равен двойному диаметру голого провода.

Допустимые отклонения номинальных диаметров медной проволоки без изоляции, согласно ГОСТ 2112-62, и максимальные наружные диаметры намоточных проводов приведены в книге [3].

Важным технологическим фактором наматывания обмотки на каркас катушки, определяющим точность раскладки по шагу и неизменность сопротивления обмотки, является натяжение провода. Последнее зависит от числа оборотов шпинделя намоточного станка, формы поперечного сечения, от трения

провода инерционной массы бобины с проводом и конструкции натяжных устройств. В процессе намотки не допускаются обрывы провода, его утонение и повреждение изоляции, т. е. натяжение провода не должно выходить за пределы упругости ее материала. Величины предельно допустимых натяжений, не выходящие за пределы упругих колебаний медного провода для диаметров, наиболее распространенных при изготовлении катушек электромагнитной системы установок магнитно-абразивной обработки, приведены в табл. 4.9 [3].

Для выполнения выводов и отводов в обмотках катушек электромагнитной системы применяют одно- и многожильные монтажные провода с волокнистой лакированной оплеткой и в полихлорвиниловой изоляции. Выбор сечения монтажных проводов производится в зависимости от величины проходящего по ним тока (табл. 4.10), а выбор изоляции — в соответствии

Таблица 4.9

Допустимое натяжение медного провода

Номинальный диаметр, мм	Натяжение провода, Г	Номинальный диаметр, мм	Натяжение провода, Г
0,30	760	0,55	2570
0,31	820	0,60	3060
0,33	925	0,65	3590
0,35	1040	0,70	4170
0,37	1160	0,75	4780
0,40	1360	0,80	5440
0,42	1500	0,85	6140
0,45	1720	0,90	6880
0,47	1880	0,95	7670
0,50	2120	1,00	8500

Таблица 4.10

Допустимая величина тока, проходящая через медный провод данного сечения

Сечение провода, мм	Наибольший допустимый ток, а	Сопротивление при 20 °С, ом·м	Сечение провода, мм	Наибольший допустимый ток, а	Сопротивление при 20 °С, ом·м
0,05	0,7	0,350	1,0	10,0	0,018
0,07	1,0	0,250	1,5	14,0	0,012
0,1	1,3	0,175	2,0	17,0	0,009
0,2	2,5	0,088	2,5	20,0	0,007
0,3	3,5	0,058	4,0	25,0	0,004
0,4	4,0	0,044	6,0	30,0	0,003
0,5	5,0	0,035	10,0	45,0	0,002
0,7	7,0	0,025	16,0	70,0	0,001

с условиями эксплуатации и в зависимости от напряжения, под которым эта изоляция находится. Так, например, провод с полихлорвиниловой или резиновой изоляцией применяется при напряжениях до 380 в переменного тока и до 500 в постоянного, а большинство проводов с волокнистой оплеткой — при напряжениях до 60—100 в переменного тока.

Технология открытой намотки катушек. В большинстве случаев для электромагнитной системы установок магнитно-абразивной обработки применяются катушки с каркасами прямоугольного сечения, реже — тороидные. При создании установок, использующих принцип вращающегося магнитного поля, применяются обмотки по типу статора электродвигателя, т. е. пазовые обмотки.

К каркасам предъявляются требования механической прочности, жесткости, устойчивости против коррозии, диэлектрическим качествам и простоты конструкции. Они изготавливаются из гетинакса, текстолита и других прессматериалов. Боковые стенки каркаса изготавливаются из материала толщиной 5—10 мм, а щеки — 10—15 мм. Следует иметь в виду, что катушки электромагнитной системы установок для магнитно-абразивной обработки в процессе работы соприкасаются со смазывающе-охлаждающей жидкостью, несущей агрессивные вещества, поэтому их обмотки необходимо тщательно герметизировать и полностью изолировать от внешней среды. В данном случае после пропитки в камерах обмотку целесообразно закрывать специальным кожухом из диэлектрического материала. Кожух с резиновыми прокладками крепится к щекам каркаса винтами, что позволяет производить его демонтаж.

В остальной части технология производства обмоток катушек электромагнитов аналогична технологии изготовления подобных деталей радиоэлектронной аппаратуры и приборов [3].

Намотанные катушки подвергают проверке на отсутствие механических повреждений каркаса, правильность заделки выводов, качество пайки в процессе намотки, правильность размеров посадочного окна и габаритов катушки, после чего катушку подвергают герметизации и проверке на соответствие техническим требованиям чертежа и электрическим параметрам.

Основные виды погрешностей намотки катушек и способы их устранения приведены в книге [3]. Причины погрешностей, возникающих в процессе производства обмоток, делятся на два вида:

1) погрешности, вызываемые материалами (непостоянство диаметра и физических свойств проволоки и низкое качество ее изоляции);

2) погрешности, присущие процессу наматывания (неточность кинематической схемы и наладки оборудования, деформация проволоки, каркаса и деталей станка).

Герметизация катушек после намотки. Проникновение влаги между витками обмоток вызывает коррозию медного провода и ведет к его обрыву, что особенно следует помнить при изготовлении катушек для магнитно-абразивной обработки. Попадание влаги в поры изоляционного материала ухудшает его свойства и вызывает возрастание диэлектрических потерь, что способствует перегреву катушки. Основными методами герметизации катушек в нашем случае являются пропитка и заливка.

Пропитка заключается в заполнении пор, трещин и пустот в изоляционных материалах, а также между конструктивными элементами катушки, например между слоями и витками обмоток. Количество влаги, проникающее через электронизоляционный пропиточный материал площадью S и толщиной l за время t , определяется формулой [3]

$$\Theta = k_{\text{в}} \frac{tS\Delta P}{l}, \quad (4.58)$$

где $k_{\text{в}}$ — коэффициент влагопроницаемости материала; Θ — количество влаги; ΔP — разность давлений водяных паров между обеими сторонами материалов.

Из формулы (4.58) следует, что с увеличением толщины материала соответственно возрастает влагозащитное действие материала. Пропитка повышает электрическую прочность изоляции, повышает собственную емкость обмоток, так как диэлектрическая проницаемость диэлектрических материалов выше диэлектрической проницаемости воздуха. Пропитка закрепляет витки провода в катушке, увеличивает механическую прочность намоточных изделий, улучшает их тепловой режим и повышает теплостойкость. Кроме того, пропитка повышает химическую стойкость в отношении паров кислот, щелочей и пр., что увеличивает срок действия катушек.

Заливка заключается в заполнении жидким электронизоляционным составом свободного промежутка между заливаемым изделием и стенками заливочной формы. Этот метод позволяет получить изделия строго определенных размеров. В сочетании с пропиткой влагозащитные свойства заливки значительно повышаются.

Выбор материалов для герметизации должен производиться с учетом условий эксплуатации и конструктивных особенностей катушек. Материалы, применяемые для герметизации, должны иметь хорошие пропитывающие и высокие диэлектрические свойства, а также обладать способностью переносить

Таблица 4.11

Данные по пропитке катушек, применяемых в системе электромагнита станков (изоляция провода эмалевая)

Условия работы		Характеристика технологического процесса и области применения	Марка герметизирующего состава
относительная влажность	рабочая температура, С		
98% при 50 °С	До \pm 120	Заливка однослойных катушек	Компаунд КГСМ-2
98% при 20 °С	До \pm 130	Двукратная пропитка многослойных обмоток открытого типа с последующим наружным покрытием лаком	Пропиточный лак МЛ-92. Покровный лак СБ-1с

снять температурные изменения без образования трещин. Конструкция катушек должна обеспечивать хороший доступ внутрь обмотки пропиточного состава.

Для герметизации катушек целесообразно применять жидкие масла, пропиточные лаки, компаунды, покровные лаки и эмалы.

В табл. 4.11 приведены рекомендации [3] при пропитке катушек с эмалевой изоляцией провода, а также характеристика и свойства некоторых пропиточных материалов.

Сушка катушек производится до и после пропитки и заливки с целью удаления влаги из пор изоляционных материалов и промежутков внутри изделия. Температуру сушки устанавливают не выше теплостойкости изоляционных материалов. Основными видами сушки являются: конвекционная, терморadiaционная, индукционная и вакуумная. Виды пропитки: при атмосферном давлении, под повышенным давлением, при вакууме с подогревом и циклическая с подогревом.

12. Выбор оптимальной схемы механизма осцилляции при магнитно-абразивной обработке крупногабаритных деталей

Чистовая обработка в магнитном поле ферропорошками происходит при интенсивном осциллирующем движении, которое в известных схемах механизмов сообщается главным образом заготовке с частотой порядка 10—25 гц (600—1500 *дв.ход/мин*) и амплитудой до 3 мм. При возможном увеличении частоты до 50—100 гц и уменьшении амплитуды это движение можно рассматривать и как низкочастотную вибрацию.

Интенсификация движения осцилляции может служить значительным резервом повышения производительности и качества обработки. Однако большинство исследователей ограничились использованием осцилляций с относительно небольшими значениями частоты и амплитуды, хотя в ряде работ и отмечается перспективность этого направления. Применение малых частот и амплитуд связано прежде всего с трудностью получения интенсивного осциллирующего движения в связи с резким увеличением затрат энергии на его осуществление, увеличением габаритов и массы механизмов осцилляции и мощности привода.

При решении задачи создания механизма осцилляции для случая магнитно-абразивной обработки деталей, имеющих большие геометрические размеры и массу (например, цилиндров опрокидывающего механизма автомобиля БелАЗ-540, $d_3=132$ мм, $l_3=500$ мм), в Физико-техническом институте АН БССР были проведены поисковые исследования возможности сообщения колебаний не детали, а полюсным накопечникам магнитной системы, имеющим значительно меньший вес. В выполнении указанной работы принимали участие сотрудники Калининградского технического института Г. С. Шулев и Б. П. Борисов. Ниже приводятся результаты исследований, позволившие создать принципиально новый вид механизма осцилляции полюсов магнитной системы и результаты его испытаний.

Классификация схем механизмов осцилляции и их энергетические характеристики. Анализ известных механизмов, сообщающих движение осцилляции при магнитно-абразивной обработке, показывает, что по характеру действия их можно классифицировать следующим образом (табл. 4.12):

1. Осциллирующее движение сообщается обрабатываемой детали. Колеблющаяся масса равна при этом сумме весов обрабатываемой детали и механизма, удерживающего ее в зоне резания, например каретки суппорта.

2. Движение осцилляции сообщается магнитной системе, масса которой в зависимости от габаритов обрабатываемой детали может изменяться от 20 до 300 кг.

3. Колебательное движение сообщается ферромагнитному порошку, содержание которого в рабочих зазорах 10—50 г. Осциллирующая масса при этом минимальна, но отсутствие в настоящее время специальных источников магнитного поля не позволяет реализовать эту схему.

4. Осциллирующее движение сообщается полюсным накопечникам электромагнита, удерживающим на своей поверхности ферромагнитный порошок. Колеблющаяся масса в данном случае равна весу полюсов и порошка, находящегося в рабочих зазорах, т. е. $G_{осц}=2-10$ кг.

Оценка затрат энергии для случая осциллиции полюсов электромагнита произведена в нашей схеме, исходя из баланса мощности привода, т. е. с учетом главных составляющих

$$N_{\Sigma} = N_{\text{рез}} + N_{\text{тр}} + N_{\text{осц}} + N_{\text{с}}, \quad (4.59)$$

где N_{Σ} — мощность привода осциллиции; $N_{\text{рез}}$ — та часть мощности привода осциллиции, которая затрачивается на осуществление процесса резания; $N_{\text{тр}}$ — мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в направляющих узла осциллиции; $N_{\text{осц}}$ — мощность, затрачиваемая на сообщение колебаний системе; $N_{\text{с}}$ — мощность, затрачиваемая на преодоление сил сопротивления, возникающих при взаимодействии основного магнитного потока с магнитным полем тока, индуцированного в наконечнике при пересечении им основного поля в зазоре.

К.п.д. привода осциллиции при этом будет равен

$$\eta_{\text{осц}} = \frac{N_{\text{полезн}}}{N_{\text{затрач}}} = \frac{N_{\text{рез}}}{N_{\text{рез}} + N_{\text{тр}} + N_{\text{осц}} + N_{\text{с}}}. \quad (4.60)$$

В нашем случае колебание объекта происходит по синусоидальному закону, т. е. смещение

$$x = A \sin \omega t,$$

где ω — круговая частота; A — амплитуда осциллиции; t — время одного периода.

Тогда мощность резания будет определена из условия

$$N_{\text{рез}} = v_{\text{рез}} F_{\text{рез}}, \quad (4.61)$$

где $v_{\text{рез}}$ — скорость резания, равная средней скорости колебания полюсов $v_{\text{осцср}}$; $F_{\text{рез}}$ — сила резания, точнее, ее усредненная величина.

$$v_{\text{рез}} = v_{\text{осцср}} = 4Af, \quad (4.62)$$

где f — частота колебаний, $gц$.

В установленном режиме работы можно принять, что мощность, затраченная на преодоление трения, равна

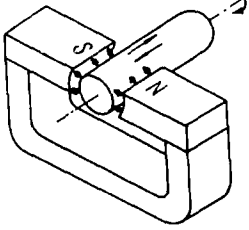
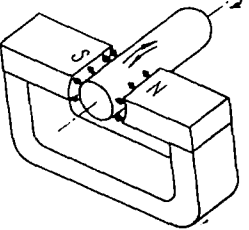
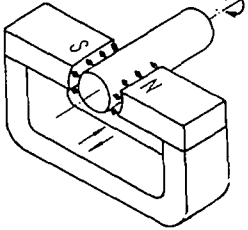
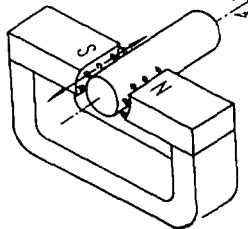
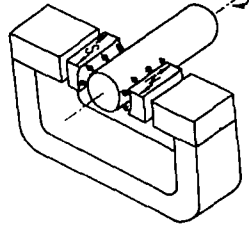
$$N_{\text{тр}} = v_{\text{п}} F_{\text{тр}}, \quad (4.63)$$

где $v_{\text{п}}$ — скорость перемещения осциллирующего объекта; $F_{\text{тр}}$ — сила трения в направляющих,

$$F_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} F_{\text{д}}, \quad (4.64)$$

$k_{\text{тр}}$ — коэффициент трения в направляющих; $F_{\text{д}}$ — сила, с которой осциллирующая масса оказывает давление на на-

Классификация схем осцилляции

№ схемы	Объект осцилляции	Схема осцилляции	Характеристики схемы
1а	Обрабатываемая деталь		<p>Осциллируемая масса</p> <p>К. п. д. схемы</p> $G_{1a\text{осц}} = G_{\text{дет}} + G_{\text{кар}}$ $\eta_{1a} = \frac{1}{1 + k_1 [F_{\text{прит}1a} + G_{\text{осц}1a} (1 + k_2 A f^2) + k_3 A f]}$
1б	Обрабатываемая деталь		<p>Осциллируемая масса</p> <p>К. п. д. схемы</p> $G_{1б\text{осц}} = G_{\text{дет}} + G_{\text{кар}}$ $\eta_{1б} = \frac{1}{1 + k_1 [F_{\text{прит}1б} + G_{\text{осц}1б} (1 + k_2 A f^2) + k_3 A f]}$
2	Электромагнитная система		<p>Осциллируемая масса</p> <p>К. п. д. схемы</p> $G_{2\text{осц}} = G_{\text{эл.м}} + G_{\text{ф.пор}}$ $\eta_2 = \frac{1}{1 + k_1 [F_{\text{прит}2} + G_{\text{осц}2} (1 + k_2 A f^2) + k_3 A f]}$
3	Ферромагнитный порошок		<p>Осциллируемая масса</p> <p>К. п. д. схемы</p> $G_{3\text{осц}} = G_{\text{ф.пор}}$ $\eta_3 = \frac{1}{1 + k_1 k_2 G_{\text{осц}3} A f^2}$
4	Полюсные наконечники		<p>Осциллируемая масса</p> <p>К. п. д. схемы</p> $G_{4\text{осц}} = G_{\text{пол.нак}} + G_{\text{ф.пор}}$ $\eta_4 = \frac{1}{1 + k_1 [F_{\text{прит}4} + G_{\text{осц}4} (1 + k_2 A f^2) + k_3 A f]}$

правляющие, зависящая от веса полюсов и порошка и от силы их притяжения $F_{пр}$ к сердечнику электромагнита:

$$F_d = G_{осц} + F_{пр}, \quad (4.65)$$

$$F_{пр} = 4,06B^2S, \quad (4.66)$$

где B — магнитная индукция в рабочих зазорах; S — площадь торца сердечника.

Сила притяжения $F_{пр}$ зависит от многих факторов и прежде всего от магнитной индукции в зазоре, площади торцов сердечника и конкретных размеров самого узла осцилляци. В связи с этим подсчет ее производится в каждом конкретном случае отдельно. Здесь же можно отметить, что величина $F_{пр}$ достаточно велика и может составлять 50—100 кгГ.

Средняя мощность, затрачиваемая на сообщение синусоидальных колебаний осциллируемому объекту, может быть определена по формуле

$$N_{осц} = 8 \cdot 10^{-5} G_{осц} A^2 f^3 \text{ вт}, \quad (4.67)$$

а максимальное усилие, затрачиваемое на процесс колебания, — по формуле

$$F_{осц} = 4 \cdot 10^{-3} G_{осц} A f^2 \text{ кгГ}. \quad (4.68)$$

На рис. 4.31 представлены графики, характеризующие изменение $N_{осц}$ и $F_{осц}$ в зависимости от веса осциллирующих объектов.

Анализ полученных зависимостей показывает, что даже при небольшом увеличении веса осциллируемого объекта воз-

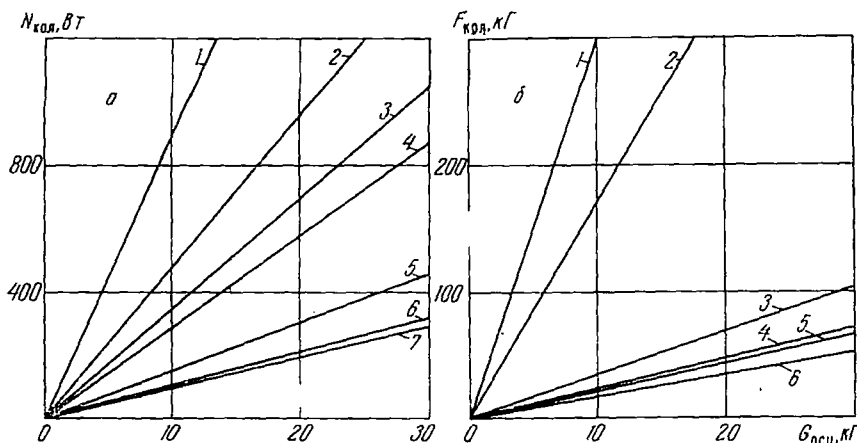


Рис. 4.31. Зависимость мощности (а) и силы (б), затраченной на осцилляцию, от массы колеблющихся деталей: 1 — при $A=3$ мм, $f=50$ гц; 2 — 4,5 мм и 30 гц; 3 — 3 и 17; 4 — 6 и 10; 5 — 2 и 17; 6 — 2,5 и 13; 7 — 6 мм и 7 гц

никает рост затрат энергии и сил инерции, особенно при повышенных режимах осцилляции.

Сила сопротивления, возникающая при пересечении магнитного потока ферромагнитной массой, равна

$$F_c = \Phi^2 v_{\text{рез}}^2, \quad (4.69)$$

где Φ — пересекаемый магнитный поток.

Учитывая, что $v_{\text{рез}} = 4Af$, мощность, затрачиваемую на преодоление сил сопротивления, можно определить как

$$N_c = V_{\text{рез}} F_c = 16\Phi^2 A^2 f^2. \quad (4.70)$$

Поскольку сравнение схем осцилляции производится для случая, когда магнитный поток для всех схем одинаков, можно обозначить $4\Phi^2 = K$ и тогда

$$N_c = 4KA^2 f^2. \quad (4.71)$$

Подставляя значения составляющих баланса мощности привода осцилляции в выражение (4.60), получаем

$$\eta_{\text{осц}} = \frac{4AfF_{\text{рез}}}{4AfF_{\text{рез}} + 4Afk_{\text{тр}}F_d + 8 \cdot 10^{-5} G_{\text{осц}} A^2 f^3 + 4KA^2 f^2} \quad (4.72)$$

или

$$\eta_{\text{осц}} = \frac{1}{1 + \frac{k_{\text{тр}}}{F_{\text{рез}}} \left(F_d + \frac{2 \cdot 10^{-5}}{k_{\text{тр}}} G_{\text{осц}} A f^2 + \frac{K}{k_{\text{тр}}} A f \right)}. \quad (4.73)$$

Исходя из всего сказанного и анализируя уравнение (4.73), можно сделать следующие выводы:

1. Схемы типа 1а (см. табл. 4.12) обеспечивают небольшие энергетические затраты на осуществление осцилляции лишь при обработке деталей небольшой массы и габаритов.

2. Наиболее высокий расчетный к.п.д. у схемы 3, так как осциллируемая масса наименьшая и отсутствуют потери мощности от сил трения в направляющих.

Однако отсутствие источников магнитного поля со специальными характеристиками сдерживает практическую реализацию возможностей этой схемы.

3. Схема 4 обладает выгодным соотношением составляющих баланса мощности за счет малой осциллируемой массы. Это позволяет использовать амплитуды и частоты более высоких значений, чем в схемах 1 и 2, при этом же обеспечивает меньшие энергетические затраты по сравнению с ними при одинаковых режимах осцилляции.

В связи с расположением направляющих непосредственно в зоне действия магнитного поля недостатком схемы 4 следует

считать повышенное значение силы притяжения $F_{пр}$ полюсных наконечников к сердечникам электромагнитов, что в свою очередь снижает расчетный к.п.д.

Уменьшить влияние силы притяжения можно, например, вынося направляющие из зоны действия поля.

Другим, как нам кажется, более перспективным путем повышения к.п.д. данной схемы является введение в систему упругих элементов, обеспечивающих колебания полюсных наконечников в резонансном режиме.

4. Рассмотренные схемы осцилляции, обладая каждая своими достоинствами и областью применения, не исключают, а дополняют друг друга, расширяя сферу действия самого метода обработки.

Учитывая ряд достоинств схемы с осциллирующими полюсными наконечниками, данную схему приняли за основу в ходе дальнейших исследований.

Для ее практической реализации были разработаны и изготовлены различные приводы.

Приводы осцилляции полюсных наконечников. Полюсные наконечники могут быть приведены в осциллирующее движение с помощью различных приводов, которые разделяются по роду используемой энергии на пневматические, гидравлические и электрические. По характеру движений и решаемым задачам привод полюсных наконечников наиболее близок к приводам головок для суперфиниширования. Однако существенные отличия в характере самого процесса обработки, связанного прежде всего с энергией магнитного поля, вызывают своеобразие как применяемых конструкций, так и их расчета и заставляют искать новые схемы приводов.

В связи с тем что одним из основных технологических факторов чистовой обработки в магнитном поле является энергия электромагнитов, обуславливаемая в конечном счете энергией электрического тока, желательно, чтобы осцилляция полюсных наконечников обеспечивалась прежде всего приводом на электрической основе и по возможности за счет энергии основных, технологических электромагнитов. Это позволит уменьшить затраты энергии на осцилляцию и тем самым повысит к.п.д. привода.

Пневматический и гидравлический приводы, обладая каждым определенными достоинствами, требуют наличия дополнительных устройств для получения и транспортирования нужного вида энергии, что в данном случае может привести к снижению к.п.д. и усложнить конструкцию.

Исходя из этих соображений, были предложены и конструктивно разработаны электромеханический, электродинамический и поляризованный электромагнитный приводы осцилляции полюсных наконечников (рис. 4.32).

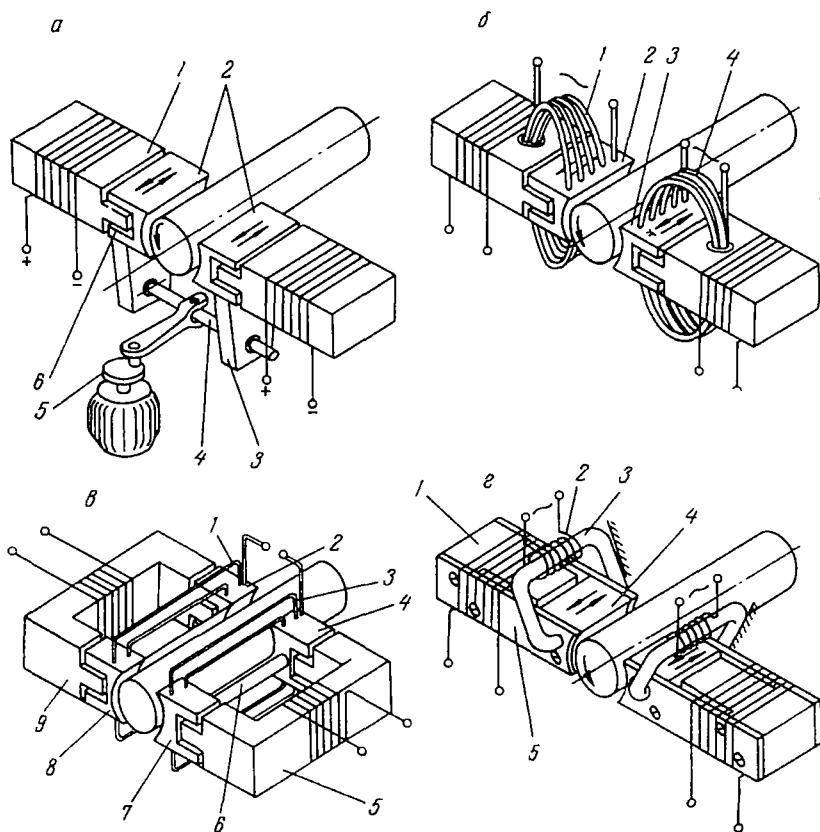


Рис. 4.32. Схемы механизмов осцилляции полюсных наконечников

Электромеханический привод (рис. 4.32, а) построен по известной схеме кривошипно-шатунного механизма. Полюсные наконечники 2, связанные с сердечниками 1 шариковыми направляющими 6, имеют кронштейны 3 из немагнитного материала, в отверстия которых входит скалка 4. При перемещении сердечников в процессе настройки скалка скользит в отверстиях кронштейнов. Амплитуда осцилляции регулируется при помощи эксцентрика 5, а частота — двигателем постоянного тока или же при помощи сменных шестерен.

Электродинамический привод осцилляции наконечников (рис. 4.32, б) основан на взаимодействии переменного тока, протекающего по введенным в наконечники 2, 3 виткам обмоток 1 и 4, с постоянным магнитным потоком, пронизывающим полюсные наконечники. В этом случае, согласно известным законам электродинамики, на витки действует переменная по величине и направлению сила, смещающая эти витки, а следова-

тельно, и жестко связанные с ними наконечники параллельно обрабатываемой поверхности. В результате полюсные наконечники приводятся в осциллирующее движение, причем смещаются синхронно или в противофазе в зависимости от вида соединения обмоток 1 и 4.

Части витков обмоток 1 и 4, находящиеся вне полюсных наконечников и сердечников, не препятствуют движению осцилляции, поскольку сами витки являются гибкими и их длина выбрана с учетом возникающих деформаций.

Амплитуда и частота осцилляций регулируются соответствующим изменением величины и частоты тока в обмотках 1 и 4.

Преимуществами схемы являются: большая конструктивная простота, отсутствие подвижных соединений, испытывающих инерционные нагрузки, простота регулирования амплитуды и достижения смещения наконечников в противофазе. К недостаткам следует отнести работу витков обмоток 1 и 4 на перегиб, что ограничивает амплитуду и снижает надежность устройства.

Этого недостатка лишена схема, представленная на рис. 4.32, в, где в отличие от предыдущей использованы подковообразные сердечники 5 и 9, каждый из которых снабжен парой подвижных полюсных наконечников соответственно 2, 8 и 4, 7. Наконечники каждой пары жестко связаны между собой немагнитной стяжкой 6 и сквозь них пропущены витки обмотки 1 и 3 переменного тока. Принцип действия аналогичен предыдущей схеме, однако здесь витки обмоток переменного тока не работают на изгиб.

Силы, действующие на полюсные наконечники одной пары, складываются, в результате чего достигается более полное использование энергии переменного тока и мощность привода может быть повышена.

Предложенная схема особенно приемлема для обработки длинных деталей.

Дальнейшее совершенствование приводов осцилляций полюсных наконечников привело к созданию и конструктивной разработке поляризованного электромагнитного привода.

Поляризованный электромагнитный привод (рис. 4.32, г) включает в себя маломощный электромагнит переменного тока, состоящий из подковообразного ярма 3 и обмотки 2. Ярмо 3 установлено непосредственно на сердечнике 1 таким образом, что наконечник 4 располагается между его полюсами с некоторыми зазорами. Сам полюсный наконечник связан с сердечником посредством плоских пружин 5 с возможностью колебаний на них. При прохождении переменного тока по обмотке 2 возникает переменный магнитный поток, который взаимодействует с постоянным магнитным потоком, создаваемым

мым основными катушками следующим образом: в первую половину периода концы ярма 3 получают определенную полярность N и S . Наконечник 4, предварительно поляризованный постоянным магнитным потоком и, следовательно, имеющий постоянную полярность, например N , будет притягиваться к южному полюсу ярма 3 и отталкиваться от северного и в результате сместится вдоль поверхности детали. Во вторую половину периода полярность концов ярма 3 изменится и наконечник сместится в противоположную сторону. В результате полюсный наконечник получает интенсивное осциллирующее движение с частотой, равной частоте переменного тока, и амплитудой, пропорциональной его величине.

Пружины 5 играют двоякую роль: с одной стороны, они берут на себя функции направляющих, обеспечивая зазор между полюсным наконечником и торцом сердечника, а с другой — являются упругими элементами, возвращающими наконечник в среднее положение и стабилизирующими процесс осцилляции. Использование резонансного режима работы пружин позволяет снизить энергозатраты на осцилляцию.

Поляризованный электромагнитный привод обладает выгодным соотношением энергозатрат на осцилляцию и отличается большой конструктивной простотой.

Кинематика механизмов осцилляции полюсов. Электромеханический привод осцилляции полюсных наконечников имеет жесткую амплитудно-частотную характеристику.

Закон движения полюсного наконечника является синусоидальным, т. е. $x = A \sin \omega t$.

Средняя скорость осцилляции полюсного наконечника является гармонической функцией времени, т. е.

$$\frac{dx}{dt} = v = A\omega \cos \omega t. \quad (4.74)$$

Чтобы установить, насколько точно зерна ферромагнитного порошка повторяют траекторию движения полюсов электромагнита, проводили следующие эксперименты.

Полюсным наконечникам сообщалось осциллирующее движение с частотой $f = 30$ гц. В рабочий зазор ($\delta = 1-3$ мм) помещался порошок чугуна зернистостью 0,3 мм. Зона обработки освещалась строботачометром, настроенным на частоту 30 гц, при этом колебания полюсов зрительно не наблюдались.

В описанных условиях наблюдалось медленное перемещение зерен порошка. Часть их смещалась относительно полюсного наконечника вдоль рабочего зазора, а часть совершала переход из слоев, непосредственно прилегающих к поверхности обрабатываемой детали, в слои, прилегающие к полюсному наконечнику.

С увеличением рабочего зазора перемещение зерен ферро- порошка, зрительно наблюдаемое в свете строботометра, увеличивалось.

Таким образом, зерна ферропорошка движутся не строго по синусоидальному закону (как сами полюсные наконечники), а с некоторым отклонением, которое тем существенней, чем больше величина рабочего зазора или соответственно меньше индукция в зазорах.

Зерна ферропорошка интенсивно перемещаются в рабочей зоне, причем внешне их движение похоже на «кипение». На поверхности образцов четко просматривается сетка рисок, нанесенных зернами ферропорошка, причем угол наклона сетки меняется в зависимости от соотношения окружной скорости вращения образца и скорости осцилляции полюсных наконечников.

Для уменьшения проскальзывания зерен порошка целесообразно работать на малых зазорах ($\delta = 0,5 - 0,8$ мм). При этом с целью предотвращения заклиннивания системы целесообразно на рабочей поверхности полюсных наконечников выпилить насечку.

В исследованиях были опробованы насечки в виде однозаходной винтовой спирали, многозаходной винтовой спирали и многозаходной винтовой спирали, выполненной в двух направлениях (правая и левая). Угол профиля нарезки составлял 90° , вершины гребешков имели скругление $R = 0,2$ мм.

В случае перекрестной насечки на рабочей поверхности полюсных наконечников образовывалась система пирамидок, расположенных в шахматном порядке. Как показало наблюдение, лучшие результаты обеспечиваются перекрестной насечкой. В данном случае сетка на поверхности деталей четко выражена, угол наклона сетки соответствует расчетному. Неплохие результаты обеспечивает и однозаходная винтовая нарезка, однако при величине амплитуды, меньшей шага нарезки, на обработанной поверхности появляются темные полосы.

Определенный интерес представляет схема механизма осцилляции полюсов электромагнита, представленная на рис. 4.32, *г*, в которой полюсные наконечники совершают колебательное движение не только вдоль обрабатываемой поверхности, но и в плоскости, ей перпендикулярной. В результате изменяются не только рабочие зазоры, но и зазоры между торцом наконечника и сердечником электромагнита.

Для расчета величины изменения зазора $\Delta\delta$ от номинального значения может быть использована схема на рис. 4.33, *а*.

С достаточной степенью приближения к реальному процессу считаем, что пружины изгибаются только в точках защемления.

Тогда

$$\Delta\delta = \frac{A}{2 \operatorname{tg} \beta} = \frac{A}{2 \operatorname{tg} \alpha/2}, \quad (4.75)$$

где
$$\beta = \frac{180 - \alpha}{2}; \quad (4.76)$$

$$\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} = \frac{L - \frac{\Delta\delta}{2}}{A} = \frac{4L - 2\Delta\delta}{A}. \quad (4.77)$$

Решая уравнения (4.75) и (4.77) относительно $\Delta\delta$, получаем окончательно

$$\Delta\delta = L \pm \frac{\sqrt{4L^2 - A^2}}{2}. \quad (4.78)$$

Зависимость $\Delta\delta$ от амплитуды колебания при различных значениях длины пружины L представлена на рис. 4.33, б.

Анализ полученных зависимостей показывает, что изменение рабочих зазоров в процессе колебаний весьма незначительно и для амплитуды 3—5 мм составляет в среднем 0,01—0,02 мм.

Так как ферромагнитный порошок в рабочих зазорах сформирован магнитным полем в упругую подвижную массу, то можно считать, что существенных изменений в процессе обработки не произойдет.

Динамика механизмов осцилляции полюсов. В общем случае уравнение движения осциллирующего полюсного наконечника имеет вид

$$m\bar{a} = \sum_{i=1}^n \bar{F}_i = \bar{F}_\Sigma + \bar{F}_c + \bar{F}_{\text{рез}} + \bar{F}_{\text{тр}}, \quad (4.79)$$

где a — ускорение полюсного наконечника; m — масса полюсного наконечника; F_Σ — суммарная внешняя сила, под воздействием которой система совершает колебательное движение; F_c — сила сопротивления, оказываемая магнитным потоком на перемещающийся в нем полюсный наконечник; $F_{\text{рез}}$ — сила резания, развиваемая зернами ферропорошка при осцилляции; $F_{\text{тр}}$ — сила трения в направляющих полюсного наконечника.

Сила сопротивления является результатом взаимодействия основного магнитного потока с магнитным полем тока, индуцированного в подвижном наконечнике при пересечении им основного потока, и может быть определена следующим образом:

$$F_c = -\lambda\Phi_n^2 x, \quad (4.80)$$

где λ — коэффициент, зависящий от размерности величин; Φ_{II} — постоянный магнитный поток.

Вообще говоря, $F_{рез}$ и $F_{тр}$ за период колебания могут изменяться, но с достаточной степенью точности можно считать, что $F_{рез} = \text{const}$, $F_{тр} = \text{const}$.

Для конкретных условий обработки $F_{рез}$ подлежит экспериментальному определению.

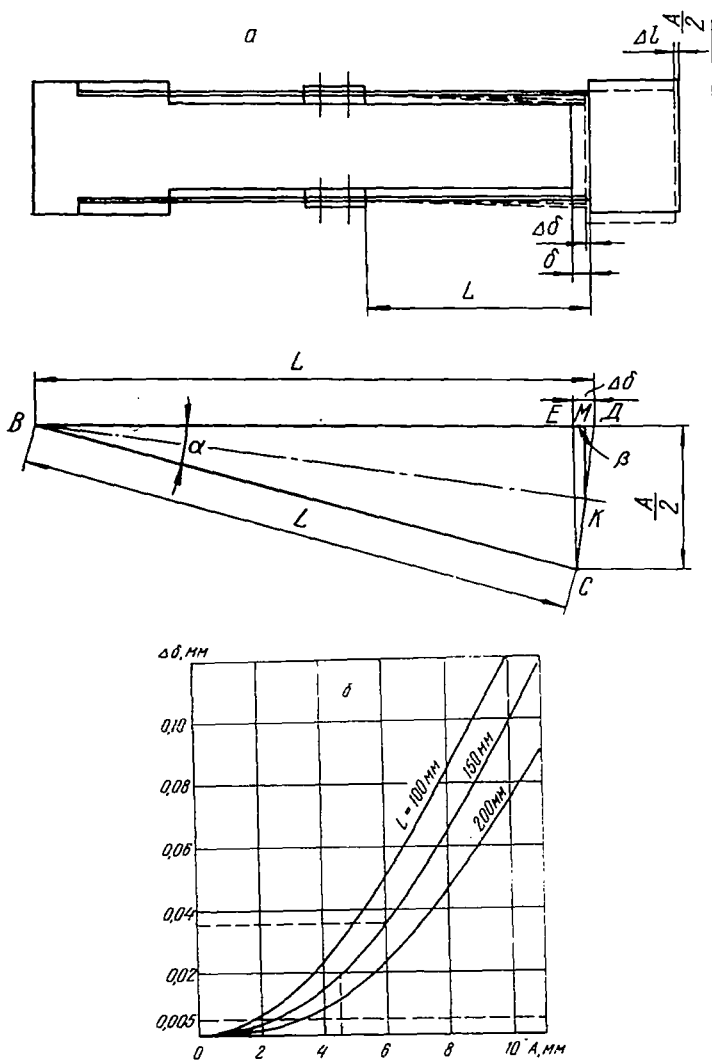


Рис. 4.33. Изменение рабочего зазора в зависимости от амплитуды осцилляции полюсного наконечника

Пренебрегая относительно малым весом самого полюсного наконечника, силу трения в его направляющих в первом приближении можно найти следующим образом:

$$F_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} F_{\text{пр}}, \quad (4.81)$$

где $k_{\text{тр}}$ — коэффициент трения в направляющих; $F_{\text{пр}}$ — сила, с которой наконечник притягивается к торцу сердечника:

$$F_{\text{пр}} = \frac{B^2 S}{2\mu_0}. \quad (4.82)$$

Учитывая, что $B = \Phi_n / S$, где S — площадь наконечника в плоскости, перпендикулярной направлению потока, получаем

$$F_{\text{тр}} = \frac{k_{\text{тр}}}{2\mu_0 S} \Phi_n^2. \quad (4.83)$$

Принимая $k_{\text{тр}} / 2\mu_0 S = \beta$, имеем

$$F_{\text{тр}} = \beta \Phi_n^2. \quad (4.84)$$

Таким образом, дифференциальное уравнение движения полюсного наконечника в окончательном виде можно записать

$$m\ddot{x} = F_{\Sigma} - \lambda \Phi_n^2 x - F_{\text{рез}} \operatorname{sign} \dot{x} t - \beta \Phi_n^2 \operatorname{sign} x \sin \omega t. \quad (4.85)$$

В различных приводах оцилляции природа внешней силы, вызывающей процесс колебаний, различна.

В электромеханическом приводе колебания обеспечиваются кинематически посредством кривошипно-шатунного механизма.

Этот привод позволяет получить стабильную амплитуду даже при некоторой перегрузке системы. Параметром регулирования амплитуды является величина эксцентриситета.

В электродинамическом приводе роль внешней силы играет сила электродинамического взаимодействия переменного тока с постоянным магнитным потоком, величина которой может быть найдена следующим образом:

$$F_{\text{э.д.}} = \lambda B I^a \sin \omega t l n, \quad (4.86)$$

где λ — коэффициент, зависящий от выбора размерности величин; B — индукция магнитного потока, пронизывающего витки обмотки переменного тока; l — длина той части каждого витка, которая пересекается магнитным потоком; n — число проводников; I^a — амплитудное значение переменного тока.

Если величина магнитного потока выбирается из оптимальных условий обработки, то амплитудное значение переменного тока будет являться параметром регулирования оцилляций.

В поляризованном электромагнитном приводе внешней силой является сила электромагнитного взаимодействия поляризованного наконечника с полюсами электромагнита переменного тока.

Определение этого усилия расчетным путем представляет сложную задачу даже для классических систем поляризованных электромагнитов, а в данном случае имеются к тому же существенные отличия от классических систем.

Суммарный магнитный поток в каждом зазоре δ вибратора (см. рис. 4.32, *г*) складывается из двух составляющих:

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{\text{в}} + \Phi_{\text{пол}}, \quad (4.87)$$

где $\Phi_{\text{в}}$ — поток, обеспечиваемый катушкой вибратора; $\Phi_{\text{пол}}$ — рассеянный поток поляризации.

При этом

$$\Phi_{\text{в}} = \Phi_{\text{в}}^a \sin \omega t, \quad (4.88)$$

где $\Phi_{\text{в}}^a$ — амплитудное значение переменного потока вибратора.

Эффект взаимодействия поляризованного наконечника с полюсами вибратора таков, что поток поляризации как бы увеличивает амплитуду потока вибратора, и суммарный магнитный поток можно представить в виде

$$\Phi_{\Sigma} = (\Phi_0 + \Phi_{\text{пол}}) \sin \omega t = \Phi_{\Sigma}^a \sin \omega t, \quad (4.89)$$

где Φ_{Σ}^a — амплитудное значение суммарного потока.

Отсюда следует вывод, что при постоянном $\Phi_{\text{пол}}$ параметром регулирования осцилляции является относительно маломощный поток вибратора.

На основе теоретических и экспериментальных исследований получены интервалы регулирования жесткости упругой системы. На рис. 4.34 представлена зависимость амплитуды

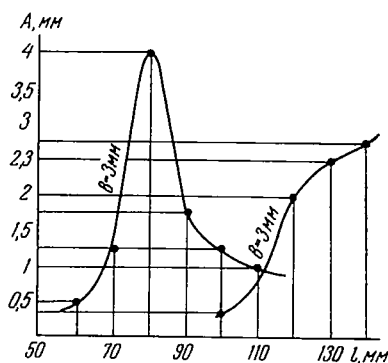


Рис. 4.34. Зависимость амплитуды осцилляции полюсных наконечников от длины вылета пружины

колебания полюсных наконечников от вылета L пружины при работе без нагрузки.

Исследования проводились для двух типов пружин толщиной $b=1,5$ мм и 3 мм. Амплитуда измерялась согласно методике, изложенной в предыдущей главе. Как видно из графиков, при толщине пружины $b=1,5$ мм амплитуда резко возрастает, т. е. частоты вынужденных и собственных колебаний системы совпадают и наблюдается явление резонанса. Для пружины толщиной 3 мм резонансная длина вылета пружины превышает конструктивно допустимый вылет экспериментального устройства.

Поляризованный электромагнитный привод осцилляции полюсных наконечников. Для детальной проверки практической целесообразности создания привода осцилляции полюсных наконечников за счет наложения дополнительного переменного магнитного поля опытную установку магнитно-абразивной обработки модернизировали следующим образом.

Вместо сплошных сердечников были установлены сердечники, связанные посредством плоских пружин с подвижными полюсными наконечниками (рис. 4.35).

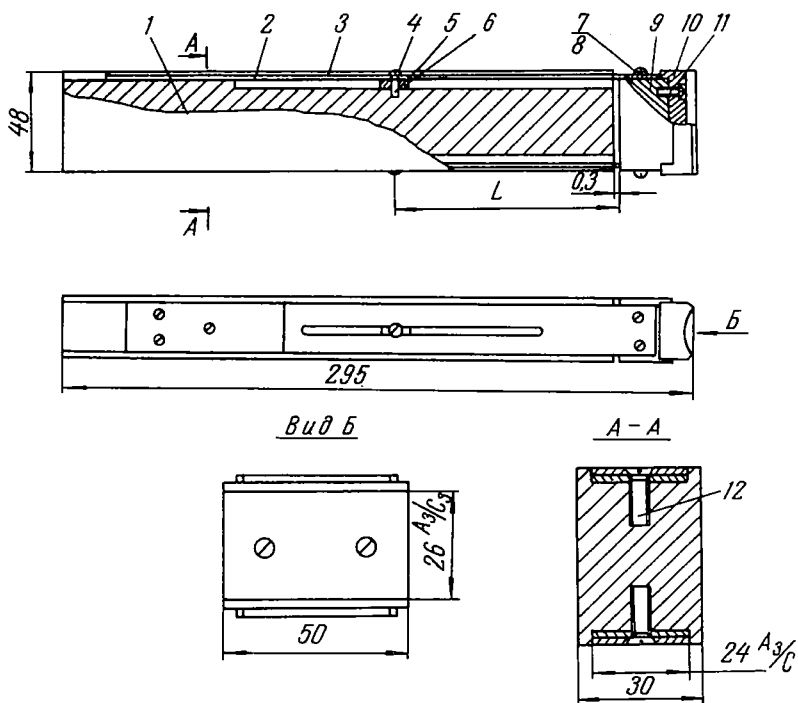


Рис. 4.35. Конструкция сборных полюсных наконечников на плоских пружинах

Вылет пружины 3 регулировался при помощи подвижного упора 6, в результате чего изменялась жесткость пружины и, следовательно, амплитуда колебаний.

Зазор между торцом сердечника и торцом полюсного наконечника составлял 0,3 мм, что вполне достаточно для колебаний наконечника и вызывает незначительные потери магнитной индукции в рабочем зазоре между полюсом и деталью.

Пружины были изготовлены из стали 65Г и термообработаны. Полюсные наконечники изготовлены из стали Ст. 3 и отожжены.

На сердечник 1 (рис. 4.35) с помощью планок 2 винтами 12 крепились пружины 3. Регулировка жесткости пружины 3 производилась с помощью движка 6, прикрепляемого к сердечнику 1 винтом 4 с шайбой 5. Второй конец пружины 3 винтами 7 с пружинными шайбами 8 крепился к корпусу подвижной части сердечника 9. Сменный полюсный наконечник 10 устанавливался в шпоночный паз корпуса 9 и фиксировался со стороны рабочей поверхности винтами 11. Для сообщения корпусу 9 осциллирующего движения на сердечник 1 устанавливался кронштейн (уголок), к которому с помощью планки и винтов крепился вибратор. Ядро вибратора состояло из медной или латунной оболочки, плотно заполненной низкоуглеродистой отожженной проволокой. Общий диаметр ядра 16 мм, диаметр проволоки 2 мм.

Катушка вибратора намотана из провода ПЭЛ-2 Ø 0,9 мм, количество витков — 800. Ток в катушке составлял 3 а.

Вибратор обеспечивал устойчивые колебания полюсного наконечника с частотой 50 гц и амплитудой 2 мм, при этом вылет пружин составлял 120 мм.

Испытание метода магнитно-абразивной обработки с осцилляцией полюсов на реальных деталях. Поверхность шейки сальника полуоси тяги рулевого управления автомобиля ЗИЛ по техническим условиям должна иметь шероховатость, соответствующую 9-му классу по ГОСТ 2789-59. На ремонтных предприятиях это достигается шлифованием и ручным полированием наждачной бумагой. Для повышения качества обработки и улучшения условий труда предложено заменить ручное полирование магнитно-абразивным с условием, что окончательная обработка шейки должна производиться одновременно со шлифованием с внутреннего торца фланца полуоси.

Исследования проводились на образцах, равных по размерам шейке полуоси, изготовленных из той же стали (40ХГГ) и имеющих такую же твердость (HRC 40—44). Перед полированием образцы шлифовались до 7-го класса чистоты. Шероховатость поверхности до и после обработки измерялась на профиллометре-профиллографе модели 201 завода «Калибр».

Обработка образцов производилась на установке с осциллирующими полюсными наконечниками, приводимыми в движение от индивидуального электродвигателя через кривошипно-шатунный механизм, при следующих постоянных режимах: магнитная индукция $B=1$ тл; рабочий зазор $\delta=1$ мм; амплитуда осцилляции $A=5$ мм; частота осцилляции $f=1440$ кол/мин; грануляция порошка $\Delta=0,21-0,3$ мм. В качестве ферромагнитных порошков использовались стальная стружка, чугунный порошок, применяемый в дробеструйных установках, и керметы.

В результате исследований получены зависимости шероховатости обрабатываемой поверхности от скорости вращения образца, времени обработки и материала порошка (рис. 4.36). Из графиков следует, что с увеличением скорости вращения обрабатываемой детали и продолжительности обработки шероховатость поверхности уменьшается. Требуемый по чертежу 9-й класс чистоты достигается при обработке керметами за 30 сек при окружной скорости детали $v_d=22$ м/мин.

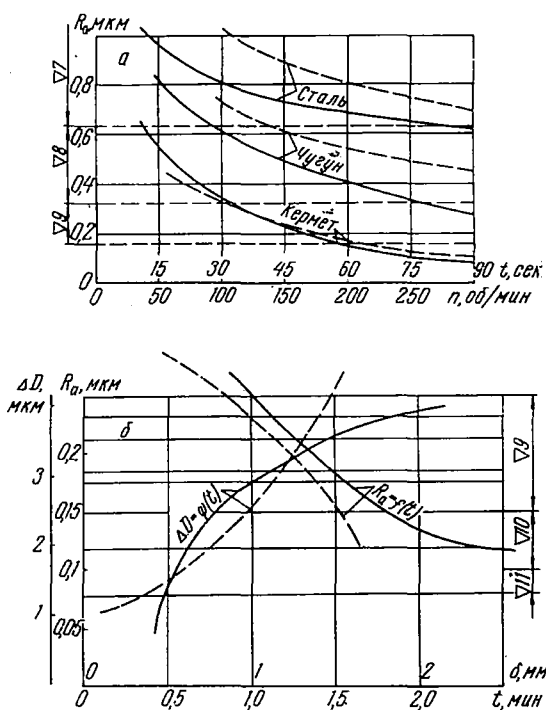


Рис. 4.36. Зависимости шероховатости от времени обработки и числа оборотов детали (а) и шероховатости и размерного съема от времени обработки и рабочего зазора (б): пунктирная линия — $R_a=f(\delta)$ при $n=160$ об/мин; сплошная — $R_a=f(t)$ при $t=60$ сек

Порошок из чугуна обеспечивает 9-й класс чистоты при $v_d = 36-41,5$ м/мин и $t_{\text{маши}} = 60$ сек. Стальной порошок в данном случае за 1,5 мин не позволяет получить даже 8-го класса чистоты.

Штоки гидроцилиндров электрических грузоподъемных механизмов требуют по техническим условиям 10-го класса чистоты и в настоящее время полируются вручную пастами или абразивной лентой.

Для исследований возможности замены существующего процесса магнитно-абразивным использовались образцы, имеющие твердость HRC 50—55 и предварительно шлифованные до 8-го класса шероховатости.

Магнитно-абразивная обработка выполнялась при следующих режимах: магнитная индукция $B = 1,2$ тл; время обработки $t_{\text{маши}} = 2$ мин; рабочий зазор $\delta = 2$ мм; окружная скорость образца $v_d = 95$ м/мин; частота осцилляции $f = 1440$ кол/мин; амплитуда осцилляции $A = 4$ мм; охлаждающая жидкость — эмульсия.

Предварительными экспериментами было установлено, что 10-го класса чистоты можно достичь при использовании порошка из белого чугуна зернистостью $\Delta = 0,21-0,3$ мм. Поэтому, в дальнейших исследованиях использовался именно этот порошок.

На рис. 4.36, б показана зависимость размерного съема и шероховатости R_a от $t_{\text{маши}}$ (рабочий зазор для этих экспериментов был принят равным 1 мм). Из графика следует, что с увеличением времени обработки съем металла с обрабатываемой поверхности, а следовательно, и производительность монотонно возрастают, а шероховатость поверхности уменьшается. 10-й класс чистоты достигается за 2 мин.

Так как на результаты обработки большое влияние оказывает величина зазора между обрабатываемой деталью и полюсами электромагнита, было проведено исследование и этой зависимости. При использовании полюсных наконечников с гладкой рабочей поверхностью минимальная величина зазора ограничивается размерами ферромагнитных зерен: она должна быть равной трем-пяти наибольшим размерам зерен. Поэтому для исследования влияния зазора на съем металла и шероховатость поверхности применялись полюсные наконечники с рифленной рабочей поверхностью.

Эксперименты проводились при тех же режимах и материале порошка, за исключением $t_{\text{маши}}$, которое в данном случае составляло 1,5 мин.

Как видно из рис. 4.36, б, уменьшение ширины зазора с 1,5 до 0,5 мм приводит к увеличению съема металла с 1,5 до 3,8 мкм и уменьшению шероховатости поверхности от $R_a = 0,26$ мкм ($\nabla 9a$) до $R_a = 0,11$ мкм ($\nabla 10$).

Применение рифленых полюсных наконечников благодаря возможности уменьшения рабочего зазора до 0,5 мм позволяет существенно повысить эффективность обработки.

Итак, в результате выполненных исследований были предложены, изготовлены и испытаны электромеханический, электродинамический и поляризованный электромагнитный приводы осцилляции полюсов электромагнитов.

Как показали исследования и опыт эксплуатации разработанных устройств, использование шариковых или роликовых направляющих вызывает большие потери на трение, так как сам полюсный наконечник интенсивно притягивается к сердечнику. Поэтому наиболее простым в изготовлении и надежным в эксплуатации является поляризованный электромагнитный привод осцилляции наконечников.

Монтаж наконечника на упругих элементах (плоские пружины и т. п.) позволяет избежать этого недостатка и стабилизирует колебания, однако кинематика движения самого наконечника усложняется.

Использование насеченных рабочих поверхностей наконечников позволяет производить обработку на небольших зазорах и способствует интенсивной осцилляции самого ферропорошка.

13. Устройства для дозирования ферромагнитного порошка

Бункерно-дозировочные устройства для чистовой обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками должны обеспечивать автоматическую подачу ферропорошка в нужный момент времени и в строго определенной дозе с возможностью ее регулирования.

Для исследований [23] использовался бункер с регулируемой при помощи заслонки выходной щелью. Аналогичную, но более совершенную конструкцию имеет бункер-дозатор, разработанный в Минском СКБ-3 (см. рис. 4.5).

При подаче бункера пневмоприводом в зону обработки заслонка под воздействием неподвижно установленных кулачков открывается и ферропорошок поступает в рабочие зазоры. Дозирование осуществляется за время выдержки открытой заслонки. При обратном ходе бункера заслонка закрывается.

В наших исследованиях в качестве дозаторов порошка применялись шибберные механизмы.

В литературе по дозирующим устройствам [13] описан ряд конструкций бункеров-дозаторов для сыпучих и мелкокусковых материалов, однако построенных опять же на основе

использования регулирующих и ограничивающих элементов типа заслонок, задвижек и т. д.

Исследования показали, что использование заслонок, шиберов, задвижек и т. п. элементов, работающих в среде ферромагнитного абразива, ведет к их быстрому износу и заклиниванию, а также вызывает необходимость иметь специальный привод для перемещения регулирующих элементов.

Особенности дозируемого материала (хорошие ферромагнитные свойства) позволили предложить принципиально новую конструкцию бункеров-дозаторов, основанных на использовании магнитной «заслонки», или «пробки» (рис. 4.37).

Под воздействием магнитного поля, пронизывающего выпускной канал 1 дозатора (рис. 4.37, а), зерна ферропорошка удерживаются магнитным полем и образуют плотную пробку, препятствующую высыпанию порошка. Магнитный поток может быть создан или за счет катушки 2, непосредственно намотанной вокруг канала, или за счет специальной электромагнитной системы, состоящей из сердечников 2 и 5 и катушек 3, 4 (рис. 4.37, б).

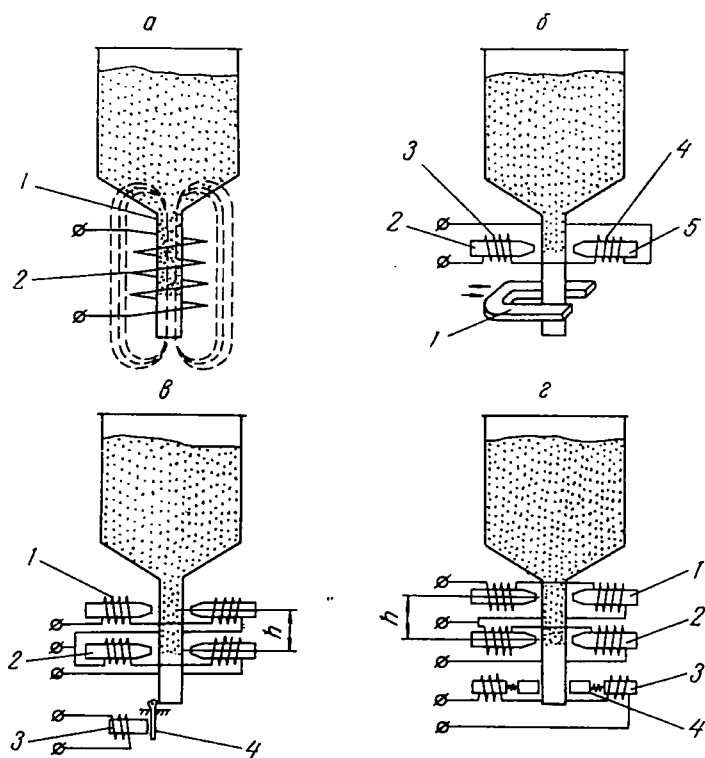


Рис. 4.37. Схемы бункеров-дозаторов

При выключении катушек порошок свободно высыпается из канала до тех пор, пока они вновь не будут включены.

Таким образом, дозирование порошка здесь производится по времени.

Предложенная конструкция предельно проста и не содержит ни одного элемента, перемещающегося в среде ферромагнитного абразива.

Регулируя, например, с помощью реле время между включением и выключением катушки можно легко дозировать величину порции порошка.

На рис. 4.37, в представлена конструкция бункера, основанная также на принципе магнитной «заслонки», но с дозированием по объему. Узел дозирования ферропорошка состоит из двух электромагнитных систем 1 и 2. Нижняя система неподвижна, а верхняя имеет возможность перемещения вдоль канала и фиксации в определенном положении.

При включенной нижней электромагнитной системе порошок заполняет канал вплоть до образовавшейся пробки.

При выключении нижней системы и одновременном включении верхней происходит отсечка объема порошка, заключенного в канале между обеими системами, и высыпание его из бункера.

Регулирование подаваемой дозы порошка в данном случае достигается изменением расстояния h между электромагнитными системами.

Для того чтобы избежать высыпания порошка из бункера в случае обесточивания всех систем дозатора, использованы специальные запирающие системы, в качестве которых могут служить: постоянный магнит 1 (рис. 4.37, б), перемещаемый вручную; подпружиненные постоянные магниты 4, срабатывающие при отсутствии питания на электромагнитах 3 (рис. 4.37, г); подпружиненная заслонка, захлопывающаяся при обесточивании электромагнита 3 (рис. 4.37, в).

Запирающие системы работают лишь вначале и по окончании работы на станке, а также в аварийных ситуациях.

Для выбора оптимального варианта электромагнитной системы, обеспечивающей создание «пробки» из ферропорошка, были проведены предварительные испытания дозаторов, представленных на рис. 4.37, а, б, которые выявили некоторые недостатки варианта с катушкой, непосредственно намотанной вокруг выходного канала дозатора.

В этом случае магнитно-силовые линии направлены вдоль выходного канала, и магнитное поле катушки, проходя по ферропорошку, находящемуся в верхней части бункера, пытается перераспределить его симметрично относительно поперечной оси. В результате порошок при включенной катушке как бы вытягивается полем из выходного канала.

Для устранения указанного явления за счет более сильного торможения зерен в канале приходится увеличивать ток в катушке, что ведет к увеличению ее габаритов или перегреву.

Второй вариант (рис. 4.37, б) лишен этого недостатка, так как обеспечивает получение локального концентрированного магнитного потока, направленного не вдоль, а поперек канала, что создает наиболее благоприятные условия для появления магнитной пробки.

Исходя из результатов предварительных испытаний, для дальнейших исследований был выбран второй вариант как обеспечивающий более оптимальные условия для запырения порошка в канале.

Объем бункера 2 л. Сечение выходного канала 20×5 мм². Катушки электромагнитных систем намотаны проводом ПЭЛ-2 $\varnothing 0,3$ мм и содержат каждая по 4000 витков.

Расстояние между верхней и нижней электромагнитными системами изменялось от 25 до 40 мм.

Питание катушек осуществлялось постоянным током от выпрямителя с регулируемыми параметрами.

Параметры тока в катушках дозатора замерялись миллиамперметром и вольтметром. Магнитная индукция замерялась с помощью датчика и милливеберметра. Взвешивание дозы порошка производилось на аналитических весах с точностью до 0,1 г. Исследования проводились для порошков железа, отбеленного чугуна, ферробора и кермета ЭБМ40 + 80% Fe зернистостью каждый 40, 50 и 70 мкм Б. П. Борисовым.

Исследовалось наименьшее значение магнитной индукции $B_{\text{мин}}$, при котором происходит надежное запираание выходного канала дозатора.

Для того чтобы выяснить влияние уровня заполнения бункера на $B_{\text{мин}}$, замеры тока и магнитной индукции проводили при максимальном и минимальном заполнении бункера ферропорошком. Установлено, что для процесса образования магнитной пробки существенное значение имеет начальное состояние ферромагнитного порошка в выходном канале, а именно находится он в состоянии покоя или движения. В связи с этим $B_{\text{мин}}$ определялось по двум методикам:

а) ток в катушках дозатора изменялся от заранее заданного значения $I > I_{\text{мин}}$, при этом происходило надежное запираание канала до $I_{\text{мин}}$, ниже которого наблюдается слабое просыпание порошка;

б) ток в катушках дозатора изменялся от значения $I < I_{\text{мин}}$, при котором происходит истечение порошка из канала, до $I_{\text{мин}}$, когда истечение прекращается и происходит запираание канала.

Результаты исследований отображены на графике (рис. 4.38, а). Точки 1 и 2 на кривой (рис. 4.38, а) соответствуют

значениям $I_{\text{мин}}$ и $B_{\text{мин}}$ для всех ис-
рошков и их зернистостей при непод-
ка в канале, причем точка 1 характ-
уровень порошка в бункере, а точка 2 — минимальный...

Аналогично точки 3 и 4 соответствуют значениям $I_{\text{мин}}$
и $B_{\text{мин}}$ для случая движущегося порошка.

На основе анализа полученных данных можно сделать сле-
дующие выводы:

1. Зернистость и материал ферромагнитного порошка ока-
зывают весьма слабое влияние на $B_{\text{мин}}$, при котором происходи-
т надежное запираание канала. Это объясняется, по-видимо-
му, тем, что все испытываемые ферропорошки обладают хороши-
ми ферромагнитными свойствами, мало зависящими от грану-
ляции самого порошка.

2. Рост уровня заполнения бункера порошком влияет на
значения $I_{\text{мин}}$ и $B_{\text{мин}}$ в сторону их увеличения.

3. Наибольшее влияние на минимальные значения тока и
индукции оказывает первоначальное состояние дозируемого
порошка.

При неподвижном порошке в канале $I_{\text{мин}}$ и $B_{\text{мин}}$ имеют
меньшие значения, чем для случая движущегося порошка.

Это объясняется тем, что движущийся порошок, обладая
определенной скоростью, успевает пройти зону действия маг-
нитного потока в канале без образования магнитной пробки.
Для компенсации этого явления значение $B_{\text{мин}}$ должно быть
соответственно увеличено, что и наблюдалось в экспери-
ментах.

4. В целях надежного запираания ферропорошка для любо-
го его состояния, всех исследованных материалов и зернисто-
стей значение магнитной индукции в канале дозатора должно
быть не менее 250—300 гс.

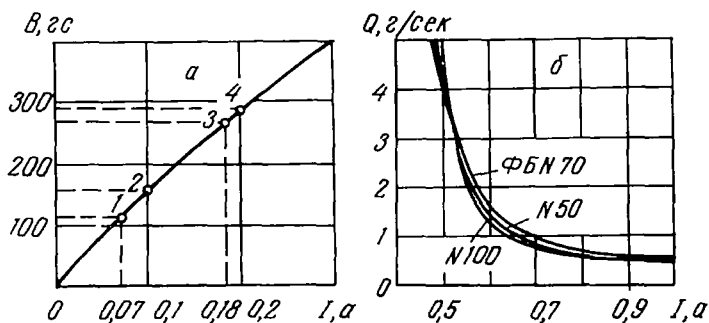


Рис. 4.38. Зависимости потребляемого тока и магнитной индукции от уров-
ня заполнения бункера (а) и удельного расхода порошка от тока в ка-
тушках затвора (б)

питания катушек дозатора
проведена серия экспериментов, кото-

... магнитной пробки и надежное запираание канала происходит и при переменном магнитном потоке, однако значение тока в катушках и соответственно магнитной индукции значительно выше, чем при питании катушек постоянным током, и составляет 0,5—0,6 а;

2) при значениях тока $I < 0,5$ а наблюдается просыпание порошка, но не непрерывное, а микродозами, величина которых зависит от величины тока. Таким образом, имеется возможность использования предложенных дозаторов, питаемых переменным током, для непрерывной регулируемой подачи ферромагнитных порошков, например при упрочняюще-восстановливающей электроферромагнитной обработке.

Результаты экспериментов, показывающих зависимость удельного расхода порошка от силы переменного тока, приведены на рис. 4.38, б.

Время непрерывной подачи порошка для каждого значения переменного тока в катушках дозатора составляло 10 сек.

Удельная подача порошка подсчитывалась по формуле

$$Q_y = \frac{G_{\pi}}{t} \text{ Г/сек.} \quad (4.90)$$

Кроме того, были проведены исследования стабильности подачи ферромагнитного порошка при помощи бункера-дозатора.

При порционном дозировании критерием оценки точности дозирования является отношение величины максимальных отклонений к величине отмериваемой порции [13]

$$K = \frac{\Delta G}{G_{\pi}} \cdot 100\%, \quad (4.91)$$

где K — погрешность дозирования, %; ΔG — максимальное отклонение порции от заданного значения; G_{π} — среднее значение порции.

Погрешность дозирования, подсчитанная по результатам замеров разных порошков зернистостью 40 мкм, составила для кермета ЭБМ40 + 80% Fe 4,6%; для ферробора 5,3%; для чугуна 3,5%; для железа 5,8%.

Таким образом, средняя погрешность дозирования составляет около 5%. Эта точность дозирования является вполне достаточной.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Метод обработки деталей в магнитном поле порошками с ферромагнитными и абразивными свойствами получил признание и промышленное использование.

В настоящей главе сделана попытка классифицировать поверхности деталей и известные или возможные кинематические схемы механизмов, обеспечивающих их обработку в магнитном поле, на основе имеющейся отечественной и зарубежной информации.

1. Классификация поверхностей, обрабатываемых магнитно-абразивным методом

Накопленный различными исследователями опыт и данные многочисленных экспериментов показывают, что метод позволяет обрабатывать, во-первых, поверхности деталей неправильной геометрической формы (при этом энергия магнитного поля используется для сообщения элементам ферромагнитного порошка кинетической энергии); во-вторых, наружные и внутренние поверхности тел вращения, плоскости, сферы, фасонные поверхности, крупногабаритные и мелкие детали, которые другими известными методами полировать затруднительно или невозможно (при этом энергия магнитного поля используется в качестве связующего вещества, удерживающего порошок в зоне резания). На рис. 5.1—5.4 показаны наиболее характерные поверхности деталей, которые можно обрабатывать магнитно-абразивным методом.

Установлено, что при обработке деталей в магнитном поле порошками производительность процесса (съем материала за единицу времени) и качество обработанной поверхности в значительной мере определяются технологическими параметрами, т. е. скоростями относительных движений порошка и детали,

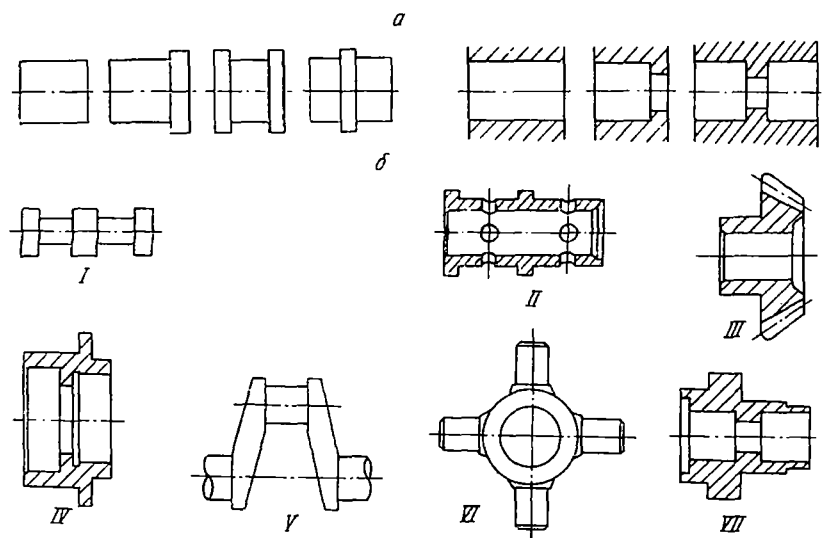
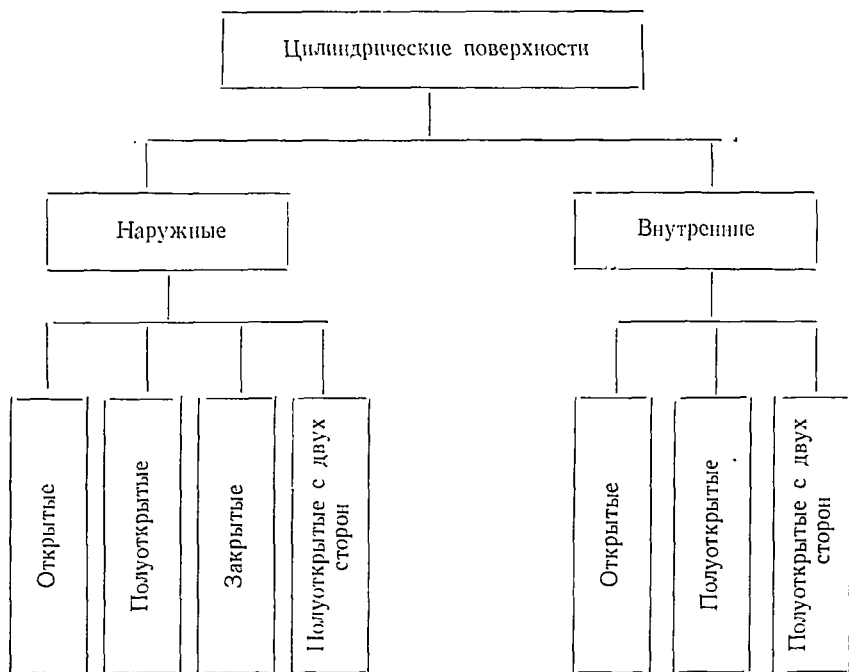


Рис. 5.1. Цилиндрические поверхности: *a* — схемы обрабатываемых поверхностей; *b* — примеры поверхностей на деталях. I — золотник; II — гильза золотника; III — полуосевая шестерня дифференциала; IV — ступница реакторов; V — коленвал; VI — крестовина дифференциала; VII — корпус топливopодкачивающего насоса

размахом и частотой их колебаний, зернистостью порошков, магнитной индукцией и величиной рабочих зазоров, формой магнитных систем, составом смазывающе-охлаждающей жидкости и порошка. Величины и характер технологических параметров процесса в большой мере определяются геометрической формой деталей, техническими условиями на их изготовление, принятой схемой механизма, осуществляющего магнитно-абразивную обработку, и материалом детали. Поэтому при группировании поверхностей деталей, подлежащих магнитно-абразивной обработке по видам, учитывалось сродство их форм и размеров.

На рис. 5.1 показан класс цилиндрических наружных и внутренних поверхностей, приведены их схемы и примеры конкретных деталей, обрабатываемых магнитно-абразивным методом. Наиболее простую форму в данном случае имеют наружные и внутренние открытые поверхности вращения типа втулок, колец, гильз и т. д. При этом магнитно-абразивная обработка возможна на минимальных рабочих зазорах между полюсами магнита и поверхностью детали, с большими амплитудами колебаний детали или полюсов. Значительно большую трудность при установлении оптимальных параметров процесса представляют детали, имеющие полуоткрытые или закрытые поверхности. В данном случае возникают сложности при обработке торцовых поверхностей в зонах перехода, а также галтелей и радиусов.

При обработке конических поверхностей (рис. 5.2), кроме указанных выше особенностей, часто необходимо учитывать то обстоятельство, что различие диаметров конуса вызывает различную интенсивность съема материала с его поверхности, а поэтому при равномерном рабочем зазоре между полюсами электромагнита и обрабатываемой поверхностью возможно искажение формы последней. В данном случае, если техническими условиями чертежа предусмотрены жесткие допуски на поверхность конуса и его размеры, следует экспериментально подбирать форму полюсов магнита, удовлетворяющую этим требованиям.

Определенный интерес представляет класс поверхностей деталей (рис. 5.3), представляющих полную сферу (шаровую поверхность), полусферу, сферический пояс или сферическую лунку. Каждая из указанных на рис. 5.3 поверхностей требует своеобразной, принципиально отличной схемы механизмов, осуществляющих магнитно-абразивную обработку. Так, например, для обработки сателлита дифференциала достаточно наличия двух относительных движений: вращения и осцилляции детали или полюсов. Полирование поверхности шара требует наличия трех движений — вращения полюсов электромагнита и осцилляции одного из них в вертикальной или горизон-

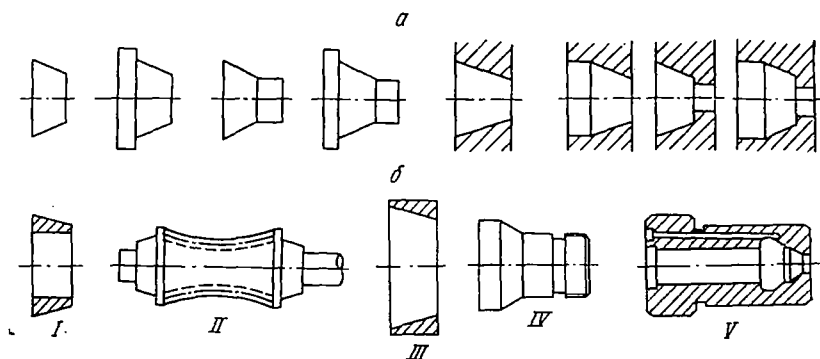
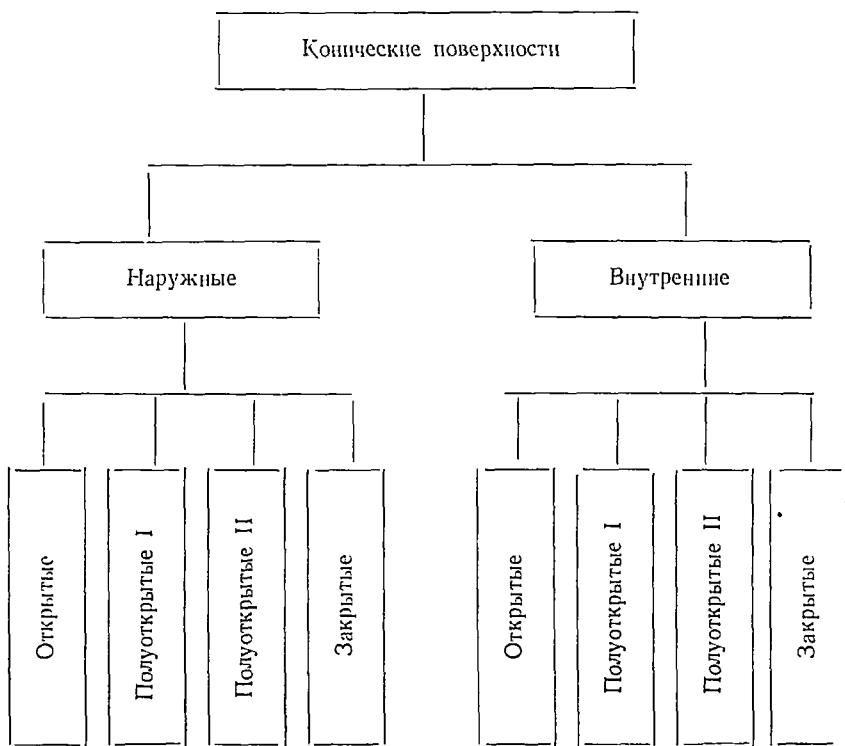
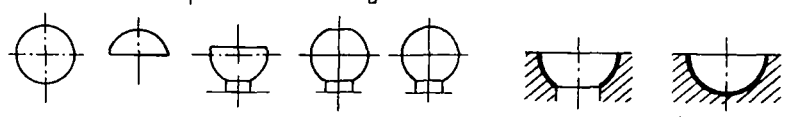


Рис. 5.2. Конические поверхности: *a* — схемы обрабатываемых поверхностей; *b* — примеры поверхностей на деталях. I — внутреннее кольцо подшипника; II — червяк рулевого управления; III — наружное кольцо подшипника; IV — седло нагнетательного клапана топливного насоса; V — корпус распылителя форсунки



a



б

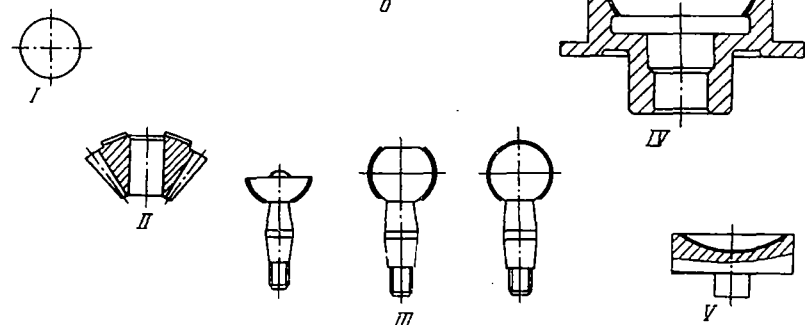


Рис. 5.3. Сферические поверхности: *a* — схемы обрабатываемых поверхностей; *б* — примеры поверхностей на деталях. *I* — шарик шарикоподшипника; *II* — спутник дифференциала; *III* — шаровые пальцы рулевого управления; *IV* — чашка дифференциала; *V* — сухарь шаровой опоры

тальной плоскости. Обработка сферической лунки вызывает необходимость сообщения полюсу магнита или детали вращения вокруг собственной оси и качания (осцилляции) вокруг заданного центра.

Большую группу составляют плоские поверхности, которые необходимо полировать до высоких классов чистоты. К этому классу относят не только плоскости как таковые, но и торцовые поверхности тел вращения, обрабатываемые по одному и тому же принципу. К классу плоскостей отнесены открытые поверхности без буртов (рис. 5.4), полуоткрытые — с одним или двумя буртиками и закрытые с пересекающимися буртами или сложной формы. Накопленный опыт показывает, что при магнитно-абразивной обработке плоских поверхностей возможны три варианта компоновки станков: с односторонней замкнутой магнитной системой (см. рис. 4.26), с применением барабанов, несущих систему электромагнитов (см. рис. 4.24), и с полностью замкнутой системой магнитов, при которой магнитные силовые линии пронизывают обрабатываемую деталь. Наиболее просты по конструкции первая и вторая схемы для магнитно-абразивной обработки плоскостей, позволяющие осуществлять процесс путем модернизации известного металлорежущего оборудования. Однако эти схемы обеспечивают низкую производительность и позволяют полировать только открытые поверхности. Более высокую производительность обеспечивают станки для полирования плоскостей, использующие схему, показанную на рис. 4.25. По этой схеме возможно осуществлять магнитно-абразивную обработку как закрытых, так и открытых поверхностей.

Несколько особо стоит класс деталей, имеющих сложную или неправильную форму поверхностей. К этому классу относят детали медицинских инструментов (ножниц, щипцов, крючков, долот и т. д.), крылья велосипедов, мотоциклов, лопатки компрессоров, турбин и другие детали машин и механизмов. Использование метода магнитно-абразивной обработки для полирования указанного типа деталей требует наиболее сложного оборудования, обеспечивающего сочетание трех и более относительных движений детали, полюсов магнита или порошка. Так, например, для полирования медицинских инструментов созданы станки, с помощью которых детали сообщается вращение вокруг собственной оси и планетарное вокруг оси диамагнитного кольцевого контейнера, а также качательное движение в вертикальной или горизонтальной плоскостях. При магнитно-абразивной обработке пера лопатки компрессора детали сообщают два движения осцилляции и планетарное по оси контейнера.

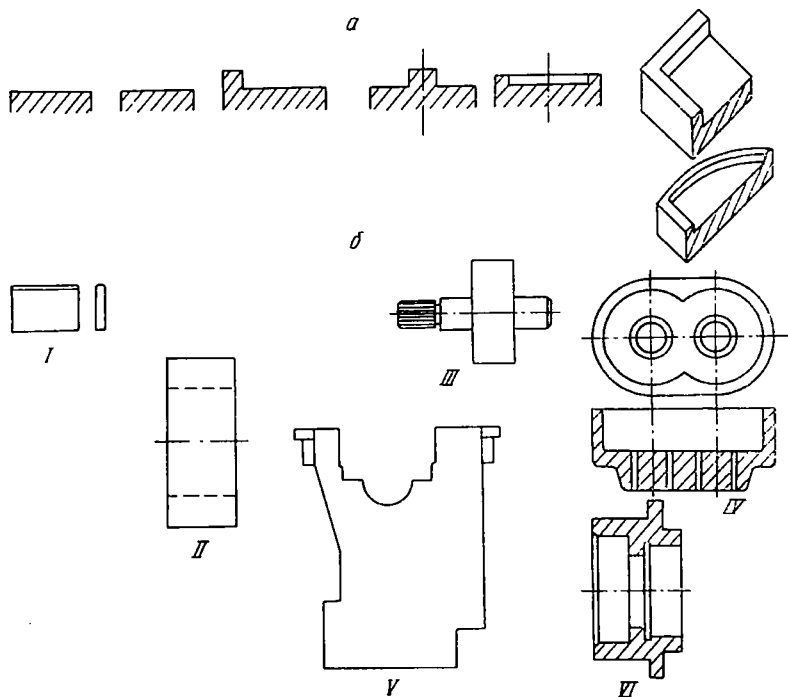


Рис. 5.4. Плоские поверхности: *a* — схемы обрабатываемых поверхностей; *б* — примеры поверхностей на деталях. *I* — лопатка насоса; *II* — статор лопастного насоса; *III* — шестерня масляного насоса; *IV* — корпус масляного насоса; *V* — блок цилиндров; *VI* — ступица реакторов

2. Кинематика магнитно-абразивной обработки

Используя работы в области кинематики резания и формообразования [3—7], авторы данной книги сделали попытку проанализировать и классифицировать уже известные или возможные кинематические схемы магнитно-абразивной обработки различных по геометрической форме поверхностей изделий порошками с ферромагнитными, комбинированными (ферромагнитными и абразивными) или только абразивными свойствами.

Изучение способов и схем обработки изделий в магнитном поле свободными порошками показывает, что их многообразие объединяется общим элементом — энергией магнитного поля, затраты которой на единицу обрабатываемой поверхности зависят от состояния поверхностного слоя, материала, геометрических размеров и формы изделия, причем чем выше класс изделия, тем меньше энергии необходимо на единицу обрабатываемой поверхности.

Поэтому кинематические схемы механических систем устройств для магнитно-абразивной обработки анализировались и классифицировались с точки зрения трехмерного пространства, т. е. с учетом геометрической формы и габаритных размеров изделий, времени, вида относительных движений изделия и инструмента-порошка (непрерывное, дискретное, пульсирующее); энергии — вида магнитного поля, возбуждаемого в рабочих зазорах под действием электромагнита на постоянном или пульсирующем (выпрямленном) токе, а также импульсного с различной частотой возбуждения и дискретного действия.

При анализе изучался комплекс вопросов, связывающих кинематику механических систем, сообщающих обрабатываемому изделию относительные движения, с кинематикой перемещения элементов порошка, осуществляемого под действием сил трения и намагничивания. Каждый элемент движения рассматривался независимо от способа его образования, т. е. независимо от того, возбуждается ли это движение механизмами станка, возникает в результате взаимодействия зерен порошка с находящимся в относительном движении изделием или наводится действием магнитных сил. При анализе принципиальных кинематических схем магнитно-абразивной обработки не принимались в расчет движения холостых ходов, в течение которых элементы порошка не взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью. За основу классификации были приняты определенные сочетания относительных движений изделия и порошка, образующие данную схему или группу кинематических схем. При этом были приняты следующие допущения:

1) не учитывалось изменение макро- и микрогеометрии поверхностей под действием физико-механических явлений, сопутствующих процессу магнитно-абразивной обработки, т. е. вопросы классификации рассматривались с чисто геометрических и кинематических позиций;

2) полагалось, что каждую кинематическую схему представляют траектории относительных движений фиксированного элемента порошка и точки поверхности изделия в процессе ее обработки;

3) полагалось также, что форма и положение элемента порошка относительно обрабатываемой поверхности изделия известны;

4) предполагалось, что в конечном итоге все принципиальные кинематические схемы магнитно-абразивной обработки образуются путем сочетания прямолинейного и вращательного движений изделия, элементов порошка, магнитной и механической систем станков и приспособлений.

В табл. 5.1 приведена классификация принципиальных кинематических схем магнитно-абразивной обработки, сгруппированных по видам относительных движений элементов порошка и изделия с учетом габаритных размеров и геометрической формы последнего, а также по видам наводимого в рабочих зазорах магнитного поля. По характеру и количеству относительных движений указанных элементов кинематические схемы подразделены на четыре класса.

1. Поверхность возникает прерывисто в двух измерениях — продольном и поперечном.

Изделие в зависимости от габаритов и геометрической формы может находиться в стационарном положении или совершать поступательное, вращательное, осциллирующее движение в двух плоскостях или комбинированное движение, сочетающее поступательные и осциллирующие движения в двух плоскостях, в одном или во взаимно перпендикулярных направлениях. Элементы ферромагнитного порошка при этом совершают прямолинейные движения, оканчивающиеся динамическим воздействием на поверхность изделия, подобно метанию дроби (песка) при дробеструйной обработке. Магнитная система неподвижна или совершает относительные движения вдоль поверхности изделия, выполняя роль механизма, сообщаящего кинетическую энергию элементам порошка.

По указанному методу обрабатываются плоскости с прямолинейной или фасонной поверхностью, несущей канавки, пазы, рифления и т. п.

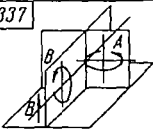
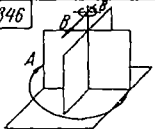
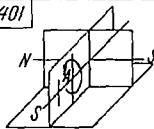
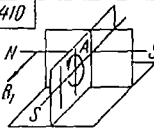
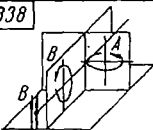
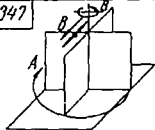
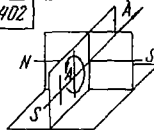
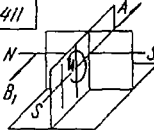
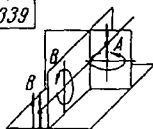
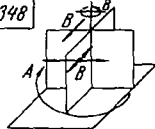
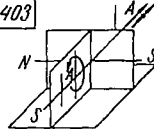
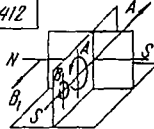
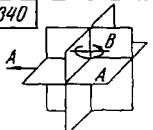
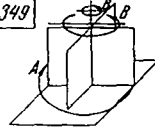
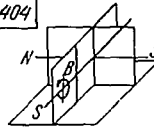
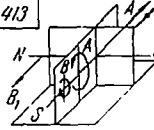
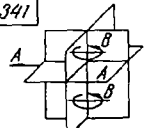
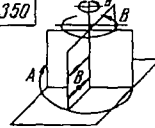
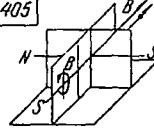
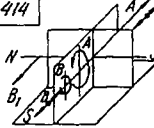
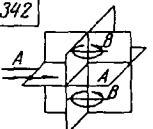
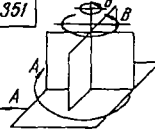
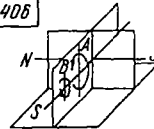
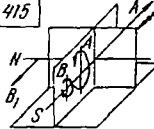
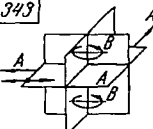
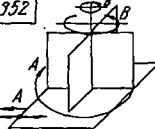
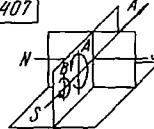
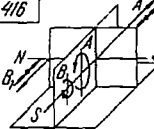
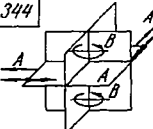
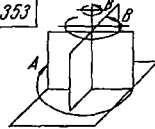
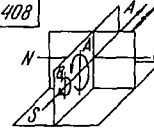
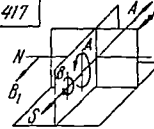
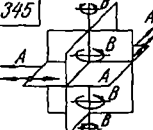
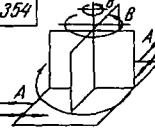
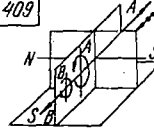
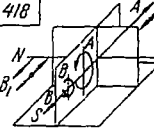
2. Поверхность возникает непрерывно в одном направлении и дискретно в двух других. К данному классу относятся механизмы, работающие по принципу изменяющего поляриность, бегущего и вращающегося магнитного поля.

Классификация кинематических схем механизмов для магнитной

Таблица 5.1
нитно-абразивной обработки (А — изделие, Б — порошок, В — система)

1-й класс			2-й класс
101	102	103	201
104	105	106	202
107	108	109	203
110	111	112	204
113	114	115	205
116	117	118	206
119	120	121	207
122	123	124	208
125	126	127	209

3-й класс			
301	310	319	328
302	311	320	329
303	312	321	330
304	313	322	331
305	314	323	332
306	315	324	333
307	316	325	334
308	317	326	335
309	318	327	336

3-й класс		4-й класс	
337 	346 	401 	410 
338 	347 	402 	411 
339 	348 	403 	412 
340 	349 	404 	413 
341 	350 	405 	414 
342 	351 	406 	415 
343 	352 	407 	416 
344 	353 	408 	417 
345 	354 	409 	418 

Основную работу резания при магнитно-абразивной обработке по данной группе кинематических схем выполняют вращающиеся (бегущие) вокруг оси магнитной системы элементы ферромагнитного порошка. Если изделия имеют незначительные габаритные размеры (например, иглы, оси и т. п. детали) и изготовлены из ферромагнитного материала, то относительное вращательное движение в бегущем магнитном поле сообщается детали. В качестве режущего инструмента в последнем случае применяется абразивный диамагнитный порошок, находящийся во взвешенном состоянии в специальном контейнере.

По данному методу обрабатываются мелкие цилиндрические детали типа игл и осей, а также изделия, имеющие неправильную или сложную геометрическую форму и значительные размеры, типа крыльев, буферов автомашин, коленчатых валов, лопастей ходовых винтов и другие детали.

Крупногабаритные изделия при магнитно-абразивной обработке находятся в фиксированном положении или совершают элементарные движения с незначительной поступательной или вращательной скоростью. Магнитная система в свою очередь может при необходимости совершать относительные поступательные, осциллирующие или колебательные движения в противофазе.

3. Поверхность возникает одновременно (мгновенно) в одном направлении и дискретно в двух других направлениях. Элементы ферромагнитного порошка при этом удерживаются на поверхности полюсов электромагнитной системы силами магнитного поля и совершают незначительные колебания под действием сил трения. Изделие или магнитная система совершают принудительные простые или сложные относительные движения: поступательное, вращательное, качательное, осциллирующее или комбинированное (сочетание двух или более простых движений).

Это наиболее многочисленный класс по количеству кинематических схем магнитно-абразивной обработки. По характеру относительных движений изделия и магнитной системы схемы, входящие в третий класс, подразделены на следующие группы:

а) схемы, в которых изделию сообщается в зависимости от размеров и геометрической формы поверхности принудительное вращательное, вращательное в сочетании с поступательным или то и другое с наложением осциллирующего движения и стационарным расположением магнитной системы;

б) схемы, у которых неподвижным в процессе обработки является изделие, а относительное движение (простое или сложное) сообщается магнитной системе;

в) схемы, сочетающие относительные движения как изделия, так и магнитной системы. При этом возможны сочетания двух вращательных движений изделия и магнитной системы в одной или различных плоскостях; поступательного движения изделия с вращением магнита и, наоборот, поступательного с осциллирующей движений в различных направлениях изделия и магнита и т. д.

По данной схеме обрабатываются плоскости, валы, сферические поверхности, детали сложной геометрической формы и другие поверхности.

4. Поверхность возникает одновременно (мгновенно) в одном направлении и непрерывно в другом, что соответствует обработке отверстий в изделиях различной длины и диаметров.

Приведенные в табл. 5.1 кинематические схемы магнитно-абразивной обработки отражают многообразие внешних явлений, характеризующих описываемый процесс. В дальнейшем задача состоит в том, чтобы вскрыть единство внутренних связей процесса, т. е. характер генерации образующей и направляющей во времени, и выработать единый критерий для всех способов формообразования различных поверхностей. С другой стороны, анализ приведенной в табл. 5.1 классификации уже на современном этапе изучения процесса магнитно-абразивной обработки позволяет систематизировать известные способы и дать толчок творческой мысли ученых и конструкторов для создания новых механизмов и станков.

Ниже на конкретных примерах разбираются схемы установок и станков для магнитно-абразивной обработки, иллюстрируемые табл. 5.1.

3. Возможные схемы магнитно-абразивной обработки

Для иллюстрации предложенной нами классификации кинематических схем механизмов для магнитно-абразивной обработки деталей ниже приведено описание ряда схем и способов, заимствованных из имеющейся отечественной и зарубежной информации, а также описаний патентов и авторских свидетельств.

Обработка неподвижных деталей больших габаритов. Простейшей формой осуществления способа обработки деталей с использованием энергии магнитного поля явилась схема, при которой деталь и магнитная система неподвижны, а ферромагнитный порошок совершает возвратно-поступательное движение за счет дискретного изменения полярности магнита [11]. При этом деталь 3 помещается в контейнер 2 из диамагнитного материала (рис. 5.5) и в процессе обработки находится

ся в стационарном положении. Работу резания осуществляет поток абразивных частиц ферромагнитного порошка, осциллирующих внутри контейнера в переменных направлениях и с высокой скоростью ударяющихся о полируемую поверхность. Абразивные частицы намагничены, и направление их перемещения контролируется одним или несколькими магнитными полями. Для обеспечения возможности перемещения частиц порошка они находятся во взвешенном состоянии в жидкости.

Применение для крупногабаритных деталей полировального устройства, работающего по магнитно-абразивному методу, позволяет обрабатывать изделия с небольшими полостями, пазами и отверстиями, гарантирует безопасность оператора, так как отсутствуют механические движения снаружи контейнера. Процесс осуществляется автоматически и не зависит от квалификации рабочего.

Полирование деталей магнитно-абразивным методом по схеме устройства, приведенного на рис. 5.5, осуществляется в следующем порядке.

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

Как видно из рис. 5.5, в контейнере 2 находится полируемое изделие 3. Контейнер заполнен смесью из ферромагнитных частиц и жидкости. Ферромагнитным порошком могут служить небольшие частицы стали, чугуна или другого материала.

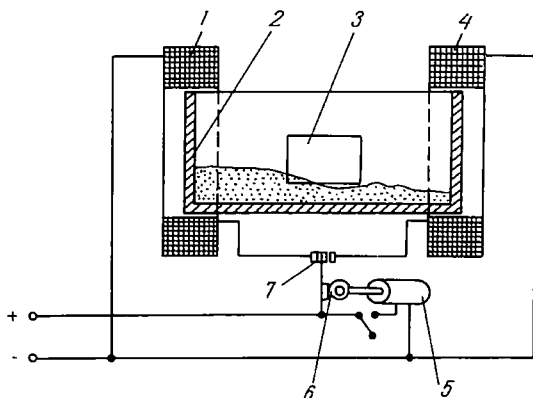


Рис. 5.5. Схема устройства для обработки крупногабаритных деталей

ла, а жидкостью может быть вода, эмульсия, легкое масло или любое другое подходящее вещество, обеспечивающее поддержание частиц во взвешенном состоянии. С двух сторон контейнера 2 укреплены магнитные катушки 1 и 4, соединенные с источником электроэнергии через переключатель 7. Практика показала, что может быть применен либо переменный, либо постоянный ток.

Переключатель 7 снабжен двойной парой контактов и кулачком 6, приводимым в действие двигателем 5, который контролирует среднюю контактную точку и вызывает вибрирование этой точки, в результате чего образуется переменный контакт с наружными контактными точками. Тем самым обеспечивается дискретное прохождение тока через каждую катушку 1 и 4. Под действием тока, проходящего по катушке 1, смесь смещена в одну сторону, контейнера. Во время работы полирующего устройства при условии быстрого переключения тока с одной катушки на другую смеси сообщается осциллирующее движение: она перемещается с одной стороны контейнера на другую, воздействуя на все стороны обрабатываемого изделия 3. Для различных типов полировальных операций консистенция смеси может значительно изменяться. Очевидно, что если обрабатываемое изделие 3 представляет собой полый цилиндр, у которого ось отверстия совпадает с осью катушек, то внутренняя поверхность цилиндра будет подвергаться полированию в той же степени, что и наружная.

Для изменения силы удара порошка о деталь применяется вспомогательная катушка, установленная под прямым углом к рабочим катушкам. Постоянный ток в данном случае по-прежнему попеременно подается к катушкам 1 и 4, а источник высокочастотного переменного тока соединен с вспомогательной катушкой. Наложение поля переменного тока на поле пульсирующего постоянного тока сообщает волнообразное движение ферромагнитным частицам в процессе их перемещения от одной стороны контейнера к другой. Переключающее устройство может иметь обмотку релейного типа, регулирующую виброязычок, соединенный с пружиной. Указанное переключающее устройство работает как обычный электрический звонок или зуммер, обеспечивая сдвиг электроэнергии с катушки 1 на катушку 4 через контакты 7.

Полирование деталей сложной формы, заточка и доводка режущего инструмента. Одна из основных трудностей повторной заточки режущих инструментов заключается в необходимости точной подгонки абразивного круга к контуру режущей кромки. По этой причине повторная заточка в большинстве случаев осуществляется вручную, а конечные результаты зависят от смекалки и опыта оператора. Аналогичная проблема характерна для шлифовки или полировки изделий сложной

конфигурации, таких, например, как шестерня, червячное колесо и т. п. Решению этих вопросов способствует применение способа магнитно-абразивной обработки изделий и заточки режущих кромок инструмента по описанной ниже схеме.

Данный способ магнитно-абразивной обработки отличается от предыдущего тем, что изделию сообщается принудительное движение по заданному закону при помощи механических, электрических, пневматических, гидравлических или других источников энергии [8].

Рабочий контейнер, как и на рис. 5.5, заполнен смесью, состоящей из абразивного порошка (например, карборунда), магнитного порошка (например, железные опилки) и жидкости, которой может быть любое из смазочных масел. В контейнере с рабочей смесью устанавливается изделие. Смесь подвергается действию переменного магнитного поля, намагничивающего и размагничивающего ее через короткий промежуток времени. Процесс перемагничивания смеси продолжается до тех пор, пока не достигается желаемый результат. Изменение магнитной силы, действующей на смесь, вызывает перемещение (осцилляцию) абразивных частиц на небольшое расстояние, в результате которого и осуществляется процесс полирования поверхности изделия сложной конфигурации.

Преимуществом данного метода в отличие от известных схем обработки является возможность полирования изделий сложной конфигурации без применения ручного труда и возможность автоматической заточки режущей кромки инструмента.

Отличительной особенностью данной схемы магнитно-абразивной обработки является магнитная смесь, периодически намагничиваемая и размагничиваемая. В период размагничивания абразивной смеси режущая кромка инструмента опускается в контейнер. При намагничивании смеси увеличивается ее плотность и осуществляется процесс полирования или заточки режущих кромок инструмента.

Другой особенностью данной схемы является наличие контейнера, несущего абразивную ферромагнитную смесь и оснащенного средством для ее намагничивания в определенном направлении. Через короткий промежуток времени направление действия магнитной силы изменяется и намагничивание смеси происходит в противоположном направлении. В результате перемагничивания абразивные частицы совершают осциллирующее движение по заданному закону. Эта осцилляция частиц используется для полирования погруженных в контейнер поверхностей изделий.

На рис. 5.6, а изображено поперечное сечение абразивного контейнера с магнитной системой и приспособлением для принудительной осцилляции изделия.

На рис. 5.6, б представлен другой вид подобной установки с частичным разрезом. Здесь изображено механическое устройство для подъема и опускания режущего инструмента.

На рис. 5.6, в представлен еще один вариант установки, работающей только на переменном токе. Последний используется здесь и для возбуждения магнитного поля и для приведения в действие устройства, перемещающего инструмент.

Как видно из рис. 5.6, а, контейнер 4 содержит смесь, состоящую из магнитных частиц и жидкости. Магнитный сердечник 2 установлен таким образом, что его концы, проходя через стенки контейнера, располагаются вблизи режущей кромки инструмента 3. Этот инструмент (например, лезвие скальпеля)

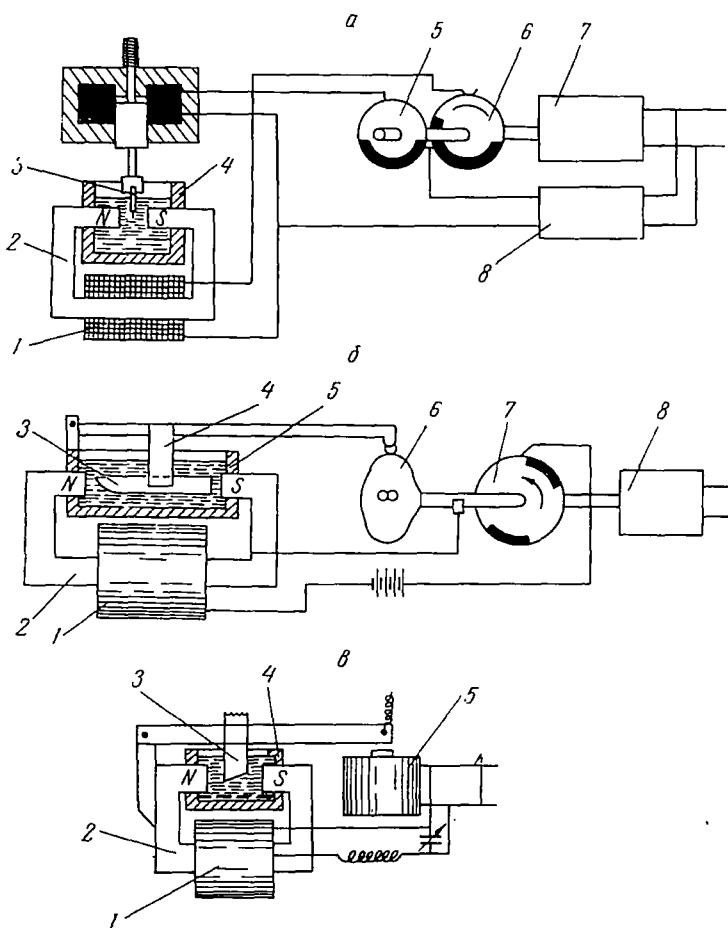


Рис. 5.6. Схемы устройств для полирования и заточки режущего инструмента

закрепляется в держателе, который в свою очередь закреплен в якоре электромагнита. Вторичная обмотка 1 располагается вокруг магнитного сердечника 2 для создания магнитного потока в сердечнике и смеси.

Пульсирующий ток в обмотку 1 подается от выпрямительной системы 8, подсоединенной к сети переменного тока. Для периодического прерывания цепи в этих обмотках предусмотрена система из двух переключателей 5 и 6, установленных на валу, который приводится в действие электродвигателем 7. Каждый из переключателей снабжен щеткой, соединенной с двумя обмотками.

Принцип действия этого устройства следующий. Условимся, что переключатели повернуты таким образом, что ни через одну из обмоток электромагнитов не проходит ток. В этом случае изделие (скальпель или другой режущий инструмент) 3 находится в самом нижнем положении контейнера 4, а смесь из-за отсутствия магнитного поля имеет наименьшую вязкость.

Если вал электродвигателя 7 повернуть в направлении часовой стрелки (как показано на рис. 5.6, а), то ток будет поступать вначале к обмотке 1 по цепи от выпрямителя 8. Затем, пройдя щетку на диске 5, ток поступит к обмотке электромагнита, сообщая детали поступательное движение, и назад к выпрямителю 8. Магнитная сила, возбуждаемая в сердечнике 1, вызывает повышение вязкости смеси, ввиду того что частицы железа в контейнере 4 притягиваются друг к другу, образуя плотную массу.

После обмотки 1 ток пройдет через переключатель 5 на обмотку электромагнита крепления детали. Это вызовет втягивание якоря в соленоид и перемещение полируемого изделия 3 в вертикальном направлении. Абразивные частицы смеси прижимаются к полируемой поверхности и обрабатывают ее. По мере вращения вала электродвигателя 7 изолирующие детали дисков 5 и 6 проскользнут под щетки. Цепь обмотки 1 окажется разомкнутой, и смесь возвратится к состоянию низкой вязкости. Затем разомкнется цепь обмотки электромагнита крепления детали, и лезвие полируемого инструмента 3 вновь опустится в абразивную смесь под действием пружины.

Скорость заточки режущего инструмента зависит от числа циклов в секунду, твердости инструмента и режущего действия абразивных частиц смеси.

Схема установки, изображенная на рис. 5.6, б, аналогична описанной выше. Здесь имеется контейнер 5, смесь, магнитный сердечник 2 и обмотка 1. Инструмент 3 закрепляется в опоре 4, которая в свою очередь прикрепляется к рычагу. Один конец рычага шарнирно соединен с опорой, а другой

скользит по кулачку 6. Кулачок 6 и переключатель 7 закреплены на валу электродвигателя 8. Напряжение на обмотку 1 подается от источника постоянного тока. Замыканием и размыканием цепи обмотки 1 управляет щетка, соединенная с коллектором и переключателем 7 на валу.

Принцип действия этого устройства аналогичен принципу действия устройства, изображенного на рис. 5.6, а, за исключением того, что инструмент 3 поднимается и опускается механическим кулачковым устройством, а не магнитом.

На рис. 5.6, в изображен еще один вариант магнитно-абразивной установки, в которой отсутствуют переключатели, кулачки и которая работает непосредственно от сети переменного тока. Это устройство состоит из контейнера 4, абразивной смеси, сердечника 2 и системы для крепления изделия.

Обмотка 1 соединена с сетью переменного тока через устройство смены фаз, состоящее из катушки индуктивности 5 и конденсатора, имеющих возможность независимой регулировки. Изделие 3 закрепляется на шарнирном рычаге. Последний приводится в качательное движение посредством магнита 5, у которого имеется полюс, расположенный вблизи конца рычага. Рычагу сообщается качание с частотой, равной частоте тока в сети.

Принцип действия описанного устройства аналогичен принципу действия устройств, изображенных на рис. 5.6, а и 5.6, б, за исключением того, что перемещение инструмента 3 осуществляется непосредственно под действием электромагнитной силы, а ток, проходящий через обмотку 1, возбуждается напряжением, поступающим из сети питания.

Из разобранных схем устройств, приведенных на рис. 5.5 и 5.6, видно, что эти устройства пригодны для полирования как внутренних, так и наружных поверхностей любых форм изделий. Обрабатываемое изделие может быть закреплено на специальной опоре или опорой может служить сам контейнер.

Приведенные описания свидетельствуют также о том, что абразивная смесь, состоящая из магнитных частиц, абразивных частиц и жидкости, может быть использована при наличии переменного магнитного поля для полирования поверхностей сложной формы и заточки режущих кромок.

Полирование поверхности деталей по методу вращающегося потока магнитной жидкой смеси. Настоящее устройство позволяет преодолеть многие недостатки существующих методов полирования изделий, обеспечивает тонкое шлифование поверхностей, удлинит срок службы абразивных частиц, а также позволяет автоматизировать процесс [9].

Автоматизация процесса в описываемом устройстве осуществляется путем применения магнитной жидкой среды, попеременно входящей во фрикционное взаимодействие с по-

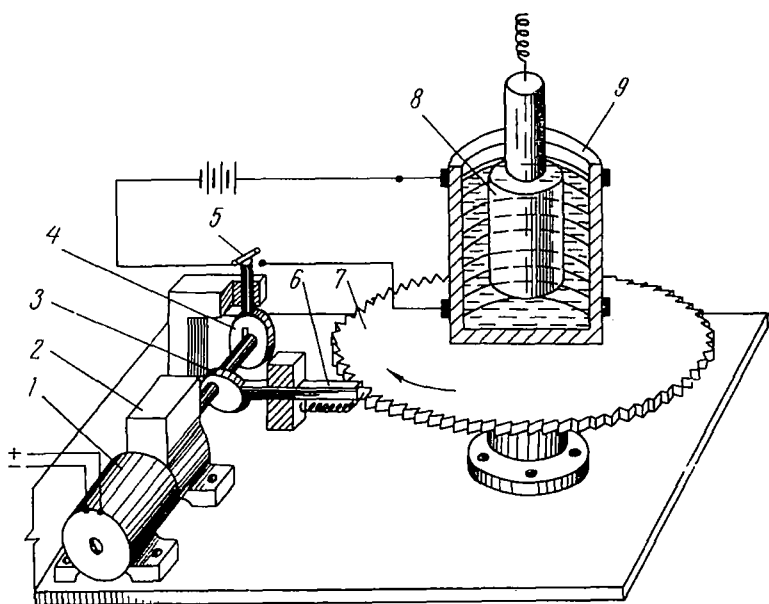


Рис. 5.7. Схема устройства для обработки пульсирующей детали в жидкой среде

верхностью полируемой детали, в то время как последняя совершает возвратно-поступательные перемещения в магнитной жидкости.

На рис. 5.7 показана схема устройства для осуществления метода.

Устройство состоит из контейнера 9, содержащего магнитную жидкую смесь, механизма вращения контейнера и питания электромагнита цилиндрической формы. Контейнер 9 присоединен к дисковому элементу, расположенному на планшайбе. Между верхней и нижней поверхностью планшайбы на наружной круглой ее части нарезаны зубья храпового колеса 7, которое зацепляется с собачкой 6. Зубья храпового колеса имеют обычную форму, часто встречающуюся в храповых механизмах. Диск — поворотный стол — может быть соединен с валиком, расположенным в центральной прорези, проходящей через диск с помощью шлицевого или шпоночного устройства. Нижний конец вала соединен с опорным элементом, который в свою очередь наглухо прикрепляется с помощью винтов или других средств к плите.

Собачка 6 имеет переднюю скошенную поверхность, предназначенную для зацепления с зубьями планшайбы 7, и может совершать скользящее возвратно-поступательное перемещение внутри подшипниковой опоры. Собачка 6 имеет обыч-

ную форму удлиненного стержня. Противоположный от колеса 7 конец собачки 6 находится во взаимодействии с кулачком 3, закрепленном на распределительном валу и удерживаемом от проворота при помощи шпоночного соединения. Вал соединен муфтой с выходным валиком редукторного механизма 2, который в свою очередь приводится во вращение от двухскоростного электродвигателя 1. Постоянство взаимодействия пятки собачки 6 с кулачком 3 обеспечивается пружиной. Пружина присоединяется одним своим концом к подшипниковому опорному элементу, а другим концом — к переднему торцу собачки 6 с помощью проушины. Второй кулачок 4 также монтируется на распределительном валу с некоторым зазором и удерживается от проворота шпоночным соединением. Кулачок 4 приводит в возвратно-поступательное движение закрепленный в кронштейне толкатель, который выполняет функцию устройства, управляющего работой переключателя полюсов 5.

Вокруг внутренней поверхности контейнера 9 в спиральных канавках расположены витки медного провода, по которым пропускается электрический ток для создания переменного магнитного поля, а также обмотка для изменения силы тока, что приводит к возникновению соответствующего магнитного потока. Коллекторные кольца, присоединенные к клеммам, служат для подачи тока к обмотке. Включая и выключая переключатель 5 с помощью толкателя, взаимодействующего с кулачком 4, создают электромагнитное поле внутри контейнера 9, что вызывает намагничивание магнитной жидкости и ориентацию частиц по направлению силовых линий. Следует иметь в виду, что устройство по принципу действия основано на применении как постоянного, так и переменного тока, причем при использовании источника переменного тока выводы могут непосредственно присоединяться к клеммам, минуя переключатель 5 и источник постоянного тока.

Работа описанного механизма осуществляется следующим образом: вращение электродвигателя 1, передаваемое через редуктор 2, вызывает вращение распределительного вала с кулачками 3 и 4. Вращение кулачка 3 заставляет собачку 6, удерживаемую пружиной, взаимодействовать с зубьями планшайбы 7, что обеспечивает поворот последней в направлении, указанном стрелкой. Это вращение, как показано, носит прерывистый характер, хотя при необходимости можно установить механизм, обеспечивающий непрерывное движение планшайбы. Контейнер 9, жестко соединенный с диском 7, также вращается, вызывая небольшое завихрение и вращение магнитной смеси. Одновременно вращение кулачка 4 вызывает попеременное включение и выключение переключателя 5 с интервалами, при которых возникает возбуждение обмоток электромагнита, расположенных в контейнере 9. При необхо-

димости обмотка электромагнита может иметь зазор с контейнером или быть изолированной от него. Наведение или отключение электрического тока в обмотке приводит к созданию магнитного поля, которое стремится сориентировать магнитные частицы, содержащиеся в магнитной жидкости. Деталь 8, если она металлическая, будет испытывать действие соленоида, благодаря чему происходит попеременное заглубление детали в магнитную жидкость. В этом случае деталь погружается в контейнер под действием магнитного поля, а выталкивается силой пружины. Если же деталь изготовлена из немагнитного материала, то для придания ей возвратно-поступательного (осциллирующего) колебания внутри контейнера с магнитной смесью применяются специальные механизмы.

Устройство обеспечивает весьма тонкое полирование, а также оптимальную автоматическую работу механизма, дающего полировальный эффект (т. е. непрерывное контактное взаимодействие абразивных частиц с поверхностью детали все новые кромками, что удлиняет срок службы частиц) и автоматическое возвратно-поступательное перемещение полируемых деталей в сочетании с вращением контейнера и содержащейся в нем магнитной смеси.

Как было указано выше, возможны модификации и изменения конструкции устройства в пределах приведенного описания.

Чистовая обработка стальных игл и других мелких цилиндрических деталей. Известны устройства [1] для чистовой обработки стальных игл и т. п. мелких изделий с использованием вращающегося магнитного поля, сообщающего относительное движение изделиям и жидкой абразивной смеси, помещенным в цилиндрический контейнер.

Особенностью этих механизмов является наличие дополнительных устройств перемешивания абразивной смеси в объеме контейнера, обеспечивающих движение немагнитных абразивных частиц в направлении, противоположном направлению движения изделий под воздействием вращающегося магнитного поля. Такая конструкция предотвращает шунтирование стальным цилиндрическим контейнером магнитного поля и потери в цилиндрическом контейнере, если он изготовлен из меди или ее сплавов.

На рис. 5.8 показана схема выполнения устройства для чистовой магнитно-абразивной обработки стальных игл и т. п. мелких изделий. В станине 6 закреплен статорный набор 5 из листовой трансформаторной стали. В пазах статора 5 уложена обмотка 4, аналогичная обмотке статора электродвигателя, работающего на трехфазном токе. Внутри обмотки 4 расположен цилиндрический контейнер 3, изготовленный из токопроводящего материала, например пластмассы, текстолита,

винилпласта, оргстекла и т. д. В контейнер загружаются подлежащие шлифованию мелкие изделия и заливается жидкая абразивная смесь.

После подачи напряжения на обмотку статора установки изделия приводятся во вращательное круговое движение и собираются к периферии контейнера.

В освободившееся в центральной части контейнера пространство опускается многолопастная мешалка 2, закрепленная на выходном валу электродвигателя 1. Контейнер 3 закрывается крышкой, прикрепленной к электродвигателю 1. По окончании цикла обработки изделий мешалка 2, электродвигатель 1 и крышка поднимаются вверх. Для облегчения подъема крышки к ней на тросике прикреплен противовес. Контейнер 3 с обрабатываемыми изделиями и абразивной смесью выдвигается из гнезда статора установки при помощи рычага с педалью.

На чертеже стрелкой *a* обозначено направление движения изделий под действием вращающегося поля, а стрелкой *б* — движение абразивной смеси, получаемого от мешалки 2.

Регулированием силы тока в обмотке статора и числа оборотов мешалки, подбором соответствующего соотношения между количеством абразива и жидкости в смеси, химического состава жидкости и зернистости абразива можно достичь оптимального сочетания параметров процесса и обеспечить высокопроизводительную обработку стальных игл и других мелких металлических деталей, крепление которых в применяемых шлифовально-полировальных станках затруднено.

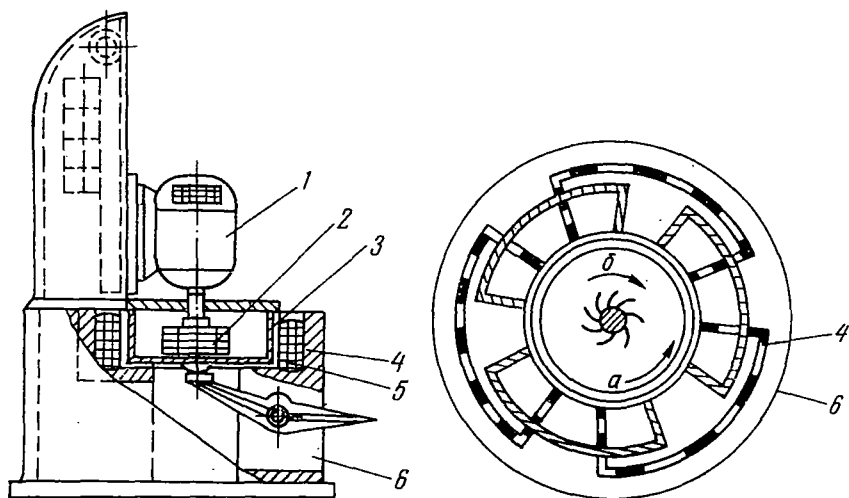


Рис. 5.8. Установка для полирования стальных игл

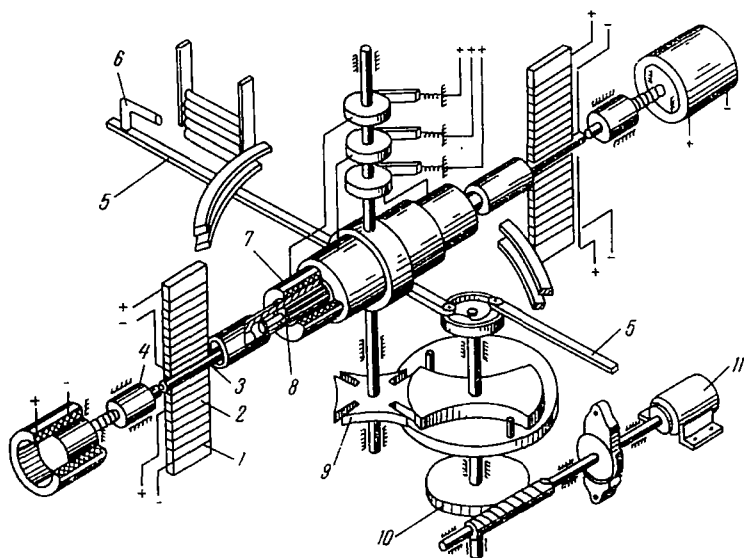


Рис. 5.9. Схема станка для магнитно-абразивной обработки по [2]

Полирование деталей цилиндрической формы типа валов, осей, колец. Магнитно-абразивная обработка деталей указанного класса достаточно широко рассмотрена выше. Здесь приведена еще одна кинематическая схема станка-автомата, предложенная Г. С. Шулевым [2]. Особенностью схемы является предложение создать двухпозиционный стапок-автомат для обработки деталей класса валов в центрах с загрузкой из бункера-накопителя. На рис. 5.9 показана схема станка: 1 — катушка магнита, 2 — полюс, 3 — деталь, подлежащая обработке, 4 — подвижный центр.

Работа станка по схеме на рис. 5.9 осуществляется следующим образом: при подаче питания на электродвигатель 11 через червячный редуктор 10, цевочную передачу и мальтийский крест 9 сообщается движение на рычаги 5. Толкатели 6 отсекают по одной детали из каждого бункера-накопителя и при помощи загрузочного устройства 7 подают их на рабочие позиции. Под действием штоков-толкателей 8 детали 3 подаются в зону резания между полюсами электромагнитов 2. Катушки электромагнитов питаются выпрямленным двухполупериодным током. В рабочие зазоры между обрабатываемой поверхностью и поверхностью полюса магнита подается ферромагнитный порошок и смазывающе-охлаждающая жидкость, осуществляющие процесс магнитно-абразивной обработки.

Обработка листов и деталей сложной формы по методу метания порошка. Для обработки пластин, листов, плиток и

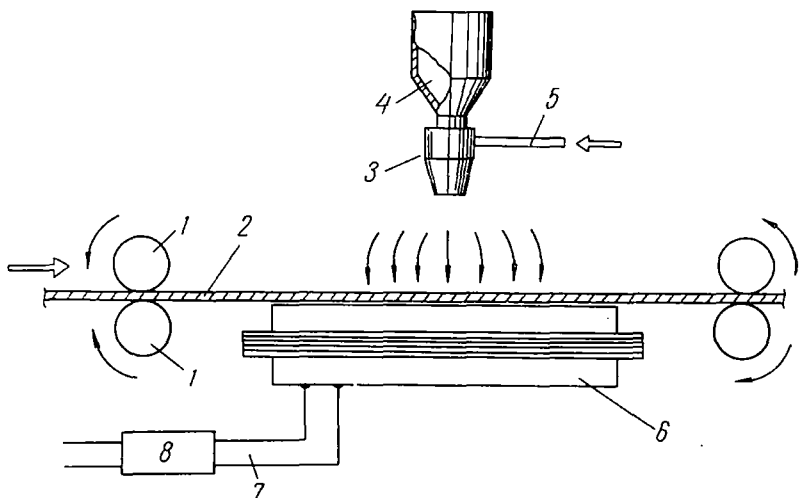


Рис. 5.10. Схема устройства для сообщения ферромагнитному порошку кинетической энергии

тому подобных плоских поверхностей и деталей сложной формы предложен способ [10], по которому энергия магнитного поля используется для сообщения зернам порошка кинетической энергии и интенсификации струйных видов абразивной обработки. В качестве абразивного материала применяется порошок, обладающий не только абразивными, но и магнитными свойствами. Электромагнитная система выполнена таким образом, что источник магнитных колебаний и поток частиц ферромагнитного порошка располагаются с разных сторон полируемой поверхности. Деталь 2 (рис. 5.10) помещается между ведущими валками 1, сообщаями ей возвратно-поступательное движение. Магнитная система 6 питается от источника 8 через коллектор 7. Ферромагнитный порошок 4 помещается в бункер. Работа устройства осуществляется следующим образом: от источника питания 8 по коллектору 7 на магнитную систему 6 подается пульсирующее магнитное поле. Детали 2 сообщается возвратно-поступательное движение. При открытой заслонке порошок из бункера под действием магнитного поля устремляется к поверхности детали 2, ударяет по ней с заданной силой и деформирует микрогребешки. Для интенсификации скорости движения порошка из бункера и увеличения силы динамического воздействия его зерен на обрабатываемую поверхность по трубопроводу 5 в сопло 3 подается сжатый воздух. В зависимости от направления относительных движений деталей и месторасположения магнитной системы возможны 29 схем механизмов этого класса (см. табл. 5.1).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

1. Влияние магнитного поля на технологические параметры процесса

Выяснить влияние магнитного поля на технологические параметры абразивной обработки, т. е. производительность (съем металла), мощность при резании, шероховатость поверхности и т. д., можно лишь в случае, если имеются все данные по указанным параметрам для обработки детали без магнитного поля. С этой целью проводились эксперименты абразивного резания без наложения магнитного поля, а затем при тех же режимах в магнитном поле. Весь возможный диапазон магнитной индукции разбивался на 10 ступеней от 0 до максимума. По окончании опыта каждый образец тщательно промывался, взвешивался на аналитических весах, а затем на нем замерялись шероховатость и твердость поверхности. Измерение шероховатости проводилось на микроинтерферрометре типа МИИ-4. Серия опытов (по 11 в каждой) повторялась 5 раз и показала сходные результаты. Из экспериментальных данных установлено, что технологические параметры, такие, как производительность, шероховатость, твердость поверхности и потребляемая мощность, в процессе абразивной обработки, проведенной без магнитного поля, значительно изменяются при наложении последнего. Их изменение во многом зависит от величины магнитной индукции в рабочем зазоре. На рис. 6.1 представлены кривые, построенные по экспериментальным данным и характеризующие течение процесса.

Анализ зависимости съема металла от магнитной индукции в рабочем зазоре (кривая 2) показывает, что производительность абразивного резания при наложении магнитного поля зависит от величины магнитной индукции (напряженности), а именно съем металла вначале с увеличением магнитной индукции падает, достигает минимума при $B = 1250 \text{ гс}$ и составляет 0,852 производительности абразивной обработки без магнитного поля; при дальнейшем возрастании индукции съем металла растет, достигая значения производительности

абразивного резания без наложения магнитного поля, а затем превосходит его при 2800 гс на 20%.

Если обозначить через Q_a сьем металла в граммах при абразивной обработке в обычных условиях, $Q_{ам}$ — производительность ее при тех же режимах, но с наложением магнитного поля, то их отношение

$$\frac{Q_{ам}}{Q_a} = K_{п} = f(B) \quad (6.1)$$

определит некоторый коэффициент $K_{п}$, являющийся функцией магнитной индукции и отражающий степень влияния магнитного поля на производительность абразивной обработки. Следовательно,

$$Q_{ам} = Q_a K_{п}, \quad (6.2)$$

т. е. если известна производительность какого-либо процесса абразивного резания, то при наложении магнитного поля, магнитные силовые линии которого перпендикулярны оси вращения детали, при всех прочих равных условиях производительность его изменится в $K_{п}$ раз в соответствии с магнитной индукцией наведенного поля. После обработки экспериментальных данных для зависимости съема металла от магнитной индукции было получено следующее выражение [7]:

$$Q_{ам} = K_Q (2,87B^2 - 6,56B) + Q_a, \quad (6.3)$$

где Q_a — сьем металла при абразивной обработке в обычных условиях, мг; B — величина магнитной индукции в рабочих зазорах, тл; K_Q — коэффициент, равный 1 мг/гс.

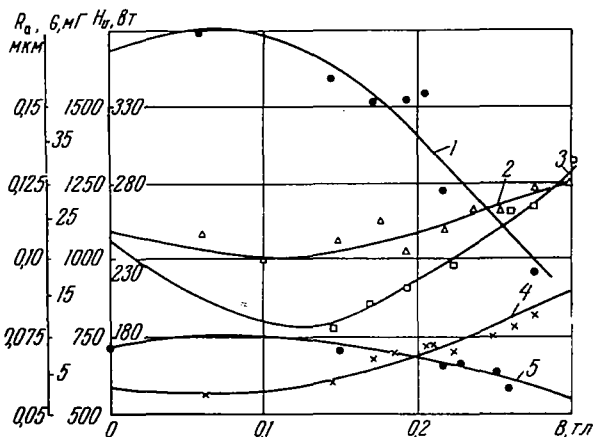


Рис. 6.1. Влияние магнитной индукции в рабочих зазорах на шероховатость поверхности (1), производительность процесса (2), затраты мощности на абразивное резание (3), твердость поверхностного слоя при магнитно-абразивной обработке (4) и циклическом перематничивании (5)

Суммарная погрешность кривой, построенной по формуле, составляет всего 0,35%. Наибольшие отклонения: +8,75% и -10,5%. Это вполне приемлемо для практических расчетов.

Подставляя полученное выражение в формулу коэффициента степени влияния магнитного поля на производительность абразивной обработки для определенных условий, при которых проводились опыты, получаем [7]:

$$K_{\Pi} = \frac{K_Q(2,87B^2 - 6,56B) + Q_a}{Q_a},$$

или

$$K_{\Pi} = K_Q \frac{2,87B^2 - 6,56B}{Q_a} + 1. \quad (6.4)$$

Характер изменения твердости поверхностного слоя детали в зависимости от величины магнитной индукции (кривая 4, рис. 6.1) при абразивной обработке в магнитном поле имеет следующие особенности:

1) твердость при $B=0,1-0,3$ тл ниже исходной и зависит от изменения магнитной индукции в рабочих зазорах;

2) при индукции, равной 0,075 тл, твердость достигает максимума 764 HV и превышает значение твердости, получаемой после абразивной обработки без магнитного поля, а при дальнейшем увеличении индукции падает и принимает минимальное значение - 670 HV при 0,28 тл.

Степень влияния магнитного поля на твердость поверхностного слоя при абразивной обработке закаленных шлифованных деталей из стали ХВГ определится коэффициентом K_{HV} по отношению

$$\frac{HV_M}{HV_a} = K_{HV} = f(B), \quad (6.5)$$

где HV_M и HV_a — твердость по Виккерсу, получаемая при обработке детали в магнитном поле и после абразивной обработки без наложения магнитного поля соответственно. Зависимость изменения твердости поверхностного слоя в процессе абразивной обработки в магнитном поле от магнитной индукции описана формулой

$$HV_M = K_H(29,3B - 21B^2) + HV_a, \quad (6.6)$$

где, кроме известных, K_H — коэффициент, равный 1 ед. HV/1 эс.

Как видно из рис. 6.1 (кривая 4), наибольшие отклонения составляют +0,86% и -1,04%. Суммарная погрешность всего участка опытной кривой равна 0,05%. Следовательно, сте-

пень влияния магнитного поля на твердость при абразивной обработке

$$K_{HV} = \frac{K_H(29,3B - 21B^2)}{HV_a} + 1. \quad (6.7)$$

Мощность вращательного движения детали (νT) подсчитана по формуле

$$N = K_N M_B n_3, \quad (6.8)$$

где M_B — крутящий момент, $кг \cdot см$; n_3 — число оборотов детали в минуту; $K_N = 1/9,75$.

Количество энергии, затраченной на вращательное движение за время опыта [7], описывалось произведением ($\nu T \cdot сек$)

$$\mathcal{E} = Nt = K_N M_B n_3 t, \quad (6.9)$$

где t — время опыта, $сек$.

Колебания крутящего момента в течение каждого опыта были в пределах 0,5—1,0% от общего значения. Для определения той части мощности, которая затрачивалась непосредственно на процесс резания, исключалась из общего значения величина энергии холостого хода кинематической цепи вращательного движения установки. С этой целью электродвигатель включался при закрепленной в шпинделе детали, устанавливалось число оборотов в минуту, идентичное с тем, при котором проводились опыты, и замерялись значения крутящего момента холостого хода. Мощность, затрачиваемая на резание (νT),

$$N_{рез} = (N_{общ} - N_{xx}); \quad (6.10)$$

$$N_{общ} = K_N M_{общ} n_3,$$

где $M_{общ}$ — общее значение крутящего момента;

$$N_{xx} = K_N M_{xx} n_3;$$

M_{xx} — крутящий момент при холостом ходе;

$$N_{рез} = K_N M_{общ} n_3 - K_N M_{xx} n_3 = K_N n_3 (M_{общ} - M_{xx}). \quad (6.11)$$

Установлено, что мощность в процессе абразивного резания в магнитном поле определенным образом зависит от магнитной индукции в рабочих зазорах (рис. 6.1, кривая 3). Причем с ростом магнитной индукции мощность вначале уменьшается, принимая минимальное значение при $B=0,145 тл$, а затем возрастает и при $B=0,28 тл$ превышает значение мощности абразивной обработки без магнитного поля. Математической обработкой экспериментальных данных получено следующее выражение для зависимости мощности абразивного резания от магнитной индукции:

$$N_{рез} = K_{Np} (42,4B^2 - 107,8B) + N_a, \quad (6.12)$$

где B — магнитная индукция в рабочих зазорах, *тл*; N_a — значение мощности абразивного резания без магнитного поля, *вт*; K_{N_p} — коэффициент пропорциональности, равный 1 вт/гс .

Кривая 3 рис. 6.1 является расчетной зависимостью мощности резания от магнитной индукции. Суммарная погрешность теоретической кривой составляет $0,09\%$, наибольшее отклонение $+3\%$, а наименьшее $-12,6\%$.

Количество энергии, затрачиваемой на изменение формы и размеров детали, определится формулой

$$\mathcal{E}_{\text{рез}} = N_{\text{рез}} t. \quad (6.13)$$

Подставляя полученное выражение для $N_{\text{рез}}$, имеем

$$\mathcal{E}_{\text{рез}} = [K_{N_p}(42,4B^2 - 107,8B) \div N_a] t, \quad (6.14)$$

где t — время обработки, *час*.

Полученное выражение не полностью характеризует энергетическую сторону абразивной обработки, поэтому удобнее пользоваться значением удельной работы, т. е. энергией, затраченной на сьем единицы веса металла, которая, по данным [7], определится формулой

$$A_{\text{уд.м}} = \mathcal{E}_{\text{рез}}/Q_{\text{ам}}, \quad (6.15)$$

где $Q_{\text{ам}}$ — вес снятого с детали металла.

Подставляя значения параметров из выведенных выше формул для $\mathcal{E}_{\text{рез}}$ и Q , получаем

$$A_{\text{уд.м}} = \frac{[K_{N_p}(42,4B^2 - 107,8B) \div N_a] t}{K_Q(2,87B^2 - 6,56B) \div Q_a}. \quad (6.16)$$

В результате исследований установлено, что удельная энергия, затрачиваемая на абразивную обработку детали в магнитном поле, зависит от значения магнитной индукции в рабочих зазорах: с ростом магнитной индукции удельная энергия резания вначале уменьшается по сравнению с энергией при абразивном резании без магнитного поля, достигая минимума при $B=0,145 \text{ тл}$. Дальнейшее повышение магнитной индукции вызывает дополнительную затрату энергии на сьем единицы веса металла детали, но при $B=0,24 \text{ тл}$ стабилизируется и почти не изменяется с увеличением индукции.

Степень воздействия магнитного поля на удельную работу резания выражается через отношение

$$K_A = A_{\text{уд.м}}/A_{\text{уд.а}}.$$

Так как

$$A_{\text{уд.а}} = N_a t / Q_a,$$

то

$$K_A = \frac{[K_{N_p}(42,4B^2 - 107,8B) \div N_a] Q_a}{[K_Q(2,87B^2 - 6,56B) \div Q_a] N_a}. \quad (6.17)$$

Для конкретных условий, при которых проводились опыты [7],

$$\frac{Q_a}{N_a} = \frac{25}{269} = 0,093 \text{ мг/вт.}$$

Следовательно,

$$K_A = 0,093 \frac{K_{N_p}(42,4B^2 - 107,8B) + N_a}{K_Q(2,87B^2 - 6,56B) + Q_a}. \quad (6.18)$$

Конечным результатом любого метода отделочной обработки является получение не только нужной геометрической формы и размеров детали, но и определенной шероховатости ее поверхности. Поэтому исследование процесса абразивного резания в магнитном поле включает также определение влияния магнитной индукции на шероховатость, получающуюся после обработки. Экспериментально установлено (см. рис. 6.1, кривая 1), что шероховатость поверхности при обработке деталей в магнитном поле абразивными порошками зависит от изменения магнитной индукции в рабочих зазорах: при всех значениях магнитной индукции получаемая шероховатость ниже исходной. Так, например, при индукции от 0 до 0,155 тл шероховатость поверхности получается выше, чем при обработке детали без наложения магнитного поля, а дальнейшее увеличение магнитной индукции способствует уменьшению шероховатости, и получаемый класс чистоты поверхности превышает значение его при обработке детали без наложения магнитного поля.

Следовательно, если известна шероховатость поверхности при каком-либо методе отделочной обработки детали абразивным порошком, то класс чистоты ее можно изменить в сторону увеличения путем наложения магнитного поля на процесс обработки, т. е.

$$R_{a_M} = R_a K_R,$$

где R_{a_M} — ожидаемое среднеарифметическое отклонение профиля при наложении магнитного поля; R_a — среднеарифметическое отклонение профиля (шероховатости поверхности), получаемое в процессе абразивной обработки без поля; K_R — коэффициент, отражающий степень влияния магнитного поля на изменение шероховатости,

$$K_R = \frac{R_{a_M}}{R_a}. \quad (6.19)$$

Закономерность изменения шероховатости поверхности при обработке деталей в магнитном поле описывается фор-

мулой, полученной после обработки экспериментальных данных:

$$R_{aM} = K_{R_M} (0,059B - 0,379B^2) + R_a, \quad (6.20)$$

где K_{R_M} — коэффициент пропорциональности, равный 1 мк/гс ; B — значение магнитной индукции в рабочих зазорах, тл .

Коэффициент влияния магнитного поля на шероховатость поверхности определяется формулой

$$K_R = K_{R_M} \frac{B(0,059 - 0,379B)}{R_a} + 1. \quad (6.21)$$

2. Влияние формы и величины рабочего зазора на производительность процесса

Размеры и конфигурация рабочих зазоров между заготовкой и полюсными наконечниками магнитной системы станков оказывают существенное влияние на производительность магнитно-абразивной обработки и качество поверхности изделия.

Форма полюсного наконечника, а следовательно, рабочих зазоров определяет количество участвующих в процессе резания зерен ферромагнитного порошка и условия их удержания внутри зазоров. Последние характеризуются шириной δ , углом охвата изделия 2α (для случая обработки тел вращения), радиусом профилирования рабочей поверхности полюсного наконечника R и его длиной L (рис. 6.2).

Исследованиями Ю. М. Барона установлено [3], что при увеличении ширины рабочего зазора δ от 1 до 3 мм производительность процесса магнитно-абразивной обработки в течение первых полутора минут полирования остается постоян-

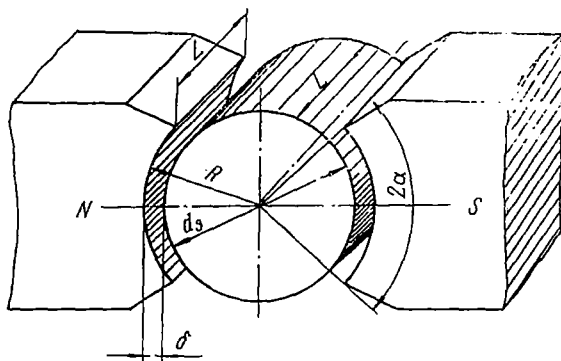


Рис. 6.2. Форма рабочего зазора

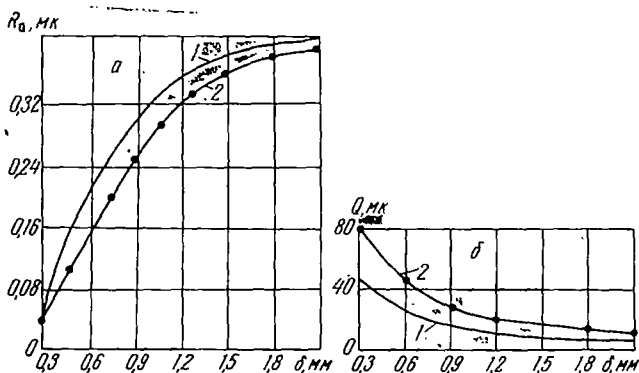


Рис. 6.3. Характер образования шероховатости поверхности (а) и съема металла (б) в зависимости от величины рабочего зазора: 1 — время обработки 30 сек; 2 — 60 сек

ной во времени, а затем постепенно снижается. Интенсивность снижения производительности зависит от ширины зазоров δ . Указанное явление объясняется тем, что с увеличением ширины зазора δ облегчается выбрасывание зерен порошка из его пространства на периферию полюсных наконечников. Причем если $\delta > 3$ мм, то интенсивность съема заметно падает с самого начала процесса, что вызывает затухание обработки. Наиболее эффективно процесс магнитно-абразивной обработки протекает при $\delta = 0,3—0,5$ мм. Следует отметить также, что расход абразивного материала порошка пропорционален объему рабочих зазоров, а поэтому увеличение δ сопровождается повышением себестоимости магнитно-абразивной обработки (рис. 6.3).

Угол охвата 2α обрабатываемой поверхности полюсными наконечниками определяет количество режущих элементов порошка, находящихся в рабочих зазорах и одновременно участвующих в резании. Экспериментально установлено [3, 7], что трудоемкость операции не изменяется, если сохранять при магнитно-абразивной обработке различных диаметров изделий постоянный угол охвата $2\alpha = 120^\circ$.

Увеличение угла α повышает производительность процесса, интенсифицируя съем металла, но одновременно увеличивается расход порошка и крутящий момент на шпинделе станка, т. е. потребляемая мощность двигателя. В [7] рекомендуется выбирать толщину сердечника электромагнита $H = 0,85 d_3$ мм, где d_3 — диаметр заготовки.

Анализ имеющейся информации по исследованиям процесса магнитно-абразивной обработки показывает, что наибольшие магнитодвижущие силы будут в зонах 1—2, 3—4, 5—6, 7—8 (рис. 6.4). В указанных зонах концентрируется

наибольшее количество элементов порошка и осуществляется интенсивный съем материала, причем, как показала скоростная киносъемка, наиболее производительными зонами являются участки 1—2, 5—6. Это явление объясняется тем, что, согласно законам электромагнитного поля, зонами наибольшей плотности магнитного потока будут указанные на рис. 6.4 участки поверхности полюсов, так как здесь наименьшее расстояние между противоположными полюсами магнита. При вращении детали по часовой стрелке силы трения перемещают прижатые к поверхности заготовки элементы порошка в зоны наибольшей плотности магнитного потока. При скоплении большого количества порошка на участках 1—2 и 5—6 происходит его уплотнение и заклинивание в рабочем зазоре, что вызывает интенсивный съем материала с поверхности заготовки. Однако, если ширина рабочего зазора $\delta > 3$ мм, магнитодвижущие силы ослабевают и на участках концентрации потока усиливается процесс миграции элементов порошка с одного полюса на другой, что способствует затуханию процесса обработки. С другой стороны, большие углы охвата α вызывают появление пустот на участках

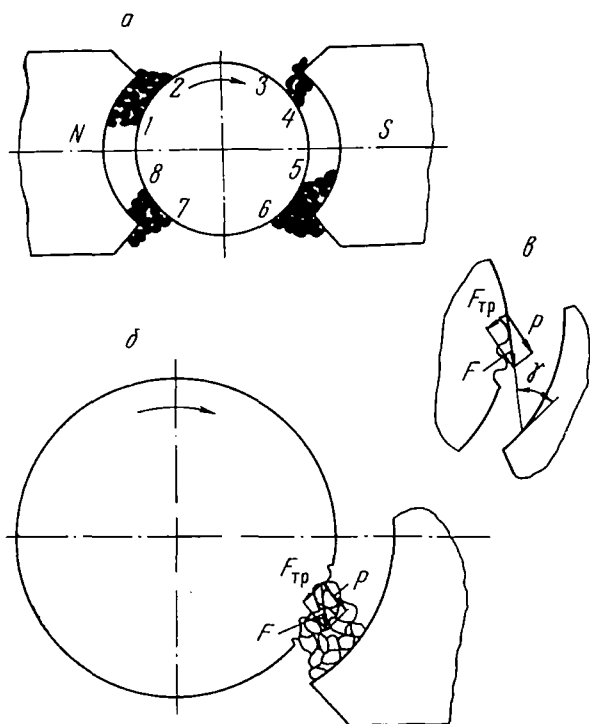


Рис. 6.4. Зоны концентрации порошка в рабочих зазорах и силы, действующие в момент заклинивания

1—8 и 4—5, что также снижает производительность процесса магнитно-абразивной обработки.

Процесс интенсификации резания в зонах 1—2 и 5—6 (рис. 6.4) можно объяснить следующим образом.

На находящиеся в рабочих зазорах элементы порошка действуют силы магнитного поля, направленные от периферии к центру заготовки, которые прижимают порошок к обрабатываемой поверхности. Так как радиус закругления вершин зерен порошка меньше ширины впадин микронеровностей, то элементы порошка входят во впадины поверхности заготовки и транспортируются вместе с ней в зону наибольшей концентрации магнитного потока. Последнее обстоятельство увеличивает силу давления P (рис. 6.4, б) перемещающихся зерен на границах с ними элементы порошка, удерживаемые в зонах 1—2, 5—6 по направлению силы F . Поскольку сила F направлена перпендикулярно к боковой поверхности микронеровностей и вектор ее действия составляет всегда угол $\gamma > 7^\circ$ по отношению к боковой поверхности полюсных наконечников, то на участках 1—2 и 5—6 происходит заклинивание зерен и возрастание удельного давления порошка на обрабатываемую поверхность. Изменение направления действия силы F (рис. 6.4, в) происходит от изменения соотношения между силами P и $F_{\text{тр}}$, величина которых зависит от значения сил прижатия зерен порошка к обрабатываемой поверхности, характеризуемых силами магнитного поля в зазорах.

Следовательно, на силы заклинивания порошка в рабочих зазорах оказывает существенное влияние величина магнитной индукции системы, исходная шероховатость поверхности заготовки и зернистость применяемого ферромагнитного порошка.

Значительное влияние на производительность процесса и качество обработанной поверхности изделия оказывают форма и радиус профиля R рабочей поверхности полюсных наконечников магнитной системы станков. При магнитно-абразивной обработке тел вращения возможны пять форм рабочих зазоров (рис. 6.5).

1. Прямоугольный, в этом случае зерна порошка легко выбрасываются из зазора и результаты обработки нестабильны во времени с постепенным затуханием процесса резания.

2. Расходящийся зазор (рис. 6.5, б), при котором ($R > d_3/2 + \delta$). В этом случае, как и в предыдущем, зерна абразивного порошка легко выбрасываются из пространства зазора.

3. Эквидистантный зазор (рис. 6.5, в), при котором радиус зазора ($R = d_3/2 + \delta$) на величину δ больше радиуса ($d_3/2$) заготовки. При эквидистантнорадиусном зазоре произ-

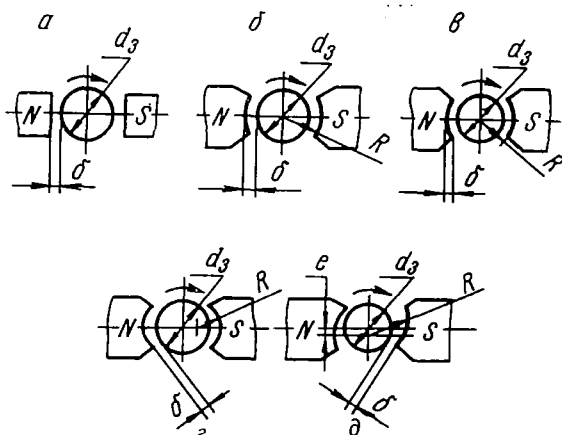


Рис. 6.5. Формы полюсов электромагнита при обработке цилиндрических деталей

водительность процесса достаточно высокая и достигает при прочих равных условиях шероховатости обработанной поверхности 12-го класса. Указанный рабочий зазор образуется расточкой полюсов непосредственно на магнитно-абразивном станке.

Радиус профилирования эквидистантного зазора, по данным [3], рекомендуется определять по формуле

$$R = \frac{d_3}{2} \div \delta - (0,1 \div 0,15) d_3. \quad (6.22)$$

4. Серповидный, при котором ($R < d_3/2 + \delta$) и ширина рабочего зазора δ в центре полюсного наконечника больше, чем в зонах концентрации магнитного потока (рис. 6.5, з).

При серповидно-эллиптическом рабочем зазоре создаются благоприятные условия для удержания зерен абразивного порошка в зонах концентрации магнитного потока и повышения производительности процесса, но указанный вид поверхности полюсов трудоемок в изготовлении.

5. Полуэллиптический зазор (рис. 6.5, д), при котором ($R < d_3/2 + \delta$) и центр радиуса R не лежит на оси заготовки, т. е. $e \neq 0$. Указанный тип рабочего зазора образуется расточкой полюсов непосредственно на магнитно-абразивном станке путем смещения оси полюсных наконечников на заданную величину e . При полусерповидном рабочем зазоре достигается наибольшая производительность процесса обработки за счет максимальной концентрации рабочих элементов ферромагнитного порошка в зонах 1—2 и 5—6 (см. рис. 6.4).

Повышению производительности процесса магнитно-абразивной обработки в значительной мере способствует изменение симметрии магнитного потока в рабочем зазоре.

Асимметрия напряженности магнитного поля при магнитно-абразивной обработке создается путем применения различной формы концентраторов магнитного потока на полюсных наконечниках. В. Н. Вerezуб [5], например, для создания более жесткой щетки ферромагнитного порошка при обработке плоскостей рекомендует применять концентратор, изображенный на рис. 6.6, *а*. В этом случае эпюра удельного давления порошка на обрабатываемую поверхность имеет вид, изображенный на рис. 6.6, *б*, т. е. максимальному значению удельного давления соответствует минимальное расстояние концентратора от обрабатываемой поверхности, и наибольшей плотности магнитное поле достигнет на линии, удаленной от центра на 25 мм. При обработке цилиндрических поверхностей и другого типа тел вращения хорошие результаты по производительности достигаются путем нанесения на поверхность полюсов магнита различных рифлений, пазов, канавок и им подобных концентраторов напряжений магнитного потока. Эффективными оказались, например, концентраторы, выполненные в виде продольных пазов глубиной 0,5 мм с углом профиля 90° (рис. 6.6, *в*).

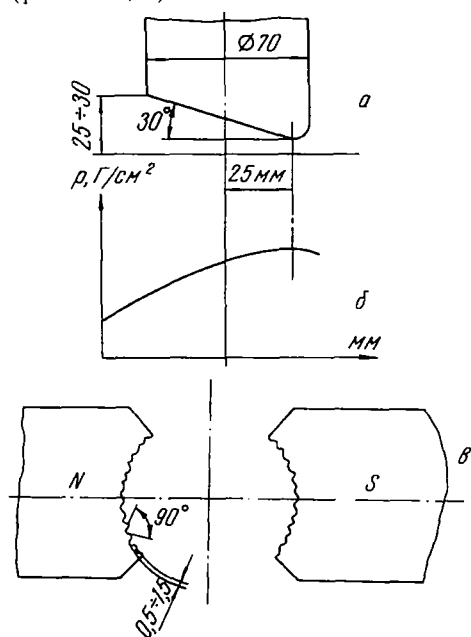


Рис. 6.6. Концентраторы магнитного потока на полюсном наконечнике: *а* — при обработке плоскостей; *б* — при обработке тел вращения

3. Роль энергии микротоков

При анализе сущности явлений, происходящих при магнитно-абразивной обработке, указывалось, что в определенных условиях (если длительность цикла $t_{\text{маш}}=3-5$ мин, применяемый ферромагнитный порошок из ферробора, армко-железа и других токопроводящих материалов, магнитная индукция в рабочих зазорах мала) в зоне резания возникают микротоки напряженности, достаточной для осуществления процесса убыточной обработки материала заготовки, хотя роль их в процессе съема незначительна.

Из работ [7--10] известно, что при указанных выше условиях в рабочих зазорах, заполненных токопроводящим ферромагнитным порошком, при наличии относительных движений инструмента и заготовки индуцируется э.д.с. весьма малой величины, однако достаточной для удаления определенного припуска с поверхности заготовки. Действие микротоков подтверждается экспериментально. Для исследования был взят порошок армко-железа, имеющий исходную твердость в 7,5 раза ниже твердости поверхности заготовки, и произведена магнитно-абразивная обработка образцов из стали ХВГ, закаленной до HRC 60—62 единицы при следующих условиях: $V=4500-10\,000$ гс; $v_{\text{рез}}=100-157$ м/мин; зернистость порошка $\Delta=0,6-1,2$ мм; вес порошка в рабочем зазоре $Q=5-10$ г. Эксперименты показали, что за $t_{\text{маш}}=6-12$ мин возможно осуществить съем 60—150 мг (5—12 мк на диаметр) металла порошком, исключаяющим вероятность абразивного резания.

Известно, что при трении друг о друга двух тел из материалов различной твердости возможен износ и более твердой и более мягкой поверхности, несмотря на низкое удельное давление, малую площадь и кратковременность контакта этих поверхностей, а также отсутствие средства материалов, благоприятного для протекания процессов диффузии и адгезии. Поэтому чтобы установить, действительно ли обработка порошком из армко-железа термообработанной стали ХВГ произошла за счет действия микротоков, произведены замеры величины э.д.с. микротоков в электрической цепи, образованной полюсным наконечником, заготовкой и контактирующими между собой элементами (зернами) порошка [7—10]. Опыты показали, что даже два спаянных между собой зерна порошка армко-железа, будучи помещенными в рабочий зазор, в котором наведена магнитная индукция $B=0,4-0,6$ тл при $n_3=500-1500$ об/мин, способны за 1—2 мин осуществить съем с поверхности заготовки 0,6—4,3 мг металла. Если же аналогичную работу при идентичных условиях осуществляют разрозненные элементы порошка, то съем металла не

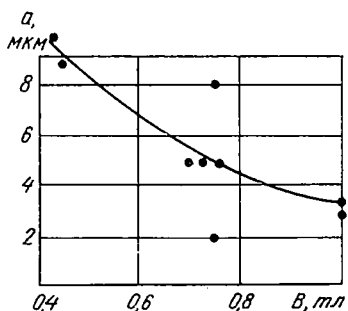


Рис. 6.7. Зависимость размерного съема металла от магнитной индукции в рабочем зазоре при обработке стали ХВГ порошком армко-железа ($t_{\text{маш}}=6$ мин; $n_3=1500$ об/мин)

наблюдается. Микрофотографии поверхностей изделия и элементов порошка после описанных экспериментов показали, что в первом случае на вершинах поверхности микронеровностей (гребешков) заготовки и зерна порошка отчетливо заметны следы износа, в то время как износ одиночного рабочего элемента незначителен и не превышает 0,1—0,2 мг. Однако, как указывалось выше, возникновение и действие микротоков возможно при мягких режимах магнитно-абразивной обработки (при $B=0,4-0,6$ тл), т. е. когда элементы порошка имеют возможность относительного перемещения. Увеличение же магнитной индукции свыше $B=1$ тл делает более жесткой щетку ферромагнитного порошка, уменьшает подвижность его отдельных элементов и энергию микротоков, усиливая эффект абразивного резания (рис. 6.7).

4. Особенности обработки плоскостей переменного сечения из диамагнитных материалов

Чистовая обработка плоских поверхностей, имеющих углубления, радиусные переходы, канавки, пазы и другие неровности, представляет значительные трудности при механизации технологических процессов и составляет большую часть суммарной трудоемкости процесса изготовления деталей, особенно крупногабаритных. Эти трудности усугубляются при чистовой обработке изделий из диамагнитных материалов (алюминия, нержавеющей стали, пластмасс, бронзы и др.).

Выполненные в [5] исследования позволили создать способ и оборудование для чистовой обработки крупногабаритных листов переменного сечения из диамагнитных материалов в магнитном поле ферромагнитными порошками.

Исследования проводились при $\delta=20-25$ мм с использованием в качестве ферромагнитного порошка чугуновой

крошки размером 0,3; 0,5; 0,8; 1,0; 1,5 мм с объемным (насыпным) весом 4—4,5 т/м³ и стальных игл, изготовленных из проволоки диаметром 0,3 мм, длиной 5 мм. При этом рассматривались не только факторы, относящиеся к режущему инструменту (твердость, зернистость, острота граней, способность к намагничиванию, форма гранул, способность к уплотнению в магнитном поле) и изделию (твердость, магнитопроницаемость, степень изменения структуры под действием магнитного поля), но и факторы, относящиеся к самому магнитному полю (его напряженность, направление, структура и геометрия, влияние воздушных зазоров).

Мощность магнитного индуктора, показанного на рис. 4.25, обеспечивает в рабочих зазорах $\delta=20\text{--}25$ мм магнитную индукцию $B=5000\text{--}6000$ гс, что при массе абразивного порошка $m=200$ г развивает нормальное давление на поверхность листа $P=18\text{--}20$ кг и определяет среднее удельное давление $P_{\text{ср}}=270$ г/см².

На рис. 6.8, а показана зависимость съема металла от времени шлифования и зернистости ферромагнитного порошка. Материал шлифуемых образцов — сплав Д16АТ. Как видно из рисунка, интенсивность и характер съема в значительной степени зависят от зернистости порошка и исходного материала для его получения. При обработке чугунной крошкой с $\Delta=0,3$ мм (кривая 5) после 10 мин шлифования съем металла практически прекращается. Если же в качестве режущего инструмента используются стальные иглы длиной 3 мм (кривая 1), то даже после 10 мин резания съем продолжает непрерывно возрастать. Уменьшение съема в зависимости от снижения зернистости порошка происходит из-за более низкого удельного давления, приходящегося на обрабатываемую поверхность [5].

Влияние скорости шлифования (сплошные линии) и продольной подачи заготовки (пунктирные линии) на съем металла показано на рис. 6.8, б. Обработка производилась при четырех значениях чисел оборотов магнитного индуктора, равных 70, 110, 150, 200 об/мин, и пяти диапазонов продольных подач $s=70, 100, 130, 150, 180$ мм/мин. Размер чугунной крошки был 1: 0,8; 0,5; 0,3 мм.

Исследования показали, что по мере увеличения числа оборотов магнитного индуктора съем металла растет. Увеличение скорости продольной подачи, наоборот, снижает объем снимаемого металла. Это объясняется меньшим временем суммарного контакта чугунной крошки с обрабатываемой поверхностью листа и увеличением шага касания режущих элементов порошка за один оборот индуктора. Из рис. 6.8, б следует, что уменьшение зернистости порошка и, следовательно, снижение массы абразивного материала приводят к

уменьшению жесткости щетки, а повышение числа оборотов индуктора свыше $n_{и} > 150$ об/мин увеличивает центробежные силы, способствующие выбрасыванию порошка на нерабочие поверхности полюсов и постепенному затуханию процесса шлифования (особенно наглядно это видно из анализа кривых 3 и 4, характеризующих обработку при $\Delta = 0,5$ и $0,3$ мм).

При исходной шероховатости заготовки, соответствующей пятому классу, после магнитно-абразивной обработки по методу В. Н. Везуба чистота поверхности повышается до седьмого класса.

В 1961—1962 гг. предложен способ полирования в магнитном поле ферромагнитными порошками с использованием специальных барабанов, несущих ряд электромагнитов [13]. В данном случае режущие элементы порошка размещались

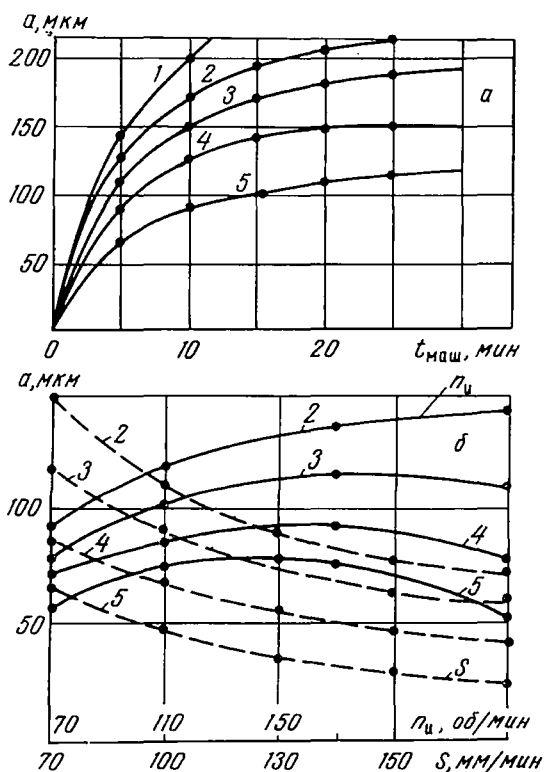


Рис. 6.8. Зависимость съема от времени обработки (а), скорости вращения индуктора и продольной подачи заготовки (б): 1 — режущие элементы — стальные иглы из проволоки диаметром 0,3 мм и длиной 5 мм; 2 — порошок из чугунной крошки $\Delta = 1,0, 0,8, 0,5$ и $0,3$ мм соответственно; сплошные линии — скорость шлифования, пунктир — продольная подача заготовки

не на торце, как в схеме, рассмотренной выше, а на периферии магнитного индуктора.

Подъемная сила одного электромагнита в предложенной [13] схеме равнялась $P_1=462$ кГ, а общая для системы, показанной на рис. 4.24, — $P_M=2774$ кГ, что позволяет осуществлять магнитно-абразивную обработку ферромагнитным порошком крупной зернистости ($\Delta=0,3-0,8$ мм).

Определенный интерес для практики создания оборудования, позволяющего осуществить магнитно-абразивную обработку плоскостей с применением электромагнитных барабанов роторного типа, представляет методика расчета подъемной силы электромагнита.

Методика рассматривается на примере электромагнита, принципиальная схема которого изображена на рис. 6.9.

Расчет подъемной силы барабана электромагнита. Исходные данные:

1. Габариты сердечника постоянного сечения $h \times b \times c$ (h — высота, b — ширина, c — толщина) $180 \times 134 \times 15$ мм.

2. Площадь сечения сердечника магнитопровода $S = b \times c = 20$ см².

3. Средняя длина магнитной силовой линии, если магнитный поток на всем своем пути проходит по стали, $l_{cp} = 172,5 \cdot 2 + 70 = 415$ мм = 41,5 см.

4. Материал магнитного сердечника — армо-железо.

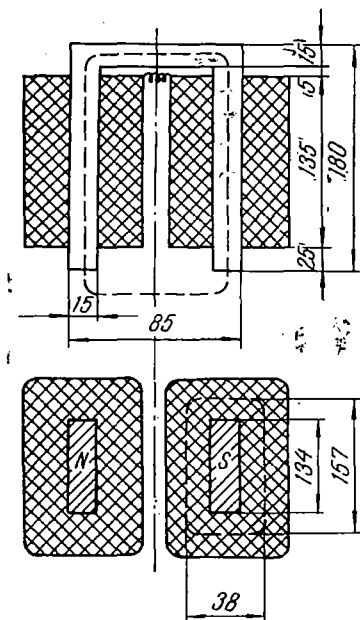


Рис. 6.9. Габариты магнита

5. Максимальная магнитная индукция для литой стали $B_{\text{макс}} = 1,7 \text{ вб/м}^2 = 17 \cdot 10^3 \text{ гс}$.

6. Значение напряженности магнитного поля H по кривой намагничивания для электротехнической стали для случая $B_{\text{макс}} H = 15\,000 \text{ а/м} = 150 \text{ а/см}$.

7. Удельное сопротивление провода (меди) $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{м}$.

8. Диаметр медного провода для намотки катушек $d_n = 1 \text{ мм}$.

9. Площадь сечения провода для намотки катушек $S_n = 0,785 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

10. Средняя длина одного витка провода при намотке катушек (см. рис. 6.9) $l = (157 + 38) \cdot 2 = 390 \text{ мм} = 0,39 \text{ м}$.

11. Количество витков одной катушки $W_1 = 3100$.

12. Количество витков двух катушек одного электромагнита $2W_1 = 6200$ (принято по конструктивным соображениям из условия наибольшего диаметра магнитного барабана $D_{\text{макс}} = 500 \text{ мм}$ и габаритов катушек $H \times B \times C = 135 \times 180 \times 60 \text{ мм}$ (H — высота, B — ширина, C — длина катушки)).

Порядок расчета. 1. По закону полного тока для магнитной цепи одного электромагнита определяем количество ампер-витков:

$$IW_2 = HI_{\text{ср}} = 150 \cdot 41,5 = 6225 \text{ ав.}$$

2. Определяем силу тока в катушках магнита в соответствии с принятым количеством витков $2W = 6200$ одного электромагнита

$$I = \frac{W_2}{2W_2} = \frac{6225}{6200} = 1,004 \text{ а.}$$

3. Определяем электрическое сопротивление катушек R по формуле

$$R = \rho \frac{L}{S_n} = \rho \frac{2lW_1}{\frac{\pi d_n^2}{4}} = 1,72 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,39 \cdot 6200}{0,785 \cdot 10^{-6}} \approx 54 \text{ ом,}$$

где $L = 2lW_1$ — общая длина провода двух катушек.

4. Определяем напряжение на катушках

$$U = RI = 54 \cdot 1,004 = 54,216 \text{ в.}$$

5. Рассчитываем мощность генератора, потребную на питание одной системы катушек,

$$P_p = I^2 R = 1,004^2 \cdot 54 = 54 \text{ вт.}$$

6. Мощность генератора с учетом потерь на питание шести магнитных систем барабана

$$P = P_p \cdot 6 = 54 \cdot 6 = 324 \text{ вт.}$$

7. Общая мощность генератора

$$N_r = RI + P = 54 \cdot 1,004 + 324 = 54,2 + 324 \approx 380 \text{ вт.}$$

Подъемная сила электромагнита, или сила притяжения, выражается зависимостью

$$f = \frac{B^2 S}{\mu^2},$$

где B — магнитная индукция, вб/м^2 ; μ — магнитная проницаемость материала сердечника (для стали, по справочнику $\mu = 5000$); S — площадь торцевой поверхности полюса сердечника, см^2 .

В нашем случае при шести электромагнитах имеем 12 полюсов, для которых общая площадь

$$\Sigma S = (b \cdot c) \cdot 12 = 20 \cdot 12 = 240 \text{ см}^2.$$

8. Определяем общую подъемную силу электромагнитного барабана, несущего шесть систем магнитов,

$$P_m = \frac{(17 \cdot 10^3)^2 \cdot 240}{5000^2} = \frac{289 \cdot 10^6 \cdot 240}{25 \cdot 10^6} = 2774 \text{ кг.}$$

9. Определяем удельную силу электромагнита, т. е. силу, приходящуюся на 1 см^2 площади его полюсов,

$$P_{\text{уд}} = \frac{P_m}{\Sigma S} = \frac{2774}{240} = 11 \text{ кг/см}^2.$$

10. Длина провода для намотки 12 катушек электромагнитного барабана приведенных габаритов

$$\Sigma L = L \cdot 6 = 2418 \cdot 6 = 14508 \text{ м} = 14,5 \text{ км.}$$

11. Вес провода $Q = 14,5 \cdot 7,8 = 113 \text{ кг}$.

Результаты наиболее характерных исследований по установлению степени влияния параметров магнитно-абразивной обработки плоскостей из диамагнитных материалов показаны на рис. 6.10.

Из анализа рис. 6.10 можно сделать следующие выводы:

1. Съем металла при магнитно-абразивной обработке сплава Д16Т по мере увеличения зернистости чугунной крошки падает. Наиболее предпочтительным в данном случае является $\Delta = 0,3 \text{ мм}$ (рис. 6.10, а).

2. Повышение напряжения постоянного тока, подаваемого на питание электромагнитов барабана, способствует увеличению съема металла, причем наиболее отчетливо это явление заметно в случае полирования чугунной крошкой зернистостью $\Delta = 0,3 \text{ мм}$ (рис. 6.10, б, кривая 2). Увеличение съема в данном случае объясняется тем, что повышение на-

пряжения способствует росту подъемной силы электромагнитного барабана и абразивная «щетка» становится более жесткой. Однако с ростом напряжения увеличивается скорость нагрева катушек электромагнита, что может вызывать снижение подъемной силы барабана (рис. 6.10, б, кривая 3, показывающая съем при непрерывном пополнении порошка). Последнее обстоятельство вызывает необходимость принудительного охлаждения системы, например, путем обдувания магнитов сжатым воздухом, как это предусмотрено в конструкции, показанной на рис. 4.24.

3. Съем металла по мере увеличения скорости вращения электромагнитного барабана (рис. 6.10, в) и продольной подачи стола уменьшается, причем падение производительности наиболее резко наблюдается в случае магнитно-абразивной обработки чугунной крошкой зернистостью $\Delta=0,3$ мм за счет того, что с увеличением скорости вращения барабана растет центробежная сила, отрывающая режущие элементы порошка от поверхности полюсных наконечников, и процесс полирования осуществляется меньшим количеством

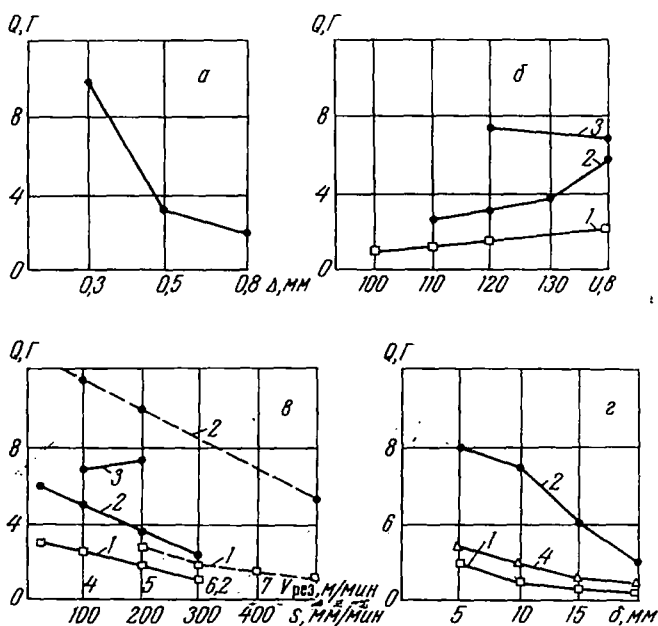


Рис. 6.10. Изменение съема металла при обработке сплава Д16Т: а — в зависимости от зернистости порошка; б — от напряжения на катушках (1 — $\Delta=0,5$ мм, 2 — $\Delta=0,3$ мм; 3 — $\Delta=0,3$ мм при непрерывном пополнении количества порошка); в — от скорости вращения барабана (сплошные линии) и продольной подачи стола (пунктир); г — от величины зазора (4 — $\Delta=0,8$ мм)

зерен. Если же потеря режущих элементов компенсируется непрерывным пополнением их из бункера, то по мере увеличения скорости вращения барабана съем металла может повышаться (рис. 6.10, в, кривая 3).

Тенденция к уменьшению съема металла по мере увеличения скорости продольной подачи стола с заготовкой (рис. 6.10, в, пунктирные кривые 1 и 2) наблюдается из-за уменьшения в данном случае количества касаний режущими элементами порошка обрабатываемой поверхности.

4. По мере увеличения рабочего зазора между периферией электромагнитного барабана и обрабатываемой поверхностью производительность обработки падает, причем более интенсивно снижение объема снимаемого металла наблюдается при $\Delta=0,3$ мм (кривая 2, рис. 6.10, г).

Из анализа графиков (рис. 6.10, г) следует, что наиболее благоприятные результаты получаются при рабочем зазоре $\delta=5$ мм. Авторы метода отмечают, что при $\delta<3$ мм процесс магнитно-абразивной обработки практически прекращается, а на поверхности изделия появляются царапины, задиры и другие дефекты. Метод позволяет полировать плоские поверхности с уступами до 3—4 мм при достаточно высокой производительности обработки.

5. Производительность процесса находится в прямой зависимости от числа проходов. За первые 10 проходов толщина съема металла при $v_{\text{рез}}=5,1$ м/сек; $s=190$ мм/мин; $\Delta=0,3$ мм; $\delta=5$ мм; $U=140$ в составляет 0,02 мм на один проход, а затем с увеличением количества проходов уменьшается и составляет при 20 и 30 проходах 0,016 мм на один проход. Авторы метода объясняют это срезанием больших высот микронеровностей при первых проходах (обработка производилась с исходной шероховатости поверхности, равной 5-му классу).

Исследования [13] показали также, что при полировании алюминиевых сплавов Д16Т на электромагнитной установке с несущим барабаном чугушной абразивной крошкой зернистостью $\Delta=0,3$ мм чистота поверхности изделия соответствует 6-му классу (с исходного $\nabla 4$) для всех параметров и технологических условий. Сообщение же заготовке или барабану осциллирующего движения способствует (при тех же условиях) повышению чистоты поверхности до 7-го класса.

Производственные испытания метода на конкретных деталях из диамагнитных материалов (типа алюминиевых сплавов, нержавеющей стали и др.), несущих на своих поверхностях круглые, радиусные и иные фасонные выфрезерованные или вытравленные уступы глубиной до 3—5 мм, показали, что такие детали легко обрабатываются на установках с электромагнитным барабаном. Так, например, при

обработке решетки с 19 ребрами, имеющими овалы, несквозные отверстия и другие неровности, в обычных условиях использовался ручной труд. На электромагнитной же установке все поверхности обработаны механически при высокой производительности и хорошем качестве, причем приспособления позволили осуществить многопозиционную обработку одновременно нескольких деталей, механизировать ручной труд и повысить производительность операции в 5—6 раз. Поверхность изделий после фрезерования или травления с исходной шероховатостью 4-го класса после обработки указанными методами приобретала шероховатость до 6—7-го класса.

5. Влияние химического состава смазывающе-охлаждающей жидкости

Магнитно-абразивная обработка обычно производится с подачей в зону резания смазывающе-охлаждающей жидкости. Характер влияния и роль присутствующей в описываемом процессе жидкости исследованы на средах, обладающих различными физическими и химическими свойствами [12]. Эффективность той или иной среды оценивалась по величине съема металла в весовых единицах (табл. 6.1).

Сравнительные исследования по выяснению роли СОЖ в процессе обработки деталей ферромагнитными порошками в магнитном поле проводились при полировании колец из стали У8А ($HRC\ 58-62$) с размерами $D=32\text{ мм}$, $d=27\text{ мм}$, $h=10\text{ мм}$. В качестве абразивного ферромагнитного материала использовались порошки керметов ЭБМ40+80% Fe и серого чугуна марки СЧ18-36 с величиной зерна 160—200 мкм. Технологические параметры магнитно-абразивной обработки

Таблица 6.1

Эффекты охлаждающих сред

Среда	Охлаждение	Электролитические свойства	Смазывающее действие	Диспергирующее действие	Химическое взаимодействие
Воздух	+	—	—	—	+
Водопроводная вода	++	+	—	—	+
Водные растворы NaCl	++	++	+	±	++
Индустриальное масло 20	+	—	++	—	—
Растворы олеиновой кислоты в индустриальном масле 20	+	—	++	++	—
Водные растворы эмульсола Э2	++	+	++	++	+

в описываемых экспериментах были следующими: окружная скорость вращения заготовки $v_{рез} = 50$ м/мин, скорость осциллирующего движения заготовки $v_{осц} = 6$ м/мин, амплитуда осцилляции заготовки $2A = 5$ мм (размах возвратно-поступательного, осциллирующего движения $A = 2,5$ мм), величина магнитной индукции в рабочих зазорах $B = 1$ вб/м², зазор $\delta = 1,5$ мм, длительность обработки одной заготовки $t_{маш} = 60$ сек. Для подачи в зону резания жидкости заданного химического состава использовалась система охлаждения от токарно-винторезного станка, которая при каждой серии опытов и смены среды тщательно промывалась.

На рис. 6.11 [12] приведена гистограмма, характеризующая величину съема металла в зависимости от состава охлаждающей среды.

Анализ результатов исследований позволяет установить, что лучшие показатели по обрабатываемости получаются при применении в качестве СОЖ водных растворов эмульсола Э2 (ГОСТ 1975-53), значительно повышающих съем металла и производительность процесса (табл. 6.2). Оптимальным в данном случае является 10—12%-ный раствор эмульсола в воде. Добавление к указанному раствору 1% олеиновой кислоты ($C_{17}H_{33}COOH$) несколько интенсифицирует процесс обработки (табл. 6.3), но дальнейшее увеличение ее в растворе даже сопровождается снижением производительности по сравнению с исходным уровнем (кривая 2, рис. 6.12).

Олеиновая кислота относится к поверхностно-активным веществам, и даже небольшие ее добавки сопровождаются повышением проникающей способности эмульсии, улучшением охлаждающих и смазывающих свойств последней. Выполняя роль эмульгатора, олеиновая кислота предотвращает расслоение эмульсии, удерживая растворенные масла в мелкодисперсном состоянии и повышая смазывающее действие

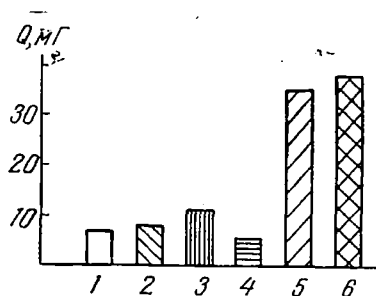


Рис. 6.11. Зависимость съема от химического состава СОЖ: 1 — без охлаждения; 2 — охлаждение водопроводной водой; 3 — 0,75%-ным раствором NaCl в воде; 4 — маслом индустриальным; 5 — 10%-ным раствором эмульсола Э2 в воде; 6 — 10%-ным раствором эмульсола в воде плюс 1% олеиновой кислоты

Съем металла при охлаждении водными растворами эмульсола Э2

№ опыта	Съем металла (Q , мг) при содержании эмульсола Э2 в растворе, %						
	0	2	3,85	5,56	7,15	10	12
1	5,3	37,7	36,1	33,8	39,6	37,8	38,0
2	7,4	37,8	32,9	37,4	36,3	36,6	34,6
3	5,8	35,9	34,0	31,6	35,6	35,3	35,9
4	6,2	37,1	34,7	34,2	37,2	36,6	36,2

Таблица 6.3

Съем металла при охлаждении 10%-ным водным раствором эмульсола Э2 с добавками олеиновой кислоты

№ опыта	Съем металла (Q , мг.) при добавке олеиновой кислоты, %			
	0	1	2	3
1	29,1	32,5	29,4	23,2
2	35,1	36,6	26,4	27,1
3	24,6	42,1	21,6	22,3
4	33,1	41,1	26,0	24,0
5	—	36,7	26,9	26,3
	30,4	37,8	26,06	24,6

жидкости. Однако было замечено, что увеличение содержания олеиновой кислоты в эмульсии вызывает прекращение «самозатачивания» ферромагнитного порошка. Молекулы олеиновой кислоты, обволакивая зерна порошка, способствуют их слипанию. Масса порошка становится более вязкой, выбрасывание зерен из рабочих зазоров затрудняется, что ухудшает условия перемешивания и переориентации («самозатачивания») порошка в зазорах. Она становится настолько вязкой, что после прекращения обработки, удаления изделия и выключения питания электромагнита «щетка» порошка продолжает сохранять форму, как при процессе полирования, копируя поверхность детали.

Использование в качестве СОЖ водопроводной воды, индустриального масла и 0,75%-ного раствора NaCl в воде по сравнению с водным раствором эмульсола дает значительно меньший эффект. Так, например, масло снижает произво-

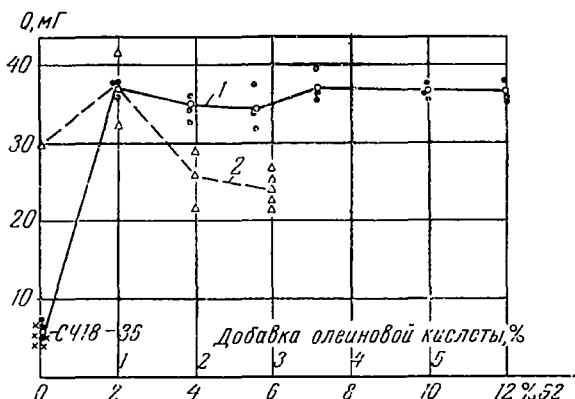


Рис. 6.12. Зависимость съема от процентного содержания эмульсола в водном растворе (1) и с добавкой олеиновой кислоты (2)

длительность в 3—4 раза, а водный раствор соли — в 4—5 раз. Масло, обладая хорошими смазывающими свойствами, способно образовывать на металлической поверхности заготовки прочную пленку, препятствующую взаимодействию ферромагнитного порошка с деталью. Кроме того, масло имеет низкую способность взаимодействия с поверхностью металла, что также делает его малоэффективным в качестве СОЖ при магнитно-образивной обработке. Добавка в масло олеиновой кислоты не вызвала изменения интенсивности процесса съема (табл. 6.4).

Водный раствор NaCl вызывает окисление зерен порошка и коррозию элементов конструкции, что затрудняет его использование в качестве СОЖ. Кроме того, поваренная соль, диссоциируя в водных растворах, вступает в химическую реакцию с металлом заготовки, образуя на обрабатываемой

Таблица 6.4

Съем металла при обработке керметом ЭБМ40+80% Fe и охлаждении растворами олеиновой кислоты в индустриальном масле 20

№ опыта	Съем металла (Q, мг) при содержании олеиновой кислоты, %						
	0	0,1	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0
1	5,40	3,70	4,5	4,6	3,90	3,70	3,1
2	4,50	3,40	5,1	4,6	3,60	3,70	4,1
3	3,70	4,10	5,0	4,3	4,20	5,10	4,4
4	5,20	5,40	5,6	2,4	3,10	3,10	3,9
5	5,00	4,60	6,0	5,0	3,80	4,60	4,0
	4,76	4,24	5,3	4,2	3,72	4,04	3,9

поверхности корродирующую пленку, что вызывает снижение качества изделия.

Выполненные исследования [12] позволяют установить роль и характер влияния каждой из указанной в табл. 6.1 и гистограмме (см. рис. 6.11) жидкостей на производительность процесса магнитно-абразивной обработки.

На рис. 6.12 (кривая 1) показан характер влияния на съем металла повышения процентного содержания эмульсола Э2 (ГОСТ 1975-53) в воде при использовании в качестве абразивного материала порошка кермета ЭБМ40+80% Fe. Добавление в воду 2% эмульсола повышает производительность процесса в 6 раз. Дальнейшее же увеличение содержания эмульсола практически не оказывает должного эффекта на величину съема металла.

Значительное повышение съема металла при добавлении в воду 2—10% эмульсола объясняется его поверхностно-химической активностью при взаимодействии с металлом. Поскольку кермет обладает значительным электрическим сопротивлением, а раствор эмульсола в воде является хотя и слабым, но электролитом, непрерывно отводящим электрические заряды от поверхности изделия, не позволяя им накопиться до величины, способной расплавлять гребешки микронеровностей, трудно предположить, что съем металла в данном случае возможен за счет действия микротоков и термоэдс. Использование же в данном случае порошка из чугуна марки СЧ18-36 дает съем металла в 6—7 раз меньший, чем применение порошка кермета ЭБМ40+80% Fe.

Таким образом, увеличение производительности процесса магнитно-абразивной обработки при использовании в качестве ферромагнитного порошка кермета марки ЭБМ40+80% Fe, а в качестве жидких сред, приведенных в табл. 6.2, СОЖ объединяется диспергирующим и химическим взаимодействием последних с обрабатываемой поверхностью заготовки. Эффект действия микротоков в данном случае непосредственного практического влияния на процесс резания не оказывает. Однако эффекты химического взаимодействия и поверхностной диффузии поверхностно-активных жидкостей и связанные с этим смазывающие и диспергирующие их свойства при магнитно-абразивной обработке обуславливаются и усиливаются наличием на границе раздела металла с окружающей средой электрических полей в молекулярном и атомарном масштабах. Возникающие при вращении обрабатываемой заготовки в магнитном поле э. д. с. микротоков способствуют интенсификации протекания химических реакций и диффузионных процессов. Повышение производительности процесса магнитно-абразивной обработки возможно, если усилить э. д. с., индуцируемую при вращении заготовки в маг-

нитном поле, путем наложения внешней электродвижущей силы, например путем введения электрохимического процесса. Проведенные по этому вопросу исследования [12] показали, что подача в зону резания при магнитно-абразивной обработке вместо СОЖ электролита (10%-ного раствора NaCl в воде), обтекающего установленный с определенным зазором к обрабатываемой поверхности латунный катод, интенсифицирует процесс съема при наложении внешней э. д. с. в 11 раз по сравнению с обработкой на этом же электролите без тока и в 1,5 раза по сравнению с обработкой в присутствии водных растворов эмульсола.

Для осуществления эксперимента по магнитно-абразивной обработке упомянутых выше образцов порошком кермета ЭБМ40 + 80% Fe с наложением внешней э. д. с. (путем введения дополнительного электрохимического процесса) была проведена модернизация опытной установки: на каркас одной из катушек 4 (рис. 6.13) электромагнита закреплялся кронштейн 3 из диэлектрического материала. В кронштейне 3 закреплялся латунный катод 2. Последний устанавливался с зазором l_3 над обрабатываемой поверхностью образца 5. К катоду 2 и изделию 5 подавалось напряжение от внешнего электрического

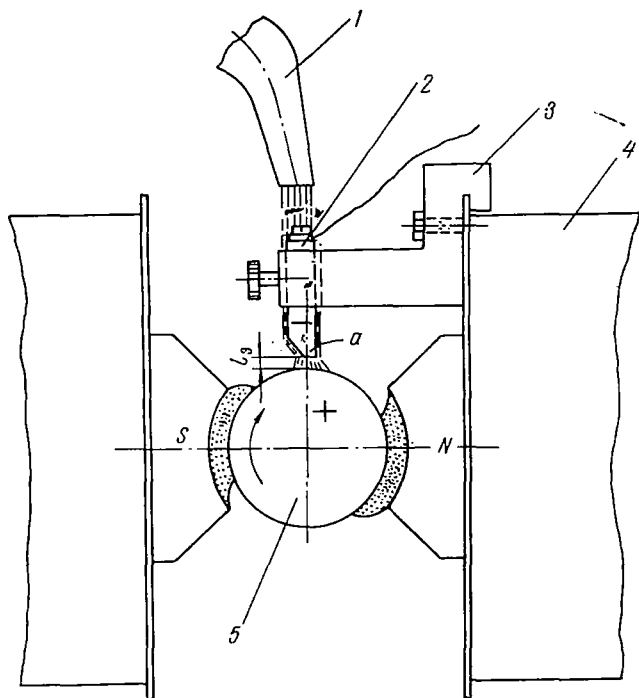


Рис. 6.13. Схема наложения внешней э.д.с. на процесс магнитно-абразивной обработки

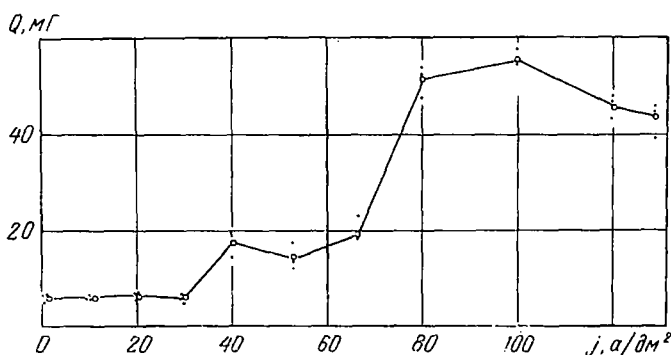


Рис. 6.14. Зависимость съема от плотности тока в рабочем зазоре

го источника. Плотность тока в данном случае определялась отношением силы тока к площади рабочей поверхности катода a . Длительность процесса обработки устанавливалась $t_{\text{маш}} = 60 \text{ сек.}$

При эксперименте электролит (10%-ный раствор NaCl в воде) подавался в зазор l_3 из патрубка l и интенсифицировал процесс съема металла с обрабатываемой поверхности за счет образования химических пленок и электрохимических реакций. Характер съема в зависимости от плотности тока в зазоре показан на рис. 6.14.

6. Технологические возможности магнитно-абразивной обработки

Производительность процесса магнитно-абразивной обработки и качество поверхности изделия после ее осуществления в значительной степени зависят от химического состава, твердости, магнитно-абразивных свойств и зернистости порошков, скорости относительных движений заготовки и инструмента (режущих элементов порошка), скорости возвратно-поступательного и осциллирующего движений заготовки, амплитуды колебаний, состояния исходной поверхности заготовки (материала, термообработки, твердости, шероховатости, вида предшествующей обработки — точения, шлифования, суперфиниширования и т. д.), способа охлаждения и состава применяемой смазочно-охлаждающей жидкости и ряда других параметров.

Установлению оптимальных параметров процесса в зависимости от перечисленных выше факторов в значительной степени способствовали исследования советских ученых [3—14]. К настоящему времени накоплена определенная информация по технологическим параметрам процесса, позволяющая су-

дить о перспективности, экономичности и возможностях магнитно-абразивной обработки, а также об области ее промышленного использования.

Первые исследования технологических параметров процесса магнитно-абразивной обработки [7—10, 13] проводились с использованием обычных ферромагнитных материалов (серого и отбеленного чугуна, конструкционной и электротехнической стали и их отходов, иголок из проволоки и т. п.), а также материалов, применяемых в мартеновских процессах (ферробора, бористого чугуна, ферровольфрама, ферротитана и др.).

В дальнейшем для интенсификации процесса был предложен абразивный материал, позволивший использовать метод не только в индивидуальном и ремонтном производствах, но и в крупносерийном, а при создании соответствующего автоматизированного оборудования — в массовом производстве [4].

Исследования А. М. Штейнберга [10], использовавшего в качестве абразивного материала ферробор, ферроборал, армо-железо и другие порошки, показали, что с увеличением грануляции (зернистости) порошка съём металла с обрабатываемой поверхности заготовки непрерывно растёт. Зависимость съёма от зернистости порошка в данном случае описывается уравнением

$$a = 5\Delta + 2,8 \text{ мкм.} \quad (6.27)$$

Эксперименты проводились на опытной установке при следующих технологических параметрах: магнитная индукция в рабочих зазорах $B=1 \text{ тл}$; время обработки $t_{\text{маш}}=3 \text{ мин}$; скорость резания $v_{\text{рез}}=157,2 \text{ м/мин}$; частота осцилляции $f=1000 \text{ кол/мин}$; амплитуда осцилляции заготовки $A=3,2 \text{ мм}$; рабочий зазор $\delta=2,5 \text{ мм}$; количество порошка в каждом зазоре $Q=10 \text{ г}$; зернистость порошка $\Delta=0,15; 0,3; 0,6; 1,2 \text{ мм}$. Обработке подвергались образцы из стали ХВГ, прошедшие закалку до $HRC 60-62$ единицы и имеющие исходную шероховатость 6—7-го класса по ГОСТ 2789-59.

Характер влияния зернистости порошка Δ на съём металла и шероховатость поверхности изделия $R_z \text{ мк}$ показан на рис. 6.15. Из рис. 6.15, а следует, что как размерный, так и весовой съём металла по мере увеличения грануляции порошка из ферробора непрерывно пропорционально растёт (рис. 6.15 а, кривые 1 и 3), а шероховатость поверхности вначале (при увеличении зерна от 0,075 до 0,45 мм) снижается, потом повышается до размеров исходной, т. е. находится в параболической зависимости (рис. 6.15, а, кривая 2). Уменьшение шероховатости R_z с увеличением зернистости порошка до 0,3—0,6 мм объясняется интенсификацией съёма в начальный пе-

риод обработки, когда идет процесс срезания вершин гребешков микронеровностей. Увеличение шероховатости по мере роста зерна от 0,6 до 1,2 мкм А. М. Штейнберг объясняет интенсификацией врезания рабочих элементов порошка в материал обрабатываемой поверхности.

Зависимость шероховатости обрабатываемой поверхности от грануляции порошка ферробора, по А. М. Штейнбергу, имеет вид [10]

$$R_z = \sqrt{2,169\Delta^2 - 2,4391\Delta + 0,8785} \text{ мкм.} \quad (6.28)$$

Вместе с тем анализ кривых рис. 6.15, а показывает, что обработка с использованием в качестве порошка ферробора обеспечивает незначительный съем металла—2—8 мкм на диаметр и, следовательно, повышение чистоты обработанной поверхности всего на 1—2 класса при большом машинном времени процесса $t_{\text{маш}} = 3\text{--}5 \text{ мин.}$

Аналогичные результаты получены по шероховатости при обработке плоскостей из диамагнитных материалов с использованием в качестве инструмента крошки из серого чугуна.

Исследования метода магнитно-абразивной обработки на цилиндрических образцах с использованием в качестве порошка керметов показали, что в последнем случае интенсивность съема (производительность процесса) значительно возрастает, что позволяет повысить чистоту поверхности изделия на 3—4 класса (по сравнению с исходной) за время резания

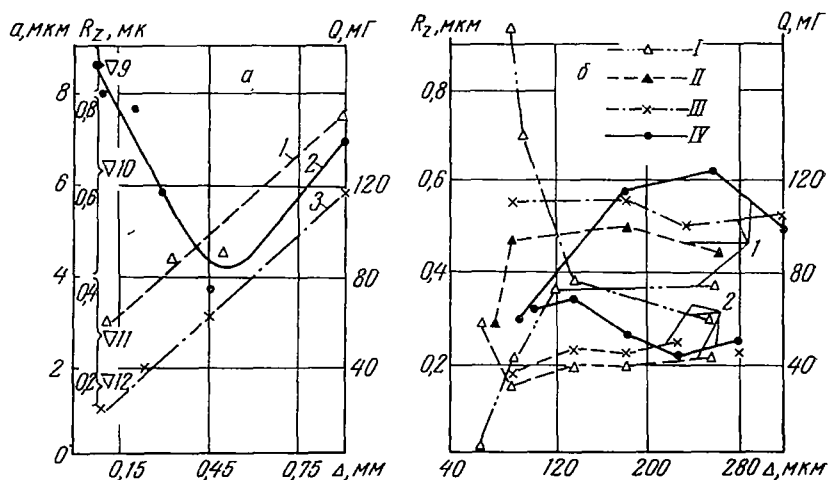


Рис. 6.15. Зависимость размерного (1) и весового (3) съема, а также шероховатости поверхности (2) от зернистости порошков ферробора (а) и кермета (б): I — ЭБМ7+80% Fe; II — ЭБМ20+80% Fe; III — ЭБМ40+80% Fe; IV — ЭБМ6+80% Fe

в 6—10 раз меньше, чем при использовании чугуна, ферритов, ферробора и других приведенных выше материалов равной зернистости.

Влияние грануляции (зернистости) порошков кермета различного композиционного состава на результаты магнитно-абразивной обработки цилиндрических образцов из стали У10А, закаленных до твердости HRC 65—68 единиц, изучалось Ю. М. Бароном [3, 4, 12].

При рассмотрении вопроса о влиянии зернистости ферромагнитных абразивных порошков учитывалось, что керметы являются результатом прессования и спекания порошка железа (ПЖ1 или ПЖ2) и белого электрокорунда ЭБ с последующим размолем полученных брикетов до заданной грануляции. Поэтому выявилась необходимость разделить понятия «зернистость исходного абразива» и «зернистость порошка кермета». Зернистость порошка абразива, например электрокорунда белого, определяет геометрию режущих кромок отдельного зерна; грануляция (зернистость) порошка кермета определяет, кроме того, еще и силу притяжения режущего элемента к поверхности изделия, т. е. силу резания.

В экспериментах Ю. М. Барона использовались порошки электрокорунда белого с исходной зернистостью М7, М20, М40 и 60 мкм, из которых были изготовлены керметы с весомым содержанием железа 80%, а затем путем размола и отсева отобраны фракции с величиной зерна 50—225 мкм. Порошки кермета с размером зерна меньше 40 мкм для ЭБМ7 + 80% Fe и ЭБМ30 + 80% Fe, а также меньше 63 мкм для ЭБМ40 + 80% Fe и меньше 80 мкм для ЭБМ6 + 80% Fe в исследованиях не использовались из-за обеднения железом при размоле и потере магнитных свойств.

Исследования Ю. М. Барона, проведенные при $v_{рез} = 50$ м/мин; $v_{осц} = 6$ м/мин; $A = 2,5$ мм; $B = 1$ гл, охлаждение — 5—10%-ный раствор эмульсола Э2 в воде; скорость возвратно-поступательного движения магнитного индуктора $v_{в.п} = 4$ м/мин, а амплитуда $2A_{в.п} = L_з - l_{пол} + (10 \div 12)$ мм, показали, что при зернистости кермета $\Delta = 100—160$ мкм после 3 мин обработки каждая из испытываемых его композиций дает поверхность без следов предшествующего шлифования. Съем металла в течение 3 мин обработки пропорционален длительности процесса, а затем намечается тенденция к снижению производительности. Исключение составляет кермет марки ЭБМ7 + 80% Fe, у которого уже после 2 мин процесс резания затухает. Кроме того, было замечено, что керметы, изготовленные с использованием мелкозернистого электрокорунда, при размоле легче разрушаются на исходные фракции абразива и порошка железа. Последнее объясняется тем, что прессование мелких порошков при идентичных условиях

всегда дает менее прочные композиции по сравнению с крупными порошками.

Характер зависимости съема металла (семейство кривых 1) и высоты микронеровностей поверхности (семейство кривых 2) от величины зерна кермета, по данным исследований Ю. М. Барона, приведен на рис. 6.15, б.

Из рис. 6.15 видно преимущество применения керметов по сравнению с другими видами ферромагнитных порошков.

Таким образом, анализ многочисленных исследований показывает, что производительность процесса и качество обработанной поверхности в значительной мере зависят от зернистости ферромагнитного порошка. Это подтверждается и данными наших исследований (кривая 4 рис. 6.16). При увеличении зернистости порошка кермета от 0,075 до 0,16—0,2 мм шероховатость обрабатываемой поверхности снижается. Однако дальнейшее увеличение Δ ухудшает чистоту поверхности детали, хотя съем металла продолжает увеличиваться.

Производительность процесса магнитно-абразивной обработки с увеличением зернистости порошка растет, на наш взгляд, вследствие увеличения в данном случае магнитных

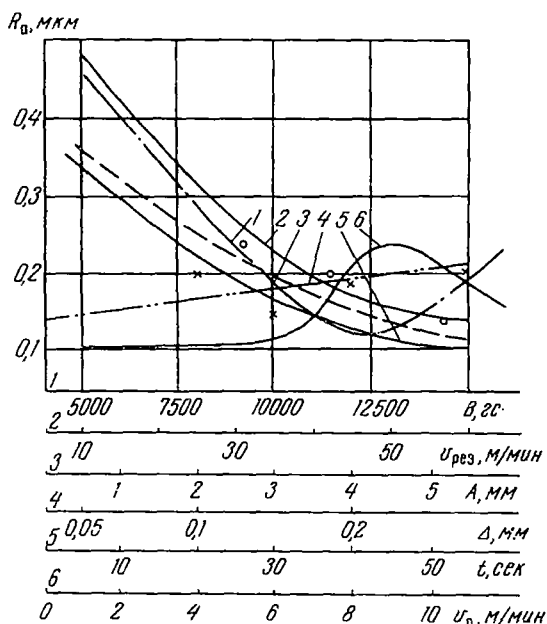


Рис. 6.16. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от магнитной индукции в рабочем зазоре (1), скорости резания (2), амплитуды осцилляции (3), зернистости порошка (4), времени обработки (5) и скорости осцилляции (6)

свойств режущих элементов, что способствует увеличению силы давления зерен на поверхность детали.

Влияние материала порошка на производительность процесса магнитно-абразивной обработки определяется не только его зернистостью, но и его твердостью, магнитной проницаемостью и электропроводностью. Так, наибольшую производительность обеспечивают порошки кермета ЭБМ40+80% Fe в силу того, что в этой композиции резание производит порошок электрокорунда, а порошок железа ПЖІМ, обладая хорошими магнитными свойствами, надежно удерживает режущие элементы в рабочем зазоре. Из других материалов удовлетворительной производительности можно достичь, применяя порошки из ферробора (обеспечивают съем $Q=215$ мг за 6 мин), белого чугуна ($Q=154$ мг за 6 мин). Порошок ферровольфрама обеспечивает съем всего $Q=38,4$ мг за то же время.

При использовании метода магнитно-абразивной обработки значительный интерес представляют параметры, характеризующие его технологические возможности: скорость относительных перемещений, величина рабочих зазоров, зернистость порошков, магнитная индукция и др.

Как было указано выше, энергия магнитного поля используется для удержания порошка в рабочем зазоре, создания равномерного контролируемого давления режущих элементов на обрабатываемую поверхность детали и сообщения этим элементам относительного перемещения в пространстве рабочего зазора. Влияние напряженности магнитного поля на шероховатость поверхности показано на рис. 6.16 (кривая 1). Исследования влияния B на шероховатость выполнялись различными авторами при несравнимых условиях, и общего мнения по этому вопросу в настоящее время не существует. Что же касается производительности, то, по мнению ряда авторов, изменение величины магнитной индукции в пределах $B=2000-10\,000$ гс незначительно влияет на съем металла. Увеличение $B > 10\,000$ гс резко изменяет объем срезаемого материала и чистоту поверхности. Оптимальной с точки зрения производительности и качества поверхности деталей принято считать $B=1,2-1,5$ тл (12 000—15 000 гс). В этом диапазоне при $v_d=40-150$ м/мин в случае обработки стали ШХ15, имеющей твердость HRC 60—62 единицы, стабильно достигается чистота поверхности 12-го класса (с исходной $\nabla 8$).

Графики рис. 6.16 построены по результатам исследований, выполненных при следующих параметрах процесса магнитно-абразивной обработки пальца поршня из стали ШХ15: скорость вращения детали $v_d=41$ м/мин; скорость осцилляции детали $v_{осц}=9$ м/мин; амплитуда осцилляции детали $A=$

≈ 2 мм; зернистость порошка кермета $\Delta = 0,21$ мм; величина рабочего зазора $\delta = 0,7$ мм; время обработки одной детали $t_{\text{маш}} = 30$ сек. Охлаждающая жидкость — 5%-ный раствор эмульсола Э2 в воде.

Выполненные исследования показывают, что скорость вращения детали при постоянном пути обработки, т. е. при условии, что каждая точка обработанной поверхности с различной скоростью проходит один и тот же отрезок пути, практически не оказывает влияния на съем металла и полученную шероховатость. В условиях магнитно-абразивной обработки более правильно говорить не о влиянии скорости вращения детали, а о влиянии длины пройденного каждой точкой поверхности детали пути. Очевидно, что чем больше скорость, тем больший путь пройдет каждая точка микронеровностей за один и тот же отрезок времени или тем большее количество раз эта точка соприкоснется с режущими элементами порошка. Сказанное особенно наглядно подтверждается при обработке деталей различного диаметра: если для диаметров 10 и 50 мм, например, сохранить одинаковой длину пути обработки, то, установив экспериментально оптимальную скорость обработки детали с $d_3 = 10$ мм, можно путем простого пересчета определить скорость резания для любого другого диаметра детали из данного материала. Кривая 2 (рис. 6.16) характеризует зависимость шероховатости обработанной поверхности плунжера (из стали ШХ15 с HRC 60—62) от скорости вращения ω_d при постоянном времени обработки $t_{\text{маш}} = 30$ сек.

Что касается траектории движения зерен порошка в процессе магнитно-абразивной обработки, то она в определенной мере зависит от значения амплитуды возвратно-поступательного (осциллирующего) движения детали. Без осцилляции (детали или порошка) резко возрастает шероховатость обработанной поверхности, так как каждый режущий элемент царапает по одной и той же бороздке микронеровностей. С увеличением амплитуды колебания детали (порошка) съем микронеровностей растет (рис. 6.16, кривая 3), достигая наибольшего значения при $A = 2—6$ мм. Дальнейшее увеличение амплитуды осцилляции нежелательно, так как из-за усиления вибрации системы СПИД шероховатость обрабатываемой поверхности резко повышается.

Влияние времени обработки на производительность процесса показано на рис. 6.16 (кривая 5). Вначале (первые 10—15 сек) шероховатость резко уменьшается, а затем по мере уменьшения высоты микронеровностей производительность снижается, что объясняется увеличением суммарной площади вершин гребешков.

На съем металла в определенной мере влияет скорость осцилляции детали, от которой зависит скорость переориента-

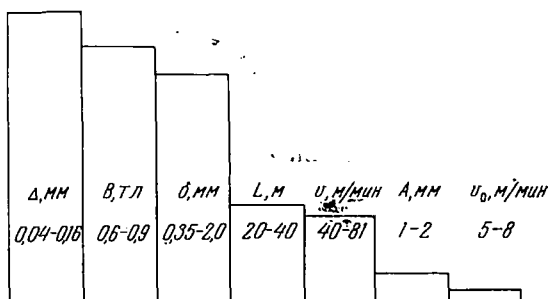


Рис. 6.17. Ранговая диаграмма эффектов факторов

ции зерен в рабочем зазоре и их самозатачивание. Из рис. 6.16 (кривая *б*) следует, что при постоянных R_{a1} , v_d , Δ , δ , A , $t_{\text{ман}}$ наибольший съем достигается при $v_{\text{осц}} = 9$ м/мин. Уменьшение $v_{\text{осц}}$ снижает объем снимаемого металла, но способствует получению более высоких классов чистоты поверхности. При $v_{\text{осц}} > 9$ м/мин съем также снижается и вторая зона оптимума по параметру R_a находится, когда $v_{\text{осц}} > 12$ м/мин.

На рис. 6.17 дана построенная по данным наших исследований ранговая диаграмма эффектов для параметра R_a в зависимости от факторов: Δ — величины зерна порошка; B — магнитной индукции в рабочем зазоре (в теслах); δ — величины рабочего зазора; L — пути, проходимого каждой точкой поверхности детали за время обработки; v_d — скорости вращения детали; A — амплитуды и v_0 — частоты осциллиции детали.

7. Качество обработанной поверхности *

По результатам замеров до и после магнитно-абразивной обработки (см. табл. 6.5 и рис. 6.18, показывающий профилограммы поверхности, типичные для всех экспериментов) установлено:

1. Связь между волнистостью, гранностью, шероховатостью обработанных поверхностей проявляется менее четко, чем у исходных.

2. Магнитно-абразивная обработка с $\nabla 7$ — $\nabla 9$ классов чистоты до $\nabla 10a$ — $\nabla 10b$ идет в основном за счет уменьшения высоты исходных микронеровностей, а не путем формирования новой, присущей магнитно-абразивной обработке шероховатости. Об этом свидетельствуют профилограммы 1 и 2 (рис. 6.18), а также табл. 6.6, из которых видно, что шаг не-

* Здесь и дальше приведены результаты исследований, выполненных Л. К. Минниным.

ровностей поверхностей, исходной и обработанной магнитно-абразивным методом до 10-го класса, практически не меняется.

3. Уменьшение в 2 раза шага неровностей, обуславливающих продольную шероховатость, при 10-м классе чистоты поверхности по сравнению с исходной $\nabla 7$ — $\nabla 9$ говорит о том, что наличие движения осцилляции позволяет дробить протяженные в направлении вращения неровности на более короткие уже в начальных стадиях процесса.

4. В начале обработки наиболее интенсивно удаляются неровности, квалифицируемые как волнистость поверхности (согласно определению, шероховатость поверхности R_a и продольная волнистость $H_{\text{вп}}$ измеряются в плоскости, проходящей через ось детали, а продольная шероховатость $R_{a\text{п}}$ и волни-

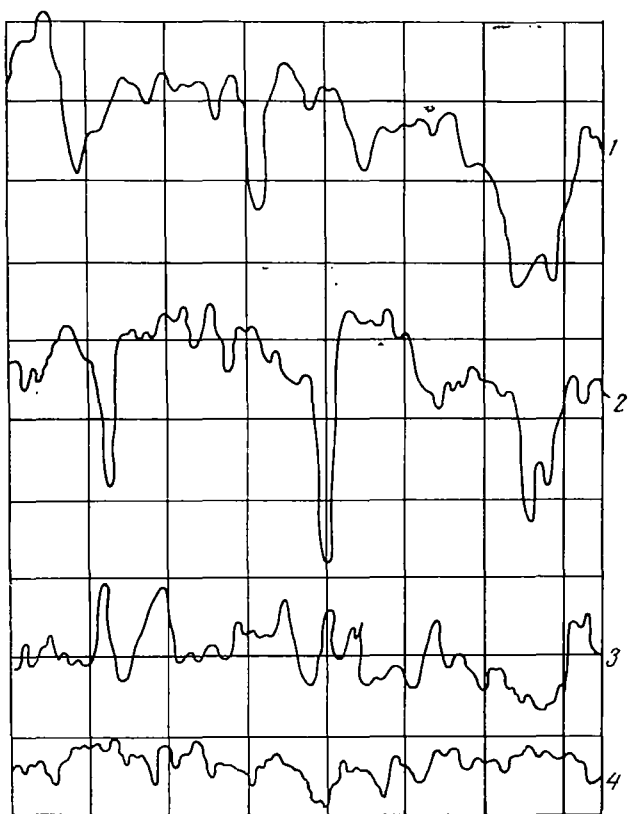


Рис. 6.18. Профилограммы исходной и полученных магнитно-абразивной обработкой поверхностей (горизонтальное увеличение в 800 раз): 1—исходная шлифованная, $\nabla 8$, вертикальное увеличение $(\text{ВУ})=20 \cdot 10^3$; 2, 3, 4—магнитно-абразивная обработка, $\text{ВУ}=100 \cdot 10^3$, соответственно $\nabla 10$, $\nabla 11$, $\nabla 12$

Геометрические характеристики исходной и обработанной поверхности

Параметр	Исходные значения при чистоте поверхности			Значения после обработки при чистоте поверхности		
	▽76	▽86	▽9а	▽10	▽11	▽12
Среднеарифметическое отклонение профиля R_a	0,95	0,5	0,32	0,12	0,06	0,04
Средняя высота микронеровностей	4,6	2,6	1,6	0,58	0,29	0,17
Шаг микронеровностей шероховатости s	98	84	73	99,7	43,4	39,7
Радиус закругления микрогребешков r	250	347	407	2430	840	1180
Средняя высота микронеровностей продольных $R_{z_{II}}$	3,53	2,24	1,7	0,42	0,34	0,23
Шаг продольных микронеровностей S_{II}	299,81	227,96	301	169	66,6	60,3
Радиус закруглений микронеровностей в продольном направлении r_{II}	3180	3500	6650	8490	1630	1930
Коэффициент поляризации шероховатости $P_R = \frac{R_a - R_\delta}{R_a + R_\delta}$	0,13	0,074	-0,003	0,16	-0,079	-0,15
Высота волнистости по дуге окружности H_B	2,61	1,22	0,63	0,45	0,28	0,20
Высота неровностей продольной волнистости	3,05	2,57	1,99	0,3	0,28	0,14
Шаг неровностей продольной волнистости	381,80	351,90	267,20	125,1	114,30	100,10
Высота неровностей гранности	2,82	1,91	1,54	1,5	1,10	0,80

Примечания: 1. Размеры величин даны в $\mu\text{м}$. 2. Взяты средние значения из 25 образцов каждого класса.

ность H_B — в плоскости, перпендикулярной оси). Как следует из табл. 6.5, шаг продольной волнистости $S_{\text{пл}}$ у поверхности, имеющей 10-й класс чистоты, в 3—4 раза меньше, чем у исходной; шаг неровностей шероховатости s_2 при этом равен шагу исходной шероховатости s_1 . Сравнение высот неровностей волнистости и шероховатости также говорит о правомерности высказанного в этом пункте заключения.

5. Обработка с 10-го до 11—11б классов чистоты идет преимущественно как абразивное резание, так как при этом одновременно со снижением высоты неровностей шероховатости и волнистости уменьшается их шаг. Однако заключение о том, что абразивная фаза резания формирует поверхность 11а—11б классов, справедливо только для определенных уровней варьирования исследовавшихся фактов.

6. Снижение шероховатости с 11-го до 12-го классов происходит в основном путем сглаживания вершин микровыступов, сформированных в течение фазы абразивного резания. Это заключение подтверждается тем, что уравнивание высоты микронеровностей и увеличение радиуса их скругления не сопровождаются заметным изменением шага.

7. Высота неровностей гранности уменьшается менее эффективно, чем волнистость и шероховатость.

8. Овальность образцов практически не изменилась. Блечение оправки, а также обрабатываемой поверхности относительно внутренней посадочной составляло 10—30 мкм. Поскольку это блечение не сказалось на изменении овальности деталей, можно предположить, что в случае, если деталь будет вставлена с погрешностью базирования, меньшей, чем исходная овальность (2—3 мкм), исправление последней будет незначительным.

На рис. 6.19 и 6.20 приведены графики, характеризующие зависимость гранности и волнистости, а также продольной волнистости от скорости вращения детали v , магнитной индукции B , зернистости порошка Δ , рабочего зазора δ , скорости v_r и амплитуды A осцилляции детали. Анализ рисунков позволяет установить влияние каждого из указанных факторов на микро- (R_z) и макрогеометрию (Δd) детали.

1. Из всех приведенных параметров наименее интенсивно снижается высота гранности H_r . Это объясняется тем, что сформированный магнитным полем из отдельных зерен порошка эластичный абразивный инструмент весьма слабо реагирует на неровности высотой 2—3 мкм при их шаге, измеряемом десятками миллиметров.

2. Наиболее интенсивно удаляются выступы волнистости как H_B , так и $H_{\text{вп}}$. Это происходит, очевидно, потому, что выступы волнистости являются концентраторами магнитного поля, так как их шаг соизмерим с размерами зерен и послед-

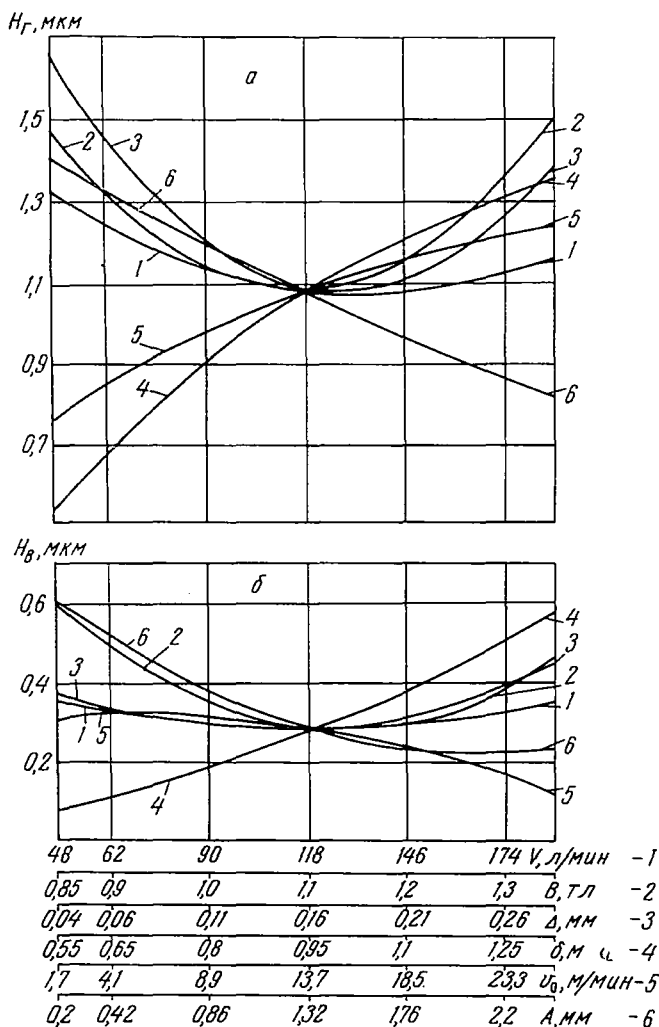


Рис. 6.19. Зависимость гранности (а) и волнистости (б) обработанной поверхности от различных факторов

ние контактируют преимущественно с вершинами микронеровностей. Величины R_z на бывших вершинах и во впадинах продольной волны значительно отличаются, если не снят весь слой металла, образующий исходную шероховатость.

3. Небольшое влияние скорости вращения детали на характеристики обработанной поверхности и величину удаляемого слоя подтверждает слабое воздействие на процесс магнитно-абразивной обработки перемангничивания детали, вели-

чины вихревых токов, микротоков, индуцируемых зернами порошка, и явления магнотрикции.

4. Наиболее значительное влияние на процесс оказывает величина рабочего зазора, так как от размера зазора зависит количество порошка, участвующего в работе резания, магнитная индукция и жесткость режущего инструмента (щетки из порошка).

5. Значительное влияние на все характеристики обработанной поверхности оказывают также скорость и амплитуда осцилляции детали, что объясняется подвижностью зерен порошка, способностью их к перемешиванию в рабочем зазоре и ориентации к детали наиболее острыми гранями. Скорость осцилляции влияет на путь, пройденный зерном по поверхности детали в единицу времени, и на изменение угла атаки $\alpha = \arctg v_0/v_d$.

6. Своеобразно влияние величины магнитной индукции на все исследуемые параметры; для каждого параметра существует свой оптимум.

7. Магнитно-абразивная обработка с успехом может применяться не только для повышения классов чистоты, но и для удаления испорченного шлифованием слоя металла и улучшения геометрической точности детали.

8. Метод позволяет снизить исходную шероховатость 7—8-го класса до 11—12-го классов за 30—40 сек машинного времени.

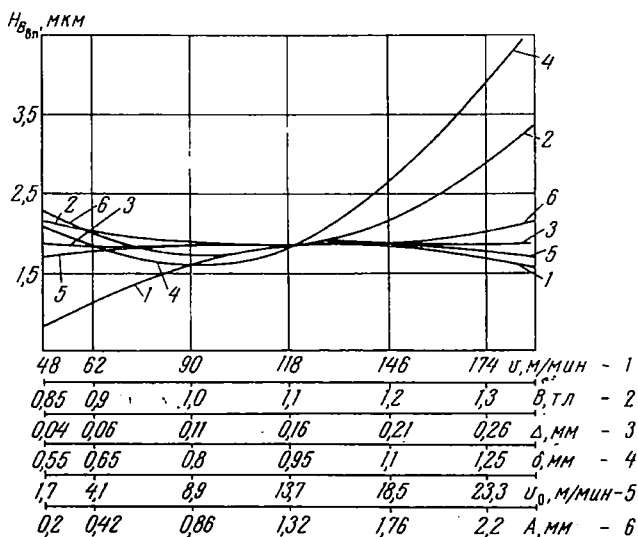


Рис. 6.20. Зависимость продольной волнистости обработанной поверхности от различных факторов

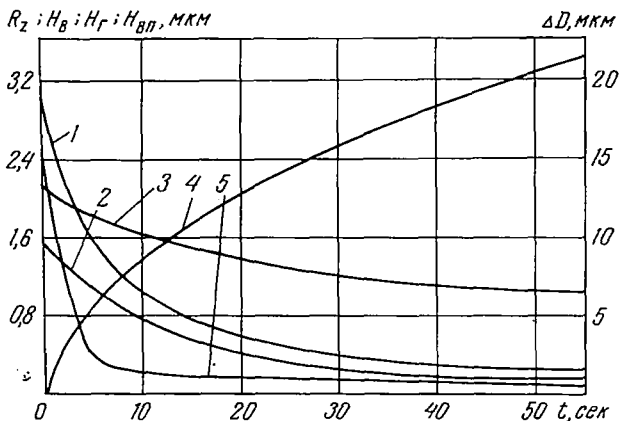


Рис. 6.21. Изменение размера образца и геометрических характеристик поверхности во времени обработки: 1 — шероховатость (R_z), 2 — волнистость (H_w), 3 — гранность (H_f), 4 — уменьшение диаметра образца (Δd_3), 5 — продольная волнистость (H_{wp})

9. Исходная величина гранности уменьшается в 4—5 раз (с 2—3 мкм до 0,4—0,5 мкм), волнистость — в 8—10 раз (с 2—3 мкм до 0,2—0,3 мкм), конусность и овальность — на 70—80% (рис. 6.21).

8. Влияние процесса на долговечность деталей

Исследование влияния магнитно-абразивной обработки на долговечность деталей выполнено на примере полирования роликов раскаточных головок.

Исходная шлифованная поверхность ролика соответствовала 9а—10а классам чистоты. Ролики обрабатывались в центрах на установке ЭУ-1, снабженной плавающим вращающимся центром. Применялись двухступенчатые режимы обработки. Вначале деталь обрабатывалась в течение 30 сек на следующих режимах: $\delta=1,5$ мм, $\Delta=0,06$ мм, $B=1,1$ тл, $v_{рез}=150$ м/мин, $v_{осц}=13$ м/мин, $A=2$ мм. Затем скорость вращения детали и величина магнитной индукции снижались до значений $B=0,6$ тл, $v_{рез}=30$ м/мин, и деталь полировалась еще 60 сек. Обработанные поверхности деталей соответствовали 12а—13а классам чистоты.

В табл. 6.6 приведены данные замеров исходной (R_{a1}) и полученной (R_{a2}) шероховатости, размерные (ΔD) и весовые (ΔG) величины удаляемого слоя, а также изменение овальности ($\Delta O = O_1 - O_2$). Бление детали в центрах составляло 20—40 мкм, что в ряде случаев привело к увеличению овальности до 1—2

Данные исследований обработки конических роликов
раскаточных головок

№ образца	R_{a_1}	R_{a_2}	ΔG	ΔD_1	ΔD_2	ΔD_3	ΔD	O_1	O_2	ΔO
1в	0,1450	0,02700	49	7	10	10	9,0	2	4	-2
2в	0,2620	0,01700	58	5	6	6	5,5	3	2	+1
3в	0,0228	0,01800	40	6	9	10	8,3	0	2	-2
4в	0,1880	0,02000	50	4	8	6	6,0	2	4	-2
5в	0,2380	0,02700	42	4	9	11	8,0	3	4	-1
6в	0,1420	0,02700	48	6	9	7	7,3	3	2	+1
7в	0,2520	0,03100	54	7	12	10	10,0	4	4	0
8в	0,1600	0,01900	40	5	9	8	7,3	2	4	-2
9в	0,1770	0,02500	52	4	7	7	6,0	6	1	+5
10в	0,1900	0,02000	36	6	7	8	7,0	2	2	0
11в	0,2180	0,01900	-42	4	7	9	7,0	5	4	12
12в	0,1680	0,02500	49	3	8	3	5,0	3	3	0
46в	0,3075	0,03150	35	6	7	8	7,0	2	2	0
47в	0,4275	0,03750	34	6	6	7	7,0	2	2	0
48в	0,4325	0,03125	26	7	8	7	6,0	3	2	0
49в	0,2825	0,03500	32	6	7	7	6,0	3	2	-2
50в	0,2900	0,40050	27	6	6	7	7,0	2	2	-1
51в	0,2850	0,02650	34	4	9	11	8,0	3	4	-1
52в	0,2675	0,03025	40	5	9	8	7,3	2	4	2
53в	0,3175	0,03875	34	4	10	10	10,0	4	4	0

мкм. Шесть образцов проходили контроль некруглости на приборе «Тэлиронд». Исходная некруглость 1,5—4,0 мкм уменьшалась в среднем на 0,5 мкм за счет сглаживания острых граней.

В Институте надежности и долговечности машин АН БССР были проведены сравнительные испытания на контактную усталость шлифованных и прошедших магнитно-абразивную обработку роликов одного класса шероховатости.

Нормальная нагрузка на ролики составляла 1200 кг при частоте нагружения 3500 циклов/мин. Смазкой служило веретенное масло.

Средняя наработка роликов, обработанных магнитно-абразивным методом, составила 26,8 час, а шлифованных — 13 час при среднеквадратичном отклонении соответственно 20 и 14 мин. Различий в характере износа, т. е. особенностей в питтинговых раковинах, обнаружено не было.

Повышенная прочность роликов, прошедших магнитно-абразивную обработку, объясняется удалением дефектного слоя, полученного шлифованием, снижением шероховатости, волнистости и гранности, изменением физико-механических свойств поверхностного слоя. Вывод: магнитно-абразивная обработка обеспечивает высокую износостойкость поверх-

постного слоя и по этому параметру не уступает традиционным отделочным методам — суперфинишу и микрохонингу.

На рис. 6.22 приведены сравнительные результаты испытаний на износ деталей, обработанных различными методами отделочной обработки. Из рисунка следует, что магнитно-абразивная обработка с успехом может конкурировать с традиционными широко применяемыми процессами.

* * *

Итак, результаты экспериментальных исследований и опытно-промышленного опробования метода подтвердили, что он имеет вполне реальную область применения: в ряде случаев он успешно заменяет традиционные способы финишной обработки (например, суперфиниш, микрохонинг, полирование войлочными кругами, абразивной лентой и т. д.).

Метод способствует решению проблемы создания абразивного инструмента для чистовых и доводочных операций и уже на нынешнем этапе его развития обеспечивает высокую экономическую эффективность внедрения.

Опыт применения магнитно-абразивной обработки показывает, что в некоторых случаях она является единственным способом, обеспечивающим высокое качество полирования и требуемую производительность.

Успешной реализации метода магнитно-абразивной обработки способствуют созданные в 1962—1973 гг. устройства и станки. Однако для широкого распространения этого прогрессивного вида абразивной обработки необходимо подключение

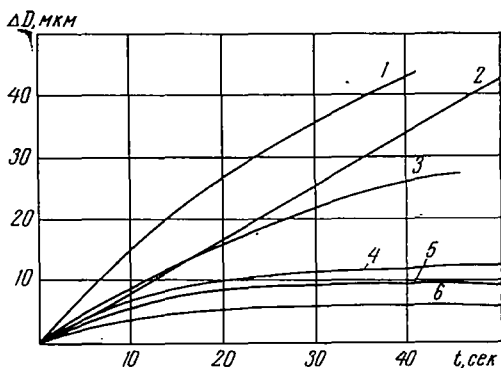


Рис. 6.22. Изменение размера образца при различных отделочных процессах: 1 — магнитно-абразивная обработка, $A = 0,6$ мм, $n_0 = 3000$ кол/мин; $v = 200$ м/мин; 2 — суперфиниш КЗМ28 с наложением ультразвуковых колебаний; 3 — магнитно-абразивная обработка, $A = 1,8$ мм, $n = 900$ кол/мин, $v = 200$ м/мин; 4 — алмазный суперфиниш АСМ20; 5 — полирование шлифполотном; 6 — суперфиниш КЗМ28

к созданию оборудования станкостроительных организаций, централизованный выпуск ферромагнитного порошка и станков, прошедших опытно-промышленную проверку. Возможности магнитно-абразивной обработки в настоящее время еще до конца не выяснены: исследовано и наиболее широко освоено только полирование цилиндрических наружных поверхностей у деталей из ферромагнитных материалов. Однако поисковые эксперименты показывают, что метод с успехом можно применять при полировании деталей из любых материалов (магнитных и немагнитных), любых габаритов и конфигурации.

Пути дальнейших научных и инженерных поисков в области магнитно-абразивной обработки непрерывно расширяются. В настоящее время известно, что метод позволяет осуществить съем металла с обрабатываемой поверхности $0,5—1 \text{ мкм/сек}$ и за $15—60 \text{ сек}$ машинного времени повысить чистоту поверхности детали на $3—4$ класса (с $7—8$ -го до $11—12$ -го класса), а также уменьшить волнистость, гранность и конусность.

Теоретические и экспериментальные исследования кинематики движения и динамики работы ферромагнитных частиц порошка, а также процесса стружкообразования и износа режущих элементов показали, что магнитно-абразивная обработка существенно отличается от обычного процесса абразивного резания. Последнее обстоятельство требует более глубокого изучения физики процесса, детального исследования кинематики механизмов, разработки научных основ метода с учетом особенностей обработки не только тел вращения, но и плоскостей, сложных и фасонных поверхностей деталей из магнитных и немагнитных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

К введению

1. Авт. свид. № 55507, 67а, СССР, 1938.
2. Барон Ю. М. Чистовая магнитно-абразивная обработка. Л., ЛДНТП, 1968.
3. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная обработка плоскостных изделий. «Машиностроитель», 1970, № 7.
4. Бармин Б. П., Калиновский Л. Д. Чистовая обработка деталей электромагнитными головками. «Авиационная промышленность», 1964, № 5.
5. Врезуб В. И. и др. Исследование процесса шлифования крупногабаритных листов переменного сечения. «Самолетостроение и техника воздушного флота», вып. 9, 1967.
6. Коновалов Е. Г., Шулев Г. С. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками. Минск, 1967.
7. Коновалов Е. Г., Штейнберг А. М. Исследование процесса чистовой обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками. Изв. АН БССР, сер. физ.-техн. наук, 1968, № 2.
8. Морозов В. А. Интенсивность магнитно-вибрационной обработки. «Вестник машиностроения», 1970, № 3.
9. Сакулевич Ф. Ю., Барон Ю. М. Чистовая обработка деталей. «Технология автомобилестроения», 1971, № 2.
10. Сакулевич Ф. Ю., Питерман М. А. Чистовая магнитно-абразивная обработка в СССР и за рубежом. «Технология автомобилестроения», 1971, № 1.
11. Шальнов В. А. и др. Новый метод чистовой обработки деталей из немагнитных сплавов. «Станки и инструмент», 1963, № 7.
12. Шулев Г. С., Штейнберг А. М. Обработка шаровых пальцев в магнитном поле ферромагнитными порошками. Сб. «Технология машиностроения и судостроения». ЦБТИ, Калининград, 1968.

К главе 1

1. Барон Ю. М. Чистовая магнитно-абразивная обработка. Л., 1968.
2. Бернар Ж. Окисление металлов, т. 1. М., 1968.
3. Богомолов Н. И. Чистота поверхности при абразивной обработке металлов с различными механическими свойствами. В сб. «Качество поверхности деталей машин». М., 1961.
4. Гогоберидзе Д. Б. Твердость и методы ее определения. М., 1944.
5. Гребенщиков И. В. Роль химических процессов при механической обработке металлов. «Фронт науки и техники», 1935, № 3.
6. Коновалов Е. Г., Шулев Г. С. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками. Минск, 1967.
7. Крагельский И. В. Трение и износ. М., 1963.

8. Маслов Е. Н. Механизм работы абразивного зерна при шлифовании. В сб. «Основные вопросы высокопроизводительного шлифования». М., 1960.
9. Маталли А. А. Новые направления развития технологии чистовой обработки. Киев, 1972.
10. Сакулевич Ф. Ю., Жданович В. И. Труды СКБ-3, вып. 5. Минск, 1971.

К главе 2

1. Блюмберг В. А., Барон Ю. М., Кремень З. И., Граховский Б. П. Авторское свидетельство СССР, № 234184. «Бюллетень изобретений», 1968, № 3.
2. Ваксер Д. Б. Исследование геометрии и размеров абразивного зерна. «Абразивы», вып. 16, 1956.
3. Вязников Н. Ф., Ермаков С. С. Металлокерамические материалы и изделия. Л., 1967.
4. Жданович В. И., Червоглаз Б. М. Труды СКБ-3, вып. 5. Минск, 1971.
5. Займовский А. С., Чудновская Л. А. Магнитные материалы. М., 1957.
6. Захаров К. Д. Технология изготовления ферритов. М., 1958.
7. Иванько А. А. Твердость. Киев, 1968.
8. Лившиц Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов. М., 1959.
9. Математическое обеспечение ЭВМ «Минск-2(22)». Минск, 1969.
10. Мескин В. С. Ферромагнитные силы. Л.—М., 1937.
11. Рейнбот Г. Технология и применение магнитных материалов. М., 1963.
12. Семенов Г. А. ЖПХ, 1959, 32, 7, 1502.
13. Федорченко П. М., Андриевский Р. А. Основы порошковой металлургии. Киев, 1961.

К главе 3

1. Акулов Н. С. Ферромагнетизм. М., 1939.
2. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах, ч. I. Постоянное магнитное поле. М., 1935.
3. Богородицкий Н. П. и др. Электротехнические материалы. М., 1955.
4. Бозорт Р. М. Ферромагнетизм. М., 1956.
5. Вонсовский С. В., Шур Я. С. Ферромагнетизм. М., 1948.
6. Гусев И. Т. Магнитные материалы. М., 1961.
7. Займовский А. С., Чудновская Л. А. Металлы и сплавы в электротехнике, т. I. Магнитные материалы. М.—Л., 1957.
8. Кифер И. И. Испытание ферромагнитных материалов. М., 1962.
9. Кузнецов М. И. Основы электротехники. М., 1964.
10. Магнитные свойства металлов и сплавов. М., 1961.
11. Рейнбот Г. Технология и применение магнитных материалов. М., 1963.
12. Современное состояние и пути развития методов и аппаратуры для исследования ферромагнитных материалов. М.—Л., 1967.
13. Френкель Я. И. Введение в теорию металлов. М., 1958.

К главе 4

1. Авторское свидетельство СССР, № 165651. «Бюллетень изобретений» 1964, № 19.
2. Арнольд Н. Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. М., 1969.

3. Бабаянц С. С. Руководство для намотчика деталей радиоэлектронной аппаратуры и приборов. Л., 1970.
4. Бармин Б. П., Калиновский Л. Д. Чистовая обработка деталей электромагнитными головками. «Авиационная промышленность», 1964, № 5.
5. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная обработка плоскостных изделий. «Машиностроитель», 1970, № 7.
6. Буль Б. К. Основы теории и расчета магнитных цепей. М.—Л., 1964.
7. Буль Б. К. Расчет проводимости магнитных зазоров. М., 1961.
8. Бухгольц Г. Расчет электрических и магнитных полей. Пер. с нем. Под ред. М. С. Рабиновича и Л. Л. Сабовича. М., 1961.
9. Врезуб В. И., Герасименко Ю. В., Хохлов Б. А. Исследование процесса шлифования крупногабаритных листов переменного сечения. «Самолетостроение и техника воздушного флота», вып. 9, 1967.
10. Гинзбург С. Г. Расчет магнитных цепей постоянного тока. Л., 1959.
11. Говорков В. А. Расчет магнитных цепей в стационарном режиме. М., 1960.
12. Гордон А. В., Сливинская А. Г. Электромагниты постоянного тока. Л., 1960.
13. Карпин Е. Б. Средства автоматизации для измерения и дозирования массы. М., 1971.
14. Коновалов Е. Г., Шулев Г. С. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками. Минск, 1967.
15. Коновалов Е. Г., Сакулевич Ф. Ю., Кожуров Л. М., Минин Л. К. Устройство для магнитно-абразивной обработки. «Промышленность Белоруссии», 1972, № 1.
16. Константинов О. Я. Расчет и конструирование магнитных и электромагнитных приспособлений. Л., 1967.
17. Никольский В. В. Теория электромагнитного поля. Изд. 3-е. М., 1964.
18. Мисевич В. С. Проектирование механизмов осцилляции для металлорежущих станков. «Станки и инструменты», № 7, 1968.
19. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний. М., 1971.
20. Подураев В. И. Обработка резанием с вибрациями. М., 1970.
21. Руководство по станку МАС-3 для магнитно-абразивной обработки золотников. Минск, 1970.
22. Румянцев Ю. Г. Определение напряженности магнитного поля вблизи токопровода. Изв. вузов. «Энергетика», 1963, № 4.
23. Сакулевич Ф. Ю., Минин Л. К. Станки для магнитно-абразивной обработки. В сб. «Металлорежущие станки и автоматические линии», № 8. М., 1973.
24. Сакулевич Ф. Ю. Авторское свидетельство СССР, № 319454. «Бюллетень изобретений», 1971, № 33.
25. Сакулевич Ф. Ю., Питерман М. А. Чистовая магнитно-абразивная обработка в СССР и за рубежом. В сб. «Технология автомобилестроения», № 1, 1971.
26. Сливинская А. Г., Гордон А. В. Постоянные магниты. М.—Л., 1965.
27. Справочник машиностроителя. М., 1960.
28. Хэг Б. Электромагнитные расчеты. М., 1934.
29. Шальнов В. А. и др. Новый метод чистовой обработки деталей из немагнитных сплавов. «Станки и инструменты», № 7, 1963.
30. Шулев Г. С., Штейнберг Д. М. Обработка шаровых пальцев в магнитном поле ферромагнитными порошками. В сб. «Технология машиностроения и судоремонта». ЦБТИ, Калининград, 1968.

К главе 5

1. Авторское свидетельство СССР, № 109734. «Бюллетень изобретений», 1957, № 12.
2. Авторское свидетельство СССР, № 165651. «Бюллетень изобретений», 1964, № 19.
3. Артоболовский И. И. Теория механизмов и машин. М., 1953.
4. Грановский Г. И. Кинематика резания. М., 1948.
5. Дикущин В. И. Основные данные для проектирования станков. «Машиностроение», т. IX. М., 1948.
6. Коновалов Е. Г. Некоторые теоретические положения по кинематике формообразования поверхностей. Изв. АН БССР, сер. физ.-техн. наук, 1957, № 1.
7. Коновалов Е. Г. Основы новых способов металлообработки. Минск, 1961.
8. Патент № 2735231, кл. 24в, США. 1956.
9. Патент № 2827740, кл. 24в, США. 1956.
10. Патент № 1148543, кл. 24в, Франция. 1957.
11. Патент № 2880554, кл. 24в, США. 1957.

К главе 6

1. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента. М., 1969.
2. Бармин Б. П., Калининский Л. Д. Исследование процесса чистовой обработки деталей металлической крошкой. Труды НИИТ, № 201, 1965.
3. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная обработка. «Машиностроитель», 1968, № 11.
4. Блюмберг В. А., Барон Ю. М. Магнитно-абразивная обработка. Сб. «Передовая технология и автоматизация управления процессами обработки деталей машин». Л., 1970.
5. Врезуб В. Н. и др. Исследование процесса шлифования крупногабаритных листов переменного сечения. «Самолетостроение и техника воздушного флота», вып. 9, 1967.
6. Иванец В. И. и др. Влияние алмазного, борозонного и электрокорундового шлифования на физико-механическое состояние поверхностных слоев деталей. М., 1970.
7. Коновалов Е. Г., Шулев Г. С. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками. Минск, 1967.
8. Коновалов Е. Г., Штейнберг А. М. Исследование процесса чистовой обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками. Изв. АН БССР, сер. физ.-техн. наук. 1968, № 2.
9. Коновалов Е. Г., Штейнберг А. М. Влияние магнитной индукции на чистовую обработку стали в магнитном поле ферромагнитными порошками. Изв. АН БССР, сер. физ.-техн. наук, 1968, № 3.
10. Коновалов Е. Г., Штейнберг А. М. Влияние грануляции порошка на результаты обработки стали ХВГ в магнитном поле ферромагнитными порошками. Изв. АН БССР, сер. физ.-техн. наук, 1969, № 1.
11. Морозов В. А. Интенсивность магнитно-вибрационной обработки. «Вестник машиностроения», 1970, № 3.
12. Сакулевич Ф. Ю., Барон Ю. М. Чистовая обработка деталей. «Технология автомобилестроения», 1971, № 2.
13. Шальнов В. А. и др. Новый метод чистовой обработки деталей из немагнитных материалов. «Станки и инструмент», 1963, № 7.
14. Шулев Г. С., Штейнберг А. М. Обработка шаровых пальцев в магнитном поле ферромагнитными порошками. В сб. «Технология машиностроения и судостроения». ЦБТИ, Калининград, 1968.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
ГЛАВА 1	
Сущность и особенности процесса обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками	8
1. Сущность метода магнитно-абразивной обработки	8
2. Кинематика движения ферромагнитных элементов в магнитном поле	17
3. Механизм съема металла	23
4. Давление ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность	31
ГЛАВА 2	
Порошки, применяемые при магнитно-абразивной обработке	45
1. Методы получения порошков	48
2. Ферриты, их свойства и технология изготовления	51
3. Керметы, их свойства и технология изготовления	53
4. Режущие способности и магнитно-геометрические параметры кермета	57
5. Определение удельного расхода ферромагнитного порошка	68
6. Некоторые магнитно-мягкие материалы на основе железа, их свойства и технология изготовления	70
7. Физические свойства порошков	72
ГЛАВА 3	
Материалы деталей магнитно-абразивных станков	77
1. Величины, характеризующие поведения тел в магнитном поле	77
2. Классификация магнитных материалов	81
3. Требования к материалам арматуры магнитных систем	85
4. Влияние механической и термической обработки на свойства материалов	94
ГЛАВА 4	
Оборудование для магнитно-абразивной обработки	96
1. Универсальный станок мод. МАС-1А для обработки наружных цилиндрических и сферических поверхностей	98
2. Опытно-промышленный станок-полуавтомат мод. МАС-3 для обработки поверхностей золотников	100
3. Опытный станок-автомат мод. ФАС-1 для обработки наружных поверхностей деталей типа колец	113
4. Станок для обработки крупногабаритных цилиндров мод. МАС-4	115
5. Опытная установка мод. ЭУ-4 для обработки сложных поверхностей	116
6. Экспериментальный станок для обработки плоскостей мод. ЭУ-5	119

7. Установки на базе универсальных станков для обработки поверхностей тел вращения	121
8. Варианты конструкции магнитных систем установок для обработки поверхностей тел вращения	133
9. Установки для обработки плоскостей на базе фрезерных станков	145
10. Расчет элементов магнитной системы станков для обработки плоскостей	153
11. Намотка катушек электромагнитной системы установок магнитно-абразивной обработки	162
12. Выбор оптимальной схемы механизма осцилляции при магнитно-абразивной обработке крупногабаритных деталей	171
13. Устройства для дозирования ферромагнитного порошка	191

ГЛАВА 5

Основные направления развития и применения магнитно-абразивной обработки 197

1. Классификация поверхностей, обрабатываемых магнитно-абразивным методом	197
2. Кинематика магнитно-абразивной обработки	204
3. Возможные схемы магнитно-абразивной обработки	210

ГЛАВА 6

Технологические особенности процесса магнитно-абразивной обработки 223

1. Влияние магнитного поля на технологические параметры процесса	223
2. Влияние формы и величины рабочего зазора на производительность процесса	229
3. Роль энергии микротока	235
4. Особенности обработки плоскостей переменного сечения из диамагнитных материалов	236
5. Влияние химического состава смазывающе-охлаждающей жидкости	241
6. Технологические возможности магнитно-абразивной обработки	250
7. Качество обработанной поверхности	257
8. Влияние процесса на долговечность деталей	263

Литература 267

КОНОВАЛОВ ЕВМЕНИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ, САКУЛЕВИЧ ФАДЕЙ ЮЛЬЯ-НОВИЧ. Основы электроферромагнитной обработки.

Редактор Т. П. Ткачева. Обложка В. П. Коломиец. Художественный редактор В. В. Савченко. Технический редактор И. В. Волоханович. Корректор В. П. Сарванова.

Печатается по постановлению РИСО АН БССР. АТ 03049. Сдано в набор 13.XII-73 г. Подписано в печать 25/II-74 г. Бумага тип. № 1 (энц.). Формат 60×90^{1/16}. Печ. листов 17,0. Уч.-изд. листов 15,3. Изд. заказ 136. Тип. заказ 1218. Тираж 1350 экз. Цена 1 р. 62 к.

Издательство «Наука и техника». Минск, Ленинский проспект, 68. Типография имени Франциска (Георгия) Скорини издательства «Наука и техника» АН БССР и Госкомитета СМ БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Минск, Ленинский проспект, 68.

1 р. 62 к.

24075

Д4

22805