

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ
МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ**

Минск
БГАТУ
2013

УДК 621.923

Акулович, Л. М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля
Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2013. – 372 с. : ил. – ISBN 978-985-519-544-4.

В монографии приведены особенности технологии магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей сложной геометрической формы, выявленные в результате научных исследований. Описаны механизмы формирования и топография магнитного поля в рабочей зоне при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей. Исследованы режущие и магнитные свойства ферроабразивных порошков, влияние активирующих технологических сред на интенсивность съема материала, синергетизм свойств металлических поверхностей при магнитно-абразивной обработке.

Предназначена для научно-технических работников, занимающихся разработкой технологий финишной обработки поверхностей деталей машин. Будет полезна аспирантам и студентам машиностроительных специальностей высших учебных заведений.

Табл. 54 . Ил. 167. Библиогр.: 205 назв.

Рецензенты:

член-корреспондент НАН Беларуси,
доктор технических наук, профессор А. П. Ласковнев,
доктор технических наук, профессор В. К. Шелег

ISBN 978-985-519-544-4

© БГАТУ, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1. МЕТОДЫ ФИНИШНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ.....	12
1.1. Классификация поверхностей деталей машин по видам профиля.....	12
1.2. Анализ существующих методов финишной обработки сложно профильных поверхностей.....	21
1.3. Специальные способы финишной обработки поверхностей сложного профиля.....	38
1.4. Анализ методов магнитно-абразивной обработки поверхностей различного профиля.....	56
1.5. Перспективы развития финишной обработки сложнопрофильных поверхностей.....	84
2. МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ	90
2.1. Исследование напряженности электрического и магнитного полей при формировании интегрированной рабочей технологической среды.....	90
2.2. Динамика интегрированной рабочей технологической среды.....	95
2.3. Абразивная способность ИРТС и ее адгезионное взаимодействие с обрабатываемым материалом.....	109
2.4. Давление ИРТС на обрабатываемую поверхность при клиновидном зазоре	112
2.5. Формирование микрогеометрии и физико-механических свойств обрабатываемой поверхности	116
2.5.1. Влияние исходных микронеровностей на формирование микрогеометрии.....	116
2.5.2. Особенности формирования физико-механических свойств поверхностных слоев деталей при магнитно-абразивной обработке.....	120

2.6. Теоретические основы профилирования полюсных наконечников.....	123
2.6.1. Расчет эквидистантного профиля полюсных наконечников	126
2.6.2. Расчет профиля конхоидных профилей полюсных наконечников	128
2.6.3. Нахождение промежуточных координат обрабатываемого профиля методом интерполирования	130
2.6.4. Аппроксимация обрабатываемого профиля по методу наименьших квадратов	140
2.6.5. Интерполирование обрабатываемого профиля кривыми второго порядка.....	141
2.6.6. Сравнение эквидистант, вычисленных различными численными методами	142
2.6.7. Приближенный расчет необходимого шага таблиц.....	143
3. РЕЖУЩИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОАБРАЗИВНЫХ ПОРОШКОВ	146
3.1. Эксплуатационные характеристики ферроабразивных порошков.....	146
3.1.1. Исследования ферроабразивных порошков с помощью сканирующей электронной микроскопии	156
3.1.2. Исследование ФАП методом микрорентгеноспектрального анализа	158
3.2. Исследование ферроабразивных порошков.....	161
3.2.1. Порошки на основе нитридов титана	161
3.2.2. Порошки на основе боридов титана TiB ₂	168
3.2.3. Порошки на основе белого износостойкого чугуна	171
3.2.4. Порошки на основе аморфных и металлических сплавов.....	176
3.2.5. Порошки на основе боридов железа.....	179
3.2.6. Порошки на основе ультрадисперсного магнетита и карбидов кремния	185

3.2.7. Порошки на основе быстрорежущей стали Р6М5.....	190	4.4.2. MAO деталей игольчатых подшипников.....	283
3.3. Особенности обработки поверхностей быстроизнашивающихся деталей оборудования пищевой промышленности.....	195	4.4.3. MAO поверхностей инструмента для холодного выдавливания.....	286
3.4. Влияние гранулометрического состава ферромагнитного порошка на эффективность обработки профиля зубчатого колеса.....	200	4.4.4. Обработка поверхностей прядильных колец для текстильного производства.....	290
3.4.1. Выбор зернистости ферроабразивного порошка.....	201	4.4.5. Зачистка острых кромок и заусенцев магнитно-абразивной обработкой.....	294
3.4.2. Определение периода технологической стойкости порции ферроабразивного порошка.....	208	4.4.6. MAO закаточных роликов для консервного производства.....	299
3.4.3. Влияния изменения фракционности ферроабразивного порошка в процессе MAO.....	213	4.4.7. Обработка поверхностей рукояток управления коммутационной аппаратуры.....	304
3.5. Оптимизация технологических параметров MAO при использовании порошков Fe-TiC.....	222	4.4.8. MAO наружных поверхностей поршневых колец.....	309
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ.....	236	4.4.9. MAO поверхности шариков.....	317
4.1. Разработка технологических процессов MAO.....	236	4.4.10. MAO поверхностей поворотных и проходческих резцов.....	320
4.2. Технологическое оборудование для MAO поверхностей различного профиля.....	237	4.4.11. MAO деталей оборудования хлебопекарного производства.....	325
4.3. Расчет и конструирование инструмента для магнитно-абразивной обработки.....	255	4.4.12. Обработка профиля зубьев мелко модульных зубчатых колес.....	328
4.3.1. Определение геометрических параметров инструмента для MAO отверстий.....	255	4.4.13. MAO поверхностей длинномерных изделий.....	332
4.3.2. Основы проектирования рабочей зоны при магнитно-абразивной обработке.....	261	4.4.14. MAO дорожек внутренних обойм подшипников.....	338
4.3.3. Расчет и конструирование полюсных наконечников при магнитно-абразивной обработке наружных конических поверхностей.....	265	4.5. Технологическая себестоимость процесса магнитно-абразивной обработки зубчатого колеса.....	344
4.3.4. Оптимизация технологических параметров MAO отверстий.....	273	Заключение.....	351
4.4. Особенности технологии магнитно-абразивной обработки поверхностей различного профиля.....	280	Список литературы.....	354
4.4.1. Обработка металлооптических элементов с высоким коэффициентом светоотражения.....	280		

ВВЕДЕНИЕ

Ведущая роль в обеспечении интенсивного развития народного хозяйства Республики Беларусь принадлежит машиностроению, которое призвано обеспечить радикальные изменения в технологии и организации производств, направленные на повышение их эффективности, снижение трудовых, материальных и энергозатрат в соответствии с мировыми тенденциями развития.

Повышение конкурентоспособности продукции является одной из важнейших задач современного машиностроения. Одним из параметров, характеризующих конкурентоспособность изделий машиностроения, является их ресурс работы, который всегда лимитируется той или иной деталью или сборочной единицей. Поэтому актуальным является повышение ресурса работы деталей машин. Особенно это актуально, если лимитирующий узел работает в условиях воздействия агрессивных сред, без смазочного материала, в контакте с частицами абразивных материалов и др. Известно, что свыше 80 % отказов машин обусловлено процессами изнашивания рабочих поверхностей деталей машин или комплексными причинами, где изнашивание играет доминирующую роль. В процессе эксплуатации поверхностный слой деталей машин и механизмов подвергается наиболее сильному механическому, тепловому, химическому и другим воздействиям. Потеря работоспособности узла в большинстве случаев происходит с поверхности сопрягаемых деталей в результате изнашивания, эрозии, коррозии, деформирования и т. п.

Задача повышения надежности и долговечности машин неразрывно связана с совершенствованием известных и разработкой новых способов финишной обработки поверхностей деталей машин, обеспечивающих не только высокую производительность обработки, но и создание поверхностей с оптимальными свойствами. Величина микронеровностей на рабочих поверхностях деталей оказывает существенное влияние на износостойкость трущихся поверхностей. Уменьшение шероховатости поверхностей обеспечивает более благоприятный микропрофиль, облегчающий трение и снижающий износ сопрягаемых деталей. При относительном скольжении контактирующих поверхностей происходит механическое зацепление микронеровностей, образованных при механической обработке. У поверхностей со значительными величинами микронеровностей

происходит интенсивное их разрушение. Поэтому технологии финишных операций в значительной мере определяют качество изделий. Повышение качества изделий машиностроительной отрасли не может быть достигнуто без совершенствования процессов финишной обработки, удельный вес которых при изготовлении деталей непрерывно возрастает.

В связи с развитием высокоэффективных процессов изготовления заготовок деталей машин, таких как обработка давлением, точное литье, порошковая металлургия и т. п., уменьшается значимость способов черновой обработки материалов резанием. В то же время возрастает роль методов чистовой обработки резанием, которые обеспечивают геометрические и физико-механические параметры рабочих поверхностей деталей машин.

Из финишных методов наибольшее применение в машиностроении получила абразивная обработка. Финишная и суперфинишная обработка материалов осуществляется, как правило, жестко связанным, свободным и подвижно-скоординированным абразивным зерном. Процесс резания жестко связанным абразивом осуществляется при сообщении заготовке или инструменту нескольких относительных движений. При обработке свободным абразивным зерном процесс резания производится при сообщении частицам порошка кинетической энергии относительно находящихся в покое или движущихся заготовок. При обработке подвижно-скоординированным абразивным зерном связующим веществом служит энергия магнитного, ультразвукового или других полей.

При абразивной обработке поверхностей инструментом с закрепленным зерном требуется профилирование инструмента как при его изготовлении, так и в процессе эксплуатации. Необходимость частой правки абразивных кругов в процессе шлифования вызвана потерей ими формы и точности профиля режущего контура. При традиционном шлифовании геометрически сложных поверхностей профилированным инструментом имеет место проблема обеспечить высокую точность и низкую шероховатость поверхности в труднодоступных (переходных) зонах. Эластичные абразивные инструменты (шлифовальная лента, фибровые диски, лепестковые круги и т. п.) занимают промежуточное место между шлифованием жесткими кругами и обработкой

свободным абразивным зерном. Они широко применяются в машиностроении для подготовки поверхности под защитно-декоративные покрытия, для обработки заготовок из пластмасс, резины, древесины.

Для обработки поверхностей деталей, работающих в условиях трения скольжения и качения (ролики и дорожки качения колец подшипников, поршневые пальцы, шейки коленчатых валов и др.) применяется суперфиниширование. Режущий инструмент (алмазные брусочки) самоустанавливаются на обрабатываемой поверхности, копируя ее профиль. Однако, суперфиниширование не позволяет производить качественную обработку поверхностей сложного профиля и отдельных конструктивных элементов, расположенных на основных поверхностях деталей машин.

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

При любом способе финишной абразивной обработки важнейшим фактором является возможность изменять давление частиц абразивного порошка на обрабатываемую поверхность заготовки. В этом случае, в незакрепленном состоянии зерна абразива более полно используют свои режущие способности, так как происходит нивелирование их рабочих кромок относительно обрабатываемой поверхности, а также переориентация и перемещение частиц абразивного порошка в процессе обработки. Наличие у частиц абразивного порошка отрицательных передних углов и скругленных вершин вызывает при высоких скоростях и малых глубинах микрорезания интенсивное скольжение частиц порошка по материалу заготовки. Трение частиц абразивного порошка приводит к тому, что около 70 % всей механической работы, затрачиваемой на процесс финишной и суперфинишной обработки, переходит в тепло. Выделяющееся тепло может вызывать структурные превращения в поверхностных слоях материала заготовки.

Одним из перспективных методов финишной обработки эластичным инструментом является магнитно-абразивная обработка (МАО). При обработке в магнитном поле переориентация абразивных частиц порошка наиболее острой кромкой к обрабатываемой поверхности осуществляется с помощью энергии магнитного поля. Ферроабразивные порошки на основе ультрадисперсных алмазов в этом отношении являются перспективным режущим инструментом, так как имеют чрезвычайно малый радиус скругления режущих кромок, высокую прочность частиц алмаза и низкий коэффициент их трения об обрабатываемую поверхность.

Особенностью способа является ориентированное абразивное резание. В результате явлений самоорганизации частицы незакрепленного абразива под действием магнитного поля ориентируются перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Процесс микрорезания производится постоянно обновляющимися острыми кромками, т. е. на протяжении всего цикла обработки имеет место процесс ориентированного абразивного резания. Для реализации МАО не требуется изготавливать профилирующий абразивный инструмент, а также периодически его править, что в 2...3 раза снижает затраты на инструмент. МАО обеспечивает шероховатость поверхности Ra 0,01...0,4 мкм, снижение температуры резания по сравнению с традиционными методами абразивной обработки, что способствует образованию нового качества поверхности и структуры поверхностного слоя.

Предшествующая монография авторов [1] была посвящена рассмотрению механизма синергетического воздействия на обрабатываемую поверхность компонентов магнитного поля, ферроабразивного порошка и смазывающе-охлаждающих технологических средств. В ней описаны особенности рабочей технологической среды (РТС), анализ их динамических характеристик, совместимость компонентов РТС и способы активации процесса съема металла.

При обработке поверхностей сложной геометрической формы на участках сопряжения нарушаются однородность ферроабразивной щетки и режимы резания. Это вызвано возникновением в этих зонах градиента магнитной индукции и изменением кинематических параметров процесса резания. В монографии приведены результаты исследований процесса МАО, выполненных в течение последних 10-ти лет в Белорусском государственном аграрном техническом

университете под научным руководством авторов. При подготовке монографии авторы ставили задачу: на основе обобщения достигнутых результатов исследований МАО выработать основные подходы комбинированного энергетического, механического и химического воздействия на стадии формирования рабочих поверхностей деталей машин.

Участие авторов в написании монографии: Акулович Л. М. – введение, структура и общее редактирование, главы 1, 2, 4; Сергеев Л. Е. – главы 1, 3, 4.

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

Авторы считают приятным долгом выразить признательность член-корреспонденту НАНБ, доктору технических наук, профессору Ласковневу А. П. и доктору технических наук, профессору Шелегу В. К. за рецензирование рукописи и полезные замечания, которые способствовали улучшению качества монографии.

1. МЕТОДЫ ФИНИШНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ

Механическая абразивная обработка в настоящее время является основным методом формирования профиля рабочих поверхностей деталей машин, обеспечивая при этом заданные параметры шероховатости и физико-механических свойств. Среди финишных способов абразивная обработка поверхностей нередко является единственным возможным методом обеспечения требуемого качества поверхности.

Основные свойства поверхности формируются в процессе изготовления на завершающих операциях, поэтому им в технологических процессах уделяется особое внимание.

Существующие абразивные методы финишной обработки деталей машин позволяют достаточно эффективно производить обработку поверхностей различного профиля: цилиндрического, конического, сферического, сложного.

По методу формирования контура режущего лезвия инструмента существующие методы финишной абразивной обработки поверхностей разделяются на обработку закрепленным, свободным и подвижно-скоординированным зерном.

1.1. Классификация поверхностей деталей машин по видам профиля

Формы поверхностей деталей в машиностроении назначаются конструктором исходя из функционального назначения узла, детали в целом и конкретной поверхности в частности. При этом учитывается среда, в которой работает данная деталь, материал и размеры детали. Обязательным условием, которое должно быть выполнено при конструировании деталей, является возможность обеспечить заданную форму поверхностей известными технологическими

методами при их изготовлении. Любой метод изготовления поверхностей (литье, штамповка, обработка резанием и т. д.) неизбежно вносит определенные отличия реально полученных поверхностей от заданных (идеальных геометрических поверхностей), которыми пользуются при конструировании. Внешнее проявление этого отличия состоит в отклонении форм, размеров и шероховатости поверхностей.

Использование в деталях поверхностей сложной формы вызвано рядом причин, основными из которых являются:

- необходимость осуществления определенного закона движения для данной машины или механизма (кулачки в кузнечно-прессовых машинах, коноиды в приборах вычислительной техники, винты с переменным шагом для уплотнения резины или угольной пыли);

- необходимость обеспечения высоких КПД энергетических установок, в которых работает данная деталь (лопасти водяных турбин, гребные винты кораблей, лопатки паровых турбин, крыльчатки газовых турбин и т. п.);

- необходимость придания определенной формы, исходя из условий расчета напряжений (форма лопастей рабочих колес водяных турбин, сечения полотен рабочих колес паровых турбин и т. п.).

Детали машин имеют, в основном, плоские, цилиндрические, конические, сферические, винтовые и точно заданные поверхности. Поверхности детали более сложной формы могут быть с достаточной точностью представлены совокупностью поверхностей более простой формы. Отдельно взятая деталь любого изделия представляет сочетание конструктивно необходимых поверхностей.

Все многообразие применяемых в машиностроении поверхностей можно свести к нескольким типам, среди которых наибольшее распространение получили следующие типы поверхностей:

- алгебраические, которые строго описываются математическими уравнениями, их форма и расположение в пространстве четко определены. Все другие виды поверхностей называются трансцендентными;

- с числовыми отметками, когда форма поверхностей задана отдельными точками, а их координаты заданы в виде числовых отметок, сведенных в таблицы;

- конструктивные, когда форма поверхностей определяется конструктивной необходимостью и не подчинена математическим уравнениям.

В конструкциях аппаратов химического, медицинского и энергетического машиностроения, газотурбинных двигателей, аппаратов криогенной техники и других устройств широко применяется большая группа сложнопрофильных деталей. Типичные представители деталей, близких к типу «тел вращения» приведены на рис. 1.1.

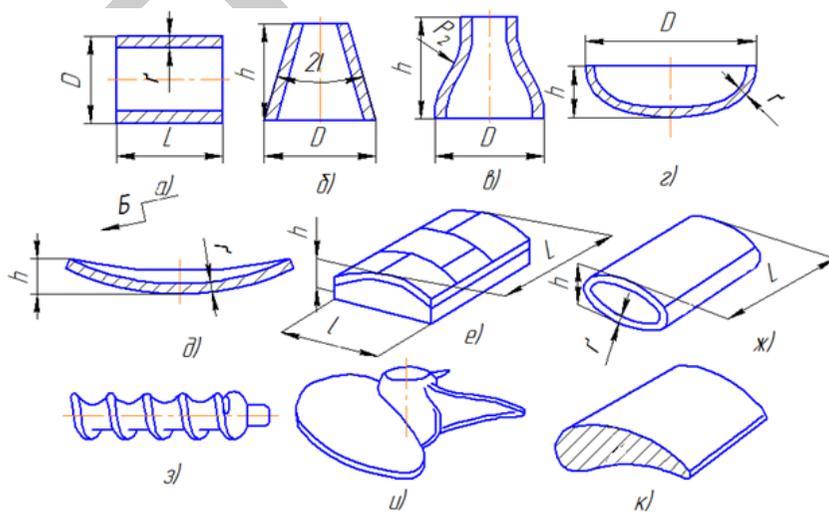


Рис. 1.1. Виды поверхностей некоторых типовых деталей сложной формы:
a – обечайки; *б* – конусы; *в* – кожухи; *z* – днища эллиптические;
д – сегменты шаровых емкостей; *е* – цилиндрические панели;
жс – трубы профильные; *з* – шнеки; *и* – лопасти водяной турбины;
к – крылья для судов на подводных крыльях

К ним относятся лопатки турбин, гребные и воздушные винты, шнеки, роторы газовых и паровых турбин, коноиды и кулачки механизмов вычислительной техники и станкостроения, изделия с зубчатым контуром на наружных и торцовых поверхностях и др. [2]. Сюда следует добавить различного рода фасонные пуансоны и матрицы ковочных и вырубных штампов, прессовые формы для вулканизации и пластических масс, а также металлические модели для точного литья. Их обработка и контроль точности формы имеют специфические

особенности и связаны с использованием специальных методов, оборудования и инструментов [3...13].

Следует отметить, что по производительности и другим критериям существующие технологии формообразования сложнопрофильных поверхностей резанием зачастую уступают аналогичным технологиям обработки изделий, ограниченных плоскостями и линейчатыми поверхностями вращения. При изготовлении изделий типа лопастей винтов, гидротурбин, насосов еще широко применяются ручные операции, доля которых в трудоемкости обработки сложнопрофильных поверхностей достигает до 70 % [14], что указывает на необходимость создания эффективных схем формообразования, реализующих их станочного оборудования и режущих инструментов.

Все многообразие деталей машиностроения в подавляющем большинстве представляет собой регулярные или близкие к ним поверхности в виде цилиндров, конусов, параллелепипедов, обработанных по наружным или внутренним поверхностям в основном на металлорежущих токарных, карусельных, фрезерных и шлифовальных станках. Парк таких станков на предприятиях составляет до 90 % станочного оборудования. Зубья колес обрабатывают на зуборезных (зубофрезерных, зубострогальных, зубошлифовальных и др.) станках, составляющих до 5 % станочного оборудования. Однако в промышленности существует относительно большое количество деталей, имеющих иррегулярную форму, довольно сложные поверхности и выполняющих весьма ответственное назначение. Их изготавливают на специальных копировальных станках с разными системами управления, в последнее время – с программным управлением. Удельный вес такого оборудования, например на автомобильных, авиационных, судостроительных заводах, составляет 3...5 %, но удельная значимость их из-за стоимости, отсутствия замены (обычно при выходе из строя) и т. д. очень высокая.

Однако наиболее слабым местом копировальных станков с механическим управлением являются копиры. Дело в том, что усилия подачи в копировальных станках достигают величины порядка 2000...5000 Н. Подобные величины усилия требуют применения стальных термически обработанных копиров толщиной 20...40 мм. Изготовление правильного профиля у копиров такой толщины вызывает затруднения. При небольшой толщине копира деформация профиля копира влияет на конечную точность обработанной детали.

Станки с программным управлением обладают рядом преимуществ перед копировальными станками: отсутствием расходов на изготовление копиров в явном виде, их ремонт и хранение; повышенной точностью обработки; заметным сокращением ручных доделочных работ; интенсификацией технологических процессов. Экономичность станков с программным управлением тем выше, чем сложнее деталь, больше перемещений узлов, больше время обработки. Однако появляются дополнительные задачи, связанные со сложностью подготовки управляющих программ, наладки и технического обслуживания станков. Все это приводит к тому, что компоновки современных копировальных станков и станков с числовым программным управлением становятся весьма сложными. Это продиктовано требованиями обеспечения формообразования поверхностей сложного профиля и параметров их точности.

Рассмотрим технологические особенности таких поверхностей. Шероховатость поверхностей деталей (обечаек, днищ, валов, труб, мешалок, отражателей) обычно находится в пределах Ra 2,5...0,63 мкм, хотя в некоторых случаях требования могут быть и значительно выше (0,08...0,04 мкм). К некоторым деталям наряду с требованиями к шероховатости поверхности предъявляются определенные требования и к направлению рисок (следов абразивных зерен). Например, совпадение направления рисок с направлением движения газовых потоков и действия центробежных сил снижает аэродинамическое сопротивление и повышает усталостную прочность несущих конструкций.

В ряде случаев задаются определенные требования к разнотолщинности стенок детали, особенно в тонкостенных несущих конструкциях. Шлифование тонкого, коррозионностойкого слоя биметаллического проката должно улучшать шероховатость при минимальном равномерном съеме металла с поверхности. В противном случае толщина коррозионностойкого слоя биметалла значительно снизится или будет иметь локальные уменьшения (значительную разнотолщинность), что приведет к сокращению сроков эксплуатации аппарата.

Выполнение требований по уменьшению шероховатости поверхности, направлению рисок и разнотолщинности стенок представляет большие трудности при изготовлении деталей (требуются специальные станки). Обеспечение этих требований по всей

обработанной поверхности является достаточно сложной технологической задачей.

Трудность обеспечения перечисленных требований на большой площади сложнопрофильных деталей поверхности обусловлена многими причинами. Основными из них являются несоответствие состояния исходной поверхности (наличие забоин, рисок, окалины и т. п.) проведению финишных операций и неодинаковая исходная шероховатость различных участков поверхности.

Для изготовления лопаток паровых турбин применяются стали 12Х13, 20Х13; лопастей крыльчаток – стали 30ХГСА, 12Х18Н9Т. Лопатки турбин в зависимости от назначения изготавливают горячей штамповкой, прессованием, прокаткой и вальцеванием. Для рабочих лопаток турбин применяются жаропрочные материалы, содержащие никель, хром, вольфрам, молибден, титан и тантал. Для сопловых лопаток турбин применяют в основном литейные сплавы на никелевой основе, например; ЖС6 и др.

Удельный съем металла в зависимости от химического состава и механических свойств обрабатываемого материала может изменяться почти в 10 раз, а стойкость абразивного инструмента, по данным [15], при обработке сплавов типа ЖСЗ, ХН77ТЮР, 20Х25Н20С2 и т. д. в 15...20 раз ниже, чем при шлифовании конструкционных и легированных сталей.

Эксплуатация сложнопрофильных деталей в различных аппаратах и устройствах протекает, как правило, в условиях повышенных температур. Их рабочие поверхности подвергаются воздействию агрессивных химических сред, гидро- или аэродинамических потоков, а иногда того и другого одновременно. Поэтому к этим деталям и состоянию их рабочих поверхностей предъявляется целый ряд таких требований, как коррозионная и эрозионная стойкость, прочность и износостойкость, теплостойкость и низкая шероховатость поверхности.

Требования к определенной шероховатости рабочих поверхностей обусловлены различными причинами. Это вызвано необходимостью уменьшить или полностью исключить адгезию продукта к стенкам деталей, а иногда требованиями к снижению динамических сопротивлений гидropотокам. В деталях криогенной техники – улучшением теплоизоляционных свойств за счет повышения отражательной способности стенок, в аэродинамических профилях –

снижением сопротивления воздушным и гидравлическим потокам для уменьшения потерь на трение.

Поэтому перед шлифованием такие поверхности целесообразно обработать лезвийным инструментом, сняв весь поверхностный дефектный слой, обеспечив постоянство толщины стенок и точность геометрических размеров и форм. Однако точение и фрезерование относительно нежестких деталей, имеющих большие допускаемые отклонения по геометрическим размерам, представляют собой еще более сложную технологическую задачу. Поверхности деталей сложного профиля принято шлифовать сразу без предварительной обработки лезвийным инструментом. Такая же схема обработки принята и для сложнопрофильных деталей, изготавливаемых из листового материала при пластическом его деформировании без нагрева, так как на исходной поверхности заготовок всегда имеются дефекты металлургического производства. Изготовление таких деталей методами вальцевания не только не устраняет поверхностные дефекты, а, наоборот, увеличивает их количество и усугубляет их влияние на процесс последующего шлифования. Точность размеров сложнопрофильных деталей, изготавливаемых из листовых заготовок, обычно находятся в пределах 5...9-го качества. В химическом машиностроении точность размеров не превышает 7-го качества, в других отраслях – не выше 5-го качества. Поэтому заготовки сложнопрофильных деталей, изготавливаемых из листовых материалов, как правило, имеют значительные допускаемые отклонения от заданной геометрической формы, а обработка их с помощью эталонных копиров сопряжена со значительными трудностями или вообще невозможна.

С технологической точки зрения поверхности деталей можно рассматривать как непрерывное множество последовательных положений одной производящей линии 1, называемой образующей, движущейся по другой производящей линии 2, называемой направляющей (рис. 1.2). Например, для получения плоскости необходимо образующую прямую линию 1 перемещать по направляющей прямой линии 2 (рис. 1.2, а). Цилиндрическая поверхность может быть получена при перемещении образующей прямой линии 1 по направляющей линии – окружности 2 (рис. 1.2, б) или образующей окружности 1 вдоль направляющей прямой линии 2 (рис. 1.2, в). Рабочую поверхность зуба цилиндрического колеса можно получить, если образующую линию – эвольвенту 1 передвигать вдоль

направляющей 2 (рис. 1.2, з) или наоборот образующую прямую 1 по направляющей – эвольвенте 2 (рис. 1.2, д).

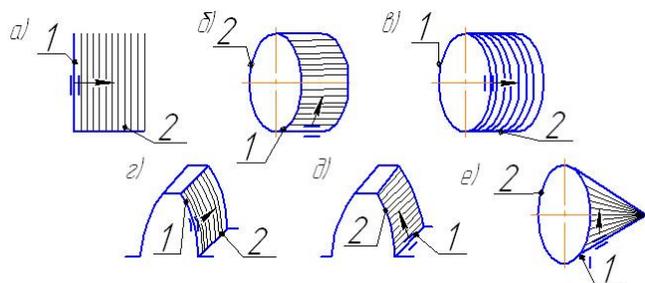


Рис. 1.2. Схемы положений производящих линий

Рассмотренные поверхности называют *обратимыми*, так как, если поменять местами образующие линии с направляющими, то форма поверхностей не изменится. При образовании *необратимых* поверхностей сделать этого нельзя. Например, если левый конец образующей прямой линии 1 перемещать по направлению окружности 2, получится круговая коническая поверхность (рис. 1.2, е). Но если окружность 2 сделать образующей и переместить вдоль направляющей прямой, конус не получится. В этом случае необходимо, чтобы по мере перемещения окружности к вершине конуса изменялся диаметр окружности, достигая в вершине значения, равного нулю. Такие поверхности называют поверхностями с изменяющимися производящими линиями.

Производящие линии на станках образуются материальными точками и линиями режущей кромки инструмента за счет согласованных относительных движений заготовки и инструмента, называемых формообразующими движениями. В зависимости от формы производящей линии и метода ее образования движения формообразования могут быть простыми и сложными. К простым движениям формообразования относят вращательное и прямолинейное.

Сложными формообразующими движениями являются те, траектории которых образуются в результате согласования взаимозависимых двух и более вращательных или прямолинейных движений, а также их сочетаний для получения единого сложного движения (рис. 1.3).

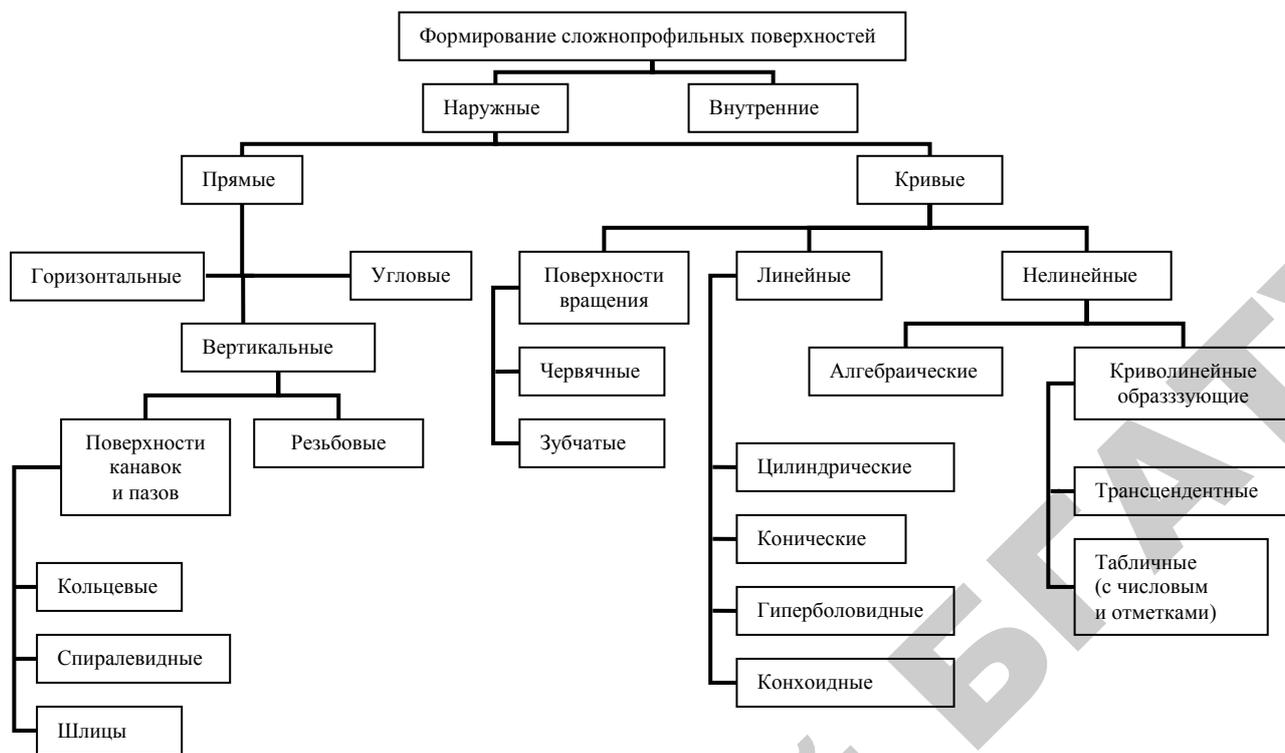


Рис. 1.3. Классификационная схема образования поверхностей сложного профиля

В технологии обработки сложнопрофильных поверхностей реализация формообразующих движений сопряжена с определенными трудностями. Поэтому создана научно обоснованная система классификации поверхностей деталей машин. Такая классификация основывается на внешних признаках, присущих деталям, и одновременно носит технологический характер, так как на ней базируется систематизация процессов обработки. Таким образом, классификация поверхностей деталей машин является основой синтеза технологических процессов для комплексного решения задач обработки поверхностей каждой классификационной группы.

В настоящее время в машиностроении для реализации методов обработки сложнопрофильных поверхностей используют следующие методы:

- настройки кинематических цепей металлорежущих станков с использованием зубчатых, червячных, планетарных, кулачковых передач в различных сочетаниях;
- использование индивидуального автономного привода каждым простым формообразующим движением и числового программного управления законом перемещения исполнительных органов металлорежущих станков;
- обкатки (обработки) фасонным режущим инструментом;
- объемного копирования, при котором возможны решения, когда копир бывает постоянных размеров и переменных (деформируемых) в процессе обработки;
- использование копиров в неявном виде (физические устройства – гидравлические, пневматические, болометрические, магнитострикционные, электронные, лазерные).

1.2. Анализ существующих методов финишной обработки сложнопрофильных поверхностей

Качество поверхности во многом определяется состоянием поверхностного слоя. Для деталей, к которым предъявляются требования повышенного сопротивления пластической деформации, прочности, износостойкости, важными являются такие характеристики поверхности, как шероховатость, отсутствие микротрещин, микротвердость, коррозионная стойкость. Основные свойства по-

верхности формируются в процессе изготовления, особенно на отделочных операциях, поэтому им в технологических процессах уделяется особое внимание. Возрастающие требования к надежности изготавливаемых деталей вызывают необходимость совершенствования технологического процесса их изготовления.

В машиностроительном производстве применяются разнообразные методы формирования рабочих сложнопрофильных поверхностей деталей машин с обеспечением заданных физико-механических свойств и шероховатости. Среди них доминирующим является механическая обработка, которая нередко является единственным возможным способом обеспечения требуемого качества поверхности. Особое место среди них занимает финишная обработка, к которой относят механические, немеханические и комбинированные способы удаления материала с заготовки [16], поскольку она обладает свойством управляемости и обеспечения гибкости производства, что является наиболее эффективным средством получения изделий требуемого качества. Поэтому ее развитие представляет важный резерв машиностроения [17...21]. Финишной обработке подвергается до 80 % всех деталей машин [13], а ее удельная трудоемкость составляет 20...45 % в общей трудоемкости машиностроительного производства [22].

Существующие методы финишной обработки деталей машин достаточно эффективны при обработке различных поверхностей: цилиндрических, конических, сферических и т. д. Современная промышленность располагает достаточно большим числом методов и способов обработки, обеспечивающих получение заданной шероховатости рабочей поверхности. Основным направлением развития финишных методов является совершенствование механической абразивной обработки. По виду режущего инструмента существующие методы финишной абразивной обработки можно разделить на абразивную обработку жестко-связанным, свободным и подвижно-скоординированным зерном [23].

В первом случае абразивные зерна неподвижно закрепляются (цементируются) в механической связке и образуют круг, брусок или гибкую абразивную ленту. Процесс резания осуществляется при сообщении детали или инструменту нескольких относительных движений.

Во втором случае зерна абразивного порошка при обработке остаются в свободном состоянии, процесс резания производится при сообщении элементам порошка кинетической энергии относительно находящихся в покое, вибрирующих или движущихся с постоянной скоростью изделий.

При абразивной обработке подвижно-скоординированным зерном роль связующего элемента выполняет энергия электромагнита. Если частицы механической связки дискретны, то электромагнитное поле непрерывно распределено, диссипацировано в пространстве рабочего зазора и может изменять свои параметры (напряженность, магнитная индукция и др.). Способность электромагнитного поля интерферировать, то есть, взаимодействуя, усиливать или ослаблять сцепление частиц абразивного порошка между собой, а также изменять их давление на обрабатываемую поверхность, создает возможность объединения в одном рабочем цикле черновой, чистовой и финишной операций. При закреплении абразивных частиц в механической связке интерференции не наблюдается и изменение давления абразивного инструмента на обрабатываемую поверхность осуществляется дискретно механизмами станка.

Для обоснования необходимости использования способа магнитно-абразивной обработки и определения места, которое может занять данный способ в технологических процессах изготовления изделий, необходимо сопоставить данный способ с известными способами финишной обработки, которые в общем случае могут быть использованы для отделочной обработки деталей. К числу таких способов можно отнести: шлифование гибкими кругами, доводку, струйную обработку, виброабразивную обработку и др.

Шлифование гибкими (эластичными) кругами применяется, как правило, в качестве промежуточной операции между обычным шлифованием и полированием. Гибкие абразивные круги (рис. 1.4) изготавливают на резиновой связке с добавлением искусственных смол. Главным преимуществом гибких абразивных кругов является то, что податливость связки позволяет выравнивать глубины резания отдельными абразивными зернами. Это способствует образованию более ровного, по сравнению с обычным шлифовальным кругом, режущего контура. Шлифование гибкими абразивными кругами позволяет эффективно обрабатывать фасонные и криволинейные участки наружной поверхности деталей, так как в этом

случае обеспечивается полное копирование профиля обрабатываемой поверхности [24]. Процесс обработки обычно сопровождается меньшим выделением тепла, что существенно снижает вероятность образования шлифовочных прижогов. При этом наблюдается увеличение микротвердости обработанной поверхности. В процессе шлифования такими кругами, вследствие наличия ровного режущего контура, глубоких рисок не образуется и стабильно получается шероховатость по параметру Ra 0,32 мкм при исходной высоте микронеровностей по параметру Ra 0,63...1,25 мкм.

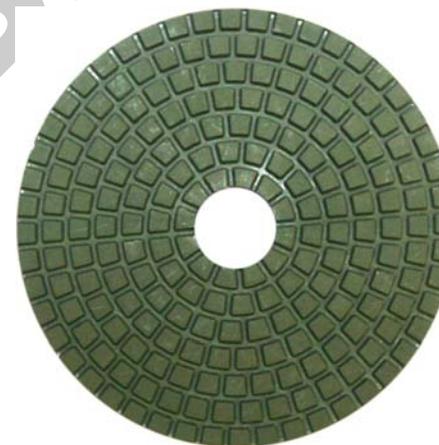


Рис. 1.4. Фотография гибкого абразивного круга

Однако обработка гибкими абразивными кругами не может быть использована в качестве самостоятельной финишной операции при обработке наружных поверхностей вращения сложного профиля, так как требует предварительного шлифования деталей и не дает возможности получать шероховатость по параметру Ra ниже 0,32 мкм, поскольку гибкий круг непрерывно работает в режиме резания.

Широкое распространение при обработке наружных цилиндрических поверхностей деталей получило суперфиниширование (рис. 1.5). Суперфиниширование – процесс отделочной обработки мелкозернистыми брусками, упруго прижатыми к обрабатываемой поверхности с небольшим давлением (0,20...0,40 МПа) и совершающими колебательные движения относительно вращающейся детали [25, 26].

Обработка происходит в пределах высоты микронеровностей, образовавшихся на предшествующей операции без существенного изменения размеров.

Процесс абразивного микрорезания при суперфинишировании прекращается автоматически по мере удаления неровностей исходного микропрофиля. Дефекты макрогеометрии суперфиниширование не устраняет, поэтому необходимая точность обработки должна быть обеспечена на предшествующих операциях.



Рис. 1.5. Фотография рабочей зоны при суперфинишировании

Использование процесса суперфиниширования при обработке наружных поверхностей деталей сложного профиля при предъявлении к ним высоких требований к геометрической форме затруднительно, так как по ряду причин, обусловленных кинематикой процесса, имеет место неравномерный съем металла с различных участков профиля. Кроме того, для получения высоких параметров шероховатости обработанных поверхностей необходимы предварительная обработка деталей шлифованием и высокая степень очистки смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС).

При обработке способами, основанными на использовании свободного абразива, зерна более полно используют свои режущие способности, так как происходит равномерное распределение режущих кромок относительно обрабатываемых поверхностей,

а также переориентация и перемещение их в процессе обработки. Такие способы позволяют, при сравнительно простых кинематических схемах оборудования, осуществлять обработку деталей сложной конфигурации из различных материалов. Значительно снижается температурный режим процесса, так как скорости резания меньше, чем при обычном шлифовании, а зоны микрорезания обильно омываются СОТС. Это позволяет получать высокое качество обработанной поверхности без прижогов, микротрещин и нежелательных структурных изменений. Обработке могут подвергаться детали, размеры которых меняются в широких пределах – от нескольких миллиметров до нескольких метров.

Наиболее распространенным способом обработки свободными абразивами является *вибрационная обработка* [27...31]. Вибрационная обработка в зависимости от характера применяемой рабочей среды представляет собой механический или химико-механический процесс съема мельчайших частиц и оксидов с обрабатываемой поверхности, а также сглаживание микронеровностей путем их пластического деформирования частицами рабочей среды, совершающими в процессе работы колебательное движение. На рис. 1.6 представлена фотография установки для вибрационной обработки.



Рис. 1.6. Фотография установки для вибрационной обработки

Большое количество микроударов, действующих на обрабатываемую деталь одновременно в различных направлениях, способствует в некоторой степени удержанию ее во взвешенном состоянии, исключая грубые забоины и повреждения. Это позволяет

обрабатывать детали малой жесткости. В результате циркуляции обработка происходит во всех зонах рабочей камеры, наиболее эффективно – около дна камеры, где давление рабочей среды наибольшее [32, 33].

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

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

Абразивная доводка (*притирка*) осуществляется абразивно-доводочной смесью, нанесенной на поверхность притира. Материал притира обычно выбирается более мягким по сравнению с обрабатываемым. При доводке применяются различные абразивные материалы, в том числе алмаз и эльбор [34]. В качестве рабочей жидкости обычно используют смесь керосина с машинным маслом.

В зависимости от состояния абразивных зерен между притиром и деталью притирку можно разделить на два вида (рис. 1.7 и 1.8): притирка свободным абразивом (пастами и суспензиями) и связанным абразивом (шаржированные притиры, монолитные абразивные притиры) [35, 36].

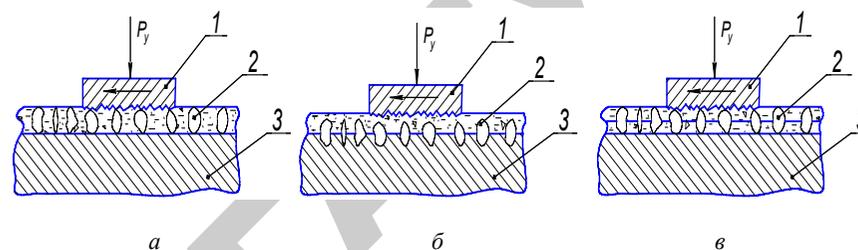


Рис. 1.7. Схемы притирки:

а – непрерывно подаваемой абразивной суспензией или нанесением пасты; *б* – шаржированным притиром; *в* – монолитным абразивным или алмазным притиром; 1 – обрабатываемая деталь; 2 – абразивные зерна; 3 – притир

Сам процесс доводки является трудоемким, малопроизводительным, содержит, как правило, большой объем ручного труда, требует частой правки притиров для восстановления их исходной формы.

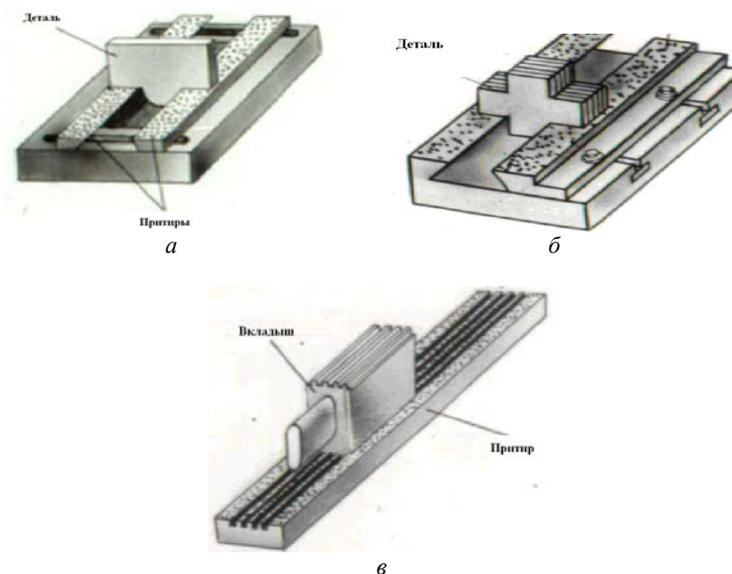


Рис. 1.8. Виды доводки сложнопрофильных поверхностей: *а* – притирка фасонных поверхностей регулируемым притиром; *б* – притирка фасонных поверхностей раздвижным притиром; *в* – притирка фасонных поверхностей вкладыша

Абразивная доводка может обеспечить точную и качественную обработку наружных поверхностей тел вращения сложного профиля. Однако детали предварительно должны быть обработаны с высокой точностью и иметь малую шероховатость поверхности.

Способ объемной *центробежно-ротационной обработки* (рис. 1.9) [37, 38] заключается в том, что гранулированная обрабатываемая среда и детали приводятся во вращательное движение вокруг вертикальной оси таким образом, что приобретают форму тора, в котором частицы движутся по спиральным траекториям. Тороидально-винтовой поток обеспечивается конструкцией рабочей камеры станка, состоящей из неподвижной обечайки и примыкающего к ней вращающегося ротора, имеющего в наиболее распространенном варианте форму тарелки.

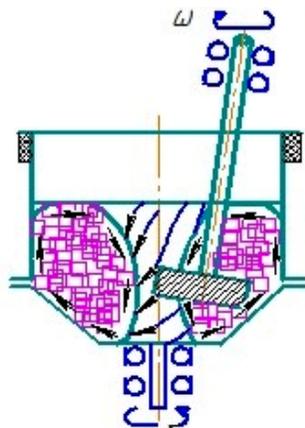


Рис. 1.9. Схема центробежно-ротационной обработки

Достоинства центробежно-ротационной обработки – высокая интенсивность обработки, одновременная обработка партии деталей, обработка деталей небольших размеров.

Недостатки центробежно-ротационной обработки – повышенный износ абразивной среды, возможность деформации деталей малой жесткости. Центробежно-ротационная обработка не позволяет эффективно обрабатывать крупные детали (>100 г), в процессе обработки происходит расслоение – обрабатываемые детали находятся внизу, абразивная масса – сверху.

Сущность *струйной абразивно-жидкостной обработки* (рис. 1.10) заключается в направлении струи суспензии, состоящей из транспортирующей среды (например, воды) и абразивных зерен, на поверхность обрабатываемой детали. Суспензия подается чаще всего сжатым воздухом, который увеличивает скорость ее истечения. Взаимодействие абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью непродолжительно и носит ударный характер, количество ударов колеблется от $2 \cdot 10^6$ до $26 \cdot 10^6$ в секунду [39, 40].



Рис. 1.10. Фотография рабочей зоны при струйной абразивно-жидкостной обработке

Струйная абразивно-жидкостная обработка имеет широкое применение на отделочных операциях деталей сложной конфигурации. Исследованию струйной абразивно-жидкостной обработки посвящены работы авторов [41, 42].

При обработке деталей гидроабразивной струей имеет место неравномерный съем металла с различных участков профиля, что приводит к искажению геометрической формы детали. В установках для абразивно-жидкостной обработки часто наблюдается ускоренный выход из строя сопел, связанный с их интенсивным разрушением под воздействием высокоскоростной гидроабразивной

струи. Для повышения стойкости сопел их изготавливают из твердых сплавов, однако и в этом случае стойкость сопел не превышает 4...6 часов. Существует необходимость перемещения сопла вдоль детали, использования устройства для сбора и возврата в струйный аппарат абразивных частиц. Эти недостатки ограничивают область применения струйной абразивно-жидкостной обработки.

Способ *турбоабразивной* обработки (рис. 1.11) [43] основан на создании абразивного кипящего (псевдосжиженного) слоя, в который помещают обрабатываемую деталь, задавая в зависимости от ее формы различные виды движения.

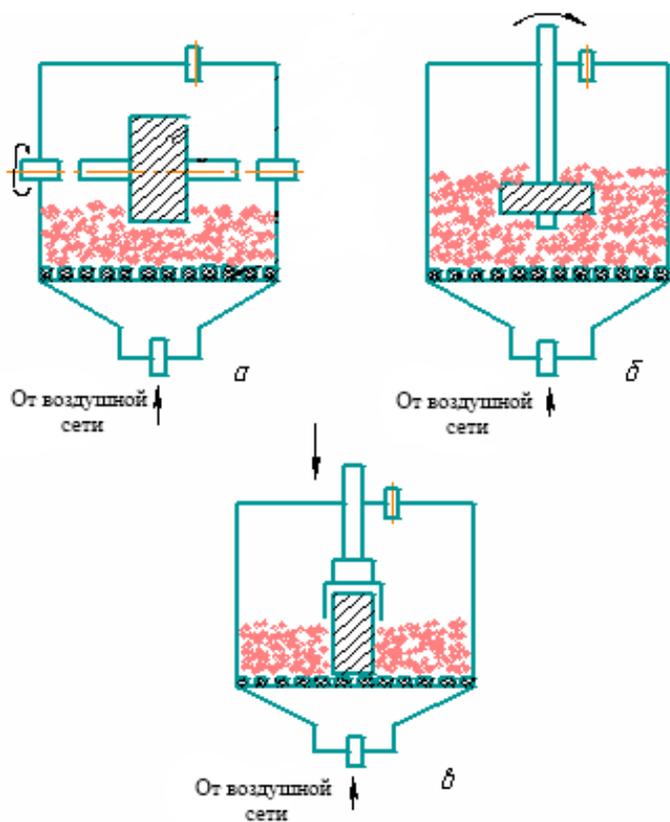


Рис. 1.11. Принципиальная схема турбоабразивной обработки

После турбоабразивной обработки поверхность имеет кратерообразный микрорельеф, состоящий из большого количества коротких царапин, которые создают матовую поверхность. Точность размеров и формы детали может быть повышена направленным образом, так как отсутствует достаточно жесткий, имеющий определенную форму инструмент.

Широкое распространение в промышленности получила обработка деталей во вращающихся барабанах. Это обусловлено простотой конструкции установок, реализующих данный способ, сравнительно высокой степенью механизации, возможностью одновременной обработки большого количества деталей. В настоящее время разработано много различных схем данного метода обработки, но все они в основном сводятся к вращению круглых или граненых барабанов вокруг горизонтальной или наклонной оси.

Обрабатываемые детали и абразивные наполнители загружаются в барабан, который равномерно вращается вокруг оси. При вращении абразивная среда и детали совершают относительное движение, сопровождающееся их соударениями, скольжением и микрорезанием обрабатываемых поверхностей частицами абразивного наполнителя, что обеспечивает съем металла. Силы взаимодействия деталей с частицами наполнителя невелики, поэтому обработка во вращающихся барабанах продолжается от 5 до 100 часов [44].

Разновидностью обработки во вращающихся барабанах является полирование деталей в барабанах с планетарным вращением. В этом случае обрабатываемые детали и абразивная среда под действием инерционных сил, возникающих при вращении барабана вокруг оси планшайбы и собственной оси, совершают сложное пространственное движение. Детали и наполнитель перемещаются с разными скоростями в разных направлениях, в результате чего происходит интенсивное взаимодействие деталей с частицами абразивного наполнителя [45]. Исследованию процесса полирования деталей в планетарных установках посвящен ряд работ [46, 47]. Необходимая степень уплотнения абразивной среды в барабанах достигается изменением скорости вращения планшайбы, а скорость относительного перемещения деталей и абразивных частиц определяется скоростью вращения барабанов вокруг собственной оси. Частота вращения планшайбы обычно составляет $7...10 \text{ с}^{-1}$, а барабанов – $5...40 \text{ с}^{-1}$.

Производительность процесса обработки в планетарных установках значительно выше, чем во вращающихся барабанах. Это позволяет снизить продолжительность полирования до 60...90 мин. При этом, учитывая то, что в барабан одновременно загружается большое количество деталей, данный метод обработки считается весьма эффективным, а потому находит широкое применение в производстве [48, 49].

К недостаткам относятся: неравномерный съём металла с поверхностей сложной формы; отсутствие эффективного воздействия абразивных наполнителей на труднодоступные участки профиля – канавки, углубления и т. п.; взаимные соударения деталей, приводящие к появлению забоин и вмятин на обрабатываемых поверхностях. Эти и другие недостатки ограничивают область применения данного метода в производстве.

В операциях отделочной обработки наружного профиля деталей типа колец, втулок и т. п. находит применение шпиндельная обработка. Закрепленная на шпинделе и вращающаяся с высокой скоростью обрабатываемая деталь вводится в соприкосновение с абразивной средой, находящейся, например, в вибрационной камере [50]. В отличие от виброабразивной обработки, в данном случае главным движением является вращение обрабатываемой детали, а не колебание частиц рабочей среды. Вибрация поддерживает рабочую среду во взвешенном состоянии, обеспечивает ввод детали в рабочую зону и вывод из нее по окончании обработки, перемещивает и непрерывно подает свежие абразивные частицы к обрабатываемой поверхности. Иногда обрабатываемой детали, помимо вращательного, сообщают возвратно–поступательные или осциллирующие осевые движения, которые интенсифицируют процесс обработки. Наивысшая производительность достигается при сообщении детали планетарного вращения.

Величина съема металла с обрабатываемых поверхностей в основном зависит от влажности абразивной среды, определяющей ее давление на обрабатываемую поверхность, скорости вращения детали и продолжительности обработки.

Сравнительно высокая интенсивность съема металла дает возможность ограничить цикл обработки до 5...7 мин. За это время шероховатость поверхности снижается по параметру Ra до 0,20...0,32 мкм и в дальнейшем не изменяется. При этом в поверхностном слое деталей

возникают сжимающие остаточные напряжения с глубиной залегания до 10...15 мкм. Погрешности макрогеометрии (волнистость, огранка) данный способ обработки практически не устраняет.

Недостатком шпиндельной виброобработки является то, что для получения поверхностей с шероховатостью по параметру Ra 0,16...0,32 мкм необходимо, чтобы исходная шероховатость была по параметру Ra не выше 0,63...1,25 мкм. При обработке деталей типа колец, втулок на их геометрическую точность существенное влияние оказывает осевое биение шпинделя, величина которого не должна превышать 0,1 мм. В противном случае наблюдается образование овала [51].

Перспективным способом обработки деталей является полирование абразивом, уплотненным инерционными силами [52, 53]. Обработка производится в специальных устройствах, позволяющих трансформировать гидроабразивную суспензию в уплотненный инерционными силами абразивный слой, контактирующий с обрабатываемой поверхностью, и обеспечить их относительное перемещение. Используют различные способы уплотнения и относительного перемещения деталей и обрабатываемого слоя могут быть различными.

Обработка наружных поверхностей вращения производится путем погружения детали в уплотненный поток свободного абразива, который формируется во вращающемся барабане (рис. 1.12). Установка состоит из четырех основных частей: контейнера, механизма для закрепления и вращения обрабатываемой детали, барабана и механизма для его вращения и устройства для эжекции абразивной смеси. Установка представляет собой специальное автономное устройство, габаритные размеры которого зависят от размеров обрабатываемой детали проектируемых технологических режимов обработки.

Абразивная смесь, состоящая из шлифовального зерна и водной эмульсии, загружается в контейнер 9. Полый барабан 5, в котором формируется уплотненный поток свободного абразива, посажен на шпиндель 4, смонтированный в верхней подвижной крышке 6. Шпиндель вместе с барабаном может перемещаться в вертикальном направлении. Загрузка обрабатываемой детали 3 производится при поднятом вверх барабане 5 через окно 1 при открытии крышке 2. Обрабатываемая деталь 3 закрепляется на шпинделе 12, который смонтирован в закрытом узле 13.

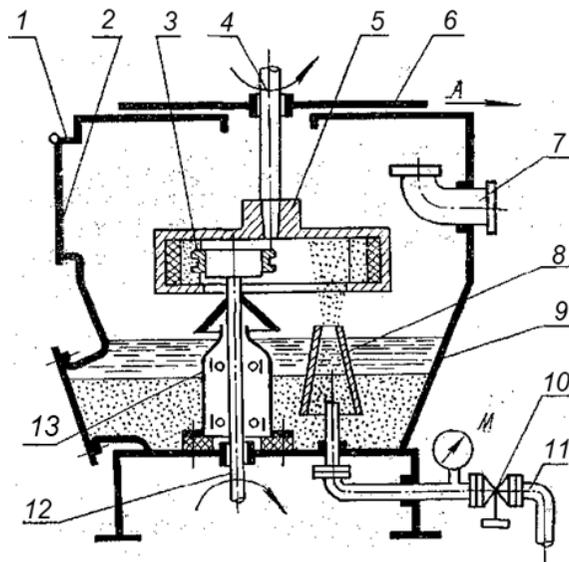


Рис. 1.12. Схема установки для обработки наружных поверхностей вращения уплотненным потоком свободного абразива

После загрузки детали барабан опускается вниз так, чтобы обрабатываемая деталь оказалась в полости барабана. Барабану и изделию сообщают встречное вращение. Одновременно через коническую насадку 8 с помощью эжекции абразивную смесь подают в барабан через отверстие в нижней его стенке. Для эжекции из системы 11 подается сжатый воздух, давление которого регулируется краном 10. Избыточное давление внутри контейнера снижается через патрубок 7. Абразивная суспензия, попадая на днище барабана, отбрасывается под действием центробежных сил к его боковой поверхности и образует уплотненное абразивное кольцо, которое, вращаясь вместе с барабаном, полирует поверхность погруженной в него детали. Выпадающая в контейнер абразивная смесь перемешивается с остальной суспензией и подается вновь в барабан. Таким образом, происходит непрерывная циркуляция абразива и жидкости, вследствие чего сохраняется текучесть абразивной суспензии и обеспечивается интенсивное охлаждение абразивной смеси и детали.

Метод обработки инерционными силами имеет ряд характерных и отличительных особенностей: возможность обработки различных видов поверхностей; автоматическое копирование профиля обрабатываемой поверхности «режущим инструментом»; активное действие технологической жидкости, проникающей непосредственно в зону обработки; эффективный отвод тепла и другие.

Однако данный способ обладает определенными недостатками при обработке деталей со сложной формой наружного профиля и значительными перепадами диаметров, т. к. линейная скорость, а значит, и кинетическая энергия абразивной частицы зависят от ее расстояния до центра вращения барабана. Частицы, движущиеся по удаленным траекториям, обладают большей кинетической энергией, и при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью интенсивнее происходит сьем металла. В связи с этим при глубоком профиле поверхности детали наблюдается его неравномерная обработка, так как наиболее эффективно снимается металл с выступающих участков профиля. Кроме того, при обработке данным способом уплотненный абразивный поток, вращающийся с высокой скоростью, производит интенсивное микрорезание и для получения обработанных поверхностей с шероховатостью по параметру Ra 0,10...0,20 мкм необходима обработка в несколько проходов с последовательным уменьшением зернистости абразивного материала, что снижает производительность процесса.

Широкое распространение на операциях отделочной обработки деталей сложной конфигурации получило *полирование абразивными лентами*.

Полирование абразивными лентами позволяет получать высокую точность обработки и наиболее рациональные характеристики шероховатости поверхности [54, 55]. Обработка производится движущейся с высокой скоростью абразивной лентой. Контакт ленты с деталью осуществляется с помощью роликов (рис. 1.13).

Одним из основных преимуществ данного способа является возможность обработки сложных криволинейных поверхностей. При этом, чем сложнее форма обрабатываемой поверхности и чем меньше должна быть ее шероховатость, тем более мелкозернистой должна быть лента.

Все большее распространение получает в последнее время полирование алмазными лентами [56], а также прерывистое и реверсивное ленточное полирование [57], позволяющее повысить стойкость лент.



Рис. 1.13. Фотография рабочей зоны при полировании гибкими абразивными лентами

Однако и обработке абразивными лентами присущи недостатки при отделке наружных сложнопрофильных поверхностей. Абразивная лента обладает определенной упругостью, поэтому отдельные труднодоступные участки профиля остаются не шлифованными. Это вызывает необходимость применения дополнительного ручного полирования, что снижает технико-экономические показатели процесса обработки.

Близкой к полированию абразивными лентами является обработка деталей профильными алмазными брусками на эластичной связке [58], упруго прижатыми к поверхности вращающейся детали. Алмазные зерна, закрепленные в эластичной связке, в процессе резания подвижны, что позволяет создавать плотный режущий контур, подобный тому, который образуется при полировании лентой. Шероховатость поверхности после обработки закаленных сталей составляет по параметру Ra 0,08...0,16 мкм при исходной величине Ra 0,63...1,25 мкм.

Несмотря на перспективность, данный метод обработки находит ограниченное применение в промышленности. Это связано с высокой стоимостью брусков, износом и засаливанием их в процессе обработки, а также сложностью восстановления их режущих свойств.

Рассмотренные методы обработки применяются преимущественно для обработки однородных изделий простой формы. Для большинства рассмотренных методов свойственен ряд недостатков, таких, как неравномерный съем металла с поверхностей сложной формы; отсутствие эффективного воздействия абразивных наполнителей на труднодоступные участки профиля; взаимные соударения деталей, приводящие к появлению забоин и вмятин на обрабатываемых поверхностях; трудность при обработке изделий с массой более 100 г; значительное время обработки. Эти и другие недостатки ограничивают область применения данных методов при обработке поверхностей сложного профиля. В связи с чем, возникает необходимость использования других эффективных методов и способов финишной обработки изделий состоящих из материалов с различными физико-механическими и магнитными свойствами.

1.3. Специальные способы финишной обработки поверхностей сложного профиля

Обработку сложных внутренних и наружных контуров тел вращения с образующей, очерченной по дуге окружности или по более сложной траектории, осуществляют на токарных станках с числовым программным управлением (ЧПУ). В этом случае траектория движения инструмента задается управляющей программой, что исключает необходимость использования специальных копировальных наладок.

Стремление повысить производительность финишной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей машин привело к созданию специального оборудования. Однако при разработке конструкций специальных шлифовальных станков, работающих на основе традиционных методов абразивной обработки (жесткий прижим инструмента к обрабатываемой поверхности), каждый раз необходимо решать сложные задачи по отслеживанию профиля исходной поверхности, имеющей значительные геометрические отклонения (овальность, волнистость, локальные выпуклости и впадины и т. п.). В качестве абразивного инструмента применяются жесткие абразивные круги, а также круги из фетра и войлока с накатанным по периферии шлифовальным порошком различной зернистости.

Одним из вариантов частичного решения этих задач является создание специальных шлифовальных головок с мощным приводом и возможностью поворота на оси подвеса, получивших название маятниковых.

Развитие ленточного шлифования привело к модернизации конструкции головок, что позволило использовать наряду с абразивными кругами абразивные ленты.

Шарнирно подвешенные ленточно-шлифовальные головки нашли широкое применение при изготовлении разнообразных сложнопрофильных деталей, которые по каким-либо причинам затруднительно обрабатывать на универсальных или специальных станках. С одной стороны, простота конструкции и обслуживания маятниковых (шарнирно подвешенных) шлифовальных головок, с другой – отсутствие специальных копиров и следящих устройств при обработке сложнопрофильных поверхностей создало предпосылки их широкому использованию в практике шлифования различных деталей больших габаритов. Шлифовальные маятниковые головки применяются в настоящее время в литейных, котельно-сборочных и других цехах для зачистки крупных отливок и обработки поверхностей сварных конструкций, снятия заусенцев и сварных швов, а также для зачистки различных крупногабаритных поверхностей [2, 3].

Кинематическая схема маятниковой шлифовальной головки станка ГФ-259 для обработки криволинейных поверхностей второго порядка приведена на рис. 1.14.

Шлифовальная головка состоит из корпуса 1, подвешенного на шарнире к каретке 5, которая может совершать возвратно-поступательное движение по направляющим 6. На одном конце корпуса установлен абразивный инструмент 7, а на другом электродвигатель 4, приводящий через шкив 3 и клиноременную передачу 2 во вращение шпиндель шлифовальной головки.

При возвратно-поступательном перемещении каретки абразивный инструмент, прижимаясь к обрабатываемой поверхности с помощью гидроцилиндра или груза, обрабатывает ее. Использование шарнирного подвеса корпуса головки создает возможность копирования фасонного профиля без специальных копиров и следящих устройств. При этом обеспечивается хорошее качество слежения за профилем обрабатываемой поверхности.

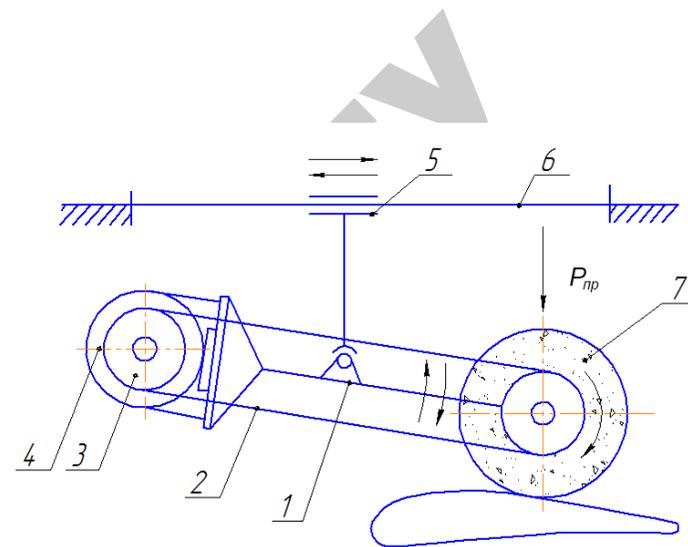


Рис. 1.14. Схема маятниковой шлифовальной головки станка ГФ-259

Шлифование маятниковыми головками имеет свою область применения, в которой его технико-экономические показатели значительно выше других методов шлифования. Областью применения этого метода является черновое и чистовое шлифование крупногабаритных сложнопрофильных деталей и заготовок, у которых необходимо улучшить качество поверхностей без повышения точности формы и размеров.

Широкие технологические возможности метода шлифования маятниковыми головками, относительная простота конструкции этих головок, отсутствие специальных копировальных и следящих систем при обработке сложнопрофильных крупногабаритных поверхностей обеспечили методу большое распространение в различных отраслях промышленности, таких, как металлургическая и энергетическая, химическое и нефтяное машиностроение, авиа- и двигателестроение. Зарубежные фирмы также выпускают значительное количество станков с шарнирно подвешенными головками для шлифования различных деталей и заготовок, имеющих сложный профиль обрабатываемой поверхности. Основными поставщиками такого оборудования являются фирмы *Centro-Maskin* (Швеция), *Snow* (Англия), *Tysmah* (США), *Schlitter* (ФРГ), *ZelahtCasuit* (Франция) и ряд других. Шлифование с заданной поперечной подачей характеризуется «жестким» контактом между инструментом и обрабатываемой поверхностью, определяемым жесткостью систем «станок – приспособление –

инструмент – деталь» (СПИД). Следовательно, замыкание между деталью и инструментом достигается без какого-либо гибкого звена в цепи «станок – деталь». При обработке с помощью маятниковых шлифовальных головок замыкание цепи «инструмент – деталь» происходит при наличии гибкого звена – маятникового рычага, имеющего возможность покачиваться на оси шарнирного подвеса. Поэтому дополнительная степень свободы у абразивного инструмента за счет возможности качания рычага головки на оси подвеса обеспечивает наличие эластичного кинематического контакта с деталью, что способствует хорошему слежению за профилем поверхности.

При обработке с заданной поперечной подачей силовое нагружение обеспечивается созданием определенного натяга между инструментом и деталью в кинематической цепи станка. Эти и другие отличительные особенности шлифования маятниковыми головками предопределяют закономерности протекания процесса, которые принципиально отличаются от закономерностей при шлифовании с заданной поперечной подачей.

В зависимости от габаритов и конфигурации обрабатываемых деталей при шлифовании маятниковыми головками используются следующие схемы обработки (рис. 1.15).

Длинномерные сложнопрофильные детали обрабатывают, как правило, по схеме *a* (рис. 1.15). В этом случае процесс резания осуществляется периферией инструмента, а рабочая подача производится перемещением инструмента вдоль оси детали или перемещением самой детали. В результате обработка ведется продольными строчками, подача на строку осуществляется поступательным перемещением детали или ее поворотом на угол γ_c .

Обработку наружных и внутренних поверхностей длинномерных деталей, имеющих значительные отклонения от правильной цилиндрической формы, производят по схемам *г* и *ж* (рис. 1.15). При этом шлифовальная головка копирует погрешности формы изделия, образовавшиеся на предшествующей технологической операции.

Обработку поверхностей крупногабаритных фасонных тел вращения производится по схемам *д* и *е* (рис. 1.15). Особенностью этих схем обработки является то, что инструмент, снимая металл, в процессе шлифования образует на обработанной поверхности спиральные строчки. Подача инструмента вдоль образующей детали

на строку производится в результате двух взаимосвязанных движений шарнирно-подвешенной шлифовальной головки, результирующая которых определяется как геометрическая сумма двух подач S_x и S_y . Вращение обрабатываемой детали вокруг своей оси обеспечивает рабочую подачу детали $S_{np} = v_p$.

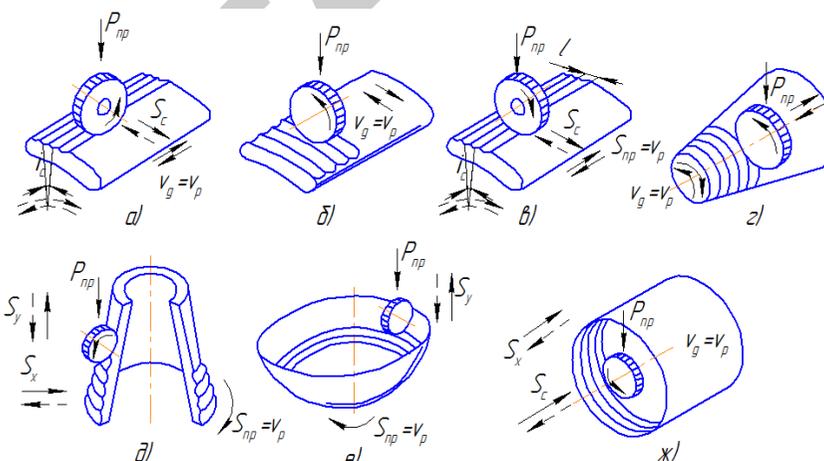


Рис. 1.15. Схемы обработки шлифованием поверхностей сложного профиля

Анализ приведенных схем показывает, что возможны два сочетания между векторами скорости резания и движением рабочей подачи. В одном случае векторы скорости резания и подачи (рис. 1.15, *a*, *б*, *г*, *ж*) лежат на одной прямой, т. е. они коллинеарны и могут быть направлены в одну или в противоположную сторону, в другом – эти векторы перпендикулярны (рис. 1.15, *в*, *д*, *е*).

Производительность процесса и размерные характеристики параметров обработанной поверхности данным методом определяются с учетом применяемого режущего инструмента и схемы обработки – с коллинеарным или взаимно перпендикулярным направлением векторов скорости резания и рабочей подачи.

Макро- и микрогеометрия поверхности детали и производительность процесса также зависят от радиуса режущей части инструмента и подачи на строку, которые определяются с учетом профиля изделия, величины снимаемого припуска и угла качания шлифовальной головки.

Однако технологические параметры метода шлифования маятниковыми головками не обеспечивают условий формообразования, точности размеров и форм, а также стабильности геометрических и физико-механических показателей детали и ее рабочих поверхностей. Это связано с тем, что точность остается в пределах показателей предшествующей операции, а также образуются межстрочные гребешки микронеровностей. Повышение точности размеров и формы деталей, стабильность геометрических и физико-механических показателей зависят от разработки и создания системы управления силой прижима инструмента к обрабатываемой поверхности.

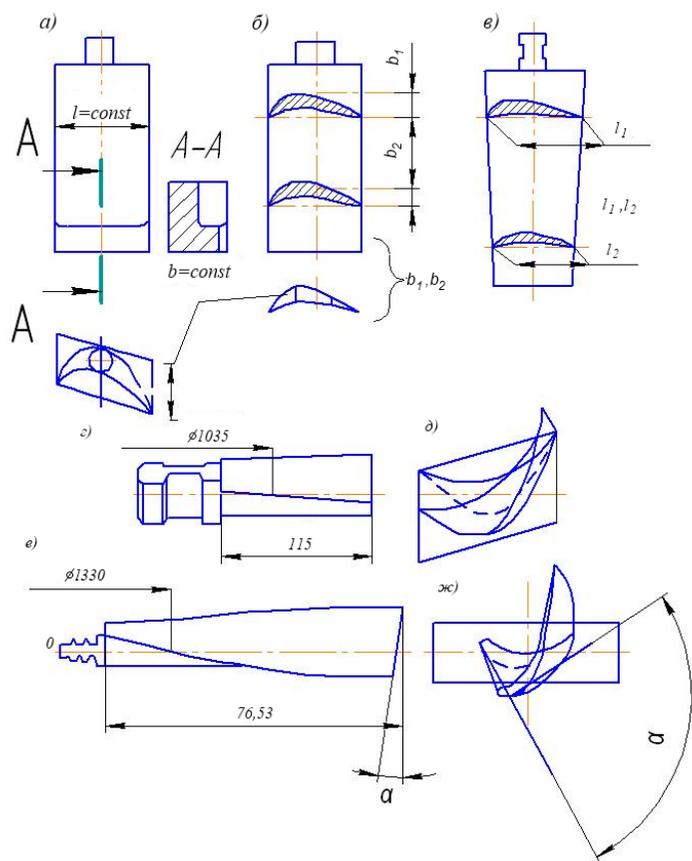


Рис. 1.16. Фрагменты профилей обрабатываемых поверхностей лопаток турбин

Рабочие элементы лопаток различают по форме сечения, по ширине лопатки, по углу закрутки лопатки, по срезу лопатки на конце. Лопатки бывают с постоянным и переменным сечением (рис. 1.16, а–в); с постоянной и переменной шириной; с постоянным углом расположения профиля и с изменяющимся углом α (рис. 1.16, г) по мере перемещения по длине лопатки. Лопатки газовых турбин отличаются от паровых значительно большими углами закрутки. Наиболее удаленная от хвостовика часть лопатки (торцовая часть) может оканчиваться срезом, параллельным хвостовому элементу или расположенным под различными углами. Наиболее сложная по рабочему элементу лопатка, у которой переменное сечение профиля разной ширины, есть угол закрутки и торцовый срез, расположенный под углом α к оси O (рис. 1.16, е).

Рассмотрим обработку абразивной лентой на станке модели СПЛ-2 (рис. 1.17), на котором можно обрабатывать лопатки длиной от 15 до 200 мм, шириной от 15 до 60 мм, при угле закрутки пера до 30° .

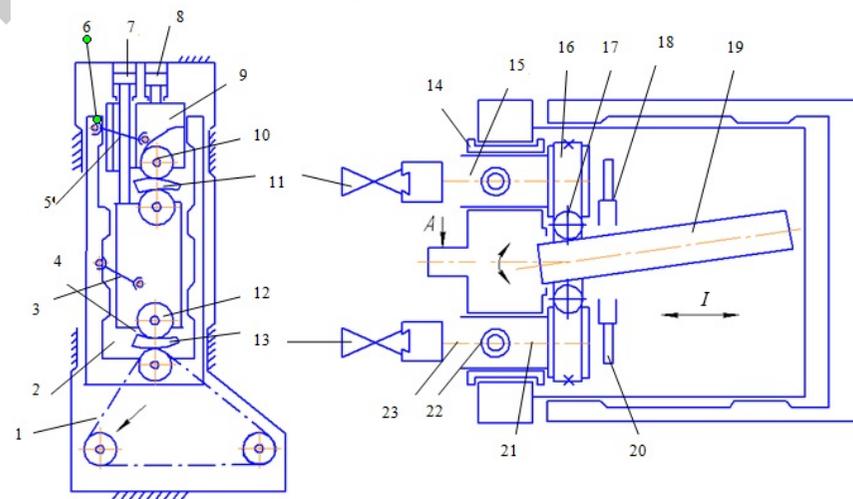


Рис. 1.17. Схема формообразующих движений на станке модели СПЛ-2

Станок работает следующим образом. Копир 11 и заготовку лопатки 13, устанавливаются с помощью зажимного патрона на шпинделях 15 и 23. Оба шпинделя имеют опоры в пинолях 21, которые

обеспечивают поворот шпинделей на требуемый угол благодаря наличию осей 22. Пиноли размещены в планшайбе 14. При обработке эта планшайба совершает возвратно-качательные А и возвратно-поступательные перемещения соответственно длине и ширине лопатки. При возвратно-поступательном I перемещении планшайбы копир и заготовка поворачиваются на угол закрутки пера лопатки вследствие того, что шкивы пинолей связаны между собой жестко закрепленной металлической лентой 16 и двумя роликами 17, между которыми находится копировальная линейка 19. Эта линейка связана со шлицевым валом и не имеет осевого перемещения; угол ее наклона соответствует углу закрутки и регулируется. При возвратно-качательном перемещении шпиндели покачиваются вследствие взаимодействия через пружины роликов 20 с копиром 18. Оба перемещения А и I от копиров 18 и 19 обеспечивают образование поверхности лопатки. Копировальные механизмы состоят из двух пар салазок 2 и 3, 6 и 9, несущих рабочие 12 и копирующие 10 ролики. Каждая пара салазок связана кулисами 5. Абразивные ленты 1 и 4 получают движение от отдельных приводов и имеют средства натяжения. Ролики 10 и 12 замыкаются при помощи гидравлических систем 7 и 8 и обеих кулис 5.

Формализация закономерностей формообразующих движений при обработке сложнопрофильных поверхностей позволяет создать специальное оборудование с управлением процессом шлифования, обеспечив при этом механизацию и автоматизацию обработки фасонных поверхностей. Например, для обработки турбинных лопаток разработан специальный копировально-шлифовальный станок с рычажным механизмом и гидравлическим управлением (рис. 1.18). Станок состоит из стола 2 для копира и стола 9 для обрабатываемой детали. Столы соединены рычажным механизмом 5...7. Механизм представляет собой шарнирный параллелограмм *abвгд*. Хобот 6 имеет возможность перемещаться в вертикальной плоскости вокруг оси 11. На нем установлены приводы для шлифовального круга 1 и копировального ролика 8. Для уравнивания системы хобота имеется пружина 12. По станине 4 в продольном направлении перемещаются салазки 3, а в поперечном направлении – стол 2. Рычажные механизмы (масштаб копирования 10:1) имеют оси качания около опор 10, которые в свою очередь являются опорой для оси 11.

Стол для копира перемещается от штока гидравлического цилиндра. Работа станка строится на поперечном шлифовании и продольной периодической подаче.

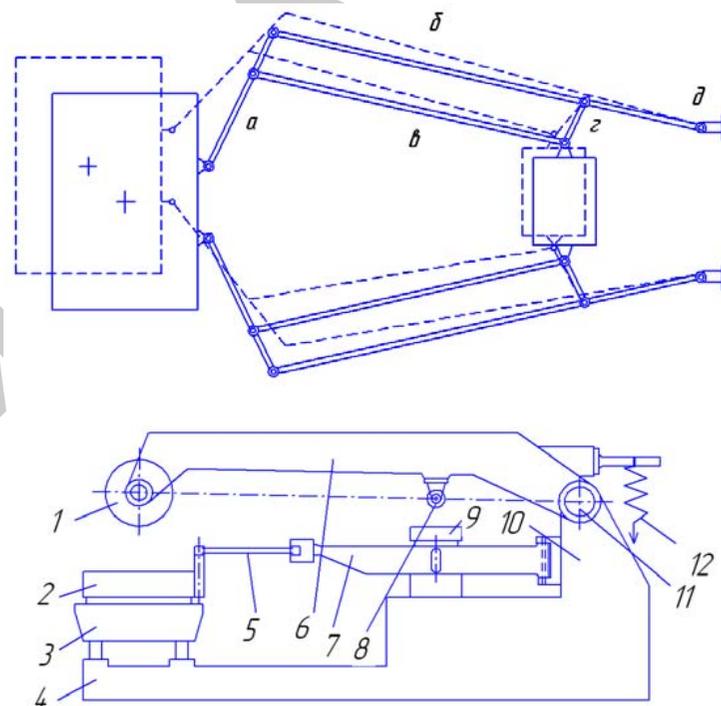


Рис. 1.18. Схема специального станка для обработки лопаток турбин

Необходимость обработки точных отверстий весьма малого диаметра, нанесение рисунка и всевозможных кривых на поверхности, получение разного рода углублений сложного сечения в твердых материалах выдвигают необходимость создания новых методов обработки, отличных от обработки резанием. К числу таких методов относятся электрофизические, основанные на использовании концентрированных потоков энергии физических полей (электрических, магнитных, лучевых), а также их комбинаций (анодно-механическая, электроабразивная, электроэрозионная, магнитно-импульсная, электрохимическая, лазерная обработка).

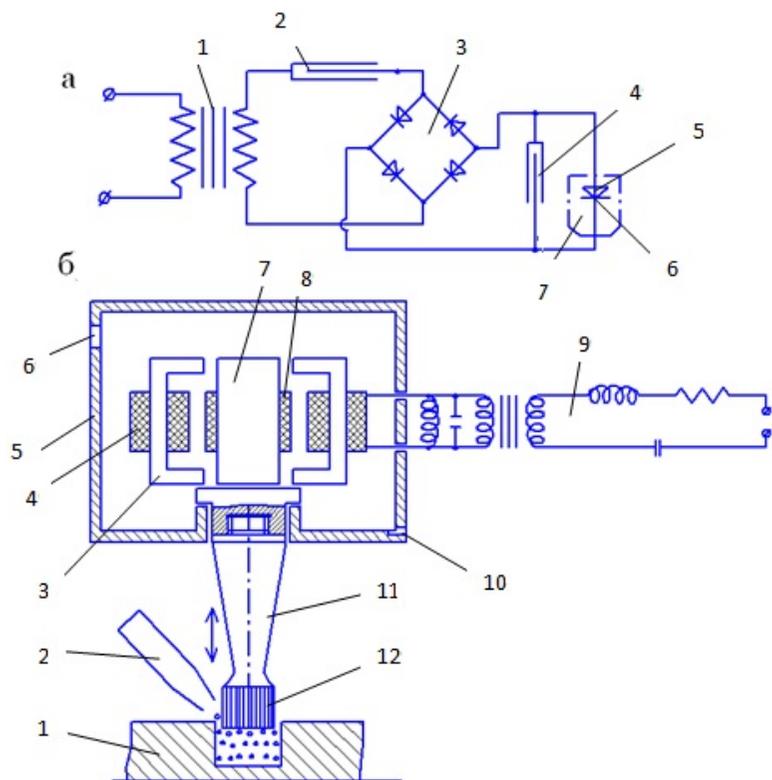


Рис. 1.19. Схема электроэрозионной обработки

Сущность электроэрозионной обработки заключается в том, что в зоне электрических разрядов, возникающих между электродами, происходит плавление малых частиц металла. Качество поверхности зависит от более высокой частоты разрядов. Принципиальная электрическая схема (рис. 1.19) состоит из силовой части (трансформатор 1 и конденсатор 2), от которой напряжение подается на мост селеновых выпрямителей и далее через импульсный конденсатор 4 на электроды 5 и 6, помещенные в ванну 7 с жидкостью. При этом верхний электрод представляет собой фасонный режущий инструмент 12, а нижний — обрабатываемую деталь 1. Разряды между инструментом и деталью происходят при длительности порядка 10^{-4} с, мощности 10...20 Дж и частотах 50...250 Гц.

Обработка осуществляется в жидкой среде. Интенсивный поток жидкости удаляет продукты эрозии из зоны обработки, благодаря чему скорость внедрения электрода (режущий инструмент) не снижается с увеличением глубины обработки. Давление жидкости при обработке достигает величины порядка 0,5...1,5 МПа. При обработке деталей из стали используют электроды из меди, латуни и алюминия; при обработке твердых сплавов электроды выполняют из чугуна. При обработке сложнопрофильных сечений крупных размеров инструмент делают полым с целью уменьшения длительности операции. Для стабилизации процесса обработки электроинструменту создают вибрирующий процесс с постепенным поступательным перемещением. Электроэрозионным методом можно обрабатывать отверстия малого диаметра с криволинейной в пространстве осью.

Электроэрозионную обработку профилированным электродом производят на станках, схема работы которых изображена на рис. 1.20.

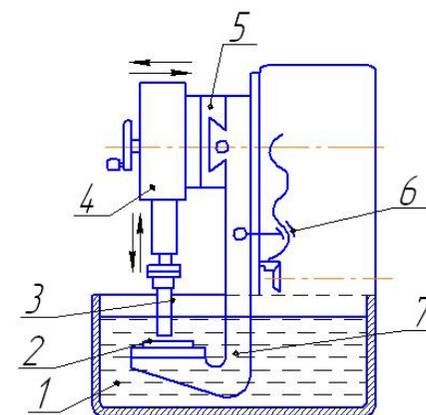


Рис. 1.20. Схема обработки на станке с профилированным электродом:

1 — диэлектрическая жидкость; 2 — изделие; 3 — электрод-инструмент; 4 — суппорт горизонтальный; 5 — суппорт поперечный; 6 — механизм вертикального перемещения; 7 — кронштейн со столиком для крепления детали

Материал инструмента выбирается в зависимости от материала детали и вида операции. Например, при обработке латуни инструмент из меди или латуни; твердых сплавов — инструмент из вольфрама, молибдена, меди, латуни. Для изготовления отверстий малого

диаметра используется инструмент из латуни. При шлифовке и заточке применяется инструмент из стали и чугуна. В качестве жидкости используются керосин или трансформаторное масло. При электроискровом методе применяют короткие импульсы длительностью 20...200 мкс и частотой 2...5 кГц.

В зависимости от количества энергии в импульсе различают жесткий, средний и мягкий режимы обработки. Жесткий или средний режимы применяют для предварительной обработки; мягкий – для отделочной обработки. При жестком режиме производительность составляет 200...400 мм³/мин, точность обработки – h_{11} , h_{12} , шероховатость поверхности Ra 40...20 мкм. При мягком режиме производительность составляет 0,01...20 мм³/мин, точность обработки до h_6 , h_7 и шероховатость – Ra 0,32...0,16 мкм.

Недостатками электроискрового способа изготовления отверстий профилированным инструментом являются:

- неизбежность образования конусности по мере продвижения электрода вдоль оси и невозможность получения профиля с острыми углами;

- большой износ инструмента;

- изменение структуры металла, химического состава и механических свойств в местах обработки на глубине порядка 0,05...0,1 мм.

Размерная электрохимическая обработка (ЭХО). Электрохимическую размерную обработку выполняют в струе электролита, прокачиваемого под давлением через межэлектродный промежуток, образуемый обрабатываемой инструментом – катодом заготовкой – анодом [59].

Этот вид ЭХО служит для придания заготовке заданных формы и размеров и позволяет получить:

- при обработке неподвижными электродами со съемом по глубине до 0,2 мм – погрешность не более 0,02 мм, при глубине более 0,2 мм – погрешность 0,03...0,05 мм;

- при прошивании мелких отверстий (диаметром до 2 мм) – точность по 9...10-му качеству;

- при обработке полостей и разрезании – точность по 12...14-му качеству точности;

- для схем точения – точность – по 8...10-му качеству;

- при шлифовании металлическими, электроабразивными и электроалмазными кругами – точность по 6...7-му качеству.

В отличие от поверхностной ЭХО, выполняемой в необновляемом или в незначительно обновляемом электролите, размерная ЭХО происходит при непрерывном и интенсивном обновлении электролита. Принудительное удаление электролита из рабочей зоны позволяет вести формообразование обрабатываемых поверхностей с меньшим, чем при электрохимическом травлении и полировании, межэлектродным промежутком. При этом на участках обрабатываемой поверхности с минимальным значением межэлектродного промежутка плотность тока выше, чем на участках с большим его значением, так как электрическое сопротивление рабочей среды (электролита) меньше. Соответственно этому анодное растворение металла на участках с минимальным значением межэлектродного промежутка будет протекать в начальной стадии обработки более интенсивно, чем на участках с большими значениями межэлектродного промежутка.

Таким образом, особенностью размерной ЭХО является неодинаковая скорость растворения металла обрабатываемой заготовки на участках с различными значениями межэлектродного промежутка. В связи с этим на все участки обрабатываемой заготовки, включая и участки с максимальным межэлектродным промежутком, назначают в зависимости от скорости растворения определенные припуски на обработку.

Виды размерной ЭХО: анодно-гидравлическая и анодно-механическая.

Анодно-гидравлическая обработка впервые была применена для извлечения из заготовки остатков застрявшего сломанного инструмента. Скорость анодного растворения зависит от расстояния между электродами: чем оно меньше, тем интенсивнее происходит растворение. Поэтому при сближении электродов поверхность анода (заготовка) будет в точности повторять поверхность катода-инструмента. Однако процессу растворения мешают продукты электролиза, скапливающиеся в зоне обработки, и истощение электролита. Удаление продуктов растворения и обновление электролита осуществляются либо механическим способом (анодно-механическая обработка), либо прокачиванием электролита через зону обработки. Этим методом, подбирая электролит, можно обрабатывать практически любые токопроводящие материалы, обеспечивая высокую производительность в сочетании с высоким

качеством поверхности. Используемые для анодно-гидравлической обработки электрохимические станки просты в обращении, используют низковольтное (до 24 В) электрооборудование. Однако значительные плотности тока (до 200 А/см²) требуют мощных источников тока, больших расходов электролита (иногда до 1/3 площади цехов занимают баки для электролита).

Анодно-гидравлическая обработка используется при выполнении следующих работ:

- при неподвижных электродах – калибрование, контурная обработка, удаление заусенцев, скругление кромок, маркирование;
- при поступательном перемещении электрода – копирование, прошивка отверстий, протягивание, калибрование;
- при вращении катода – обработка плоских и фасонных поверхностей, отрезка, кольцевая вырезка;
- при вращении анода – обработка фасонных поверхностей (наружных и внутренних), обработка канавок (прямых и спиральных), отрезка;
- при сложном движении электрода – вырезка проволокой (стержнем), вырезка трубчато-контурным методом.

По технологическому назначению различают следующие виды электрохимической обработки:

- электрохимическое объемное копирование, при котором форма электрода-инструмента отображается в заготовке;
- электрохимическое прошивание, при котором электрод-инструмент, углубляясь в заготовку, образует отверстие постоянного сечения. Оно осуществляется в условиях интенсивного проточного движения электролита и малого зазора между электродами (менее 0,5...1 мм). Точность обработки составляет 0,2...0,3 мм;
- электроабразивная (электроалмазная) обработка ведется абразивным или алмазным кругом на электропроводящей связке (металлической, бакелитовой с графитовым наполнителем). Между анодом-заготовкой и катодом-шлифовальным кругом имеется межэлектродный зазор, образованный зернами, выступающими из связки. В зазор подается электролит. Продукты анодного растворения материала заготовки удаляются абразивными зернами; шлифовальный круг имеет вращательное движение, а заготовки – движения подачи, т. е. движения, соответствующие процессу механического шлифования. Применяется в инструментальных

цехах машиностроительных предприятий при изготовлении и переточки режущих инструментов. Отделочную обработку поверхностей заготовок можно проводить электрохимическим хонингованием. Кинематика процесса соответствует хонингованию абразивными головками. Отличие состоит в том, что заготовку устанавливают в ванне, заполненной электролитом, и подключают к аноду. Хонинговальную головку подключают к катоду. Вместо абразивных брусков в головке установлены деревянные или пластмассовые;

- струйное электрохимическое прошивание с использованием сформированной струи электролита;
- электрохимическое калибрование характеризуется удалением с обрабатываемых поверхностей заготовок незначительных припусков (0,5...1,0 мм). Его применяют для исправления геометрических размеров предварительно изготовленных наружных и внутренних поверхностей заготовок, для образования канавок различной формы. При этом заготовка и электрод-инструмент в процессе обработки неподвижны относительно друг друга. Поверхности электрода-инструмента, не участвующие в формообразовании детали, защищают электроизоляционным слоем;
- электрохимическое полирование поверхности с целью повышения ее точности;
- электрохимическое точение, осуществляемое при вращении заготовки и поступательном перемещении электрода-инструмента;
- электрохимическая отрезка, при которой заготовка разделяется на части. При этом продукты анодного растворения удаляются за счет механического воздействия вращающегося диска или движущейся ленты. Применяется в заготовительных цехах для разрезки заготовок из труднообрабатываемых металлов;
- электрохимическое удаление заусенцев;
- электрохимическое травление, обеспечивающее удаление с обрабатываемой поверхности оксидных пленок, образующихся при предварительной термической или химической обработке заготовок или деталей;
- электрохимическое маркирование, позволяющее наносить на металлические детали различные цифры, буквы и другие обозначения. Различают трафаретное и безтрафаретное электрохимическое маркирование.

По способу реализации различают следующие виды электрохимической обработки:

- многоэлектродная, осуществляемая несколькими электродами, подключенными к общему источнику электрического тока и находящимися во время обработки под одним потенциалом;

- непрерывная электрохимическая обработка, осуществляемая при непрерывной подаче напряжения на электроды;

- импульсная электрохимическая обработка, осуществляемая при периодической подаче напряжения на электроды (рис. 1.21). Электроимпульсное полирование осуществляется при подводе к электродам импульсного напряжения, обеспечивающего замыкание парогазовой оболочки электролитными мостиками и протекание постоянной составляющей электрического тока (ионная проводимость) и амплитуды переменной составляющей (проводимость по образующимся электролитным мостикам);

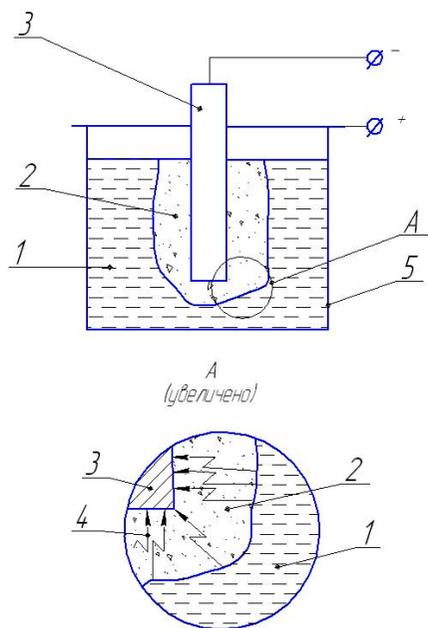


Рис. 1.21. Схема импульсной ЭХО:

1 – электролит; 2 – парогазовая оболочка; 3 – обрабатываемое изделие;
4 – импульсные электрические разряды; 5 – ванна

- циклическая электрохимическая обработка, при которой один из электродов перемещается в соответствии с заданной циклограммой;
- комбинированные виды электрофизической и электрохимической обработки (ЭФХО).

Различают следующие виды комбинированной ЭФХО:

- анодно-механическая обработка;

- электрохимическая абразивная обработка;

- электрохимическая доводка (ЭХД);

- электроэрозионнохимическая обработка (ЭЭХО);

- электрохимическая ультразвуковая обработка и др.

Комбинированные виды обработки сочетают в себе преимущества электрофизических и электрохимических методов. Используемые сочетания разнообразны. Например, сочетание анодно-механической обработки с ультразвуковой в некоторых случаях повышает производительность в 20 раз. Существующие электроэрозионно-ультразвуковые станки позволяют использовать оба метода как раздельно, так и совместно.

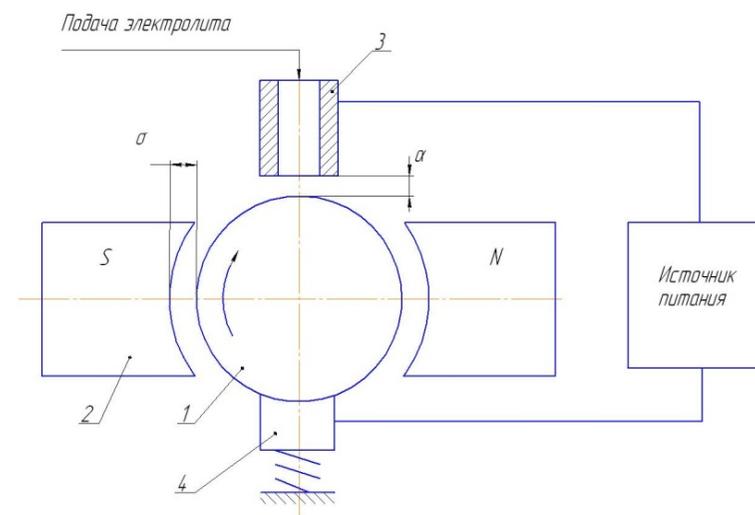


Рис. 1.22. Схема совмещенной магнитно-абразивной и электрохимической обработки:

1 – обрабатываемое изделие; 2 – полюсы магнита;

3 – катод-сопло подачи электролита; 4 – анод-токосъемник;

a – зазор для ЭХО; δ – зазор для магнитно-абразивной обработки

Одним из методов комбинированной электрохимической абразивной обработки является совмещенная магнитно-абразивная и электрохимическая обработка [60] (рис. 1.22), при которой совмещается микрорезание абразивными зернами, формирующими пространственно-сложный абразивный инструмент под действием магнитного поля, и химическое воздействие жидкофазной компоненты рабочей среды при наличии в ней химически-активных, в том числе поверхностно-активных веществ. При этом абразивные зерна должны обладать магнитными свойствами и должны быть созданы условия для протекания электрохимических процессов.

При формообразовании поверхностей деталей машин электрохимической обработкой обязательным условием является необходимость поддержания заданного значения плотности тока, которая зависит как от величины межэлектродного промежутка, так и от равномерности обновления электролита на всех участках обрабатываемой поверхности. Это вызвано тем, что на участках обрабатываемой поверхности с меньшим значением межэлектродного промежутка плотность тока выше, чем на участках с большим его значением, так как электрическое сопротивление рабочей среды (электролита) меньше. Соответственно этому анодное растворение металла на участках с минимальным значением межэлектродного промежутка будет протекать в начальной стадии обработки более интенсивно, чем на участках с большими значениями межэлектродного промежутка. В связи с этим на каждый из участков обрабатываемой заготовки, включая и участки с максимальным межэлектродным промежутком, назначают определенные припуски на обработку в зависимости от скорости растворения металла.

Следует отметить основные особенности и отличия методов электрохимической обработки поверхностей деталей машин, суть которых сводится к следующему:

- при получении отверстий струйным методом электрод-инструмент устанавливают с зазором относительно заготовки и размещают его внутри диэлектрического корпуса. Зазор заполняется потоком электролита и при подводе электрического тока между электрод-инструментом и заготовкой создается токопроводящий канал. В результате материал заготовки растворяется и образуется углубление. Процесс идет достаточно быстро только при высоких

напряжениях (до нескольких сотен вольт). Так получают отверстия диаметром 1,5...2,0 мм и вырезают контуры деталей сложной формы;

- при точении наружных и внутренних поверхностей роль резца выполняет электрод-инструмент, который находится с зазором относительно обрабатываемой поверхности. При подводе электролита и электрического тока происходит съем металла;

- при протягивании наружных и внутренних поверхностей заготовки должны иметь предварительно обработанные поверхности, по которым можно базировать электрод-инструмент. Его устанавливают относительно заготовки с помощью диэлектрических прокладок. Электрод-инструмент продольно перемещается (иногда вращается). По такой схеме выполняют чистовую обработку цилиндрических отверстий, нарезание резьбы, шлицев, винтовых канавок;

- при разрезании заготовок используется профилированный инструмент (вращающийся диск) или непрофилированный – проволока. Зазор между инструментом-электродом и заготовкой должен быть постоянным;

- для выполнения в заготовках различных фигурных пазов, щелей, особенно в нежестких материалах, применяется непрофилированный инструмент-электрод в виде проволоки из латуни, меди или вольфрама. Для устранения влияния износа проволоки на точность обработки проволока непрерывно перематывается с катушки на катушку, что позволяет подводить в работу все новые ее участки;

- при шлифовании используется вращающийся металлический инструмент цилиндрической формы, который поступательно движется вдоль заготовки. Часто применяется в качестве окончательной операции при изготовлении пакетов пластин из магнитомягких материалов, вязких и прочных сплавов.

1.4. Анализ методов магнитно-абразивной обработки поверхностей различного профиля

Магнитно-абразивная обработка является одним из методов финишной обработки, который характеризуется эффективностью и экономичностью, а также обеспечивает высокое качество обработки

внутренних и внешних поверхностей тел вращения, а также плоских поверхностей, изготовленных как из металлических так и неметаллических материалов. Магнитно-абразивная обработка осуществляется при движении относительно друг друга заготовки и абразивных частиц в магнитном поле (ГОСТ 23505–79). Впервые метод магнитно-абразивной обработки был предложен в 1938 году Н. И. Каргаловым, который получил авторское свидетельство на способ полирования деталей машин с использованием энергии магнитного поля [61].

Особенностями способа МАО являются:

– снижение циклических нагрузок на технологическую систему, что способствует повышению точности геометрических размеров и формы обрабатываемой поверхности из-за непрерывного контакта абразива с поверхностью изделия;

– обеспечение стабильности физико-механических показателей качества поверхностного слоя детали ввиду отсутствия жесткого крепления абразивного зерна в связке,

– устранение в зоне резания критических давлений и температур, что увеличивает стойкость зерна и способствует самопроизвольному нивелированию режущего инструмента относительно топографии обрабатываемой поверхности;

– управление жесткостью абразивного инструмента в осевом и продольном направлениях путем регулирования величины магнитной индукции, что позволяет изменять величину съема металла с обрабатываемой поверхности изделия;

– совмещение черновой, чистовой и финишной обработки без смены технологических баз и позиционирования детали;

– осуществление размерной и безразмерной обработки, обеспечивающей съем металла 0,002...0,5 мм за 10...120 с.

Промышленное применение способ получил, начиная с 70-х годов прошлого века, благодаря разработкам, выполненным в ФТИ НАН Беларуси под руководством Е. Г. Коновалова [62]. В разработку технологических процессов МАО внесли существенный вклад работы П. И. Ящерицына, Ф. Ю. Сакулевича, Н. Я. Скворчевского, Г. С. Шулева, Л. К. Минина, Н. С. Хомича, В. И. Ждановича, В. С. Майбороды, Ю. М. Барона, О. В. Благодарной, G. Kremen, J. Kodacsy, H. Yamaguchi, T. Shinmura, R. Komanduri, E. Wantuch и др. [23, 63...76].

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

Эффективность обработки, интенсивность удаления припуска, а также качество обрабатываемой поверхности зависят от окружной скорости вращения заготовки, плотности магнитного потока, размера рабочего зазора, материала заготовки, типа и зернистости ферроабразивного порошка. Регулированием силы тока, поступающего на электромагнитные катушки, можно изменять давление ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность.

Зерна ФАП взаимодействуют между собой и расположены между полюсами магнита вдоль силовых линий магнитного поля, создавая тем самым гибкую ферро-абразивную щетку. Магнитное поле удерживает порошок в рабочем зазоре и выступает в роли связки, прижимающей порошок к обрабатываемой детали [23]. Благодаря своим положительным качествам метод МАО получил широкий спектр применения. Финишная обработка, снятие заусенцев, а также скругление фасок могут быть выполнены одновременно. Метод магнитно-абразивной обработки может быть использован для выполнения операций полирования и удаления оксидных пленок при высокой скорости вращения заготовок.

Проблема финишной обработки валов больших диаметров крайне важна и требует своего решения для листопрокатного производства, каландров и рабочих органов барабанов химического, пищевого машиностроения и изготовления бумаги. Решение данной стратегической задачи, заключающееся в разработке гаммы оборудования, предназначенного для финишной обработки валов диаметром до 1,5, длиной до 6,5 и рабочая поверхность которых должна иметь Ra 0,01...0,004 мкм требует создания технологического процесса, включающего комплекс уникальных операций, отделочной из которых явилось МАО [77].

Технологическая оснастка, особенность которой заключается в позиционировании и закреплении на крупногабаритном токарном

станке 165 представляет собой П-образный магнитопровод при обхвате сектора обработки вала каландра до 15° и наличии в обязательном порядке серповидного зазора, а рабочая поверхность полюсных наконечников выполнена с продольно-поперечными пазами для эффективного управления магнитными потоками в зоне обработки (рис. 1.23). В результате использования схемы MAO каландров бумагоделательных машин обеспечено снижение Ra 0,5...1,0 до 0,01...0,04 мкм за 45...60 с.

На рис. 1.24 изображена схема установки для осуществления способа MAO наружных поверхностей валов, где обрабатываемая деталь помещается между полюсными наконечниками 4 при раздвижении двух магнитных систем 1 и закрепляется в кулачковом патроне и центре 7. Полюса электромагнитов с полюсными наконечниками 4 подводят к обрабатываемой детали 8 с определенным зазором. Зазор заполняют ферроабразивным порошком. В обмотки катушек 3 подается ток [78]. Далее включают механизм осцилляции 5 с предварительно установленной частотой и амплитудой, деталь приводят во вращение, и всему устройству сообщается продольная подача.

Регулирование частоты осцилляции полюсных наконечников 4 производят с помощью изменения частоты вращения электродвигателя.

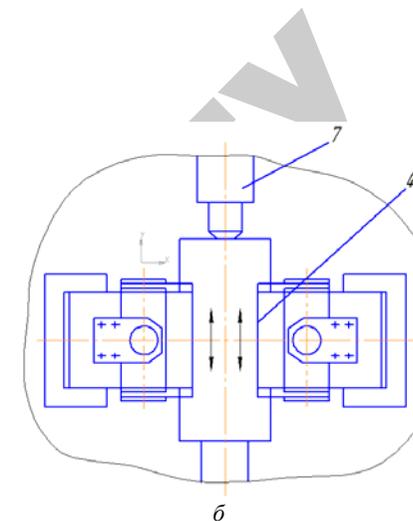
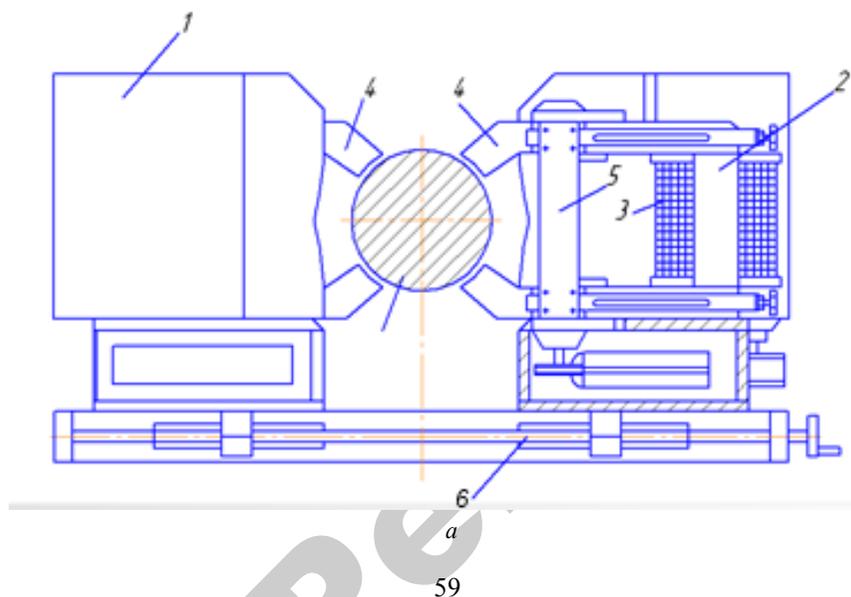
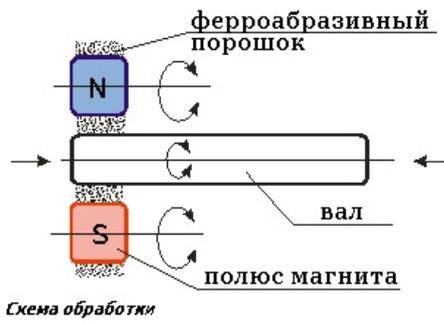


Рис. 1.24 Схема установки для MAO наружных цилиндрических поверхностей: а – главный вид, б – вид сверху

Тенденция развития процесса MAO заключается в переходе от обработки цилиндрических и плоских деталей простой формы к более сложной пространственной и в увеличении геометрических размеров обрабатываемого изделия. Проведенные ранее исследования были направлены на разработку общих теоретических положений физических основ и технологических особенностей метода, однако проведенный анализ показывает, что данные исследования в основном касались деталей простой геометрической формы, изготовленных из различных материалов, в то время как работы, посвященные MAO изделий сложной пространственной формы носят стохастический и разрозненный характер. В то же время расширение диапазона использования деталей со сложнопрофильными поверхностями позволяет в значительной мере повысить качество многих изделий. Во многих случаях только усложнение формы и повышение точности размеров рабочей поверхности детали позволяет получить новые свойства, расширить функциональные возможности, повысить надежность, увеличить ресурс, КПД и улучшить эксплуатационные характеристики машин в целом.

Представляет интерес рассмотрение принципиальной возможности MAO различных видов сложнопрофильных поверхностей деталей, к качеству поверхности которых предъявляются повышенные требования. Важным с точки зрения более широкого распространения процесса MAO является установление области применения для различных материалов.

ПОЛИРОВАНИЕ, ЗАЧИСТКА ВАЛОВ



Полировальный модуль устанавливается на суппорт универсального токарного станка

Станок для полирования валов

Диаметр детали, мм	5 – 1500
Производительность, м/мин	0,1 – 1,0
Съем металла, мкм	5 – 100
Потребляемая мощность, кВт	3,0
Габариты модуля L x B x H, м	0,8 x 0,5 x 0,4

Примеры применения:

- полирование с целью снижения шероховатости поверхности и повышения сопротивления износу, коррозии и механическим нагрузкам

Рис. 1.23. Схема магнитно-абразивной обработки каландров бумагоделательных машин

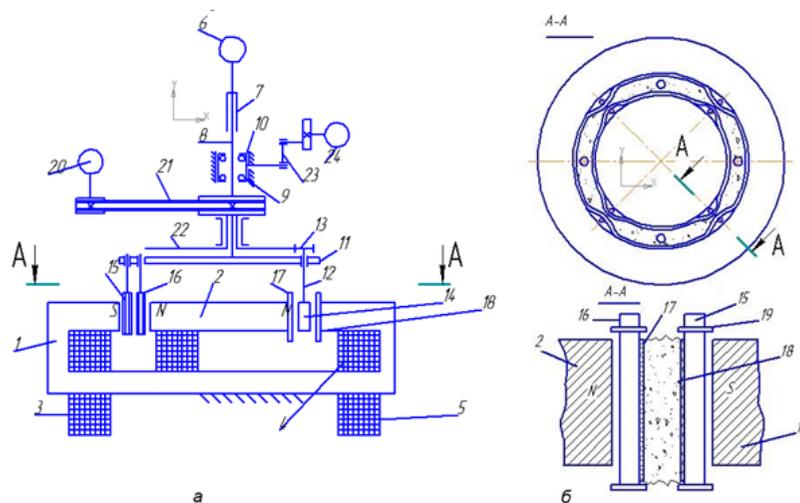


Рис. 1.25. Схема установки для МАО поверхностей малогабаритных деталей машин:

а – главный вид; б – рабочая зона в сечении сверху и сбоку

На рис. 1.25 приведена схема установки для МАО поверхностей малогабаритных деталей машин, где на катушки электромагнитов 3...5 подают напряжение, а ферроабразивный порошок размещают в рабочем зазоре между лентами 17 и 18. Закрепленные в приспособлениях детали опускают в ферроабразивную среду. Затем последовательно включают в работу электродвигатели 6, 20 и 24, сообщающие деталям вращательное и осциллирующее движение и перемещение вдоль кольцевого рабочего зазора. Перемещение вдоль рабочего зазора роликам 15 и 16 сообщается от электродвигателя б через муфту, центральный вал 8 и водило 11, несущее на своей плоскости подшипниковые узлы роликов 15 и 16. При этом скорость поступательного перемещения роликов 15 и 16 и деталей одинакова. Детали "внедряются" в ферроабразивную среду, уплотняют ее и оттесняют к рабочим лентам 17 и 18 и полюсам 1 и 2 электромагнита. При этом за деталью образуется зона, свободная от ферроабразивной среды или обладающая значительно меньшей плотностью по отношению к исходной. Движущиеся вслед за немагнитными деталями ролики 15 и 16 перекрываются по рабочим лентам 17 и 18 и сообщают перемещение им и частицам уплотненных

слоев ферроабразивной среды навстречу друг другу к середине рабочего зазора в направлении, параллельном магнитным силовым линиям, пересекающим рабочий зазор [79].

Перемещаясь вдоль рабочего зазора, ролики 15 и 16 вызывают восстановление рабочих свойств ферроабразивной среды на всем протяжении своего пути со скоростью, равной скорости перемещения деталей.

При этом достижение частицами среды, находящимися у разноименных полюсов, максимального перемещения к середине зазора навстречу друг другу происходит одновременно. В зоне рабочего зазора позади роликов 15 и 16 происходит перемешивание и переориентация зерен среды, следовательно, и восстановление ее режущих свойств. В каждом участке рабочего зазора позади роликов 15 и 16 происходит расширение обжато участка среды под действием сил магнитного поля, частицы выстраиваются цепочками вдоль магнитных силовых линий, пересекающих рабочий зазор. Величину зазора z между каждым из роликов 15 и 16 и полюсными наконечниками 1 и 2 и диаметр каждого ролика d выбирают из условия, что $d + z = (0,58...0,73)D$, где $D = 25\delta$, но выше, чем в середине рабочего зазора.

При $(d + z) > 0,73D$ в зоне перекрытия слоев происходит повышение плотности среды, затрудняющее перемешивание и переориентацию частиц.

Однако в пространстве зазора за роликами 16 и 15 сложно установить равномерную плотность ФАП и обрабатываемые детали при своем перемещении вдоль зазора все время внедряются в среду ФАП с неравномерной плотностью, что приводит к снижению качества обработанной поверхности.

На рис. 1.26 представлена схема установки для МАО поверхностей поршней, которая работает следующим образом: устройство закрепляется на суппорте токарного станка через изолирующую пластину. Обрабатываемый поршень 12 через изоляционную прокладку закрепляется в кулачках патрона. Токоподвод от генератора импульсов (ТГ-250, МГИ-400) к поршню осуществляется через корпус, установленный в задней бабке. Второй полюс генератора подключается к магнитопроводу 2. Обработка осуществляется на обратной полярности (деталь – катод, электрод – анод). Приводом поперечной подачи станка электрод 8 вводится в канавку.

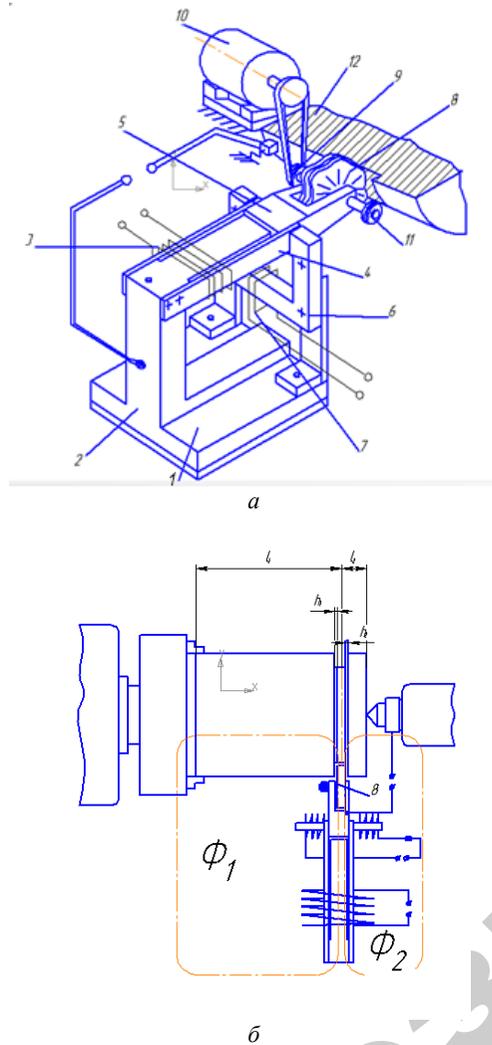


Рис. 1.26. Схема установки для МАО поверхностей поршня:
 а – главный вид; б – вид сверху

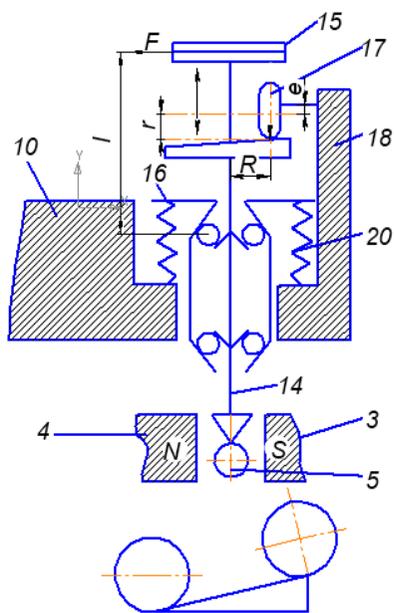
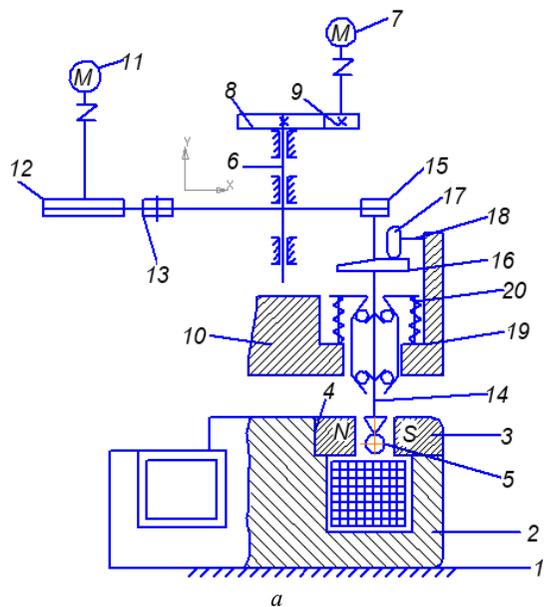
Включают индуктор 3, в зону обработки подают ФАП и включают осцилляцию подвижного магнитопровода 5 подачей переменного напряжения на катушку 7 осцилляции. Ферропорошок в полости канавки начинает колебаться на электроде. Наблюдая характер его

движения, устанавливают компенсирующие элементы 11, добиваясь равномерного распределения ФАП с обеих сторон электрода 8. После выравнивания потоков Φ_1 и Φ_2 в зоне обработки компенсирующими элементами 11 включают привод 10 вращения и генератор импульсов. При этом возникают разряды между электродом и поршнем, вследствие чего поверхность канавки упрочняется [80].

Форма электрода 8 обеспечивает одновременное упрочнение как дна, так и боковых стенок канавки, что повышает производительность. Качество обработки повышается обеспечением равномерного симметричного распределения магнитного потока в зоне обработки. Выполнение электрода в виде набора дисков позволяет подстраивать их по ширине обрабатываемой канавки от h_{\min} до h_{\max} .

Однако недостатком этой схемы является необходимость введения компенсирующих элементов 11, что вызвано неодинаковыми величинами магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 , обусловленных асимметричным расположением упрочняемой канавки относительно торца поршня и различным магнитным сопротивлением элементов токарного станка. Поэтому настройку устройства на партию поршней производят на пробных образцах, что увеличивает трудоемкость и себестоимость обработки этих деталей.

На рис. 1.27 приведена схема установки для МАО поверхностей деталей фасонной формы, которая работает следующим образом. На станине 1 установлена кольцевая магнитная система 2 с полюсными наконечниками 3 и 4, между которыми помещают обрабатываемые поверхности изделия 5. Механизм обкаточного движения изделий состоит из центрального вала 6, верхний конец которого соединен с электродвигателем 7 через зубчатые шестерни 8 и 9, а нижний с ротором 10. Механизм вращения изделий 5 вокруг собственной оси содержит кинематически связанные с электродвигателем 11 ведущий шкив 12, отклоняющие шкивы 13 ременной передачи и закрепленный на оси шпинделя 14 ведомый шкив 15 [81]. Механизм осцилляции состоит из профильного кулачка 16, жестко установленного на валу шпинделя 14, и установленного на роторе 10 эксцентричного ролика 17, ось 18 которого перпендикулярна оси шпинделя 14, корпус шпинделя 19 установлен в роторе 10 с возможностью продольного перемещения, при этом пружины 20, установленные в корпусе шпинделя 19, обеспечивают кинематическое замыкание механизма.



66

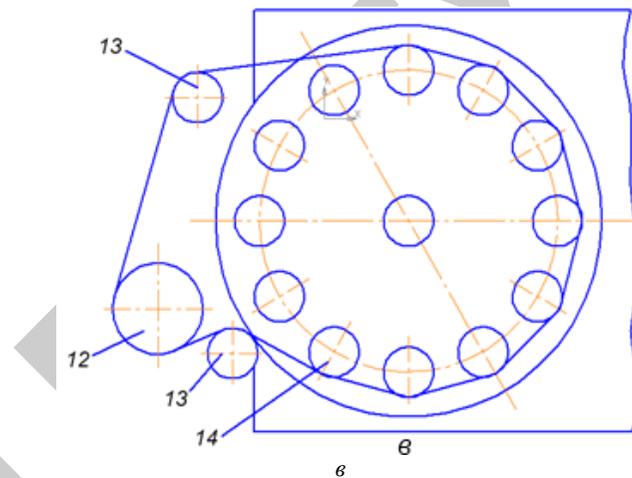


Рис. 1.27. Схема установки для МАО поверхностей деталей фасонной формы:
 а – кинематическая схема установки; б – кинематическая схема механизма осциллирующего движения; в – кинематическая схема привода шпинделей

Обрабатываемые изделия 5 закрепляются в шпинделях 14 и опускаются в рабочий зазор между полюсными наконечниками 3 и 4 электромагнитной системы 2, в рабочий зазор засыпается порция ферромагнитного порошка и подается напряжение на электромагнитную катушку. Затем включается электродвигатель 11, сообщая изделию 5 вращение вокруг своей оси и осциллирующее движение. Вращение вокруг своей оси передается изделиям 5 от электродвигателя 11 через шкивы 12 и 15 ременной передачи. Вращение вокруг оси кольцевой магнитной системы сообщается от электродвигателя 7 через зубчатые шестерни 8 и 9, центральный вал 6 и ротор 10. Осциллирующее движение изделие 5 получает от электродвигателя 11 через шкивы 12 и 15 и подпружиненный корпус шпинделя 19, на котором установлен профильный кулачок 16, кинематически связанный с эксцентрично установленным роликом 17. При вращении шпинделя 14 профильный кулачок 16 обкатывается по установленному с эксцентриситетом ролику 17 и приводит подпружиненный корпус шпинделя 19 в колебательное движение с амплитудой, зависящей от эксцентриситета ролика 17 и профиля кулачка 16. Частота и амплитуда осциллирующего движения могут регулироваться за счет изменения профиля и размеров кулачка и эксцентрикового ролика.

67

Однако качество магнитно-абразивного полирования зависит от того, насколько равномерно следы контакта (ферроабразивного порошка) распределяются на поверхности изделия. В случае неравномерности распределения этих следов получаются локальные отклонения по точности и шероховатости поверхности.

На рис. 1.28 показана схема предлагаемой установки, которая работает следующим образом: закрепленные в приспособлениях заготовки 8 опускают в кольцевую ванну 14 с рабочей смесью. Подается напряжение на катушки электромагнита и в зазоре между всеми парами полюсными концевиками наводится постоянное магнитное поле заданной напряженности. Затем последовательно включаются в работу электродвигатели 1, 11 и 10, сообщая изделиям вращение вокруг оси кольцевой ванны и собственной оси, а также осциллирующее движение в вертикальной плоскости. При этом вращательное движение вокруг оси кольцевой ванны 14 сообщается электродвигателем 1 через муфту 2, центральный вал 3 и водило 5, несущее на своей плоскости подшипниковые узлы шпинделей 6 с приспособлениями для крепления изделий 8, а вращение вокруг собственной оси передается изделиям 8 от электродвигателя 11 через ременную передачу 12 и солнечную шестерню 13, находящуюся в зацеплении с 45 планетарными шестернями 7. Изменяя направление вращения и число оборотов роторов электродвигателей 1 и 11, можно получить разноименное или одноименное направление двух вращательных движений изделий, регулировать скорость их движений относительно полюсов [82] электромагнита и, следовательно, изменять режимы обработки.

Осциллирующее движение изделия получают от электродвигателя 10 через кривошипно-шатунный механизм 9, который соединен с ползуном 4. Ползун передает движение центральному валу 3, а последний дисковому водилу 5 с обрабатываемыми заготовками.

При включении катушек электромагнитов образуется магнитное поле, в котором режущие частицы (зерна ферропорошка) уплотняются, ориентируются своей большей осью вдоль магнитных силовых линий и прижимаются острыми гранями к обрабатываемой поверхности.

При вращении заготовок режущие частицы обрабатывают поверхность, а сообщаемое им круговое движение и осцилляция исключают совпадение траектории режущих частиц по следам предыдущей обработки и увеличивают интенсивность процесса.

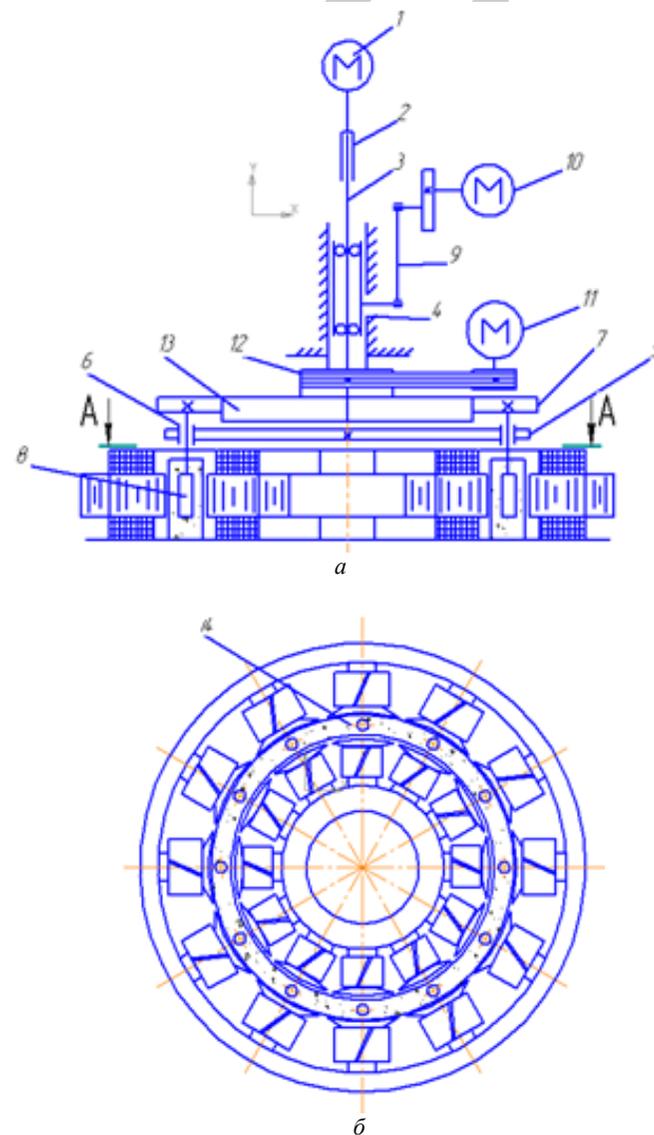


Рис. 1.28. Схема установки для МАО поверхностей деталей машин типа «кольцевая ванна»: а – кинематическая схема установки; б – «кольцевая ванна»

Однако поочередность обработки внутренних поверхностей подвешенных в ванне изделий не позволяет интенсифицировать процесс. Обработке в основном подвергаются радиально расположенные поверхности заготовок (поверхности, обращенные к полюсам внутреннего магнита).

На рис. 1.29 представлена схема обработки деталей с глубиной винтовой нарезки более 3 мм. Две одинаковые детали 1 с наружной винтовой поверхностью располагают на параллельных осях в рабочей зоне, образованной двумя полюсными наконечниками 2 магнитной системы (не показана).

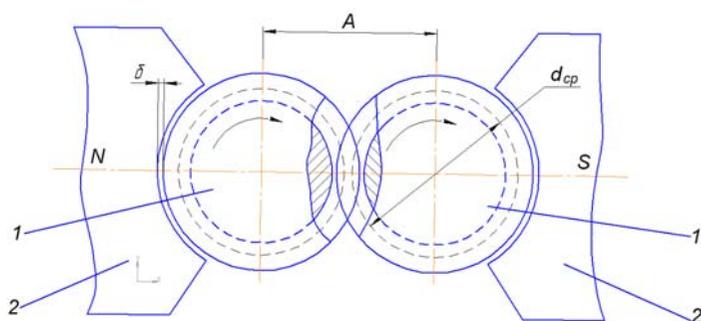


Рис. 1.29. Схема установки для МАО винтовых поверхностей

Детали вводят в зацепление одна с другой, обеспечивая постоянный гарантированный зазор между боковыми поверхностями витков $\delta = 0,3 \dots 1,5$ мм, величину которого выбирают в зависимости от глубины винтовой нарезки и схемы обработки, т.е. детали устанавливают с межцентровым расстоянием между ними [83]

$$x = d_{\text{сп}} + \frac{\delta}{2 \sin \alpha},$$

где $d_{\text{сп}}$ – средний диаметр винтовой нарезки;

δ – гарантированный рабочий зазор между боковыми поверхностями витков;

α – угол профиля витка в продольном сечении.

Форма полюсных наконечников 2 определяется схемой обработки из условия обеспечения постоянного рабочего зазора между наружными поверхностями деталей и гладкими рабочими поверхностями полюсных наконечников.

При обработке деталей 1 задают синхронное вращение в одном направлении, а полюсным наконечникам 2 сообщают движение продольной подачи, скорость которой зависит от материала детали, исходной величины шероховатости, величины магнитной индукции и не зависит от параметров винтовой нарезки.

В рабочую зону подают ферроабразивный порошок. Съем металла в этом случае происходит в трех зонах для каждой из деталей 1 в зонах перекрытия их полюсными наконечниками 2, где происходит обработка по диаметру выступов и боковых сторон витков на небольшом расстоянии от вершины и в зоне зацепления, где происходит обработка боковых поверхностей витков и дна впадин между витками. Обработка всей детали происходит по мере перемещения полюсных наконечников.

Для обеспечения равномерности обработки винтовых поверхностей, оцениваемой по отношению Ra_{max} во впадение нарезки Ra_{max} у ее вершины, которое не должно превышать 1,5, следует использовать различное расположение в рабочей зоне деталей с различной глубиной винтовых нарезок.

Так, при обработке винтовых наружных поверхностей с глубиной нарезки более 3 мм детали 1 располагают так, чтобы в поперечном сечении прямая, соединяющая их центры, была перпендикулярна (угол $\beta = 90^\circ$) оси симметрии полюсных наконечников 2.

При этом величину бокового зазора в зацеплении выбирают в пределах 0,8...1,5 мм. При таком расположении деталей основная масса ферроабразивного порошка скапливается в зоне зацепления деталей и обеспечивает интенсивную обработку глубоких впадин.

Поэтому детали следует располагать так, чтобы в поперечном сечении прямая, соединяющая их центры, совпадала с осью симметрии полюсными наконечников (угол $\beta = 0^\circ$), а величину бокового зазора следует выбирать в пределах 0,3...0,8 мм. В этом случае основная обработка происходит в зонах перекрытия деталей полюсными наконечниками, а в зоне зацепления происходит лишь дообработка впадин. Явление шаржирования при этом не наблюдается, так как

в зоне зацепления скапливается значительно меньше порошка, чем в зоне обработки.

Однако при обработке винтовых наружных поверхностей с глубиной нарезки менее 3 мм расположение деталей приводит к появлению шаржирования из-за наличия большого количества порошка в зоне зацепления и к неравномерности обработки.

На рис. 1.30 приведена рабочая зона установки для МАО поверхностей деталей машин из немагнитных материалов, которая работает следующим образом: прямолинейный, кольцевой или другой формы рабочий зазор между полюсами электромагнита 1 заполняют ферроабразивным порошком 2. В рабочий зазор помещают обрабатываемые изделия 3 круглой, плоской или другой формы и вслед за каждым из них ферромагнитные тела 4, форма и размеры которых определяются обрабатываемым изделием и рабочим зазором [84].

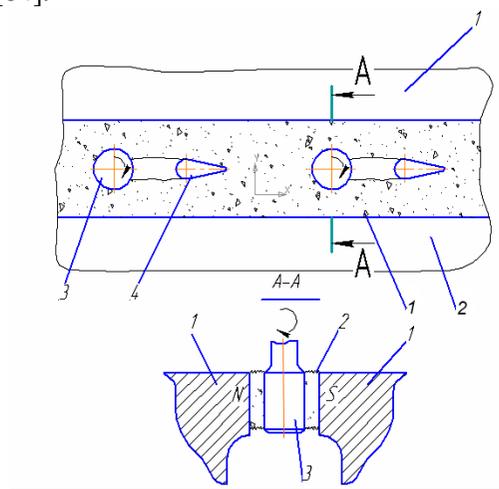


Рис. 1.30. Схема установки для МАО поверхностей деталей машин из немагнитных материалов

Обрабатываемым изделиям 3 и ферромагнитным телам 4 сообщают поступательное движение в ферроабразивной среде вдоль зазора между полюсами электромагнита 1. При этом изделия 3, внедряясь в порошкообразную ферроабразивную среду, обрабатываются ею, оттесняя и уплотняя последнюю на полюсах элек-

тромагнита 1, и оставляют за собой вдоль рабочего зазора зону, свободную от ферроабразивной среды или обладающую значительно меньшей плотностью по 5 отношению к исходной. Движущиеся вслед за немагнитными изделиями 3 ферромагнитные тела 4 притягивают к себе уплотненную на полюсах ферроабразивную порошкообразную массу, восстанавливая равномерную исходную плотность среды в зазоре. Таким образом, обрабатываемые изделия 3 при своем поступательном движении все время внедряются в сплошную ферроабразивную среду с равномерной исходной (или приближающейся к ней) плотностью, что исключает затухание процесса во времени. В зависимости от конфигурации изделий последним, кроме создающего силы резания поступательного вдоль рабочего зазора, могут также сообщаться вращательное (для изделий типа тел вращения), осциллирующее, колебательное с изменением угла атаки (например, для изделий аэро- и гидродинамических форм) и другие виды движений.

Однако для увеличения режущих свойств ферроабразивной среды путем ее перемешивания ферромагнитным телам 4 необходимо сообщать дополнительно вращательное вокруг своей оси или другие виды движений, что приводит к увеличению трудоемкости обработки.

На рис. 1.31 показана схема установки для МАО поверхностей деталей машин на постоянных магнитах, которая состоит из неподвижного корпуса 1, вращающегося корпуса 2, магнитного индуктора 3, механизма рабочих движений, обеспечивающего одновременное вращение и радиальные осцилляции магнитного индуктора, механизма для регулирования магнитной индукции на полюсах индуктора.

Внутри вращающегося корпуса 2 устройства размещается механизм рабочих движений индуктора, а на нижнем его торце — направляющие, позволяющие магнитному индуктору 3 совершать радиальные осцилляции.

В состав механизма рабочих движений входят хвостовик 4, несущий на себе ведущую шестерню 5 и эксцентриковый палец 6, планетарный механизм с колесами 7 и 8.

Магнитный индуктор состоит из двух блоков 9 и 10, собранных внутри корпуса индуктора. Блоки 9 и 10 набраны из радиально расположенных постоянных магнитов 11 и стальных магнитопроводов 12. Полюсами магнитов 11 являются их боковые плоскости, и магниты собраны в блоках таким образом, что одинаковые полюсы каждых двух соседних магнитов обращены друг к другу. При этом

нижние плоскости разделяющих их магнитопроводов 12 имеют чередующие полярности [85].

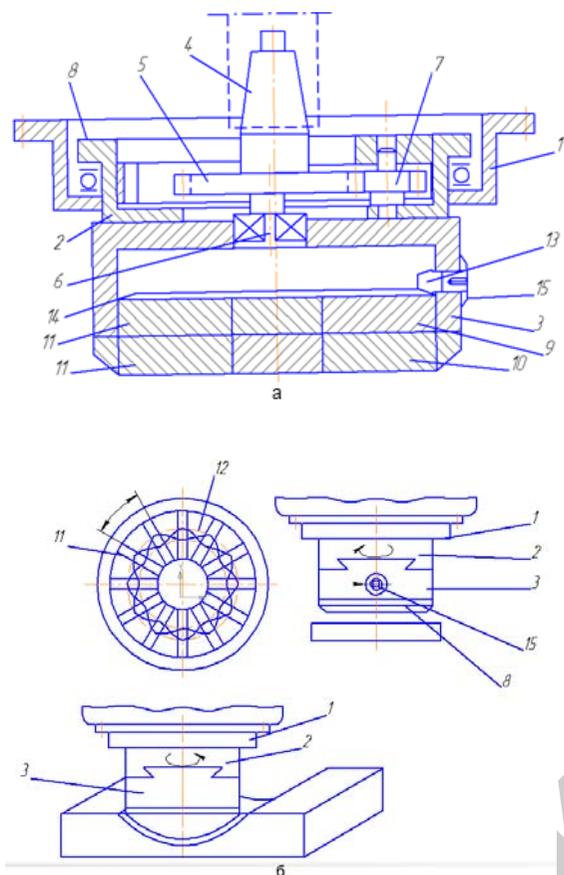


Рис. 1.31. Схема установки для MAO поверхностей деталей машин с использованием постоянных магнитов:
а – главный вид; б – способы применения устройства для обработки плоской и фасонной поверхности

Блок 9 выполнен поворотным относительно блока 10, неподвижно закрепленного в корпусе для включения-выключения магнитного поля и для регулирования магнитной индукции на полюсах индуктора.

Механизм регулирования магнитной индукции и включения – выключения магнитного поля должен обеспечивать поворот блока магнитов 9 на один угловой межполюсный шаг, а также обеспечивать фиксированные угловые положения блока 9 в пределах этого шага. Например, с этой целью может быть применен механизм из конических шестерен 13 и 14. На шестерне 13 закреплена угловая шкала 15, а коническая шестерня 14 закреплена на поворотном блоке магнитов 9. В ступице конической шестерни 15 имеется отверстие под ключ.

При включении вращения шпинделя базового станка через шестерни 5, 7 и 8 и корпус 2 вращение сообщается магнитному индуктору 3. Одновременно, благодаря эксцентриковому пальцу 6, входящему в окно магнитного индуктора, ему сообщают радиальные осцилляции. Передаточные отношения колес 5, 7 и 8 подобраны таким образом, чтобы за каждый полный оборот корпуса 2 с магнитным индуктором 3 последний совершил несколько радиальных ходов.

Обрабатываемая деталь получает движение подачи от привода базового станка.

Зерна ферроабразивного порошка, находящегося при включенном магнитном поле в зазоре δ между индуктором и обрабатываемой поверхностью, повторяют движение магнитного индуктора и в процессе магнитно-абразивного полирования образуют на обрабатываемой поверхности сетку взаимно пересекающихся рисок. Включение-выключение магнитного поля, необходимые для замены отработавшей порции порошка, осуществляются поворотом блока 9 на один угловой шаг расположения магнитов с помощью конических шестерен 13 и 14. При включенном положении полярности магнитов в блоках 9 и 10 совпадают, при выключенном положении – противоположны.

В состав механизма рабочих движений входят хвостовик 4, несущий на себе ведущую шестерню 5 и эксцентриковый палец 6, планетарный механизм с колесами 7 и 8.

Однако инструмент изготавливается на основе постоянных магнитов, что повышает стоимость его изготовления и приводит к низкой коррозионной стойкости ввиду контакта с СОТС.

На рис. 1.32 изображена схема установки для MAO поверхностей деталей машин для обработки червяков, которая содержит корпус,

состоящий из двух разъемных частей 1 и 2, установленных на приводимой во вращение оси – сердечнике 3, на которой расположена электромагнитная катушка 4. Разъемные части корпуса являются полюсными наконечниками и имеют кольцевые выступы 5, на которых выполнены радиальные сквозные треугольные пазы 6 и несквозные прямоугольные пазы 7, служащие концентраторами магнитного поля. При этом прямоугольные пазы 7 расположены на образующей поверхности выступов параллельно оси вращения сердечника, а пазы 6 расположены со стороны разделяющего полюсные наконечники 1 и 2 кольца 8 из немагнитного материала, осуществляя наряду с концентрацией магнитного поля в межполюсном зазоре фиксацию кольца 8, на образующей поверхности которого выполнены насечки, по направлению совпадающие с направлением магнитных силовых линий [86].

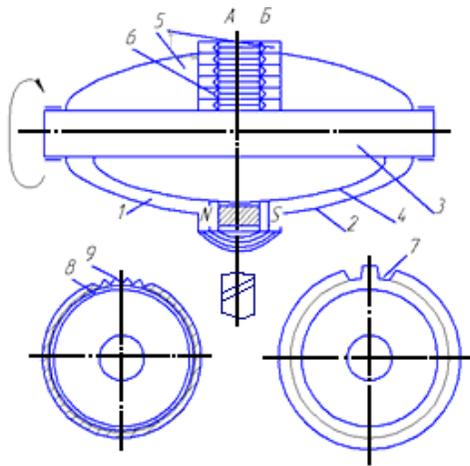
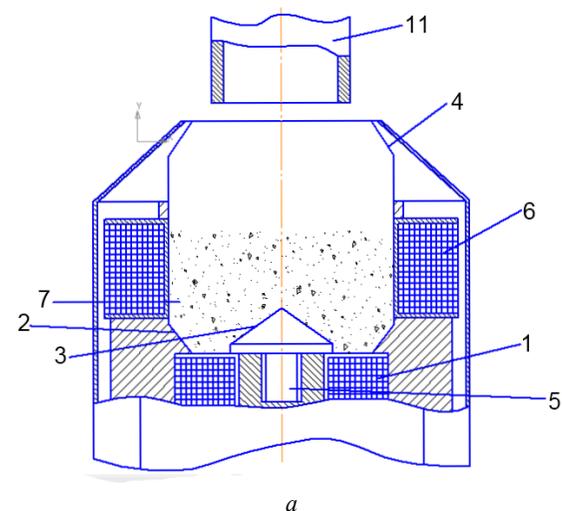


Рис. 1.32. Схема установки для МАО поверхностей деталей машин для обработки червяков

При работе устройства постоянный ток от источника питания подается на электромагнитную катушку 4. Под воздействием магнитного поля ферроабразивный порошок 9 притягивается к электромагнитной головке в зоне между разъемными частями 1 и 2 корпуса и при вращении устройства полирует обрабатываемую поверхность.

Однако сложность конструкции и низкая технологичность устройства связаны с высокой трудоемкостью изготовления, а необходимость использования постоянного тока повышает себестоимость изготовления деталей.

На рис. 1.33 изображена схема установки для удаления заусенцев труб методом МАО, которая работает следующим образом: с помощью токоотъемника 8 на обмотки электромагнита и электромагнитной катушки подается электрический ток, в результате чего внутри ванны 4, между полюсами 2 и наводится магнитное поле, формирующее и уплотняющее массу ферроабразивных частиц. Кроме того, электромагнитная катушка 6, благодаря наведенному внутри себя магнитному полю, расширяет вдоль оси ванны 4 зону формирования массы ферроабразивных частиц. Далее с помощью привода 10 электромагнит 1 приводится во вращение, а обрабатываемую деталь (трубу) 11 вводят (вручную) в ванну 4 и прижимают к вращающейся плотно сформированной массе ферроабразивных частиц 7. При этом заусенцы на торце трубы сминаются и срезаются ферроабразивными частицами. После обработки деталь 11 удаляется из ванны 4. При этом ферроабразивные частицы, благодаря электромагнитной катушке 6, удерживаются в зоне обработки, не увлекаются деталью 11 [87].



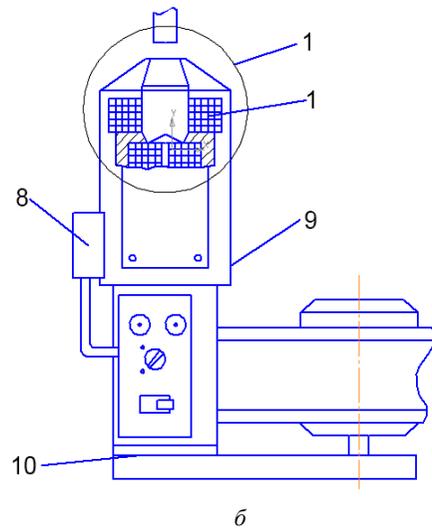


Рис. 1.33. Схема установки для удаления заусенцев труб методом МАО:
а – рабочая зона; б – общий вид установки

Однако при использовании этого устройства велика доля ручного труда, что приводит к снижению производительности обработки и субъективности полученных результатов.

На рис. 1.34 изображена схема установки для МАО шариков. Верхний полюсный наконечник 1, находится в крайнем верхнем положении, открывая доступ в рабочую зону. Обрабатываемые шарики 3 помещают на кольцевую канавку нижнего полюсного наконечника 2. Туда же подают ферроабразивный порошок и СОТС. На катушки 6 подают напряжение и под действием магнитного поля верхний полюсный наконечник 1 притягивается к нижнему 2 и занимает свое рабочее положение.

Затем приводят во вращение верхний и нижний полюсные наконечники. При вращении верхний 1 и нижний 2 полюсные наконечники также получают поперечные колебания заданной амплитуды [88].

Одновременно включают генератор 8 колебаний, нижний полюсный наконечник 2 начинает вибрировать с заданной частотой. Шарики 3 обкатываются между наконечниками 1 и 2. Частицы ферроабразивного порошка выстраиваются в магнитном поле и производят обработку поверхности шариков.

Однако отсутствие жесткого контакта шариков с обрабатываемыми дисками приводит к образованию кольцевой гранности из-за неравномерности вращения шариков и различной степени их проскользывания.

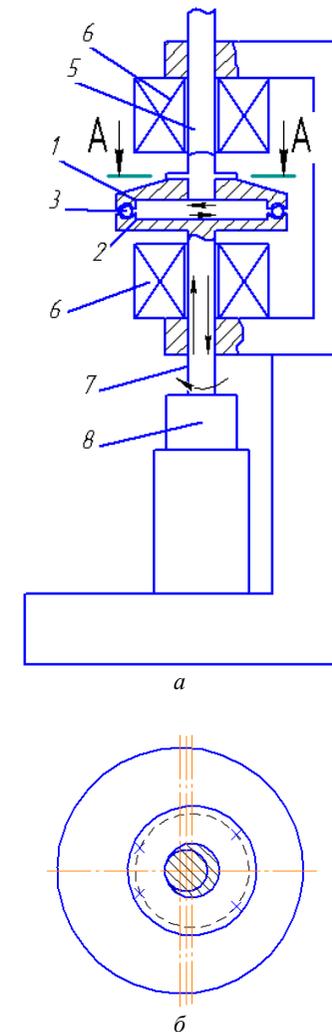


Рис. 1.34. Схема установки для МАО шариков:
а – кинематическая схема; б – рабочая зона обработки МАО шариков

В работе [71] представлен способ и установки для обработки методом MAO швейных игл, обеспечивающих одновременное полирование поверхности рабочей части иглы, сглаживание фаски между острием и основным телом лезвия иглы, удаление заусенцев с краев отверстия в ушки игл, закругления вершины острия иглы, что позволило увеличить износостойкость иглы на 65...70 % при исходной микротвердости 1600...1800 МПа. После MAO микротвердость поверхности иглы достигает 2800...2900 МПа, и уменьшается себестоимость обработки в 3...4 раза при увеличении производительности в 1,6 раза (рис. 1.35).

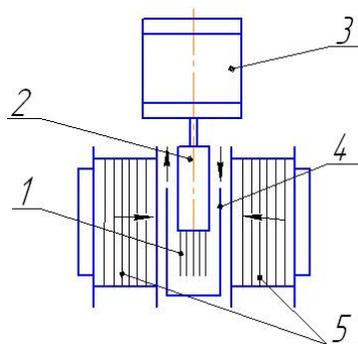


Рис. 1.35. Схема установки для MAO швейных игл:
1 – иглы; 2 – патрон; 3 – электромагнит; 4 – кювета;
5 – электромагнитные катушки

Однако установлено, что магнитная индукция действует неравномерно как вдоль плоскостей полюсов электромагнита, так и внутри рабочей зоны, причем наибольшее значение магнитной индукции 0,03 Тл находится по краям полюсов. Это требует необходимости расположения обрабатываемых игл в зоне значений наибольшей магнитной индукции, что снижает эффективность производства и требует применения дополнительного устройства для ориентации игл в рабочей зоне.

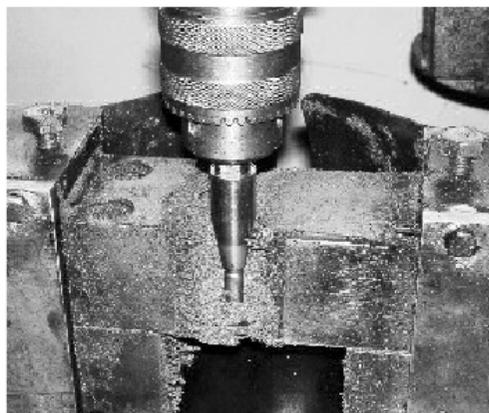
В работе [89] показана возможность формирования шероховатости рабочих поверхностей на уровне 0,15...0,2 мкм, обеспечивающего существенное повышение поверхностной твердости (в ряде случаев до величины $HV = 18...20$ ГПа, на глубине более 10...50 мкм), что приводит к повышению работоспособности режущего инструмента

не менее чем в 1,3...1,5 раза. При этом необходимо одновременно решать задачи, связанные с обеспечением равномерной и эффективной обработки всех рабочих поверхностей твердосплавного инструмента – задней и передней поверхностей, непосредственно режущих кромок, элементов, предназначенных для стружкодробления на передней поверхности, опорных поверхностей.

Исследования MAO твердосплавного инструмента выполняли при возможности позиционирования, последующего перемещения обрабатываемых изделий под различными углами в кольцевой рабочей зоне и вращения деталей вокруг оси оправки, используемой для крепления твердосплавного инструмента, в различных направлениях с регулируемой частотой. Установками, реализующими разную кинематику и динамику процесса перемещения обрабатываемых деталей в рабочих зонах при обработке являются:

– установка для MAO твердосплавного инструмента [69] (рис. 1.36, а),

– магнитно-абразивный роторный станок MAPC-4 с вертикальным расположением шпинделей, в которых на оправках закрепляют твердосплавный инструмент (рис. 1.36, б). Исследования выполняли на четырехгранных пластинах, изготовленных из двух- и трехкарбидных твердых сплавов типа T15K6 и TT10K8. Использовали окончательно обработанные пластины CNMG 120412, SNMG 12040822 и SNUM 120408, изготовленные фирмами KENNAMETAL, MITSUBISHI и ОАО «Кировградский завод твердых сплавов». Шероховатость рабочих поверхностей (передней и задней) кировградских пластин составляет 0,8...0,9 мкм, опорной поверхности – 0,33...0,35 мкм, рабочие кромки имеют радиус округления 35...45 мкм, на отдельных пластинах имеют место микросколы и неправильная форма радиуса. Первая группа пластин обрабатывалась на станке MAPC-4 при скорости вращения вертикально расположенных шпинделей с закрепленными в них на оправках резовыми пластинками 2,8 м/с и скорости перемещения вращающихся деталей через рабочие зоны 0,006 м/с. Время MAO составляло 120 с. Обработка выполнялась с реверсом вращения. Величина магнитной индукции в рабочих зазорах (свободных от ферроабразивного порошка) поддерживалась на уровне 0,28 Тл. В качестве ферроабразивного порошка использовали порошок Ферромап с размером частиц 200/100 мкм и с добавлением 5 %-й алмазной пасты ACM 3 2 [69].



a



б

Рис. 1.36. Фотографии установки для МАО твердосплавного инструмента:
a – рабочая зона установки для МАО; *б* – шестишпindelный рабочий модуль станка MARC типа «кольцевая ванна»

Вторая группа пластин обрабатывалась на установке типа кольцевая ванна с шестишпindelным модулем. МАО выполняли порошком Ферромап с размером частиц 630/400 мкм и порошком Ферромап с размером частиц 200/100 мкм и с добавлением 5 %-й алмазной пасты АСМ 3 2, при величине магнитной индукции в рабочих зазорах 0,28...0,3 Тл, скорости обработки 2 и 3 м/с, времени обработки 120 с. При этом 60 с выполнялась

обработка при вращении шестишпindelного модуля по часовой стрелке и 60 с – против часовой стрелки. Установлено, что величина Ra как на задней, так и на передней поверхности режущих пластин за время обработки 120 с с реверсом вращения достигает величины 0,6...0,63 мкм на передней и задней поверхности и практически не зависит от состава применяемого ферроабразивного порошка. При этом следует отметить, что при обработке на станке MARC получены худшие результаты, подтверждающие результаты работы [90].

Такая низкая эффективность МАО объясняется исходным качеством пластин и характером финишной обработки, результаты которой не представляется возможным, в полной мере, удалить при МАО. Анализ изменения величины опорной поверхности микропрофиля в зависимости от величины уровня микронеровностей показал, что при МАО на станке MARC имеет место некоторое снижение высоты микровыступов в области вершин на передней поверхности режущих пластин, что может быть объяснено преобладанием при обработке тангенциальных сил резания при МАО и очень незначительными нормальными силами.

Анализ изменения радиусов округления режущих кромок МНТП после МАО в различных условиях позволил установить, что после МАО на станке MARC, при указанных выше режимах МАО на уголке формируется радиус 72...75 мкм, а на гранях пластин происходит только незначительное его увеличение на 5...7 мкм.

Общим недостатком методов, применяемых при МАО МНТП, являются ограничения, связанные с существующими схемами обработки, определяемые условиями базирования деталей в зонах обработки – когда ось МНТП расположена вертикально и совпадает с осью преимущественного вращения шпинделя станка. Подобные ограничения объясняются существующим для МАО оборудованием и известными схемами обработки, которые являются развитием и усовершенствованием схемы роторной обработки, реализуемой на станках типа MARC и типа «кольцевая ванна». Данные схемы МАО не учитывают в полной мере специфику процесса обработки, определяемую сложной и разнообразной формой МНТП. При этом необходимо одновременно решать задачи, связанные с обеспечением равномерной и эффективной обработки всех рабочих поверхностей

твердосплавного инструмента – задней и передней поверхностей, непосредственно режущих кромок, элементов, предназначенных для стружкодробления на передней поверхности, опорных поверхностей.

1.5. Перспективы развития финишной обработки сложнопрофильных поверхностей

При создании образцов новой техники с переходом одного поколения объектов к другому производство их усложняется не только с точки зрения организации, но и в соответствии с новым высоким качеством продукции, которая требует эффективных высоких технологий, повышающих интенсификацию производственного процесса. За последнее время в условиях научно-технического прогресса количество продуктов производства резко увеличилось, постоянно повышаются технический уровень производства и сложность самих процессов [91...95].

Традиционные технологические процессы механической обработки, получения заготовок и сборки изделий на протяжении многих лет остаются неизменными и в обозримом будущем будут оставаться базовыми. Большинство нетрадиционных методов формообразования имело узкую объектную направленность, а оптимизация и выбор окончательного варианта метода изготовления деталей проводились зачастую без учета возможности распространения технологии на выпуск товаров народного потребления. Несмотря на это, были разработаны новые высокоэффективные технологические процессы на базе новых физических явлений, позволяющих изменить форму и качество детали.

Машиностроение является прежде всего разработчиком высоких наукоемких технологий (ВТ), создание которых связано с конструктивными особенностями изделий и необходимостью обеспечивать их наивысшие технические характеристики при эксплуатации. В то же время обеспечение высокой эффективности использования изделий в течение всего срока эксплуатации требует, как правило, принципиально новых технологических решений. Машиностроительное производство использует большой процент ВТ, базирующихся на различных видах технологий, в основе которых лежат технологические способы с разными физическими явлениями:

механические, тепловые, физические, магнитные, ядерные. Среди них есть как традиционные методы формообразования, в основе которых лежит механическое воздействие на материал детали, так и новые, так называемые нетрадиционные методы, сочетающие последние достижения в области физики и химии, комбинированные технологии, нанотехнология, прототипирование, совмещенные и прецизионные технологии. Традиционные технологические процессы достигли значительного уровня развития, последующие работы в этом направлении давали локальные и незначительные улучшения технологических характеристик процессов и качества продукции. Значительно позднее широкое применение получили электрофизические и химические методы обработки материалов, с помощью которых появилась возможность использования различных видов энергии для формообразования деталей сложного профиля и которые формируются на базе высокой наукоемкости, системности (включая физическое и математическое моделирование с целью их структурно-параметрической оптимизации), высокоэффективного рабочего процесса размерной обработки, компьютерной среды и автоматизации работ, качества, экологической чистоты при соответствующем техническом обеспечении и квалифицированном ее обслуживании (прецизионность, диагностика, управление, спецподготовка персонала), а также гарантированности безотказной службы изделий, обладающих высшим уровнем функциональной пригодности, эстетичности и экологичности. В самом общем виде содержание, цели и структурные признаки высокотехнологичных процессов показаны на рис. 1.37.

Перспективы технологии машиностроения в значительной степени определяются объемом и уровнем финишных операций. Финишные процессы позволяют активно воздействовать на обрабатываемую деталь и управлять состоянием ее поверхностного слоя (значит, износостойкостью, усталостной прочностью, контактной жесткостью и другими ее эксплуатационными свойствами). Современные исследования, выполненные за последние годы, накопленный научный и производственный опыт сделали возможным переход от эмпирических, случайных поисков конкретного технического решения к оптимизации схем технологических механизмов и оборудования на основе единой методики анализа геометрических, кинематических и динамических характеристик формообразующих движений [2...4].

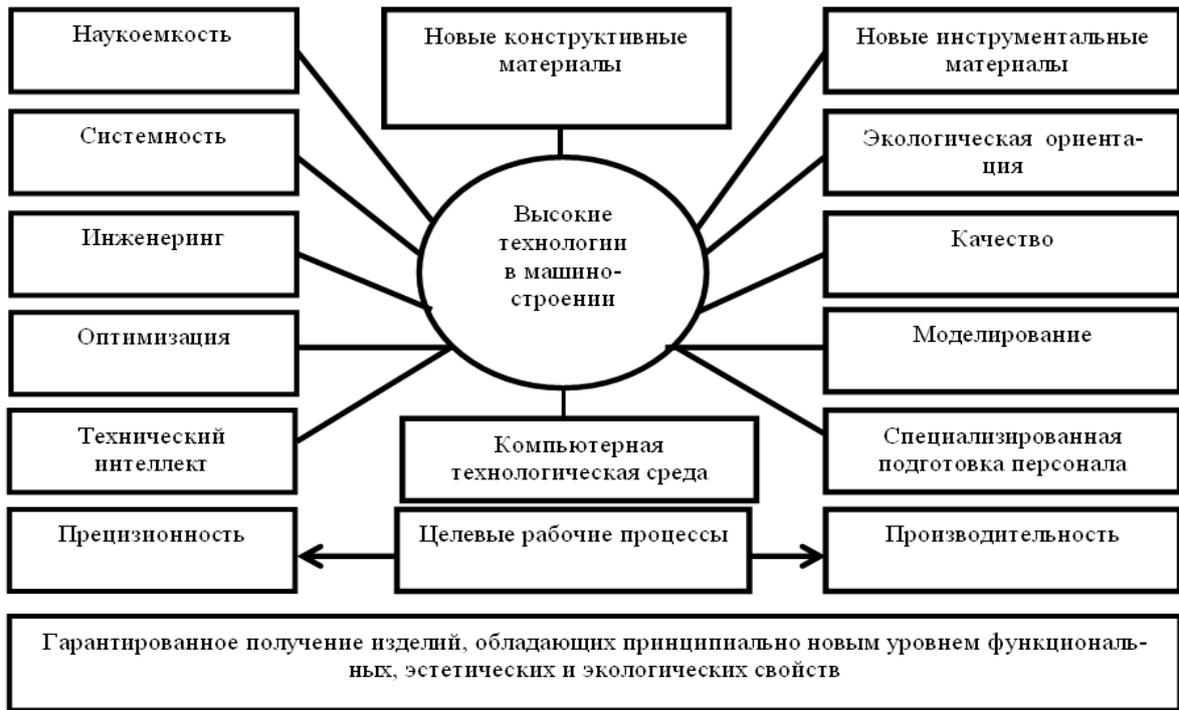


Рис. 1.37. Структурная схема высоких технологий

В общей проблеме совершенствования процессов финишной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей машин в настоящее время решающую роль играют методы количественной оценки основных технологических характеристик, таких как скорость обработки, затраты мощности, стойкость инструмента, равномерность съема припуска. В последние годы решена задача установления функциональных взаимосвязей наладочных параметров технологического оборудования с этими характеристиками. Использование данных взаимосвязей позволяет оптимизировать режимы обработки, наметить пути совершенствования конструкций оборудования, решить некоторые проблемы автоматического управления процессом обработки путем проведения численных экспериментов на ЭВМ. Такой подход имеет особо важное значение для формообразования поверхностей деталей сложной формы. Проведенные теоретические обобщения различных по своему прикладному назначению процессов позволили выделить наиболее общие свойства некоторых явлений и использовать их для решения отдельных проблем. Разработанные в настоящее время новые способы обработки прецизионных поверхностей и технологическое оборудование для этой цели отличаются простотой и удобством использования в производственных условиях. Они позволяют интенсифицировать процесс обработки и решить некоторые проблемы формирования требуемых параметров качества деталей сложной формы, переменной жесткости, крупногабаритных и др. Решаются вопросы, связанные с автоматическим управлением и регулированием входных и выходных параметров технологического процесса.

Важным направлением научных разработок в области технологии машиностроения является задача сохранения точностных параметров в процессе длительной эксплуатации оборудования, снижения его металлоемкости и упрощения конструкции. Эти проблемы решаются технологическими и конструктивными методами, например, рациональное распределение масс, давлений и скоростей в зоне контакта. Стоимость такого оборудования может быть значительно уменьшена, поскольку на нем легко реализовать автоматическое управление заданными режимами в зонах обработки. Обеспечение наиболее рациональных параметров относительных движений инструментов и деталей позволяет уменьшить время приработки и достичь оптимальной топографии контактирующих поверхностей, дающих возможность повысить ресурс работы и улучшить эксплуатационные характеристики деталей и машин в целом.

Весьма актуальным является правильный выбор инструментов для обработки деталей, в том числе, для абразивных – применение новых видов зерен и связок, оптимизация характеристик кругов, повышение скоростей обработки. Разработаны принципиально новые шлифовальные круги на пористой металлической связке, в которых в качестве режущих зерен используются синтетические алмазы с принудительно ориентированными кристаллическими осями при помощи магнитного поля. Благоприятная геометрия зерна и одновременно подача охлаждающей среды через поры круга в зону шлифования способствуют снижению сил резания, уровня температур, исключают прижоги, повышают качество и производительность обработки.

Выявлены основные закономерности МАО, при которой обрабатываемой детали и порошку с магнитными и абразивными свойствами, помещенным в постоянное магнитное поле, сообщают принудительное относительное движение. Использование МАО позволяет повысить износостойкость поверхности до двух раз, микротвердость на 20...30%. Шероховатость поверхности за период менее 1 мин снижается в 5...10 раз [23]. В настоящее время исследованы различные кинематические схемы обработки и влияние сочетания формообразующих движений на производительность процесса и уровень действующих сил резания. Перспективы развития МАО лежат в области интенсификации процесса за счет управления режимами обработки и индукции магнитного поля, а также использования новых режущих материалов и СОТС в виде интегрированной рабочей технологической среды.

Отличительной особенностью технологии машиностроения на современном этапе является комплексный подход к созданию и совершенствованию последовательных технологий промежуточной упрочняющей и финишной обработки, обеспечивающих повышение производительности и возможность управления и прогнозирования качества получаемых деталей, энерго- и ресурсосбережение, экологическую чистоту производства. Основные тенденции и перспективы ее развития можно представить из анализа схемы, приведенной на рис. 1.38.

Решение указанных задач обеспечит достижение устойчивых темпов наращивания производства, повышение эффективности и конкурентоспособности выпускаемой продукции на внешнем и внутреннем рынках. И, как следствие, наиболее перспективным

является внедрение «безлюдной» технологии, обеспечивающей наибольшую механизацию и автоматизацию технологических и производственных процессов и высвобождение квалифицированных станочников.

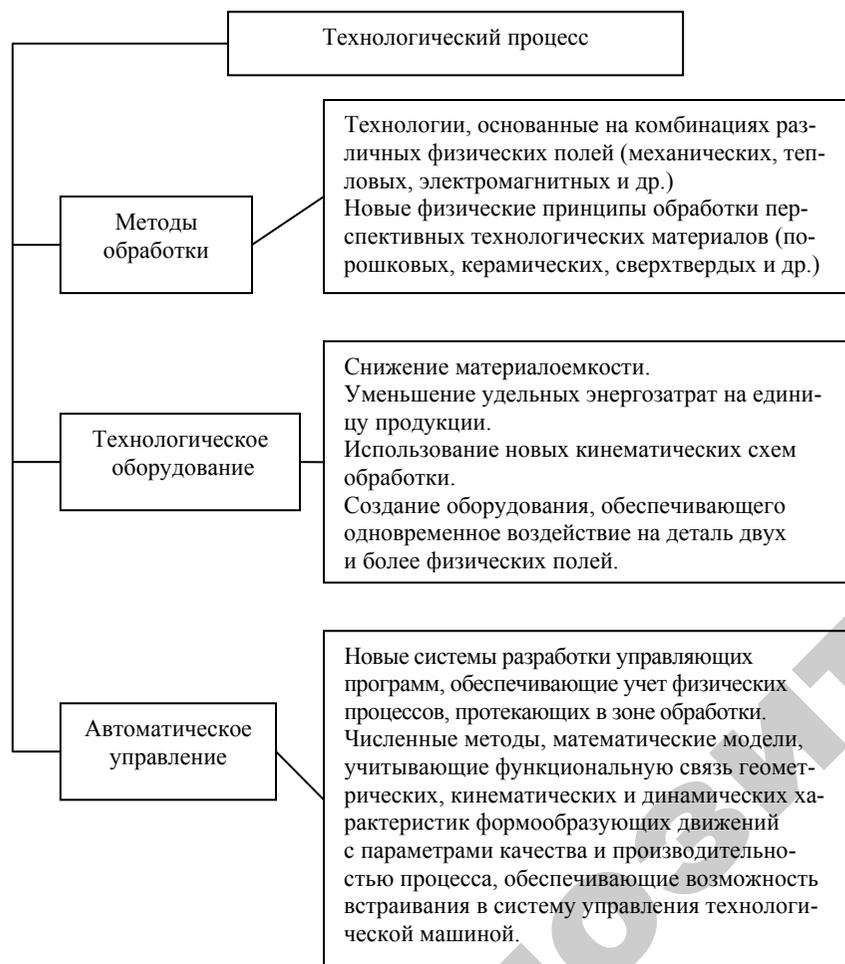


Рис. 1.38. Перспективы развития технологии машиностроения

2. МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

На формирование профиля поверхности при магнитно-абразивной обработке решающее влияние оказывает состояние интегрированной рабочей технологической среды (ИРТС), компонентами которой являются магнитное поле, ферроабразивный порошок, смазывающе-охлаждающее технологическое средство. Установлено, что параметры обработанной поверхности формируются в результате синергетического воздействия всех компонентов ИРТС, из которых доминирующим является магнитное поле.

2.1. Исследование напряженности электрического и магнитного полей при формировании интегрированной рабочей технологической среды

Известно, что существование и изменение электромагнитного поля обусловлены движением заряженных частиц, которое можно описать присущими только ему закономерностями, поэтому электромагнитное поле может рассматриваться как самостоятельный материальный объект.

Электромагнитное поле в каждой точке пространства и в каждый момент времени характеризуется двумя векторами: напряженностью электрического поля E и напряженностью магнитного поля H .

Напряженности электрического и магнитного полей в конкретной точке пространства могут быть определены по силе, действующей на электрические заряды, помещенные в эту точку. Сила, с которой электромагнитное поле действует на частицу, имеющую заряд и движущуюся со скоростью v , может быть найдена по формуле [96]

$$F = e \left(E + \frac{v}{c} \cdot H \right), \quad (2.1)$$

где E и H – напряженности электрического и магнитного полей в рассматриваемой точке пространства, когда пробный заряд в этой точке отсутствует;

c – константа с размерностью скорости, равная по величине скорости распространения света в пустоте $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Пусть в пространстве, занятом средой, задано электромагнитное поле. Вычислим силу, с которой это поле действует на физически бесконечно малый объем среды $\Delta\tau$. Под физически бесконечно малым объемом будем понимать объем, протяженность которого мала по сравнению с характерной длиной задачи, но достаточно велика для возможности осреднения по этому объему.

Суммируя (2.1) по всем частицам, находящимся в указанном объеме, и считая E и H постоянными на протяжении пространства, занятого этими частицами, получим для искомой силы следующее выражение:

$$F = \left[\sum_{\alpha} e_{\alpha} E + \frac{1}{c} \sum_{\alpha} e_{\alpha} v_{\alpha} \cdot H \right], \quad (2.2)$$

где v_{α} – скорость частицы, и суммирование производится по всем частицам внутри объема $\Delta\tau$.

Введем величины

$$p_e = \frac{\sum_{\alpha} e_{\alpha}}{\Delta\tau}, \quad j = \frac{\sum_{\alpha} e_{\alpha} v_{\alpha}}{\Delta\tau}, \quad (2.3)$$

которые называются соответственно плотностью заряда и плотностью тока.

$$f = p_e E + \frac{1}{c} (j \cdot H). \quad (2.4)$$

При изучении изменения и свойств электромагнитного поля пользуются системой уравнений Максвелла. Эта система, записанная в интегральной форме, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \oint_L H \cdot dl &= \frac{4\pi}{c} I + \frac{1}{c} \int_{\Sigma} \frac{\partial E_n}{\partial t} d\Sigma, \\ \oint_L E \cdot dl &= \frac{1}{c} \int_{\Sigma} \frac{\partial H_n}{\partial t} d\Sigma, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где L – контур, на который натянута поверхность Σ и который поκειται в выбранной системе координат;

I – ток, протекающий через Σ .

$$I = \int_{\Sigma} j_n d\Sigma. \quad (2.6)$$

Индекс n означает нормальную составляющую вектора, причем направление нормали к поверхности выбирается так, чтобы направление обхода при интегрировании по контуру L и направление нормали образовывали правовинтовую систему.

К уравнениям Максвелла относят также следующие два соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \oint_{\Sigma} E_n d\Sigma &= 4\pi\theta \\ \oint_{\Sigma} H_n d\Sigma &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Уравнения Максвелла являются обобщением опытных фактов и представляют фундаментальные постулаты электродинамики. Правильность этих постулатов проверена тем, что все выводы, следующие из (2.5), согласуются с известными экспериментальными данными.

Если поверхность Σ замкнута, то контур L в (2.5) можно считать стянувшимся в точку. Поэтому левые части в (2.5) выпадают и

$$\oint_{\Sigma} j_n d\Sigma = -\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \oint_{\Sigma} E_n d\Sigma \quad \text{и} \quad \frac{\partial}{\partial t} \oint_{\Sigma} H_n d\Sigma = 0.$$

Преобразуем первое уравнение, воспользовавшись соотношениями (2.7):

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_{\Sigma} E_n d\Sigma = 4\pi \frac{\partial \theta}{\partial t}. \quad (2.8)$$

Если все функции, входящие в (2.5) дифференцируемы, то эти уравнения можно записать в дифференциальной форме:

$$\left. \begin{aligned} \text{rot}H &= \frac{4\pi}{c} j + \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} \\ \text{rot}E &= -\frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial t} \end{aligned} \right\}; \quad (2.9)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{div}E &= 4\pi p_e \\ \text{div}H &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.10)$$

Если функции, входящие в (2.5) терпят разрыв на некоторой поверхности, покоящейся в выбранной системе координат и учитывая, что $\frac{\partial E}{\partial t}$, $\frac{\partial H}{\partial t}$, E , H имеют технические ограничения, получим соотношения, которым должны удовлетворять компоненты полей при переходе через поверхности разрыва [96]. Примем этот контур и ограниченную им часть плоскости n , τ за контур и поверхность, фигурирующие в уравнениях Максвелла (2.5). Тогда, если контур настолько мал, что в его пределах подынтегральные функции в (2.5) можно считать постоянными с каждой стороны от поверхности разрыва, то получим

$$\left. \begin{aligned} (H_{\tau 1} - H_{\tau 2})l &= \frac{4\pi}{c} I_{\chi} + \frac{1}{c} \\ (E_{\tau 1} - E_{\tau 2})l &= -\frac{1}{c} \frac{\partial H_{\chi}}{\partial t} lh \end{aligned} \right\}. \quad (2.11)$$

Отсюда, переходя к пределу при $h \rightarrow 0$ и считая, что и $\frac{\partial E}{\partial t}$ и $\frac{\partial H}{\partial t}$ ограничены, $i_{\chi} l = \lim_{h \rightarrow 0} I_{\chi}$ (i_{χ} – величина, называемая плотностью поверхностного тока в направлении χ), найдем

$$\left. \begin{aligned} (H_{\tau 1} - H_{\tau 2})l &= \frac{4\pi}{c} I_{\chi} + \frac{1}{c} \\ (E_{\tau 1} - E_{\tau 2})l &= -\frac{1}{c} \frac{\partial H_{\chi}}{\partial t} lh \end{aligned} \right\}. \quad (2.12)$$

Проделав ту же операцию в плоскости n , χ , получим

$$H_{\chi 1} - H_{\chi 2} = \frac{4\pi}{c} i_{\tau}, \quad E_{\chi 1} - E_{\chi 2} = 0. \quad (2.13)$$

Эти две группы соотношений можно объединить в одну группу соотношений, которым должны удовлетворять проекции векторов напряженности полей на плоскость, касательную к поверхности разрыва, при переходе через поверхность разрыва:

$$\left. \begin{aligned} H_{i1} - H_{i2} &= \frac{4\pi}{c} (i \cdot n) \\ E_{i1} - E_{i2} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.14)$$

где H_i , E_i – проекции соответствующих векторов на плоскость разрыва, $i = i_{\tau}\tau + i_{\chi}\chi$.

Рассмотрим некоторый объем поверхности разрыва, заключив его внутрь призматической фигуры высотой h и основанием Σ , параллельными поверхности разрыва (рис. 2.1).

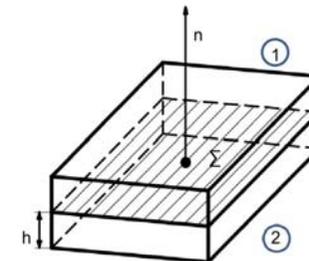


Рис. 2.1. Схема векторов напряженности электромагнитных полей в поверхности разрыва

Принимая поверхность призмы за замкнутую поверхность, фигурирующую в уравнениях Максвелла, и считая призму настолько малой, что в ее пределах подинтегральные функции можно считать с обеих сторон разрыва постоянными, а $\frac{h}{\sqrt{\Sigma}} \ll 1$, получим

$$\left. \begin{aligned} (E_{n1} - E_{n2})\Sigma &= 4\pi\theta \\ (H_{n1} - H_{n2})\Sigma &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

Переходя здесь к пределу при $h \rightarrow 0$ и вводя обозначение $\lim_{h \rightarrow 0} = \vartheta \Sigma$ (ϑ – величина, называемая поверхностной плотностью заряда), найдем

$$\left. \begin{aligned} E_{n1} - E_{n2} &= 4\pi\vartheta \\ H_{n1} - H_{n2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

Условиям (2.14) и (2.16) должны удовлетворять компоненты электромагнитного поля на поверхностях разрыва.

2.2. Динамика интегрированной рабочей технологической среды

Так как МАО ведется обычно в магнитных полях, близких к полям насыщения большинства ФАП, то для оценки их свойств особое значение имеет величина намагниченности, которая определяется структурой вещества и температурой окружающей среды. Традиционный подход к оценке процесса МАО привел к тому, что в основном учитывают магнитную проницаемость μ ФАП, характеризующую ее свойства в магнитных полях при отсутствии учета μ РТС. Такой подход привел, во-первых, к трудностям оценки пригодности разных порошков, так как большинство ФАП в полях, используемых при МАО, имеют близкие μ (порядка нескольких единиц), во-вторых, к завуалированию физической сущности процесса. Поэтому требуется проведение исследования роли РТС в процессе

МАО, что обеспечивается использованием принципа суперпозиции при определении силового баланса в ферромагнитной среде с магнитной проницаемостью μ_e .

Намагниченность \bar{M} частицы произвольной формы с размагничивающим фактором N_0 можно вычислить применением магнитной восприимчивости $\bar{M} = \chi \bar{H}$, связанной с магнитной проницаемостью $\chi = \mu - 1$.

Намагниченность частицы вычисляют по формуле

$$\bar{M} = \Delta \bar{M} + \chi_e \bar{H}, \quad (2.17)$$

где $\Delta \bar{M}$ – намагниченность вспомогательной частицы с магнитной восприимчивостью $\chi_i - \chi_e$;

χ_i и χ_e – магнитные восприимчивости частицы и среды соответственно.

Для определения намагниченности вспомогательной частицы необходимо вычислить действующее на нее суммарное поле \bar{h} . Оно складывается из внешнего поля \bar{H} и размагничивающего поля $N \Delta \bar{M}$, где N – эффективный размагничивающий фактор вспомогательной частицы в среде с магнитной проницаемостью μ_e :

$$N = \frac{N_0}{\mu_e} = \frac{N_0}{1 + \chi_e}. \quad (2.18)$$

Поскольку $\Delta \bar{M} = (\chi_i - \chi_e) \bar{h}$, а $\bar{h} = \bar{H} - N \Delta \bar{M}$, то

$$\Delta \bar{M} = \left\{ \frac{\chi_i - \chi_e}{1 + N(\chi_i - \chi_e)} \right\} \bar{H}. \quad (2.20)$$

Для намагниченности тела получаем:

$$\bar{M} = \left\{ \frac{[\chi_i + N\chi_e(\chi_i - \chi_e)]}{[1 + N(\chi_i - \chi_e)]} \right\} \bar{H}. \quad (2.21)$$

ФАП для МАО является плотноупакованной системой ферромагнитных частиц в основном сферической формы. Эту систему можно представить как пористую среду, состоящую из ферромагнитных частиц и пор. Концентрация v магнитной компоненты зависит от формы частиц порошка. При наиболее плотной упаковке сферических частиц $v = 0,74$. Поскольку намагниченность \bar{M} смеси равна [23]:

$$\bar{M} = \chi_e \bar{H} = v \bar{M}, \quad (2.22)$$

то исключив \bar{H} и N из уравнений (2.20), (2.21), (2.22), получим квадратное уравнение относительно χ :

$$[1 - N_0(1 - V)]\chi^2 + \{1 - \chi_i[V - N_0(1 - V)]\}\chi_e - \chi_i V = 0. \quad (2.23)$$

Положительным решением уравнения (2.23) является:

$$\chi_e = \frac{1}{A} \left[\sqrt{(1 - C\chi_i)^2 + 2AV\chi_i} - (1 - C\chi_i) \right], \quad (2.24)$$

где $A = 2(1 - N_0)$;
 $C = V - N_0$.

Таким образом, по формуле (2.24) можно определить магнитную восприимчивость порошка, если известна восприимчивость его частиц и их форма.

Заменив в формуле (2.22) значения восприимчивости соответствующими магнитными проницаемостями, получим:

$$\bar{M} = \left[\frac{(\mu_i - \mu_e)\mu_e}{\mu_e - N_0(\mu_i - \mu_e)} + (\mu_e - 1) \right] \bar{H}. \quad (2.25)$$

Учитывая, что магнитный момент сферической частицы \bar{m} определяется как

$$\bar{m} = \frac{4}{3} \pi b^3 \bar{M}, \quad (2.26)$$

а N_0 для сферы равен $\frac{1}{3}$, для порошка с такой формой частиц

$$\bar{m} = \frac{4}{3} \frac{\pi b^3}{\mu_0 \mu_e} \bar{B}_0 \left[\frac{3\mu_e(\mu_i - \mu_e)}{2\mu_e + \mu_i} + (\mu_e - 1) \right]. \quad (2.27)$$

В присутствии дополнительного магнитного тела в среде, например, обрабатываемой детали, \bar{B}_0 заменяется на $\bar{B} = \bar{H}_e \mu_0 \mu_e$, где \bar{H}_e – напряженность суммарного магнитного поля, создаваемого электромагнитом и намагниченным изделием. Расчет градиента магнитной индукции в рабочем зазоре при МАО ферромагнитного тела представляет собой довольно сложную задачу, так как зависит от многих факторов – конфигурации полюсных наконечников магнитной системы, распределения магнитно-абразивного порошка, коэффициента заполнения им рабочего пространства, магнитных свойств порошка и детали.

Рассмотрим упрощенную схему (рис. 2.2) МАО ферромагнитного изделия цилиндрической формы в рабочем пространстве, образуемом двумя полюсными наконечниками. Коэффициент заполнения зазора считаем равным единице.

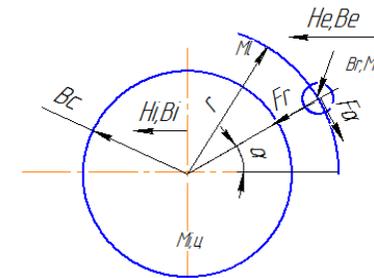


Рис. 2.2. Схема магнитного и динамического взаимодействия компонентов ИРТС

Поле внутри сплошного цилиндра между полюсными наконечниками в достаточной степени однородно. В этих условиях скалярный потенциал магнитного поля ϕ описывается уравнением Лапласа ($\Delta\phi = 0$).

Для среднего сечения цилиндра, помещенного в магнитное поле, силовые линии которого пересекают его перпендикулярно оси, это уравнение можно записать в цилиндрических координатах:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{r^2 \partial \alpha^2}. \quad (2.28)$$

Решение уравнения (2.28) методом Фурье заключается в определении постоянных коэффициентов в выражениях для потенциала в области внешнего магнитного поля φ_e и внутри цилиндра φ_i :

$$\varphi_i = \left(C_1 r + \frac{C_2}{r} \right) \cos \alpha; \quad \varphi_e = \left(C_3 r + \frac{C_4}{r} \right) \cos \alpha, \quad (2.29)$$

где r – координата точки, в которой определяется потенциал;

α – угол между вектором \vec{r} и направлением линии магнитной индукции внешнего поля;

$C_1 \dots C_4$ – некоторые постоянные, которые определяются из граничных и других условий. Поскольку в точке $r = 0$, находящийся в центре цилиндра, потенциал конечен, то $C_2 = 0$.

Без цилиндра в рабочем зазоре ($r \rightarrow \infty$) $0 = -H_0 r \cos \alpha$, откуда $C_3 = -H_0$, где H_0 – напряженность внешнего магнитного поля. Поле внутри ферромагнитного цилиндра с магнитной проницаемостью $\mu_{ц}$ равно $H_i = H_0 - M_{ц} N_{эф}$.

$$M_{ц} = H_0 \frac{2\mu_e (\mu_{ц} - 1) + (\mu_e - 1)(\mu_{ц} - \mu_e)}{\mu_e + \mu_{ц}}, \quad (2.30)$$

где $M_{ц}$ – намагниченность цилиндра;

$N_{эф} = \frac{N_0}{\mu_e}$ – размагничивающий фактор цилиндра в среде с магнитной проницаемостью μ_e ;

$N_0 = \frac{1}{2}$ – размагничивающий фактор цилиндра, намагниченного перпендикулярно его оси, в вакууме. Намагниченность цилиндра

вычисляется по методу суперпозиции по схеме, аналогичной приведенной выше.

Тогда напряженность поля внутри цилиндра:

$$H_i = H_0 \left\{ 1 - \frac{1}{2\mu_e} \left[\frac{2\mu_e (\mu_{ц} - 1) + (\mu_e - 1)(\mu_{ц} - \mu_e)}{\mu_e + \mu_{ц}} \right] \right\}. \quad (2.31)$$

Введем обозначение:

$$f = \frac{2\mu_e (\mu_{ц} - 1) + (\mu_e - 1)(\mu_{ц} - \mu_e)}{2\mu_e (\mu_e + \mu_{ц})}. \quad (2.32)$$

Тогда $H_i = H_0 (1 - f_1)$.

При $\alpha = 0$, $\frac{\partial \varphi_i}{\partial r} = C_1$ и $\frac{\partial \varphi_e}{\partial r} = -H_i$, следовательно $C_1 = H_0 (f - 1)$. Из равенства потенциалов на границе раздела двух сред $\varphi_i = \varphi_e$ при $r = b_{ц}$, где $b_{ц}$ – радиус цилиндра, находим $C_4 = H_0 b_{ц} 2f_1$. Подставив значения найденных коэффициентов в уравнение (2.31) и приняв во внимание, что $H_{e_r} = \frac{\partial \varphi_e}{\partial r}$ и $H_{e_\alpha} = \frac{-\partial \varphi_e}{r \partial \alpha}$, получим составляющие напряженности магнитного поля вне цилиндра:

$$H_{e_r} = H_0 \left[1 + \frac{b_{ц}^2}{r^2} f_1 \right] \cos \alpha; \quad H_{e_\alpha} = -H_0 \left[1 - \frac{b_{ц}^2}{r^2} f_1 \right] \sin \alpha, \quad (2.33)$$

так как $B_e = H_e \mu_0 \mu_e$ и $B_0 = H_0 \mu_0 \mu_e$, для составляющих магнитной индукции вне цилиндра получим:

$$B_{e_r} = B_0 \left[1 + \frac{b_{ц}^2}{r^2} f_1 \right] \cos \alpha; \quad B_{e_\alpha} = -B_0 \left[1 - \frac{b_{ц}^2}{r^2} f_1 \right] \sin \alpha. \quad (2.34)$$

Раскрывая формулу $\vec{F} = \vec{m} \text{grad } \vec{B}$ для прямоугольной системы координат, получаем составляющие силы:

$$\begin{aligned} F_x &= m_x \left(\frac{\partial B_x}{\partial x} \right) + m_y \left(\frac{\partial B_x}{\partial y} \right) + m_z \left(\frac{\partial B_x}{\partial z} \right); \\ F_y &= m_x \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} \right) + m_y \left(\frac{\partial B_y}{\partial y} \right) + m_z \left(\frac{\partial B_y}{\partial z} \right); \\ F_z &= m_x \left(\frac{\partial B_z}{\partial x} \right) + m_y \left(\frac{\partial B_z}{\partial y} \right) + m_z \left(\frac{\partial B_z}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (2.35)$$

Поскольку цилиндр намагничен однородно в направлении, перпендикулярном его оси, то на достаточном удалении от торцев $B_z = 0$. Далее проводим преобразования:

$$B_{e_x} = B_{e_r} \cos \alpha - B_{e_\alpha} \sin \alpha;$$

$$B_{e_y} = B_{e_r} \sin \alpha - B_{e_\alpha} \cos \alpha;$$

$$x = r \cos \alpha; \quad y = r \sin \alpha; \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Учитывая равенства (2.34), (2.35), получаем:

$$B_{e_x} = B_0 \left[1 + \frac{f_1 b_{\Pi}^2}{(x^2 + y^2)^2} (x^2 + y^2) \right];$$

$$B_{e_y} = 2 B_0 f_1 \frac{xy b_{\Pi}^2}{(x^2 - y^2)^2}.$$

Продифференцируем полученные функции:

$$\frac{\partial B_{e_x}}{\partial y} = 2 B_0 \frac{f_1 b_{\Pi}^2}{(x^2 + y^2)^2} x \left[1 - 2 \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} \right];$$

$$\frac{\partial B_{e_x}}{\partial y} = 2 B_0 \frac{f_1 b_{\Pi}^2}{(x^2 + y^2)^2} y \left[1 + 2 \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} \right];$$

$$\frac{\partial B_{e_y}}{\partial x} = 2 B_0 \frac{f_1 b_{\Pi}^2}{(x^2 + y^2)^2} y \left[1 - 4 \frac{x^2}{x^2 + y^2} \right];$$

$$\frac{\partial B_{e_y}}{\partial y} = 2 B_0 \frac{f_1 b_{\Pi}^2}{(x^2 + y^2)^2} y \left[1 - 4 \frac{y^2}{x^2 + y^2} \right].$$

(2.36)

Составляющие магнитного момента частицы ФАП, находящиеся во внешнем поле \vec{B}_y , вычисляем:

$$m_x = B_{e_x} f_2;$$

$$m_y = B_{e_y} f_2,$$

(2.37)

$$\text{где } f_2 = \frac{4 \pi b^3}{3 \mu_0 \mu_e} \frac{4 \mu_e (\mu_i - 1) - (\mu_e - 1)(\mu_i - \mu_e)}{2 \mu_e + \mu_i}.$$

Подставив (2.36) и (2.37) в 2.34), получим искомые силы:

$$F_x' = 2 B_0^2 \frac{f_1 f_2 b_{\Pi}^2}{(x^2 + y^2)^2} x \left(3 - 4 \frac{x^2}{x^2 + y^2} - \frac{f_1 b_E^2}{x^2 + y^2} \right);$$

$$F_y = 2 B_0^2 \frac{f_1 f_2 b_{\Pi}^2}{(x^2 + y^2)^2} y \left(1 - 4 \frac{x^2}{x^2 + y^2} - \frac{f_1 b_{\Pi}^2}{x^2 + y^2} \right). \quad (2.38)$$

В цилиндрической системе координат уравнения (2.38) имеют вид:

$$F_r = -2B_0^2 \frac{f_1 f_2 b_{II}^2}{r^3} \left(\cos \alpha + \frac{f_1 b_{II}^2}{r^2} \right);$$

$$F_\alpha = -2B_0^2 \frac{f_1 f_2 b_{II}^2}{r^3} \sin 2\alpha. \quad (2.39)$$

При решении установленных зависимостей задаются силовыми параметрами, характерными для осуществляемой обработки, и находят необходимую намагниченность РТС.

Уравнения, описывающие состояние интегрированной рабочей технологической среды получаются из законов сохранения массы, количества движения и энергии [96]:

$$\frac{d}{dt} \int_{\tau} \rho d\tau = 0;$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\tau} \rho v d\tau = \int_{\Sigma} p_n d\Sigma + \int_{\tau} f d\tau; \quad (2.40)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\tau} \rho \left(\varepsilon + \frac{v^2}{2} \right) d\tau = - \int_{\Sigma} q_n d\Sigma + \int_{\Sigma} p_n \cdot v d\Sigma + \int_{\tau} A d\tau,$$

где v – скорость ИРТС, равная скорости центра инерции частиц, находящихся в физически бесконечно малом объеме в окрестности рассматриваемой точки;

τ – объем, ограниченный поверхностью E , движущейся в направлении нормали со скоростью v_n ;

ρ – плотность ИРТС, т. е. сумма масс всех частиц, находящихся в физически бесконечно малом объеме, отнесенная к величине этого объема;

q_n – поток тепла через поверхность Σ , т. е. поток энергии через «жидкую» поверхность, который возникает за счет переноса энергии молекулами, пересекающими данную поверхность, а также за счет работы сил межмолекулярного взаимодействия;

p_n – плотность поверхностных сил, равная с обратным знаком потоку импульса через поверхность, который возникает за счет переноса импульса молекулами, пересекающими поверхность, а также за счет сил межмолекулярного взаимодействия;

p_e – внутренняя энергия единицы объема среды, т. е. сумма кинетической энергии хаотического движения и потенциальной энергии взаимодействия частиц, находящихся в указанном объеме;

f – плотность внешних объемных сил;

A – разность полного притока энергии к выделенному объему и притока энергии за счет потока тепла через ее поверхность и работы поверхностных сил.

Так как в качестве объемных сил в дальнейшем будем рассматривать только силы воздействия электромагнитного поля на среду:

$$f = p_e E + \frac{1}{c} (j \cdot H). \quad (2.41)$$

Всюду в дальнейшем будем считать среду двухпараметрической, т. е. считать, что все термодинамические величины (например, температура T и внутренняя энергия ε) и вообще все величины, характеризующие среду при термодинамическом равновесии, являются функциями двух параметров: плотности ρ и давления p . При этом тензор напряжений будет иметь вид

$$p_{ik} = -p \delta_{ik} + \tau_{ik}, \quad (2.42)$$

причем будем считать функциями $p, H, \frac{\partial v_i}{\partial \chi_i}$ такими, что если все

$\frac{\partial v_i}{\partial \chi_i} = 0$, то напряжения в рассматриваемом элементе среды должны

совпадать с напряжениями в равновесном состоянии, т. е. $p_{ik} = -p \delta_{ik}$, или $\tau_{ik} = 0$. Задание q и \hat{P} , т. е. их выражение через другие величины, связано с некоторыми предположениями относительно свойств среды.

Далее при конкретных расчетах для вектора потока тепла и тензора напряжений примем выражения, используемые в обычной гидродинамике, т. е. будем полагать, что

$$q = 0, \tau_{ik} = 0. \quad (2.43)$$

Или

$$\left. \begin{aligned} q &= -k \text{grad} T, \\ \tau_{ik} &= \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_m}{\partial x_m} \delta_{ik} \right) + \zeta \frac{\partial v_m}{\partial x_m} \delta_{ik} \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

где T – температура,

μ и ζ – первый и второй коэффициент вязкости,

k – коэффициент теплопроводности. В дальнейшем во многих случаях μ , ζ и k будут считаться постоянными.

Преобразуем поверхностные интегралы в объемные, предполагая, что подынтегральные функции являются дифференцируемыми:

$$\left. \begin{aligned} \oint_{\Sigma} q_n d\Sigma &= \oint_{\Sigma} q_i n_i d\Sigma = \int_{\tau} \frac{\partial q_i}{\partial x_i} d\tau = \int_{\tau} \text{div} q d\tau \\ \oint_{\Sigma} p_n d\Sigma &= e_k \oint_{\Sigma} p_{ki} n_i d\Sigma = \int_{\tau} \frac{\partial p_{ki}}{\partial x_i} d\tau e_k = \int_{\tau} \text{div}(\hat{P}) d\tau \\ \oint_{\Sigma} p_n \cdot v d\Sigma &= \oint_{\Sigma} p_{ki} v_{ki} n_i d\Sigma = \int_{\tau} \frac{\partial p_{ki} v_{ki}}{\partial x_i} d\tau = \int_{\tau} \text{div}(\hat{P} \cdot v) d\tau \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

$$\text{где } \text{div}(\hat{P}) = \frac{\partial p_{ki}}{\partial x_i} e_k, \quad \hat{P} \cdot v = p_{ki} v_{ki} e_i.$$

Тогда если подынтегральные функции в объемных интегралах равенств (2.45) непрерывны, то, используя формулу Остроградского, из интегральных уравнений можно получить дифференциальные уравнения движения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp}{dt} + p \text{div} v &= 0, \\ p \frac{dv}{dt} &= \text{div} P + p_e E + \frac{1}{c} (j \cdot H), \\ p \frac{d}{dt} (\varepsilon^2 + v^2/2) &= -\text{div} q + \text{div}(P \cdot v) + E \cdot j \end{aligned} \right\} \quad (2.46)$$

При получении первого уравнения использовано равенство $\frac{d\tau}{dt} = \tau \text{div} v$, а при выводе остальных – равенство $\frac{d}{dt}(p d\tau) = 0$.

Умножив уравнение импульсов на v скалярно, получим

$$\frac{1}{2} p \frac{dv^2}{dt} = v \cdot \text{div} P + p_e v \cdot E + \frac{1}{c} (j \cdot H) \cdot v.$$

Подставив это выражение в уравнение энергии, имеем

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= -\text{div} q + E \cdot j - p_e v \cdot E - \frac{1}{c} (j \cdot H) \cdot v + \\ &+ \text{div}(P \cdot v) - v \text{div} P + \Phi, \end{aligned} \quad (2.47)$$

$$\text{где } D = A - f \cdot v = E \cdot j - p_e v \cdot E - \frac{1}{c} (j \cdot H) \cdot v = (E + \frac{v}{c} \cdot H)(j - p_e v) = E' \cdot j';$$

$$\Phi = \tau_{ik} \frac{\partial x_i}{\partial x_k} = \tau_{ik} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right).$$

$$\tau_{ik} = p_{ik} - p \delta_{ik}.$$

Осуществим преобразование системы (2.46). В силу уравнений Максвелла

$$\begin{aligned}
p_e E + \frac{1}{c}(j \cdot H) &= \frac{1}{4\pi} E \operatorname{div} E + \frac{1}{c} \left[\left(\frac{c}{4\pi} \operatorname{rot} H - \frac{1}{4\pi} \frac{\partial E}{\partial t} \right) \cdot H \right] = \\
&= -\frac{\partial}{\partial t} \frac{1}{4\pi c} (E \cdot H) - \frac{1}{8\pi} \operatorname{grad}(H^2 + E^2) + \\
&+ \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{1}{4\pi} (H_i H_j \cdot E_i E_j) e_j = -\frac{\partial}{\partial t} + \operatorname{div} \hat{T}.
\end{aligned} \quad (2.48)$$

При преобразовании было использовано векторное тождество

$$\frac{1}{2} \operatorname{grad} a^2 = a \cdot \operatorname{rota} + \frac{\partial a_i a_j}{\partial x_i} e_j - a \operatorname{div} a.$$

Далее,

$$\begin{aligned}
E \cdot j &= E \cdot \left(\frac{c}{4\pi} \operatorname{rot} H - \frac{1}{4\pi} \frac{\partial E}{\partial t} \right) = -\frac{c}{4\pi} \operatorname{div}(E \cdot H) - \\
&- \frac{1}{8\pi} \frac{\partial}{\partial t} (H^2 + E^2) = \operatorname{div} s - \frac{\partial w}{\partial t}
\end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\text{где } s = \frac{c}{4\pi} (EH);$$

$$w = \frac{1}{8\pi} (H^2 + E^2).$$

При преобразовании было использовано векторное $\operatorname{div}(a \cdot b) = b \operatorname{rota} - a \operatorname{rot} b$.

Соотношения, написанные в интегральной форме, имеют вид

$$\left. \begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \int_V p d\tau &= - \oint_{\Sigma} p v_n d\Sigma \\
\frac{\partial}{\partial t} \int_V G d\tau &= - \oint_{\Sigma} \hat{T} \cdot nd\Sigma \\
\frac{\partial}{\partial t} \int_V W d\tau &= - \oint_{\Sigma} S_n d\Sigma
\end{aligned} \right\}, \quad (2.50)$$

Первое из этих соотношений выражает тот факт, что изменение массы в некотором неподвижном объеме происходит за счет потока массы $m = \rho v$ через границу объема, причем через площадку $d\Sigma$, с нормалью и протекает $\rho v n d\Sigma$ массы в единицу времени.

Второе равенство (2.50) показывает, что изменение полного количества движения в неподвижном объеме происходит за счет потока импульса через границы объема.

Последнее равенство (2.50) выражает тот факт, что полное изменение энергии в объеме происходит за счет потока энергии через его границу. Плотность потока энергии задается вектором S . Через площадку с нормалью n будет протекать в единицу времени количество энергии

$$S_n = p \left(\varepsilon + \left(\frac{v^2}{2} \right) v_n + q_n - (\hat{P} \cdot v) n + \frac{c}{4\pi} (E \cdot H) n \right).$$

Действительно, уравнения механики (2.46) определяют движение и все механические характеристики среды, если известно электромагнитное поле. В свою очередь для однозначного определения электромагнитного поля из уравнений Максвелла (2.9) необходимо либо задать плотность тока как функцию координат и времени, либо связать плотность тока с остальными величинами, входящими в уравнения, причем в последнем случае система уравнений механики, уравнений Максвелла и выражение для плотности тока должны рассматриваться совместно.

Анализ работ [96, 97] показывает, что контур области МП определяется плотностью тока, который характеризует вектор магнитной индукции. Поэтому в силу моделирования процесса МАО оценку магнитной проницаемости рабочей среды требуется производить путем интегрирования входящих в нее компонентов. Таким образом, получение представления об эффективности процесса МАО следует осуществлять через общую оценку среды, а не через физико-механические характеристики ФАП и СОТС в нее входящих. Это связано тем, что физика взаимодействия ФАП, СОТС и МП образует иной характер протекания процесса МАО относящийся к синергетическому. Поэтому изменение магнитной проницаемости РТС по отношению, например, к магнитной проницаемости ФАП изменяет картину МП и частности уровень нормальных и тангенциальных

сил и поскольку нормальные силы направлены в сторону детали то их величина играет важную роль в реализации съема материала. Следовательно, правильно определяемая совместимость компонентов РТС обеспечивает эффективность МАО сложнопрофильных поверхностей. Полно и точно отражает суть происходящих процессов в зоне обработки понятие рабочая технологическая среда (РТС), включающая в себя три компонента: СОТС + ФАП, СОТС + гибкие ферроабразивные волокна, СОТС + механические «щетки» в присутствии ФАП, магнитореологические суспензии и жидкости при обязательном наличии ЭМП.

Это связано с тем, что комплексное определение РТС позволяет подобрать материалы ФАП и СОТС, которые удовлетворяют технологическим требованиям как по эксплуатационным характеристикам, так и по обеспечению минимальной себестоимости процесса МАО. Подобное превращение изменяет не только силовой баланс, но и уровень адгезионного взаимодействия, что вызывает циклическое нагружение поверхностного слоя ФАП.

Поэтому отсутствие учета свойств РТС, как сложного комплекса физико-химических и магнитных явлений, не позволяет дать правильную оценку его эффективности и не обеспечит проектирование научно-обоснованного технологического процесса. Сознательное назначение его режимов и параметров невозможно без выполнения условий законов резания, происходящих в зоне деформаций на контактных поверхностях тел при наложении магнитных полей.

Следовательно, использование принципа РТС обеспечивает выявление возможных недостающих факторов процесса МАО, приводит объединение неявных компонентов и связей между ними, устанавливает точность путей реализации и образование структуры ФАП, СОТС и ЭМП.

2.3. Абразивная способность ИРТС и ее адгезионное взаимодействие с обрабатываемым материалом

Вопросы создания материалов, служебные функции которых связаны с трением, например функции ферромагнитных частиц, для полирования под действием магнитных сил необходимо решать с учетом их совместимости с контактирующими материалами [98].

Характер взаимодействия прижатых друг к другу поверхностей при их относительном перемещении, согласно наиболее распространенной в настоящее время молекулярно-механической теории внешнего трения твердых тел И. В. Крагельского, имеет двойственную природу и определяется двумя факторами: молекулярным и механическим взаимодействием в пятнах касания. Соотношение между молекулярной и деформационной составляющими силы трения зависят от многих факторов, среди которых одно из первостепенных – природная склонность взаимодействующих материалов к схватыванию. В случае сильной адгезионной связи схватывание сопровождается глубинным вырыванием материалов – задирами. Влияние молекулярного фактора на контактное взаимодействие становится решающим при трении поверхностей, имеющих низкую шероховатость в условиях упругого и упругопластического контакта. Поэтому одной из наиболее важных задач в процессе МАО является поиск критериев совместимости. В качестве критерия желательно иметь такой универсальный параметр, который, с одной стороны, коррелировал бы с техническими показателями, например с коэффициентом трения или установившейся шероховатостью трущихся поверхностей, с другой – отражал физико-химическую природу контактных явлений.

В связи со сказанным, степень взаимодействия в зоне контакта пар целесообразно оценивать по работе адгезии (работы разрыва фаз по границе), включающей поверхностные энергии каждой фазы (γ_α и γ_β) и энергию поверхности раздела фаз:

$$W_A = \gamma_\alpha + \gamma_\beta + \gamma_{\alpha-\beta}. \quad (2.51)$$

Физический смысл этого уравнения заключается в том, что работа обратимого отделения поверхностей двух тел друг от друга, т. е. работа адгезии, равна изменению свободной энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое при обратимом изотермическом процессе.

Малая величина $\gamma_{\alpha-\beta}$ и, следовательно, большое значение W_A наблюдается при контактировании материалов с высокой взаимной растворимостью, когда между материалами α и β нет резкой границы раздела, что указывает на необходимость использования защит-

ных пленок образуемых СОТС. Таким образом, большое значение W_A может быть идентифицировано с химическим взаимодействием в зоне контакта (рис. 2.3). Определение склонности исследуемого класса материалов к адгезионному взаимодействию может быть сведено с учетом механического фактора к аналогичной задаче для соответствующего твердого тугоплавкого соединения, распределенного в железной матрице.

В образующихся при обработке пластически деформированных местах истинного контакта трущихся поверхностей, имеющего дискретный характер, мгновенно начинает протекать диффузия, от которой зависит прочность связи взаимодействующих материалов. Известно, что пластическая деформация сопровождается возникновением на контактных поверхностях активных центров (дислокаций, вакансий), что приводит к понижению энергии активации процесса диффузии в поверхностных слоях трущихся материалов, т. е. способствует ее более активному протеканию.

Можно считать, что физические и химические процессы, протекающие в местах контакта включений тугоплавкого соединения с обрабатываемым металлом, довольно близки к процессам, протекающим на их границе, когда металл находится в жидком состоянии при температуре плавления. Ф. Ю. Сакулевич установил [23], что эта температура составляет 673 К. Естественно, что в местах дискретного фактического контакта абразива с изделием температура будет близка к значениям, соответствующим эвтектическому плавлению карбидов (боридов) с полируемыми металлами.

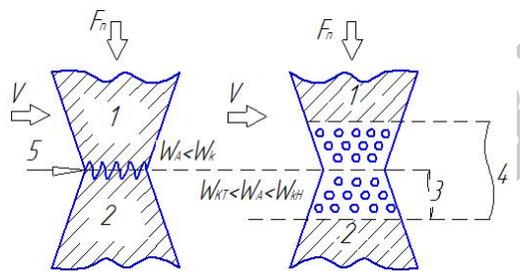


Рис. 2.3. Схема механизма адгезионного изнашивания при МАО:
1 – твердая фаза; 2 – мягкий металл; 3 – зона разрыва связей (схватывания);
4 – реакционная зона; 5 – граница разрыва связей (W_A – сила адгезии,
 W_K – сила когезии)

Необходимо отметить прямую связь смачиваемости со степенью взаимодействия твердого и жидкого металлов – образованием химических соединений, твердых и жидких растворов, диффузией жидкого металла в твердый.

Смачиваемость тугоплавких соединений жидкими металлами определяется их адгезионным взаимодействием, обусловленным силами Ван-дер-Ваальса, дисперсионными силами или химической диффузией. Работу адгезии, определяемую по краевому углу смачивания, находят по формуле Юнга:

$$W_A = \sigma_{ж} (1 + \cos \theta), \quad (2.52)$$

где W_A – работа адгезии соответствующего жидкого металла к карбиду (бориду), Дж/м²;

$\sigma_{ж}$ – поверхностное натяжение жидкого металла при температуре плавления, Дж /м²;

θ – краевой угол смачивания, град.

2.4. Давление ИРТС на обрабатываемую поверхность при клиновидном зазоре

Поскольку в ИРТС абразивные зерна расположены хаотично и входят в контакт с неупорядоченным микрорельефом обрабатываемой поверхности, то каждое зерно при движении срезает металл различными участками своей поверхности. Поэтому в любой момент контакта РТС с изделием от абразивных зерен исходят напряжения в различных направлениях, причем в каждое следующее мгновение эти направления меняются. Другими словами, каждый элементарный объем металла, СОТС, абразивных зерен пронизывается множеством волн, идущих в различных направлениях. Создается сложная пространственная картина наложения, интерференции и дисперсии напряжений. В итоге все это приводит к вибрации в зоне резания, что обуславливает быстрое проникновение жидкости непосредственно в зону резания.

В ряде конкретных случаев в зоне обработки происходят более сложные процессы. Известно [99], что в более узкой части

клиновидного зазора создается давление на 30...40 % превышающее аналогичное в эквидистантном зазоре. При переходе от формообразования поверхности детали в окрестности точки входа в зону обработки к формообразованию этой поверхности в точке выхода из зоны обработки, кривизна профиля полюсного наконечника изменяется. Поскольку обработка детали производится контуром полюсного наконечника с переменной кривизной по отношению к концентрической окружности детали, то возникает более высокая степень прилегания поверхности РТС к поверхности данной детали. Увеличение кривизны и соответственно уменьшение ее радиуса приводит к росту пятна контакта детали и контура полюсного наконечника. Ввиду того, что поверхность РТС материализуется только при наличии ввода в данную технологическую систему потока ЭМП, следует рассматривать ее как поверхность технической формы.

В случае, если известны два фактора, которыми являются форма обрабатываемой поверхности детали и кинематическая схема ее формообразования, то в таком случае требуется определить форму инструментальной поверхности. Одним из решений этой задачи может быть профилирование поверхности полюсного наконечника по отношению к обрабатываемой. Особенности формы и геометрической структуры сложно-профильных поверхностей являются причиной ограничений накладываемых на реализацию известных методов их финишной обработки.

В рабочей зоне клиновидный слой РТС получается за счет зазора, благодаря которому деталь располагается эксцентрично (рис. 2.4).

Направление сил P_ϕ , действующих на деталь, совпадает с нормалью к поверхности детали, т. е. с его радиусом. Если разложить эти силы на вертикальные и горизонтальные составляющие, то только вертикальные $P_{\phi v}$ будут противодействовать внешней нагрузке на деталь.

Обозначим через $\delta = \frac{\Delta}{2} = \frac{D}{2} - \frac{d}{2} = \frac{D}{2} - r$ – радиальный зазор; Δ – диаметральный зазор; $\psi = \frac{\Delta}{D} = \frac{2\delta}{D}$ – относительный зазор; h_{\min} – высоту сечения зазора в месте наибольшего сближения вала и втулки;

$e = \delta - h_{\min} = \frac{\Delta}{2} - h_{\min}$ – абсолютный эксцентриситет; $X = \frac{e}{\delta} = \frac{2e}{\Delta}$ – относительный эксцентриситет.

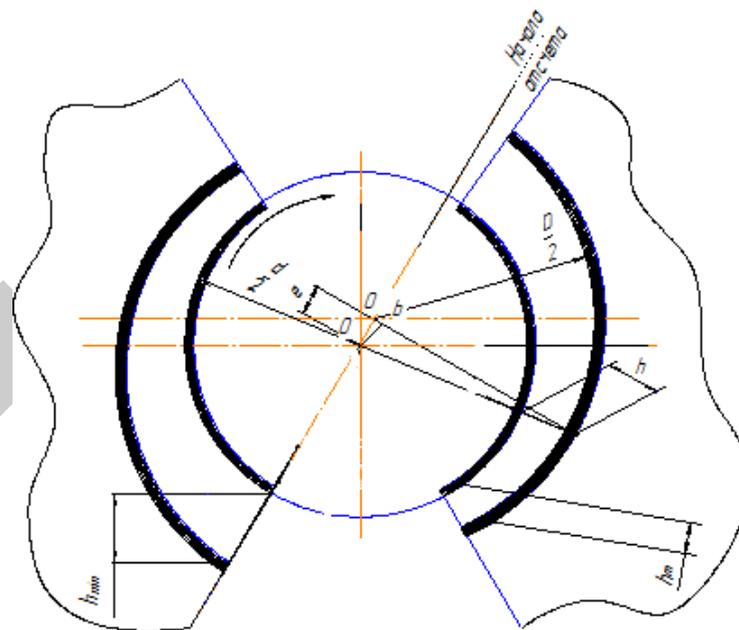


Рис. 2.4. Схема сил резания в клиновидном зазоре при МАО сложнопрофильных поверхностей

Значение относительного эксцентриситета путем несложных преобразований может быть выражено формулой

$$\chi = 1 - \frac{2h_{\min}}{D\psi}. \quad (2.53)$$

Область зазора, в которой имеются силы, оканчивается сечением, расположенным на углу ϕ_2 от линии отсчета. Интегрируя последнее уравнение в пределах $\phi_2 - \phi$ при $\eta = \text{const}$, получаем формулу для усиления в любой точке зазора.

Усилие P_ϕ , возникающее в сечении, расположенном на углу ϕ_2 от линии центров, после некоторых математических преобразований выразится так:

$$P_\phi = \frac{6\eta V}{\psi^2} \int_{\phi_2}^{\phi} \frac{(1 - \chi \cos \phi) - (1 - \chi \cos \phi_m)}{(1 - \chi \cos \phi)^3} d\phi. \quad (2.54)$$

Вертикальная составляющая

$$P_{\phi B} = P_\phi \cos(\phi - \phi_a). \quad (2.55)$$

Суммирование всех вертикальных составляющих в пределах границ существования сил $\phi_2 - \phi_1$ дает силу

$$P_B = \int_{\phi_2}^{\phi_1} P_{\phi B} d\phi = \int_{\phi_2}^{\phi_1} P_\phi \cos(\phi - \phi_a) d\phi = \frac{6\eta V}{\psi^2} \int_{\phi_2}^{\phi_1} \int_{\phi_2}^{\phi} \frac{(1 - \chi \cos \phi) - (1 - \chi \cos \phi_m)}{(1 - \chi \cos \phi)^3} d\phi [\cos(\phi - \phi_a)] d\phi. \quad (2.56)$$

Для получения суммарной силы, P_B следует умножить на длину детали (здесь должен учитываться параболический закон распределения по длине реальной детали). Тем не менее, в любом случае форма клиновидного зазора в зоне контакта примерно одинакова с формой зазора. Разница состоит лишь в том, что пределы интегрирования при MAO резко сужаются, т. е. резко уменьшается зона, в которой действуют силы.

Это давление по своей величине таково, что не создает ощутимую деформацию всей системы «станок – деталь – инструмент», однако местные локальные деформации возникают и оказывают довольно существенное влияние на процесс стружкообразования и, следовательно, шероховатость обработанной поверхности.

В каждый момент в различных точках контактов в направлении ширины зазора местное локальное давление может иметь различную величину, так как условия контакта двух шероховатых рельефов всегда различны.

В реальном процессе MAO пористым телом является РТС, а непористым – обрабатываемая деталь. Относительные скорости скольжения поверхностей остаются те же, поэтому приведенный расчет с достаточной точностью отражает действительность.

2.5. Формирование микрогеометрии и физико-механических свойств обрабатываемой поверхности

2.5.1. Влияние исходных микронеровностей на формирование микрогеометрии

Проведенные экспериментальные исследования зависимости производительности процесса обработки от величины исходной шероховатости показали, что более интенсивный съем металла наблюдается с грубо обработанных поверхностей деталей, что объясняется увеличением в этом случае плотности контактирования ФАП с обрабатываемой поверхностью. Можно предположить, что различный характер контактирования с исходными микронеровностями будет оказывать влияние на формирование микрогеометрии поверхности деталей, обработанных ФАП. В связи с этим были проведены экспериментальные исследования по определению влияния величины исходной шероховатости поверхности на ее конечную величину, достигаемую в результате обработки. Предполагается, что различный характер контактирования с исходными микронеровностями будет оказывать влияние и на формирование микрогеометрии поверхности деталей, обработанных MAO. Измерение шероховатости проводили через 1, 2, 3, 4, 5, 7 и 9 мин обработки. Результаты экспериментов приведены на рис. 2.5.

С увеличением продолжительности обработки величина шероховатости поверхности для всех групп деталей последовательно уменьшается и приближается к шероховатости, соответствующей по параметру Ra 0,16...0,20 мкм. Величина микронеровностей поверхности предварительно отполированных деталей с течением времени практически не изменялась. Это свидетельствует о весьма малой глубине абразивного микрорезания при MAO.

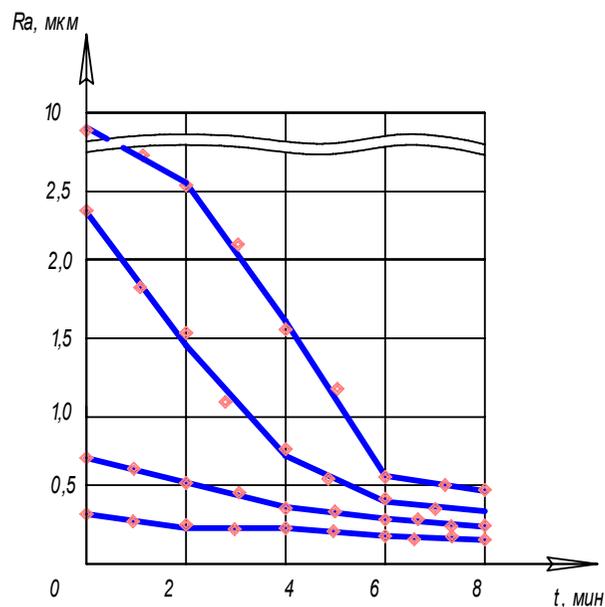


Рис. 2.5. Изменение шероховатости обработанной поверхности Ra в зависимости от величины исходных микронеровностей (условия обработки: $\Delta = 300$ мкм; $V_{рез} = 2,4$ м/с):
 1 – Ra 0,16 мкм; 2 – Ra 0,63 мкм; 3 – Ra 2,5 мкм; 4 – Ra 10 мкм

Из рис. 2.5 следует, что величина исходных микронеровностей определяет продолжительность обработки, необходимой для достижения некоторой минимальной шероховатости, при заданных режимах обработки соответствующих параметрах микро- и суб-микрогеометрии зерен ферроабразивного порошка. Так, предварительно шлифованные образцы достигают ее после 1...3 мин обработки. Образцы, наружный профиль которых подвергался полустойковой (по параметру Ra 2,5 мкм) и грубой (по параметру Ra 10 мкм) токарной обработке, имели такую шероховатость соответственно через 3,5...5 и 7...8 минут обработки. При этом интенсивность снижения шероховатости с течением времени убывает, что связано с интенсивным удалением в первые минуты обработки вершин исходных микронеровностей. В дальнейшем происходит преимущественно нивелирование микропрофиля обрабатываемой поверхности ферроабразивными зёрнами.

Анализируя результаты проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что MAO эффективно удаляет исходную шероховатость обрабатываемой поверхности независимо от ее величины.

При магнитно-абразивной обработке зерна порошка не имеют жесткого закрепления и благодаря этому температура в зоне резания значительно ниже, чем при шлифовании [23]. В связи с этим в процессе магнитно-абразивной обработки не возникает опасности создания дефектного слоя. Более того, при MAO удаляется дефектный слой поверхности, который был сформирован на предшествующей стадии обработки.

Часто при анализе состояния поверхности деталей их качество оценивается лишь шероховатостью, и ее параметры принимают за характеристику работоспособности и прочности изделия. Рядом исследований установлено, что улучшение микрогеометрии поверхности деталей способствует повышению их прочности, но не является определяющим фактором, характеризующим работоспособность. Процесс упрочнения поверхностного слоя в значительной степени связан с характеристиками его тонкой кристаллической структуры: размерами блоков мозаики (областей когерентного рассеивания), величиной искажений решетки и др.

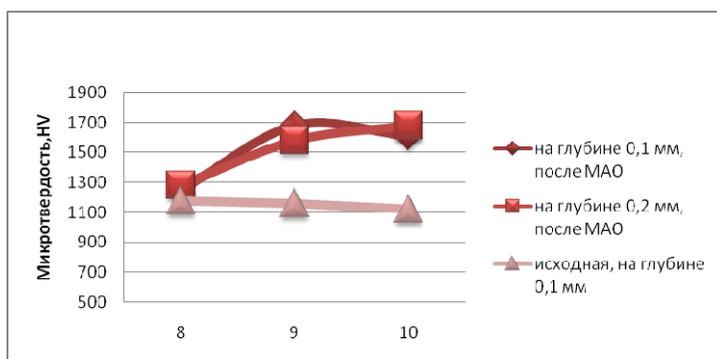
Выполненные ранее исследования влияния MAO на упрочнение поверхностных слоев [23, 65, 66] носят противоречивый характер. Поэтому была поставлена задача исследования влияния технологических факторов рассматриваемого метода обработки на изменение поверхностной микротвердости деталей из стали 30ХГСА и твердого сплава ВК8.

Магнитно-абразивную обработку проводили на установке, оснащенной специальной наладкой и оппозитными полюсными наконечниками, показанными на рис. 1.24. Режимы обработки: магнитная индукция $B = 1$ Тл, скорость резания $V_{рез} = 1,8$ м/с, рабочий зазор, $\delta = 1$ мм, амплитуда осцилляции $A = 2$ мм, время магнитно-абразивной обработки $t = 180$ с; ФАП Fe-TiC зернистостью 250/315 мкм.

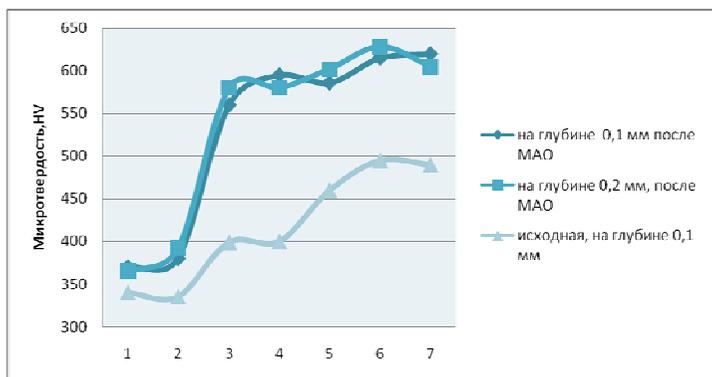
Разработана методика подготовки образцов для проведения дюрOMETрических исследований. Методика предусматривала применение методов, обеспечивающих минимальное воздействие на материал детали в процессе подготовки образцов. На эрозионной установке на образцах предварительно прорезались продольные пазы, длиной 35...40 мм и шириной 0,3 мм (диаметр проволоки

0,29 мм). После магнитно-абразивной обработки образцы разрезались и шлифовались по плоскости разъема на мягких режимах. Вторая группа образцов подготавливалась по той же технологии. Исследование морфологии поверхности резца, но без магнитно-абразивной обработки РКС-1 проводилось с использованием микроскопа VEGA II TESCAN при точении.

Установленные изменения в состоянии поверхностного слоя элементов после MAO обуславливают и изменение его физико-механических свойств, в том числе и микротвердости. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя исходного образца и обработанного MAO показано на рис. 2.6, а, б.



а



б

Рис. 2.6. Изменение микротвердости (HV): а – твердый сплав ВК8; б – сталь 30ХГСА

Данными исследований установлено, что на глубине 0,1...0,2 мм происходит значительное увеличение микротвердости, по сравнению с исходным значением. При магнитно-абразивной обработке микротвердость поверхности стали 30 ХГСА повышается до 20 %, микротвердость увеличивается до 30 %. Данное явление может быть объяснено тем, что MAO сопровождается сложными явлениями, которые включают в себя микрорезание, микроудары, пластическую деформацию. Особенно важную роль в процессе изменения свойств обрабатываемых поверхностей играют микроудары и пластическая деформация.

2.5.2. Особенности формирования физико-механических свойств поверхностных слоев деталей при магнитно-абразивной обработке

Магнитно-абразивная обработка состоит в одновременном проявлении воздействия на поверхность детали сил магнитного поля и процессов, протекающих при взаимодействии поверхности с ФАП, – микрорезаний, микроударов частичек, пластической деформации поверхностного слоя. Совокупность воздействий различных факторов позволяет достигать определенного упрочняющего эффекта.

В качестве технологической жидкости использовали водный раствор с 3...4 %-м содержанием триэтаноламина или Аквапола 12. Качество поверхностного слоя после MAO оценивали по параметру шероховатости Ra , микротвердость – по параметру HV . Для измерения параметров шероховатости поверхности использовали профилограф-профилометры моделей 201, 250 и 296 завода «Калибр». Микротвердость оценивали на микротвердомере DURAMIN 5 при нагрузке на пирамиду 50 г для стали 30ХГСА и 200 г для твердосплавной вставки из твердого сплава ВК8. Сечения измерений микротвердости проходили перпендикулярно оси симметрии резца. Шаг измерения составлял 0,05 мм.

При MAO на повышенных скоростях обработки ($V = 2,4$ м/с) происходит общее снижение микротвердости обрабатываемого материала. Однако даже при данных условиях микротвердость поверхностного слоя увеличивается до 40 % относительно исходной. Это связано с пластической деформацией поверхностного слоя

частицами ферроабразивного порошка, которая за счет повышения концентрации дислокаций и измельчения хрупких фаз значительно упрочняет поверхностный слой детали.

На отдельных кривых микротвердости обнаружен подслоевой максимум. Наибольшая микротвердость во всех случаях составляла на стали 30 ХГСА – $639 HV$, на твердом сплаве ВК8 – $1640 HV$. Глубина расположения максимума для этих материалов почти одинакова при обработке со скоростью $1,2...2,4$ м/с и составляет $10...20$ мкм. Она увеличивается до $30...40$ мкм при скорости обработки большей $2,5$ м/с. Наличие пика связано с ударным воздействием частиц порошкового инструмента на обрабатываемую поверхность. Подобное действие частиц ФАП идентично действию микрошариков или частиц абразива при струйных видах обработки.

Твердость растет с увеличением скорости обработки. Если для скорости обработки до 2 м/с разница между минимальным значением микротвердости и следующим за ним максимумом составляет не более $3...5\%$, то для больших скоростей эта разница достигает $8...20\%$. Такое распределение микротвердости никак не отвечает любым изменениям структуры или фазового состава материалов, и его нельзя отнести к погрешности измерений. Можно допустить, что такой характер распределения микротвердости связан с действием магнитного поля и образованием по глубине обрабатываемого материала областей доменов с разными знаками напряжений и концентрацией дислокаций. Толщина упрочненной зоны во всех случаях достигала $100...200$ мкм.

Влияние размера частиц ферроабразивного порошка при разных скоростях МАО на распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя приведено на рис. 2.7.

При больших скоростях во время обработки крупной фракцией подповерхностный минимум микротвердости отсутствует. По всему слою микротвердость спадает плавно. Это можно объяснить тем, что в немонотонном изменении (формировании максимумов и минимумов) микротвердости при МАО особенную роль играют прослойки, в которых скапливается большое количество малоподвижных дислокаций. При увеличенных скоростях обработки и использовании крупного порошка сила удара частиц сдвигает эти дислокации и они распределяются более равномерно. Этим же можно объяснить и увеличение толщины упрочненной зоны почти на 400 мкм. Но в этом случае ухудшается шероховатость поверхности.

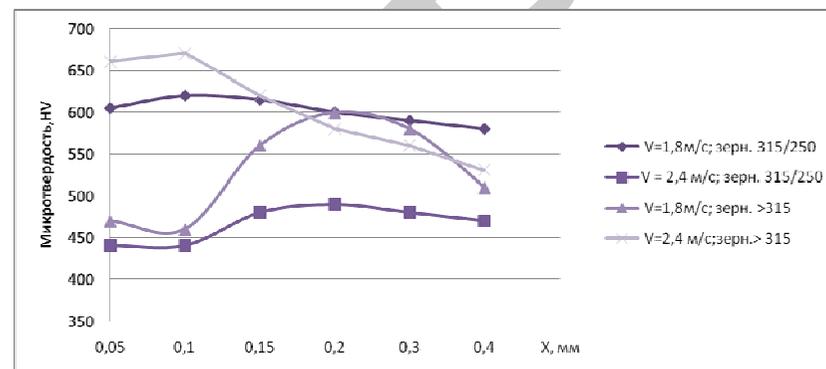


Рис. 2.7. Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя стали 30ХГСА в зависимости от зернистости ФАП (режимы обработки: $t = 120$ с, $B = 1$ Тл)

Наилучшие показатели по микротвердости поверхностного слоя приобретают в первые 120 с обработки (рис. 2.8). Именно за этот промежуток времени формируется минимальная шероховатость поверхности и происходит первичное упрочнение поверхностного слоя. Увеличение времени обработки приводит к уменьшению глубины слоя с повышенной микротвердостью и ее величины.

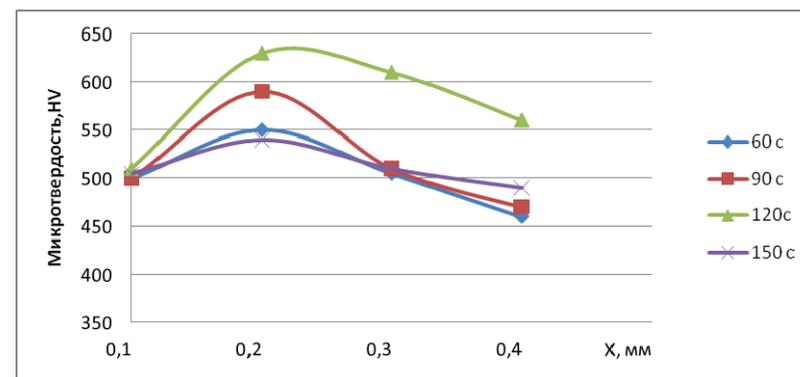


Рис. 2.8. Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя в зависимости от времени магнитно-абразивной обработки (режимы обработки: $V = 2$ м/с, $B = 1$ Тл, $\Delta = 315/250$ мкм)

2.6. Теоретические основы профилирования полюсных наконечников

Многие задачи теории формообразования сложнопрофильных поверхностей при их финишной обработке могут быть получены с помощью уравнений дифференциальной геометрии. Использование математического аппарата позволяет проверить данные результаты и обеспечить понимание представления о материализации исходных и конечных поверхностей детали инструмента. Хотя при MAO поверхность инструмента материализуется при использовании ЭМП, однако ее рассмотрение следует осуществлять как изначально заданное исходя из условия достижения заданного качества и эффективности процесса.

Проблема распределения ЭМП в той или иной области рабочей зоны часто решается путем построений методом сеток и интеграторов или на основе интуиции. Однако исключение столь нестрогих решений приобретает на сегодняшнем этапе особую важность, поскольку рост мощности технологического оборудования при использовании энергии ЭМП производится масштабно и быстро. При таких условиях грамотное конструктивное решение, производимое аналитическим путем или графическими и численными методами обеспечивает надежность работы оборудования и возможно только на базе точного знания топографии ЭМП. В свою очередь полученные данные служат источником анализа тепловых полей, а также параметров и режимов MAO сложнопрофильных поверхностей. Выяснение и точное обоснование особенностей конфигурации области ЭМП при MAO является необходимым условием для правильного выбора геометрии рабочей зоны, что обеспечивает эффективность процесса. В работе [90] используется схема MAO с кольцевой ванной для лопаток ГТД и пластин CNMG 120412, SNMG 12040822 и SNUM 120408, изготовленных фирмами KENNAMETAL, MITSUBISHI и ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» и ввиду наличия больших зазоров в рабочей зоне это схема имеет невысокие значения магнитной индукции ($B = 0,25 \text{ Т}$), что приводит к снижению эффективности съема материала и неоднородности физико-механических характеристик деталей. Исходя из выше изложенного, предлагаются два варианта расчета профиля полюсных наконечников и образование в первом случае

эквидистантного, во втором случае конхоидного контура в их радиальном сечении, что обеспечивает реализацию создания меньших по величине рабочих зазоров и рост интенсивности обработки деталей.

Используются [100...102] различные способы задания рабочих поверхностей инструмента, которые разработаны в инженерной геометрии: матричный, в параметрической, явной и неявной формах. С целью определения наиболее эффективного способа, который должен быть максимально универсальным и информативным проведена оценка их пригодности как для описания поверхности инструмента, так и возможных путей формообразования при финишной обработке деталей машин. Главная задача заключается не в описании свойств заданных поверхностей, а в синтезе технических решений и только затем в анализе полученных результатов.

Для многих деталей получение непрерывных аналитических описаний их поверхностей по ряду причин не всегда удается и поэтому геометрическая информация сопряжена не с функциональным, а с дискретным распределением совокупности точек или линий, принадлежащих этой поверхности, в связи с этим рассмотрен также и табличный способ. Поскольку поверхность детали и инструмента имеют материальный носитель своей формы, то важным физическим условием их контакта служит то, что они не должны занимать одну и ту же область рабочей зоны. Следовательно, поверхность детали будет правильно формообразована, если будет существовать ориентированно сопряженная с ней поверхность инструмента.

В работе [89] обработка лопаток ГТД методом MAO проводилась в больших кольцевых зазорах и при наличии прямолинейной формы полюсных наконечников, выполняющих функцию поверхности инструмента. Это приводит, во-первых, к падению величины магнитной индукции в данных зазорах ($0,25...0,3 \text{ Т}$) и, во-вторых, к отсутствию требуемого уровня съема материала по причине того, что кривизна соответствующих участков образующей поверхности детали (лопатка ГТД) не соответствует кривизне (в данном случае нулевой) режущего контура полюсных наконечников. Следствием низкой степени конформности образующих поверхность детали и режущего контура полюсных наконечников и максимальным отличием показателей их кривизны является разноразмерность параметров шероховатости, например, по длине пера лопатки ГТД. Таким образом,

для того, чтобы повысить производительность и качество обработки этих сложнопрофильных деталей необходимым условием служит полнота прилегания поверхности инструмента к поверхности детали в области их контакта и получение количественной оценки этой полноты обеспечивает переход от интуитивного понятия к объемному и однозначному восприятию, выражаемому численными значениями. В качестве расчета профиля полюсных наконечников лопаток ГТД предлагается схема, представленная на рис. 2.9.

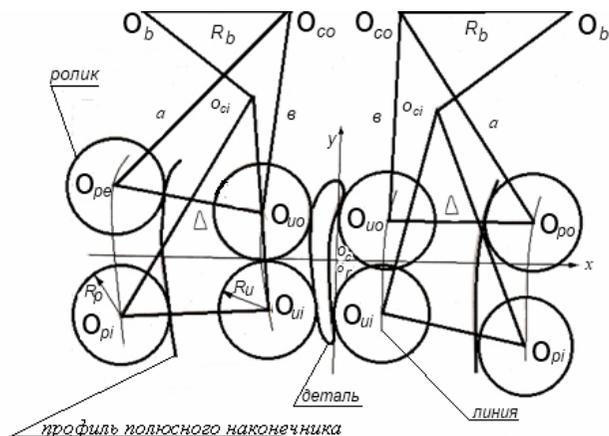


Рис. 2.9. Схема для расчета профиля полюсных наконечников
МАО лопаток ГТД

Обрабатываемые поверхности сложного профиля задаются в виде:

- неявных функций: $F(x, y) = 0$;
- явных функций: $y = f(x)$ или $p = f(\varphi)$;
- в параметрическом виде: $x = x(t)$, $y = y(t)$ или $p = p(t)$, $\varphi = \varphi(t)$,
- таблицами значений:

x	...	x_{i-1}	x_i	x_{i+1}	...
y	...	y_{i-1}	y_i	y_{i+1}	...

t			...	t_{i-1}	t_i	t_{i+1}	...
x			...	x_{i-1}	x_i	x_{i+1}	...
y			...	y_{i-1}	y_i	y_{i+1}	...

д) графических.

Способ задания обрабатываемой поверхности придает особенность общему методу расчета.

2.6.1. Расчет эквидистантного профиля полюсных наконечников

Эквидистантный профиль полюсных наконечников определяется, как огибающая окружности радиуса $R_3 = R_u - R_p$ центр которой (x_∂, y_∂) движется по профилю изготавливаемой детали.

При задании обрабатываемого профиля в виде функции ($F(x, y) = 0$) огибающая окружностей, образующая профиль копира, находится из решения

$$\left. \begin{aligned} F(x, y, c) &= 0 \\ F'_c(x, y, c) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.56)$$

где каждое значение C выделяет определенную окружность из их семейства.

Общее решение системы дают расчетные зависимости для определения координат (x_3, y_3) эквивалентного профиля, отстоящего от заданного (x_∂, y_∂) на расстоянии R_3 .

$$\begin{aligned} x_3 &= x_\partial \pm \frac{R_3 \cdot y_\partial}{\sqrt{1 + (y_\partial)^2}} \\ y_3 &= y_\partial \pm \frac{R_3}{\sqrt{1 + (y_\partial)^2}} \end{aligned} \quad (2.57)$$

$$y'_\partial = - \frac{\frac{\partial F}{\partial x}}{\frac{\partial F}{\partial y}}$$

При задании обрабатываемой поверхности в виде функции $y = f(x)$ используются те же зависимости, что и в случае, где $y_\partial' = f'(x_\partial)$, в случае задания обрабатываемого профиля в виде $x = x(t)$, $y = y(t)$, огибающая находится из решения системы уравнений

$$x = x(t, c); y = y(t, c) \quad \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial c} \frac{\partial y}{\partial c} \\ \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial y}{\partial t} \end{vmatrix} = 0, \quad (2.58)$$

где, как и в предыдущих случаях, каждое значение C выделяет определенную окружность из свойства окружностей, а t выделяет на окружности определенную точку.

Решение системы дает расчетные зависимости

$$x_3 = x_0 \pm \frac{R_3 \cdot y'_{0c}}{\sqrt{(x'_{0c})^2 + (y'_{0c})^2}}; \quad (2.59)$$

$$y_3 = y_0 \pm \frac{R_3 \cdot x'_{0c}}{\sqrt{(x'_{0c})^2 + (y'_{0c})^2}}. \quad (2.60)$$

При задании обрабатываемой поверхности в полярных координатах $\rho = \rho(\varphi)$.

$$\rho_3^2 = \rho_0^2 + \frac{2R_3 \cdot \rho_0^2}{\sqrt{\rho_0^2 + (\rho_0')^2}} + R_3^2 \quad (2.61)$$

$$y_3 = \arccos \frac{x_3}{\rho_3} = \arccos \frac{1}{\rho_3} \left[\rho_0 \cos \varphi + \frac{R_3 (\rho_0' \sin \varphi + \rho_0 \cos \varphi)}{\sqrt{\rho_0^2 + (\rho_0')^2}} \right], \quad (2.62)$$

где ρ_0 – радиус-вектор профиля обрабатываемой детали;
 φ – соответствующий ρ_0 полярный угол;
 ρ_3 – радиус-вектор эквидистантного профиля;
 γ_3 – соответствующий ρ_3 полярный угол.

Если обрабатываемый профиль задается таблицами значений

x	...	x_{i-1}	x_i	x_{i+1}	...
y	...	y_{i-1}	y_i	y_{i+1}	...

или

t		...	t_{i-1}	t_i	t_{i+1}	...
x		...	x_{i-1}	x_i	x_{i+1}	...
y		...	y_{i-1}	y_i	y_{i+1}	...

то координаты эквидистанты определяются с использованием зависимостей для вышеуказанных случаев или входящие в эти зависимости производные могут быть найдены известными методами дифференцирования табличных функций или дифференцированием интерполяционных кривых. При графическом задании профиль обрабатываемой детали, как правило, описывается дугами окружностей. Порядок графического построения эквидистанты к графически заданному профилю общеизвестен и состоит в увеличении или уменьшении на требующуюся величину радиуса кривизны детали.

2.6.2. Расчет профиля конхоидных профилей полюсных наконечников

Из конструкторско-технологического анализа копирующих систем (рис. 2.10), следует, что профиль полюсных наконечников можно представить в виде огибающей копирующего ролика, центр которого перемещается по конхоиде к эквидистанте, образованной центром режущего инструмента.

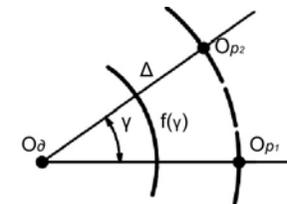


Рис. 2.10. Конхоиды в полярных координатах

Рассмотрим способы нахождения эквидистант.

Как известно, уравнение конхоиды в полярных координатах (рис. 2.10) имеет вид

$$\rho_p = f(\gamma) \pm \Delta, \quad (2.63)$$

где ρ_p, γ – полярные координаты точек O_p или O_{p2} ;
 $f(\gamma)$ – эквидистанта к обрабатываемому профилю;
 Δ – межцентровое расстояние $O_u O_p$.

При задании профиля обрабатываемой детали в виде $F(x_o, y_o) = 0$ или $y_o = f(x_o)$ профиль полюсных наконечников определяется в следующей последовательности.

Находится траектория центров инструмента $O_u(x_u, y_u)$:

$$x_u = x_o \pm \frac{R_u \cdot y_o'}{\sqrt{1 + (y_o')^2}}; \quad (2.64)$$

$$y_u = y_o \pm \frac{R_u}{\sqrt{1 + (y_o')^2}}, \quad (2.65)$$

где $y_o' = -\frac{\partial F}{\partial x_o} / \frac{\partial F}{\partial y_o}$ – при задании профиля детали в виде $F(x_o, y_o) = 0$

или $y_o' = f'(x_o)$ – при задании профиля детали в виде $y = f(x_o)$.

Рассматриваются координаты линии центров копирующего ролика:

$$O_p(x_p, y_p); \quad (2.66)$$

$$x_p = x_u \pm \Delta \cos \gamma = x_u \left(1 \pm \frac{\Delta}{\sqrt{x_u^2 + y_u^2}}\right) \quad (2.67)$$

Вычисляются координаты профиля полюсных наконечников:

$$\delta_k = \delta_p \pm \frac{R_p \cdot y_p'}{\sqrt{(x_p')^2 + (y_p')^2}}; \quad (2.68)$$

$$y_k = y_p \mp \frac{R_p \cdot \delta_p'}{\sqrt{(x_p')^2 + (y_p')^2}}; \quad (2.69)$$

$$x_p' = x_u' \left(1 \pm \frac{\Delta}{\sqrt{x_u^2 + y_u^2}} \mp \frac{x_u(x_u \cdot x_u' + y_u \cdot y_u')\Delta}{(x_u^2 + y_u^2)^{\frac{3}{2}}}\right) \quad (2.70)$$

2.6.3. Нахождение промежуточных координат обрабатываемого профиля методом интерполирования

Если обрабатываемый профиль задается таблицами значений, то координаты профиля полюсных наконечников определяются с использованием зависимостей, перечисленных в разделе 2.6.1, а входящие в эти зависимости производные находятся дифференцированием табличных функций.

Для дифференцирования по таблице с переменным шагом h аргумента x обычно рекомендуется использовать интерполяционный полином Ньютона:

$$f(x) = f(x_i) + a_0 f(x_i, x_{i+1}) + a_1 a_{i+1} f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}) + \dots + a_i a_{i+1} \dots a_{i+n-1} f(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n}) \quad (2.71)$$

В этом случае приближенное значение первой производной равняется

$$\begin{aligned} (x) = & f(x_i, x_{i+1}) + (a_i + a_{i+1})f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}) + \\ & + (a_i a_{i+1} + a_i a_{i+1} + a_i a_{i+1})f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}) + \\ & + \dots + (a_i a_{i+1} \dots a_{i+n-2} + a_i a_{i+1} \dots a_{i+n-3} a_{i+n-1} + a_i a_{i+2} a_{i+n-1}) \times \\ & \times f(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+1}). \end{aligned} \quad (2.72)$$

Как известно, разделенными разностями первого порядка называется отношение вида

$$\frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} = f(x_{i-1}, x_i). \quad (2.73)$$

Разделенными разностями второго порядка называется отношение вида:

$$\frac{f(x_{i-1}, x_i) - f(x_{i-2}, x_{i-1})}{x_i - x_{i-2}} = f(x_{i-2}, x_{i-1}, x_i); \quad (2.74)$$

$$f(x) = f(x_i) + a_0 f(x_i, x_{i+1}) + a_1 a_{i+1} f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}) + \dots + a_i a_{i+1} \dots a_{i+n-1} f(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n}). \quad (2.75)$$

В общем случае разделенные разности $n + 1$ -го порядка находятся по разностям n -го порядка из зависимости

$$\frac{f(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n}) - f(x_{i-1}, x_i, \dots, x_{i+n-1})}{x_{i+n} - x_{i-1}} = f(x_{i-1}, x_i, \dots, x_{i+n}). \quad (2.76)$$

Схема вычислений разделенных разностей приведена в таблице 2.1. При переменном шаге аргумента x готовые выражения первых производных в зависимости от n используемых разностей имеет вид:
 $n = 2$ (три точки x_i, x_{i+1}, x_{i+2})

$$y'_i = f(x_i, x_{i+1}) + (2x - x_i - x_i - x_{i+1}) f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}); \quad (2.77)$$

$n = 3$ (четыре точки $x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}$)

$$y'_i = y_i + (3x^2 - 2x x_i - 2x x_{i+1} - 2x x_{i+2} + x x_{i+1} + x x_{i+2} + x_{i+1} x_{i+2}) f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3});$$

$n = 4$ (пять точек $x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}, x_{i+4}$)

$$y'_i = y'_i + (4x^3 - 3x^2 x_i - 3x^2 x_{i+1} - 3x^2 x_{i+2} + 3x^2 x_{i+3} + 2x x_i x_{i+1} + 2x x_i x_{i+2} + 2x x_i x_{i+3} + 2x x_{i+1} x_{i+2} + 2x x_{i+1} x_{i+3} + 2x x_{i+2} x_{i+3} + 2x x_i x_{i+1} - x_i x_{i+1} x_{i+2} - x_i x_{i+1} x_{i+3} - x_i x_{i+2} x_{i+3} - x_{i+1} x_{i+2} x_{i+3}) f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}, x_{i+4}).$$

Таблица 2.1

	x	y	x'	y'	$f'(x_i, x_{i+1})$	x^2	y^2	$f^2(x_i, x_{i+2})$	x^3	y^3	$f^3(x_i, x_{i+3})$
1	+3	49,9									
			+5	-0,137	-0,0275						
2	+8	49,8				+9	-0,022	-0,00252			
			+4	-0,201	-0,0502		-		+17	-0,000045	-0,000003
3	+12	49,6				+12	-0,030	-0,00257			
			+8	-0,649	-0,0811				15	-0,000052	-0,000003
4	+20	48,9				+11	-0,288	-0,00262			
			+3	-0,330	-0,1100						
5	+23	48,6									

Подставляя в приведенные выражения значения x , взятое в рассматриваемом интервале $(x_i \dots x_{i+n})$, находим значение производной.

Разделенная разность может быть определена и непосредственно через значения функции $f(x)$:

$$f(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n}) = \frac{f(x_i)}{(x_i - x_{i+1})(x_i - x_{i+2}) \dots (x_i - x_{i+n})} + \frac{f(x_{i+1})}{(x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x_{i+2}) \dots (x_{i+1} - x_{i+n})} + \frac{f(x_{i+2})}{(x_{i+2} - x_i)(x_{i+2} - x_{i+1}) \dots (x_{i+2} - x_{i+n})} + \dots$$

Готовые выражения разделенных разностей различных порядков n , выраженные непосредственно через функцию, имеют вид:

$n = 2$ (три точки x_i, x_{i+1}, x_{i+2})

$$f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}) = \frac{y_i}{(x_i - x_{i+1})(x_i - x_{i+2})} + \frac{y_{i+1}}{(x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x_{i+2})} + \frac{y_{i+2}}{(x_{i+2} - x_i)(x_{i+2} - x_{i+1})};$$

$n = 3$ (четыре точки $x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}$),

$n = 4$ (пять точек $x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}, x_{i+4}$)

$$f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}) = \frac{y_i}{(x_i - x_{i+1})(x_i - x_{i+2})(x_i - x_{i+3})(x_i - x_{i+4})} + \frac{y_{i+1}}{(x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x_{i+2})(x_{i+1} - x_{i+3})(x_{i+1} - x_{i+4})} + \frac{y_{i+2}}{(x_{i+2} - x_i)(x_{i+2} - x_{i+1})(x_{i+2} - x_{i+3})(x_{i+2} - x_{i+4})} + \frac{y_{i+3}}{(x_{i+3} - x_i)(x_{i+3} - x_{i+1})(x_{i+3} - x_{i+2})(x_{i+3} - x_{i+4})} + \frac{y_{i+4}}{(x_{i+4} - x_i)(x_{i+4} - x_{i+1})(x_{i+4} - x_{i+2})(x_{i+4} - x_{i+3})}.$$

Для дифференцирования по таблице с постоянным шагом, если разыскивается производная не в начале и не в конце таблиц, лучше всего применять интерполяционную формулу Стирлинга.

$$f(x) = f(x_0 + ht) = f_0 + t f_0' + \frac{t^2}{2!} f_0'' + \frac{t(t^2-1)}{3!} f_0''' + \frac{t^2(t^2-1)}{4!} f_0^{(4)} + \frac{t(t^2-1)(t^2-2^2)}{5!} f_0^{(5)} + \frac{t^2(t^2-1)(t^2-2^2)}{6!} f_0^{(6)} + \dots$$

Здесь

$$t = \frac{x - x_0}{h},$$

где x – текущее значение аргумента;

h – шаг;

t – нормированное значение аргумента;

f_{02}, f_{04}, f_{06} – конечные разности;

f_{01}, f_{03}, f_{05} – центральные разности.

Приближенное значение первой производной равняется:

$$f'(x) = \frac{1}{h} (f_0 + t f_0' + \frac{3t^2-1}{3!} f_0''' + \frac{4t^2-1}{4!} f_0^{(4)} + \frac{5t^4-15t^2+4}{5!} f_0^{(5)} + \frac{6t^5-5t^3+8t}{6!} f_0^{(6)} + \dots)$$

Производная в центральном узле, т. е. при $t = 0$, выражается зависимостью

$$f'(x) = f_0' - \frac{1}{6} f_0''' + \frac{1}{30} f_0^{(5)} - \dots$$

Как известно, конечными разностями первого порядка называются зависимости вида

$$f(x_i) - f(x_{i-1}) = f'_{i-\frac{1}{2}}.$$

Конечными разностями второго порядка – зависимости вида

$$f'_{i+\frac{1}{2}} - f'_{i-\frac{1}{2}} = f''_i.$$

В общем случае конечные разности n -го порядка находятся по разностям $n-1$ -го порядка из зависимости

$$f''_i = f'_{i+\frac{1}{2}} - f'_{i-\frac{1}{2}}.$$

$$f'(x) = \frac{1}{h}(f'_0 + tf_0^2 + \frac{3t^2 - 1}{3!}f_0^3 + \frac{4t^2 - 2t}{4!}f_0^4 + \frac{5t^4 - 15t^4 + 4}{5!}f_0^5 + \frac{6t^5 - 5t^3 + 8t}{6!}f_0^6 + \dots)$$

Таблица 2.2

Схема вычислений обычных, конечных и центральных разностей

i	x	y	f'	f^2	f^3	f^4	f^5	f^6
-3	4	-99,1337						
			+0,6987					
-2	6	-98,4350		+0,1980				
			+0,8967		+0,0304			
-1	8	-97,5383		+0,2284		-0,0633		
			+1,2151		-0,0329		+0,1053	
0	10	-96,4132	+1,2226	+0,1955	-0,0118	+0,0422	-0,0303	-0,2716
			+1,3206		+0,0093		-0,1616	
+1	12	-95,0926		+0,2048		-0,1239		
			+1,5254		-0,1146			
+2	14	-93,5672		+0,0902				
			+1,6156					
+3	16	-91,9516						

Схема вычислений обычных, конечных и центральных разностей при ручном счете приведена в таблице 2.2.

Конечная разность любого порядка может быть определена и непосредственно через значение функции

$$f_i^n = y_{i+\frac{n}{2}} + C_n y_{i+\frac{n}{2}-1} + C_n^2 y_{i+\frac{n}{2}-2} + \dots + (-1)^{\frac{n}{2}} C_n^{\frac{n}{2}} y_i + (-1)^{\frac{n}{2}+1} C_n^{\frac{n}{2}+1} y_{i-1} + \dots + y_{i-\frac{n}{2}}$$

- для четных значений n

или

$$f_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} = y_{i+\frac{n}{2}+1} - C'_{n+1} y_{i+\frac{n}{2}} + C_{n+1}^2 y_{i+\frac{n}{2}-1} + \dots + (-1)^{\frac{n}{2}} C_{n+1}^{\frac{n}{2}} y_{i+1} + (-1)^{\frac{n}{2}+1} C_{n+1}^{\frac{n}{2}+1} y_i + \dots + (-x_{i-\frac{n}{2}})$$

- для нечетных значений n .

Готовые выражения для конечных разностей различных порядков, выраженные непосредственно через значения функций, имеют вид:

$$f_i^2 = y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1};$$

$$f_{i+\frac{1}{2}}^3 = y_{i+2} - 2y_{i+1} + 3y_i - y_{i-1};$$

$$f_i^4 = y_{i+2} - 4y_{i+1} + 6y_i - 4y_{i-1} + y_{i-2};$$

$$f_{i+\frac{1}{2}}^5 = y_{i+3} - 5y_{i+2} + 10y_{i+1} - 10y_i - 5y_{i-1} - y_{i-2};$$

$$f_i^6 = y_{i+3} - 6y_{i+2} + 15y_{i+1} - 20y_i + 15y_{i-1} - 6y_{i-2} + y_{i-3}.$$

Центральные разности определяются как среднее арифметическое двух соседних конечных разностей.

Центральная разность первого порядка выражается зависимостью вида

$$\frac{f'_{i-\frac{1}{2}} + f'_{i+\frac{1}{2}}}{2} = f'_i.$$

В общем случае центральная разность n -го порядка определяется из конечных разностей того же порядка

$$f_{i+\frac{1}{2}}^n = \frac{f_i^n + f_{i+1}^n}{2}.$$

Если рассматривается производная в одном из первых узлов таблиц, то используется формула Ньютона для интерполяции «вперед».

Откуда

$$f(x_0 + ht) = f_0 + t f'_{\frac{1}{2}} + \frac{t(t-1)}{2!} f'_2 + \frac{t(t-1)(t-2)}{3!} f''_{\frac{3}{2}} + \frac{t(t-1)(t-2)(t-3)}{4!} f''_4 + \dots + \frac{t(t-1)\dots(t-(n-3))}{n!} f''_{\frac{n}{2}}.$$

$$f'(x_0 + ht) = \frac{1}{h} \left[f'_{\frac{1}{2}} + \frac{2t-1}{2!} f''_2 + \frac{3t^2-6t-2}{3!} f''_{\frac{3}{2}} + \frac{4t^3-18t^2+22t-6}{4!} f''_4 + \dots \right].$$

И откуда для $t = 0$

$$f'(x) = \frac{1}{h} \left(f'_{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} f''_{\frac{3}{2}} - \frac{1}{4} f''_4 \right) \dots$$

Если же производная разыскивается в одном из последних узлов таблиц, то используется формула Ньютона для интерполяции «назад»:

$$f(x_0 + ht) = f_0 + t f'_{-\frac{1}{2}} + \frac{t(t-1)}{2!} f''_{-1} + \dots + \frac{t(t+1)\dots(t+(n-1))}{n!} f''_{-\frac{n}{2}}.$$

Откуда

$$hf'(x_0 + ht) = f'_{-\frac{1}{2}} + \frac{2t-1}{2!} f''_{-1} + \frac{3t^2-3t+2}{3!} f''_{-\frac{3}{2}} + \frac{4t^3-18t^2+22t-6}{4!} f''_{-2} + \dots$$

И отсюда для $t = 0$

$$f'(x) = \frac{1}{h} \left(f'_{-\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} f''_{-1} + \frac{1}{3} f''_{-\frac{3}{2}} + \frac{1}{4} f''_{-2} \right).$$

Иногда удобнее применять формулу численного дифференцирования не через разности, а непосредственно через значение функций. Для этого используется один из вариантов формулы Лагранжа для равных промежутков:

$$f(x) = \frac{(-1)^n (t-1)\dots(t-n)}{n!} \sum_{i=0}^n \frac{(-1)^i C_n^i y_i}{t-i} + h^{n+1} t(t-1)\dots(t-n) f(x, x_i, \dots, x_{i+n}).$$

Откуда

$$hf'(x) = \sum_{i=0}^n (-1)^{n+1} \frac{C_n^i y_i}{n!} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{t(t-1)\dots(t-n)}{(t-1)} \right] + h^{n+1} t(t-1)\dots(t-n) f(x, x_i, \dots, x_{i+n}) \frac{\partial}{\partial t} [t(t-1)\dots(t-n)] + h^{n+2} f(x, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n}) t(t-1)\dots(t-n).$$

Готовые выражения для вычисления первых производных непосредственно через значения функций при различных значениях n имеет вид:

$n = 2$ (три точки $i, i+1, i+2$)

$$y'_i = \frac{1}{2} h [-3y_i + 4y_{i+1} - y_{i+2}] + \frac{h^3}{3} f'''(\xi),$$

$$y'_{i+1} = \frac{1}{2} h [y_{i+2} - y_i] + \frac{h^2}{6} f'''(\xi),$$

$$y'_{i+2} = \frac{1}{2} h [y_i + 4y_{i+1} - 3y_{i+2}] + \frac{h^2}{3} f'''(\xi);$$

$n = 3$ (четыре точки $i, i + 1, i + 2, i + 3$)

$$y'_i = \frac{1}{6}h[-11y_i + 18y_{i+1} - 9y_{i+2} + 2y_{i+3}] - \frac{h^3}{4}f^{(3)}(\xi),$$

$$y'_{i+1} = \frac{1}{6}h[-2y_i - 3y_{i+1} + 6y_{i+2} - y_{i+3}] - \frac{h^3}{12}f^{(4)}(\xi),$$

$$y'_{i+2} = \frac{1}{6}h[y_i - 6y_{i+1} + 3y_{i+2} + 2y_{i+3}] - \frac{h^3}{12}f^{(4)}(\xi),$$

$$y'_{i+3} = \frac{1}{6}h[-2y_i - 9y_{i+1} - 18y_{i+2} + 11y_{i+3}] - \frac{h^3}{4}f^{(4)}(\xi);$$

$n = 4$ (пять точек $i, i+1, i+2, i+3, i+4$)

$$y'_i = \frac{1}{12}h[-25y_i + 48y_{i+1} - 36y_{i+2} + 16y_{i+3} + 3y_{i+4}] + \frac{h^4}{5}f^{(v)}(\xi),$$

$$y'_{i+1} = \frac{1}{12}h[-3y_i - 10y_{i+1} + 18y_{i+2} - 6y_{i+3} + 3y_{i+4}] - \frac{h^4}{2c}f^{(v)}(\xi),$$

$$y'_{i+2} = \frac{1}{12}h[-y_i - 8y_{i+1} + 8y_{i+3} - y_{i+4}] + \frac{h^4}{30}f^{(v)}(\xi),$$

$$y'_{i+3} = \frac{1}{12}h[-y_i + 6y_{i+1} - 18y_{i+2} + 10y_{i+3} + 3y_{i+4}] + \frac{h^4}{20}f^{(v)}(\xi),$$

$$y'_{i+4} = \frac{1}{12}h[3y_i - 16y_{i+1} + 36y_{i+2} - 48y_{i+3} + 25y_{i+4}] + \frac{h^4}{5}f^{(v)}(\xi).$$

Последние члены выписанных зависимостей являются остаточными и в расчетах приближенных значений производных не используются.

Из приведенных формул видно, что наиболее простые выражения получаются при четных n в средних точках. В этих же точках и остаточные члены имеют наименьшее значение.

2.6.4. Аппроксимация обрабатываемого профиля по методу наименьших квадратов

При задании профиля таблицами значений для определения производных наряду с перечисленными способами применен метод наименьших квадратов.

Аппроксимирующая кривая устанавливается в виде

$$Y = B_0 + B_1x + \dots + B_mx.$$

Коэффициенты B_i при переменной x определяются по правилу Крамера:

$$B_0 = \frac{\Delta B_0}{\Delta}; B_1 = \frac{\Delta B_1}{\Delta}; \dots; B_m = \frac{\Delta B_m}{\Delta},$$

где $\Delta =$
$$\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^5 \\ \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^5 & \sum_{i=1}^n x_i^6 \end{vmatrix};$$

$$\Delta B_0 = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^5 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^5 & \sum_{i=1}^n x_i^6 \end{vmatrix};$$

$$\Delta B_m = \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^m \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \dots & \sum_{i=1}^n y_i x_i^{m+1} \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \dots & \sum_{i=1}^n y_i x_i^{m+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} & \dots & \sum_{i=1}^n y_i x_i^{m+n} \end{vmatrix}.$$

Подставляя в приведенные матрицы известные координаты (x_i, y_i) точек искомой прямой, определяем коэффициенты B_i .

2.6.5. Интерполирование обрабатываемого профиля кривыми второго порядка

При аппроксимации профиля кривыми второго порядка решение устанавливается в виде

$$\begin{vmatrix} x^2 & xy & y^2 & x & y \\ x_{i-2}^2 & x_{i-2}y_{i-2} & y_{i-2}^2 & x_{i-2} & y_{i-2} \\ x_{i+2}^2 & x_{i+2}y_{i+2} & y_{i+2}^2 & x_{i+2} & y_{i+2} \end{vmatrix} = 0,$$

где x_i, y_i – табличные координаты точек.

Интерполирование координат таблично-заданного профиля дугами окружностей осуществляется с использованием зависимостей

$$x_0 = \frac{1}{j} \left| \frac{(x_{i-2}^2 - x^2 + y_{i-2}^2 - y^2)(y_{i+1} - y_i)}{(x_{i+2}^2 - x_{i+1}^2 + y_{i+2}^2 - y_{i+1}^2)(y_{i+2} - y_{i+1})} \right|,$$

$$y_0 = \frac{1}{j} \left| \frac{(x_{i+2} - x_i^2 + y_{i+2}^2 - y_i^2)(y_{i+1} - y_i)}{(x_{i+2} - x_{i+1})(x_{i+2}^2 - x_{i+1}^2 + y_{i+2}^2 - y_{i+1}^2)y} \right|,$$

$$j = 2 \left| \frac{(x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} - y_i)}{(x_{i+2} - x_{i+1})(y_{i+2} - y_{i+1})} \right|,$$

$$R = \sqrt{(x_{i(i+1, i+2)} - x_0)^2 + (y_{i(i+1, i+2)} - y_0)^2},$$

где x_0, y_0 – координаты центра кривизны;

R – радиус кривизны.

Интерполирование обрабатываемого профиля кубическими сплайн-функциями или кубическими многозвенниками.

При использовании этого метода устанавливается набор кубических сплайн-функций $S(x)$, которые удовлетворяют условиям

$$S(x_i) = y(x_i) \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n).$$

Функция $S(x)$ непрерывна и имеет непрерывные первую и вторую производные:

$$S'(x_i) = y'(x_i) \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n).$$

Описание функции $S(x)$ и порядок вычисления ее коэффициентов можно определить с помощью использования ЭВМ и других средств вычислительной техники.

2.6.6. Сравнение эквидистант, вычисленных различными численными методами

Для того, чтобы составить хотя бы приблизительное количественное представление о возможностях описанных выше численных методов дифференцирования, рассчитаны, как база для сравнения, координаты эквидистанты к эллипсу.

$$\frac{x^2}{m^2} + \frac{y^2}{n^2} = 1 \quad i \ i; \quad n = 50 \quad i \ i.$$

Затем аналитически заданный эллипс пересчитывается в таблицу координат, которые и являются исходными данными для приложения различных методов численного дифференцирования.

Результаты вычисления координат эквидистант, выполненных по одним и тем же зависимостям но со значениями производных, определенных различными классическими методами численного дифференцирования, представляются в виде таблицы. Наилучший результат, кроме крайних значений, обеспечивает применение формулы Лагранжа. Однако в общем случае применять классический метод целесообразно лишь для предварительного расчета копира или для проверки расчетов, выполненных другими методами.

Результаты вычислений узловых точек по методу наименьших квадратов при интерполировании функций вида $y = B_0 + B_1x + B_2x^2$ в зависимости от числа m , используемых в расчете точек, представляются в виде таблицы.

Из рассмотрения приведенных данных следует, что метод наименьших квадратов может применяться для аппроксимирования геометрических профилей с определенной погрешностью.

2.6.7. Приближенный расчет необходимого шага таблиц

При отсутствии в чертеже заданной таблицами сложной поверхности указаний о способе интерполирования ее промежуточных значений, шаг t таблиц, с достаточной для изготовления копиров точностью, может быть определен исходя из технологических соображений. Принимая, приближенно, что производится линейная интерполяция промежуточных значений и что для изготовления копиров может быть использована какая-то определенная доля μ поля допуска профиля лопатки H и других сложнопрофильных деталей из геометрических соотношений, ясных из приводимого на рис. 2.11, приходим к уравнению:

$$\mu H = R_n - \sqrt{R_n^2 - \left(\frac{t_k}{2}\right)^2},$$

$$t_k = \sqrt{8R_n\mu H},$$

где A, B – точки профиля полюсных наконечников;

R_n – радиус инструмента, применяемого для изготовления профиля полюсных наконечников.

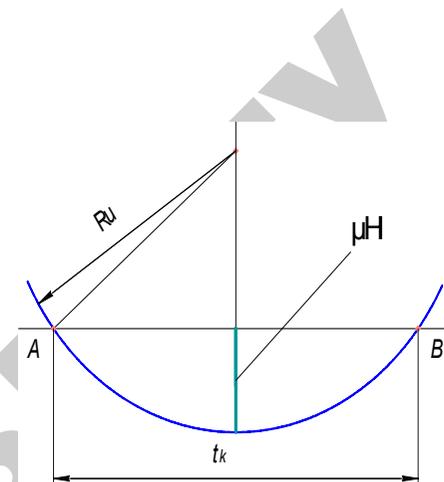


Рис. 2.11. Схема для оценки точности профиля при линейной интерполяции

Так как параметр профиля полюсных наконечников обычно больше параметра профиля обрабатываемой поверхности в ∂ раз, приходим к зависимости

$$t_\partial = \frac{t_k}{\partial} = \frac{\sqrt{8R_n\mu H}}{\partial},$$

где t_∂ – шаг в таблице детали.

В случае, если производится круговая интерполяция радиусом R_n (рис. 2.12), необходимый шаг профиля полюсных наконечников определяется из уравнения

$$\mu H = \left[R_n - \sqrt{R_n^2 - \left(\frac{t_k}{2}\right)^2} \right] + \left[R_n - \sqrt{R_n^2 - \left(\frac{t_k}{2}\right)^2} \right],$$

откуда

$$t_k \approx \sqrt{\frac{8R_n\mu H \cdot R_n}{R_n + R_n}};$$

$$t_\partial = \frac{t_k}{\partial} = \frac{1}{\partial} \sqrt{\frac{8R_n\mu H \cdot R_n}{R_n + R_n}}.$$

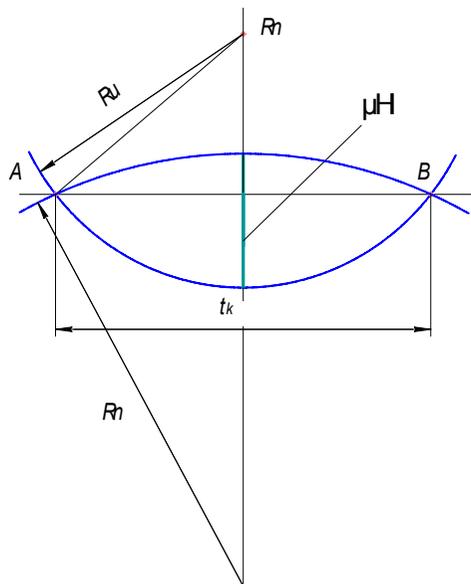


Рис. 2.12. Схема для оценки точности профиля при круговой интерполяции

При решении проблемы наиболее выгодного формообразования деталей сложнопрофильных поверхностей и задач, стоящих по его созданию, следует исходить из требуемой рабочим чертежом геометрической информации об обрабатываемой поверхности. Остальные параметры ТП необходимо согласно [13] вычислять, поскольку назначение режимов резания всякий раз связано с конкретными условиями производства, что в свою очередь требует высокой квалификации исполнителя и реализации интуитивного подхода. В связи с этим эффективность разработки ТП устанавливается тем, насколько деталь, обработанная заданным инструментом, соответствует «идеальной», чтобы наилучшим образом выполнить свое функциональное назначение. Однако известно, что получить деталь с идеальными конструктивными параметрами невозможно и, несмотря на удачные инженерные решения, результат также не является полным. Точными должны быть научные решения и для этого необходимо использовать принцип конструирования от детали к инструменту, а затем к кинематике формообразования.

3. РЕЖУЩИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОАБРАЗИВНЫХ ПОРОШКОВ

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

3.1. Эксплуатационные характеристики ферроабразивных порошков

В качестве ферроабразивных порошков применяют достаточно большое количество материалов, которые имеют разные физические и специальные свойства. Предложено несколько классификаций ФАП. Однако развитой единой классификации ферроабразивных порошков не существует. Наиболее приемлемыми являются классификации по структуре частиц порошка [103, 104] и по способу их получения [103]. В соответствии с этими подходами отдельно можно выделить магнитно-абразивный инструмент, который состоит из механических смесей магнитных и абразивных составляющих. В качестве магнитной составляющей чаще всего применяют порошки обычного или легированного железа, а также, специально для работы в переменных магнитных полях, – порошки магнитно-твердых сплавов (Fe-Ni-Al, Fe-Ni-Al-Co, ферритов).

Абразивной составляющей могут быть практически все известные абразивные материалы (алмаз, эльбор, корунд, карбид кремния, карбид бора) [105]. В магнитном поле происходит формирование магнитно-реологического инструмента. В результате возможно

создание ФАП практически любой конфигурации с управляемой интегральной твердостью.

В работе [106] отдельно выделен еще один тип ферроабразивных порошков, а именно: порошки однородных материалов, которые обладают магнитными свойствами и достаточно высокой твердостью для осуществления абразивного резания (ферриты, альсифер, альперм). Эти порошки существенно уступают порошкам других типов, однако находят применение, благодаря низкой стоимости. Применение таких порошков ограничено: их используют для обработки материалов с невысокой твердостью (цветные металлы и сплавы, дерево, пластмассы) [107].

Приведенные выше типы ФАП были первыми, которые применялись для МАО, и, несмотря на низкие эксплуатационные свойства, использование их было эффективным, благодаря преимуществам метода.

Намного лучшие эксплуатационные свойства имеют специальные композиционные ферроабразивные порошки, которые можно разделить на несколько типов по структуре [103] (рис. 3.1) или на два класса по способу получения [105].

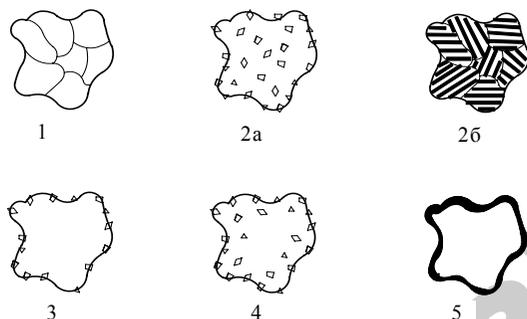


Рис. 3.1. Типы ферроабразивных порошковых материалов

Если пользоваться классификацией по структуре ферроабразивных порошков, предложенной в работе [103], можно выделить первый тип – порошки, изготовленные из более твердых, чем обрабатываемый материал (рис. 3.1, тип 1), например, чугунная дробь, порошки ферросплавов. Ко второму типу относятся специальные порошки, которые состоят из ферромагнитной матрицы и абразивного наполнителя,

распределенного по всему объему частиц. Этот тип можно разделить на два подтипа (рис. 3.1, подтипы 2а, 2б), которые отличаются способом изготовления. Порошки типа 2а изготавливают традиционными методами порошковой металлургии, которые включают смешивание исходных компонентов, брикетирование, спекание, дробление и размол. Такие порошки содержат до 30 % абразивной составляющей, в качестве которой используют оксиды (Al_2O_3 , SiO_2 и др.), карбиды (SiC , TiC , Mo_2C , Cr_3C_2 , ZrC и др.), бориды (TiB_2 , ZrB_2). К материалам, которые изготавливают по такой технологии, относятся МАМ40 и FeTi – первые специальные ферроабразивные порошки.

К подтипу 2б относятся порошки, в которых абразивный компонент образует каркас, – псевдосплавленные и полученные распылением из расплава [105]. Псевдосплавленные порошки имеют в своем составе достаточно твердый абразивный компонент при значительной прочности зерен в целом. Распыленные порошки системы Fe-Si-C с добавками алюминия, бора, переходных металлов имеют высокую прочность частиц, эвтектическое строение и высокодисперсный абразивный компонент. Порошки типа 2 чаще всего используются в качестве инструмента для МАО.

Тип 3 представляет собой порошки с ферромагнитным ядром, покрытые слоем абразива. Стойкость частиц с такой структурой определяется прочностью сцепления абразива с ферромагнитной матрицей. Порошки, близкие к 3-му типу, со структурой 4-го типа имеют абразив с несколькими поверхностями разного состава, расположенными на поверхности частиц ФАП. Такая структура, по мнению авторов [103], должна совмещать преимущества структур 2-го и 3-го типов и в то же время не иметь их недостатков.

Порошки 3-го и 4-го типа получают прокаткой смеси железного порошка и абразива в валках [108], обкатыванием железного порошка в смеси железа и абразива [109] или методами внутреннего азотирования или цементации порошков сплава железа из нитридо- и карбидо-содержащими элементами.

Порошки 5-го типа состоят из магнитного ядра, полностью покрытого абразивным материалом [110]. Такую структуру можно получить при борировании железного порошка. Порошки 5-го типа исключают контакт материала ферромагнитного ядра с обрабатываемыми изделиями.

Классификация специальных порошков для МАО по способу получения позволяет выделить два класса: так называемые керметные и литые ФАП [105, 111]. К керметным порошкам относят гетерогенные композиции на ферромагнитной основе с одной или несколькими керамическими фазами и малой растворимостью фаз. По керметной технологии можно получить порошки со структурой 2-го, 3-го и 4-го типов. К преимуществам данных порошков можно отнести возможность применения сравнительно широкой гаммы абразивных материалов. К литым порошкам относят порошки, полученные распылением или грануляцией из расплава. Они имеют, преимущественно, структуру 2-го типа (из приведенной выше классификации). К преимуществам литых порошков для МАО можно отнести простоту технологического процесса получения, возможность варьирования абразивной составляющей и сравнительно простого управления размером абразивных включений.

В [112] свойства порошков разбиты на 4 категории – химические, геометрические, физико-механические и технологические (специальные). К химическим свойствам относят: материал ферромагнитного и абразивного компонентов, процентное содержание компонентов. К геометрическим – гранулометрический состав, размер абразивного зерна, форму и геометрию частиц и их структуру. Физико-механические свойства – микротвердость структурных составляющих, насыпная плотность порошка и соотношение коэффициентов температурного расширения структурных составляющих. К технологическим относятся: магнитная проницаемость, магнитная восприимчивость, достигаемое удельное массовое снятие, изменение шероховатости поверхности во время МАО и абразивная способность [113]. В предложенной схеме рассмотрены наиболее распространенные ферроабразивные порошки. Рекомендации по выбору пары «обрабатываемый материал – порошок» приведены в [105], но они основаны на адгезионном родстве материалов и не позволяют учесть условия МАО и физические явления, которые возникают при обработке.

Одной из наиболее важных характеристик ферроабразивных порошков является их режущая способность. В [114], а позже в [107] рассмотрена методика ее определения как совокупность показателей: удельного съема материала за единицу времени – характеристика абразивной способности, показателя степени сохранения

абразивной способности во времени и достигаемой шероховатости поверхности. Такой подход дает достаточно полную характеристику ФАП и помогает при выборе порошка.

Выбор типа порошка для обработки конкретной поверхности иногда сопряжен с определенными трудностями. Это связано с тем, что практически не проводились сравнительные исследования работоспособности разных порошков при обработке различных материалов, учитывающей также и схему обработки. Кроме того, многие порошки изготавливали опытными партиями, которые во многих случаях имели нестабильные свойства и потому не были доведены до серийного производства. В табл. 3.1 внесены данные сравнительных результатов исследований эксплуатационных характеристик ферроабразивных порошков [89, 105, 112, 113, 115].

Практически все указанные порошки показывают приблизительно одинаковую способность обеспечения шероховатости обрабатываемой поверхности (достигаемая шероховатость поверхности по параметру $Ra < 0,16$ мкм). При этом массовое снятие в большинстве случаев не играет решающей роли. Наилучшие свойства, имеют порошки, которые содержат в качестве абразивной составляющей карбид титана, что подтверждается результатами, полученными в работах [67, 69, 105, 115, 116, 117].

Исследования различных порошковых материалов для МАО показали, что эффективность обработки в значительной степени зависит от формы зерен ферроабразивного порошка. При МАО большое значение на эффективность обработки оказывает не только материал порошка, но и состояние режущих кромок зерен ФАП. Основными геометрическими параметрами, определяющими режущую способность ферроабразивного зерна, являются форма зерен, число вершин (режущих кромок), углы при вершинах и радиусы округления вершин. У зерен ФАП, как правило, отсутствует правильная геометрическая форма. Среди них встречаются зерна, подобные октаэдру, тригональному трапецоиду, ромбическому тетраэдру, трехгранной призме, шаровидным многогранникам и т. д. Некоторые зерна бывают удлиненными, иглообразными, мечевидными, пластинчатыми.

Форма зерен ФАП зависит от материалов магнитной и абразивной составляющих, технологии его получения, зернистости и других факторов. Можно выделить две типовые формы зерен, которые определяются прежде всего способом их изготовления (рис. 3.2, 3.3):

Основные эксплуатационные свойства известных ферроабразивных порошков

Ферроабразивный порошок (состав)	Метод изготовления	Рекомендуемые к обработке материалы	Результаты практического применения		
			Обрабатываемый материал	Массовый съем, г	Шероховатость по параметру R_a , мкм
1	2	3	4	5	6
23AM40-80 (80 % Fe – 20 % Al_2O_3)	Механическая смесь	Стали, сплавы на медной основе	У10А	6,74	0,08
			Д-16	3,2	0,58
Ж-15КТ (85 % Fe – 15 % TiC)	Керметная технология	Стали, инструментальные твердые сплавы	ШХ15	11,66	0,064
			Р6М5	1,34	0,21
Fe-TiC (80 % Fe – 20 % TiC)	Распыление расплава	Стали, инструментальные твердые сплавы	У10А	2,30	0,68
			Р6М5	1,12	0,37
Fe-ZrC (90 % Fe – 10 % ZrC)	Распыление расплава	Конструкционные, инструментальные стали	У10А	3,48	0,68
Fe-VC (80 % Fe – 20 % VC)	Керметная технология	Стали, цветные металлы и сплавы	ШХ15	14,1	0,045
			Д16	7,3	0,82

Продолжение табл. 3.1

1	2	3	4	5	6
Fe-VC (60 % Fe – 40 % VC) плавненный	Распыление расплава	Стали, цветные металлы и сплавы	ШХ15	15	0,13
			Д-16	8,6	0,6
Cr_3C_2 (80 % Fe – 20 % Cr_3C_2)	Керметная технология	Чугуны, стали	У10А	5,26	0,69
[Fe 93.5 % Si 6.5 %]-TiC	Распыление расплава	Стали	ШХ15	17,48	0,062
Fe-TiC-WC (Fe 80 % – TiC 16,5 % – WC 3,5%)	Распыление расплава	Стали, сплавы на основе меди, алюминия и титана	Сталь 45	3,3	0,06
			T15K6	1,3	0,06
Fe-Nb (Fe 95 % – Nb 5 %)	Распыление расплава	Стали, сплавы на основе меди, алюминия и титана	Сталь 45	3,2	0,1
			T15K6	0,9	0,13
Fe-WC (20)	Керметная технология	Конструкционные, инструментальные стали	У10А	2,74	0,71
Fe-W ₂ B ₅ (20)	Керметная технология	Стали, инструментальные твердые сплавы	У10А	4,52	0,685
			Р6М5	2,3	0,54
Fe-(Al_2O_3 +Ni)	Керметная технология	Цветные металлы и сплавы	Д-16	3,78	0,66
Fe-[Al_2O_3 +(Ni-Co)]	Керметная технология	Цветные металлы и сплавы	Д-16	3,48	0,62

1	2	3	4	5	6
ФАПР-3	Распыление расплава	Стали, титан, чугун	ШХ15	7,6	0,68
			Р6М5	3,4	0,74
Полимам-Т	Распыление расплава	Стали, твердые сплавы	Сталь 45	3,8	0,07
			ВК 6	1,2	0,05
Полимам-М	Распыление расплава	Медь, сплавы на основе меди	Д-16	4,2	0,08
			Т15К6	1,6	0,05
Стружковые отходы стали Р6М5	Механическое измельчение стружки	Конструкционные стали, твердые сплавы	Сталь 45	12,4	0,09
			Р6М5	4,6	0,12
Ферабраз-310	Самораспространяющийся высокотемпературный синтез	Стали, твердые сплавы	У10А	3,8	0,12
Ферабраз-311	Самораспространяющийся высокотемпературный синтез	Стали, твердые сплавы, титановые сплавы	Т15К6	1,9	0,09
П АСМ (Алмазосодержащий порошок)	Керметная технология	Инструментальные стали, твердые сплавы	ВК8	6,9	0,07
			Т15К6	7,2	0,07

– осколочные зерна, полученные в результате размола гранулированных расплавленных материалов, которые имеют практически беспористую структуру. К порошкам с такой структурой можно отнести ПОЛИМАМ-Т «ФЕРОМАП» порошок на основе аморфного железа;

– округлые зерна, полученные в результате расплава, без последующего размола. Примерами таких порошков являются порошки на основе Р6М5, ПОЛИМАМ-М, ЦАРАМАМ.

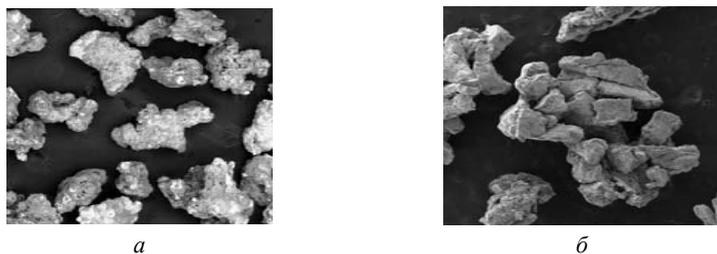


Рис. 3.2. Фотография осколочной формы ферроабразивных порошков, полученных в результате размола ($\times 500$):
а – Fe-TiC; б – порошок на основе алмазов

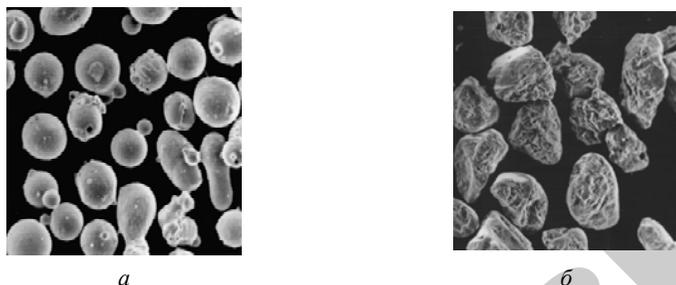


Рис. 3.3. Фотография округлой формы ферроабразивных порошков ($\times 400$):
а – порошок на основе Р6М5; б – порошок ЦАРАМАМ

Как показано на рис. 3.2–3.3, зерна ФАП имеют различную геометрическую форму. Разница в форме зерен порошков одного состава или происхождения обусловлена способом получения, дополнительной обработкой, методом классификации и другими факторами. Необходимо иметь полную информацию про характерные размеры зерен порошков, которые используются в процессе обработки. Это связано

с тем, что при МАО используют порошковые материалы с достаточно широким составом фракций: от 20 до 800 мкм.

Известно, что, при прочих равных условиях, уплотнение ФАП зависит от формы зерен порошков. При этом, чем лучше условия для уплотнения, тем эффективнее процесс МАО. По данным [103, 105] каждая частичка ФАП должна иметь как можно больше различных элементов. При этом важным и является степень свободы отдельных частиц и возможность поворачиваться относительно обрабатываемой поверхности в процессе МАО. Это подтверждает тот факт, что частички округлой формы обеспечивают повышенную полирующую способность за счет выглаживания обрабатываемой поверхности деталей, в сравнении с использованием осколочных зерен и зерен-конгломератов. Для того, чтобы обеспечить возможность поворота частиц ФАП относительно обрабатываемой поверхности, коэффициент внутреннего трения в ферроабразивной «щетке» должен быть незначительным.

Большинство ферроабразивных зерен имеет несколько вершин, образованных тупыми углами, с определенными радиусами их округления. Количество вершин на абразивном зерне, а также их углы и радиусы округления зависят от марки ФАП и его зернистости. Значение углов при вершинах зерен находится в диапазоне $30...130^\circ$, а большая часть углов составляет $100...130^\circ$ [118]. Ферроабразивное зерно, как правило, имеет несколько граней, которые образуют в пересечениях углы при вершинах. В большинстве зерен имеется несколько вершин, каждая из которых характеризуется определенным углом и радиусом округления.

Согласно Федорченко И. М. для придания высоких характеристик любому антифрикционному материалу следует стремиться к созданию композиционного сочетания фаз. Одна из фаз должна быть твердой и износостойкой с низким коэффициентом трения и ее включения должны располагаться в пластичной матрице, воспринимать нагрузку и производить процесс резания, другая – мягкой, пластичной и образовывать матрицу для этих твердых включений.

Установлено [105], что в интервале повышенных температур создается условие для изменения термодинамических потенциалов и образования ФАП как комплексных соединений, пригодных для дальнейшего применения при механической обработке деталей сложного профиля, изготовленных из различных материалов.

На рис. 3.4 представлена микроструктура материала ФАП, эвтектика которой имеет массивное образование, выполняющей роль матрицы, с ярко выраженной тенденцией к окружению включений алмаза чаще всего в виде ограниченных октаэдров. Их микротвердость является аномально высокой и достигает 40 ГПа. Агрегатная микротвердость матрицы составляет 6...7 ГПа. Алмазные зерна являются структурными центрами окружающих их эвтектических участков. При стабилизации устойчивого продвижения эвтектического фронта, образующиеся при кристаллизации матрицы отростки определяют зональное строение и определяет внешний вид колоний. Кристаллам алмаза свойственно в процессе образования частицы относительно слабое реагирование на локальные изменения температуры и концентрации расплава, что объясняется низкой степенью смачиваемости [119].

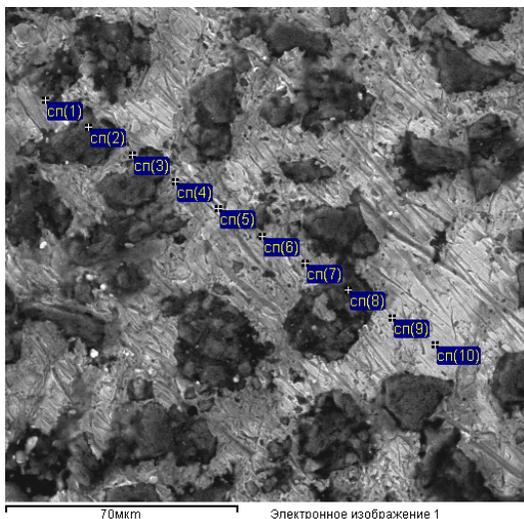


Рис. 3.4. Типовая микроструктура материала ферроабразивных порошков

3.1.1. Исследования ферроабразивных порошков с помощью сканирующей электронной микроскопии

Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) является одним из наиболее универсальных приборов для исследования и анализа микроструктурных характеристик твердых тел. Основной причиной

широкого использования СЭМ является высокое разрешение при исследованиях массивных объектов, достигающее 5...7 нм (50...70 Å), табл. 3.2.

Таблица 3.2

Спектральный анализ структуры ФАП

Спектр	C	Ni
сп(1)		100,00
сп(2)	100,00	
сп(3)	59,92	40,08
сп(4)		100,00
сп(5)		100,00
сп(6)		100,00
сп(7)	64,33	35,67
сп(8)	98,48	1,52
сп(9)		100,00
сп(10)		100,00

Изображение в СЭМ формируется тонким пучком электронов, который сканирует поверхность образца, вызывая вторичную эмиссию. В результате взаимодействия возникают вторичные электроны, отраженные электроны, характеристическое рентгеновское излучение, оже-электроны и фотоны различных энергий. Они образуются в определенных объемах (областях генерации внутри образца) и используются для измерения многих его характеристик (состава, топографии поверхности, кристаллографической ориентации и т. д.), рис. 3.5. Вторичные электроны улавливаются специальными датчиками, сигнал от которых подает после усиления на модулятор электронно-лучевой трубки. Величина сигнала зависит, прежде всего, от особенностей рельефа поверхности, которую обегает электронный луч. Изменение силы сигнала приводит к изменению яркости свечения экрана и формированию изображения изучаемой поверхности. Разрешение 5...7 нм и большая глубина резкости позволяют выявить структурные элементы размером 0,2...1 мкм.

Исследование морфологии поверхности и поперечной структуры материала проводили на сканирующем электронном микроскопе «Miga» фирмы «Tescan» (Чехия) в режиме отраженных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ. Погрешность определения геометрических размеров методом СЭМ составляет 5 %.

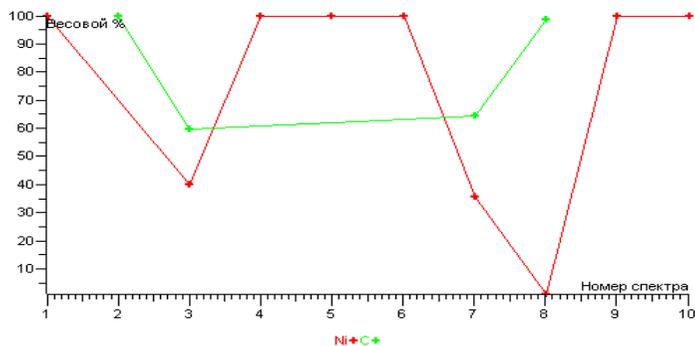


Рис. 3.5. Микрорентгеноструктурный анализ ФАП

Микроскоп оснащен детекторами вторичных электронов SE и обратно отраженных электронов BSE, которые позволяют проводить исследование образцов в двух режимах.

При съемке образцов в режиме вторичных электронов (SE), контраст на изображении создается за счет отражения электронного пучка от поверхности образца. В случае исследования при помощи детектора обратно отраженных электронов (BSE), контраст на картинке создается за счет разности «усредненных» атомных номеров.

3.1.2. Исследование ФАП методом микрорентгеноспектрального анализа

Метод микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) основан на возникновении характеристического рентгеновского излучения при взаимодействии сфокусированного электронного пучка с образцом. Для каждого химического элемента характеристическое рентгеновское излучение имеет строго определенную длину волны и энергию. При регистрации спектр рентгеновского излучения может раскладываться по длинам волн (спектрометр волновой дисперсии), либо по энергиям (спектрометр энергетической дисперсии), табл. 3.3.

В комплекте с СЭМ применялся спектрометр энергетической дисперсии.

При использовании его для элементного анализа структуры можно проводить качественную и полуколичественную идентификацию структурных составляющих материала (рис. 3.6). Объем

области генерации рентгеновского излучения в значительной мере определяется рассеиванием и глубиной проникновения электронов. Область генерации на порядок превышает диаметр зонда и имеет размер порядка 0,1...0,5 мкм при напряжении 20 кВ в зависимости от материала образца.

Таблица 3.3

Химический анализ структуры ФАП

A. Diamond	
Formula	C
Pdf Number	75-219
Concentration	8
B. Nickel, syn	
Formula	Ni
Pdf Number	4-850
Concentration	68
C. Awaruite	
Formula	Fe Ni ₃
Pdf Number	3-419
Concentration	10
D. Kamacite	
Formula	(Fe, Ni)
Pdf Number	37-474
Concentration	14

«INCA 350» позволяет регистрировать рентгеновское излучение элементов от В до U. Минимальный предел обнаружения элемента – 0,5 %. Относительная погрешность при работе в режиме количественного анализа составляла 3...5 %. Ошибка определения элементов с атомным номером 30 и больше составляет 1 %, с атомным номером от 12 до 30 – соответственно 4...8 %. Область возбуждения рентгеновского излучения 0,5 мкм. Съемка проводилась при ускоряющем напряжении 20 кВ. Методика проведения количественного анализа состоит из следующих этапов:

- проведение количественной нормализации детектора по образцу-эталоны;
- проведение непосредственно анализа образца;
- обработка результатов анализа с помощью программного обеспечения системы «INCA 350».

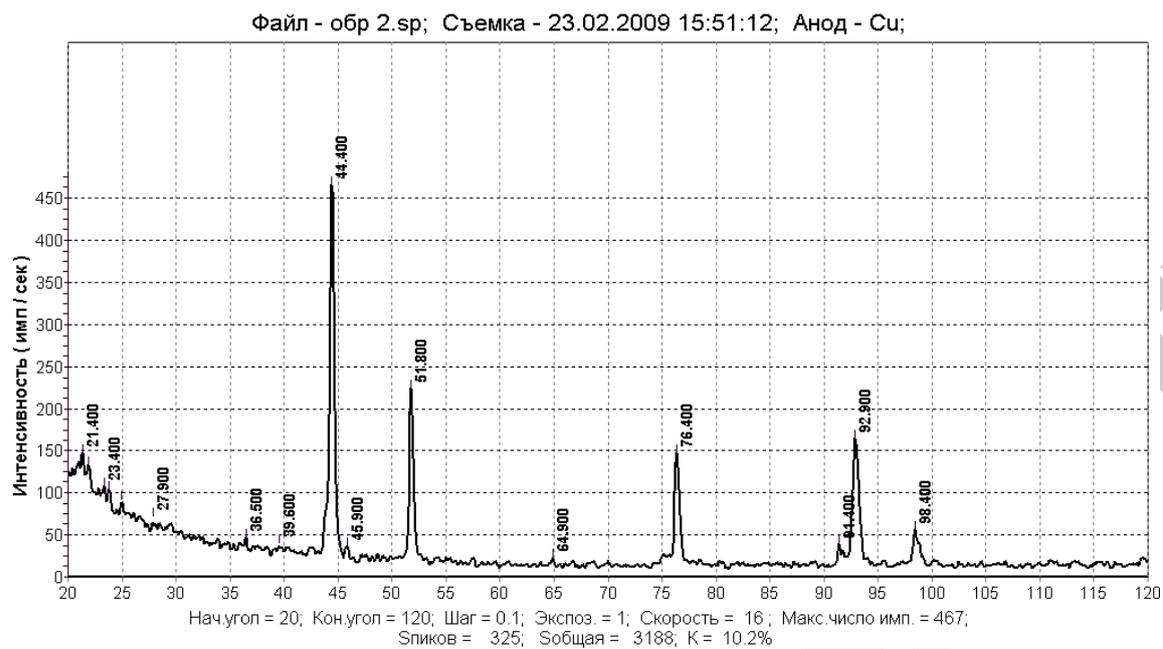


Рис. 3.6. Качественная и полуколичественная идентификация структурных составляющих ФАП

3.2. Режущие свойства ферроабразивных порошков

3.2.1. Порошки на основе нитридов титана

В работе [120] показана перспективность использования в качестве ФАП тугоплавких соединений типа карбидов и нитридов. Их достоинствами являются образование диффузионных зон при $T = 1470 \dots 1570$ К, которые создают прочную химическую связь между абразивом и ферромагнитной матрицей, а также высокая теплопроводность. Это уменьшает локализацию тепла на границе ФАП – обрабатываемая поверхность и обеспечивает повышение качества деталей. Однако современная технология изготовления ФАП достаточно сложна, что значительно повышает себестоимость продукции. Также выход годной фракции (100...350 мкм) при производстве керметов, наиболее широко применяемых в настоящее время, не превышает 40...60 %. Общим недостатком практически всех ФАП является то, что в их составе имеется свободный углерод в виде графита, который загрязняет обработанную поверхность деталей. Это объясняется трудностью регулирования количеством углерода в процессе спекания ФАП.

Используемые материалы:

1. СОТС СинМА-1 – продукты конденсации жирных кислот с алканоламинами и калиево-алканоламиновыми мылами.

СинМА-2 – продукты этерификации указанных выше компонентов.

Значение pH 3 % раствора в воде – 8,5...10.

2. Лигносульфонат – анионноактивные ПАВ.

3. Сталь ШХ15 ГОСТ 801–78, твердость – 61...65 HRC.

4. Дуралюмин Д16 ГОСТ 21488–76.

5. Латунь Л63 ГОСТ 15527–70.

6. Медь МЗ ГОСТ 859–78.

7. Порошковый сплав Ж15КТ (15 % TiC).

8. Порошковый сплав Fe-Ti (3 %).

9. Травитель Марбле: HCl – 50 мл, CuSO₄ – 2 г, C₂H₅OH – 50 мл, H₂O – 50 мл.

Представленные к испытаниям образцы – втулки $D \times d \times l = 36 \times 32 \times 32$ мм. Исходная шероховатость – Ra_1 1,2...1,6 мкм при испытании СОТС и Ra_1 0,6...0,84 мкм – при испытании ФАП.

Выходные параметры процесса МАО – величина массового съема G (г) и шероховатость после обработки Ra_2 (мкм).

С учетом технико-экономических факторов для промышленного производства ФАП на основе оксидов перспективно использовать метод литья. Были исследованы ФАП на основе оксидов V и Ti и их результаты представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4.

Производительность и качество обработанной поверхности материалов в зависимости от типа ФАП

Тип ФАП	Обрабатываемые материалы					
	Дуралюмин Д16		латунь Л63		медь МЗ	
	G , г	Ra_2 , мкм	G , г	Ra_2 , мкм	G , г	Ra_2 , мкм
Ж15КТ 100/160 мкм	0,658	0,08	1,293	0,09	1,516	0,08
Fe-V 4 % 100/160 мкм	0,656	0,05	1,267	0,05	1,243	0,06
Fe-V 6 % 100/160 мкм	0,597	0,04	1,791	0,04	0,954	0,05
Fe-V 8 % 100/160 мкм	0,396	0,06	1,445	0,05	0,725	0,06
Fe-Ti 3 % 100/160 мкм	0,099	0,04	0,328	0,04	0,385	0,05

Установлено, что для данной зернистости ФАП на основе оксидов V (4 %, 6 %, 8 %) характерно понижение шероховатости после обработки по сравнению с Ж15КТ. ФАП на основе оксидов Ti (5 %) имеет более низкие величины массового съема, но отличается высокими полирующими свойствами. Как видно на рис. 3.7, а, поверхность частиц ФАП имеет многогранную неправильную форму. На ней находится пленка оксидов, имеющая толщину 5...20 мкм. Микротвердость этой пленки колеблется от 350 до 1100 $H_{\mu}(20)$, что свидетельствует о непостоянстве ее химического состава. Вместе с тем этот вид ФАП обладает ферромагнитной матрицей, структура которой состоит из малоуглеродистого мартенсита. Альтернативой технологии изготовления ФАП на основе карбидов служит использование плазменного напыления нитридов на сплав Fe-Ti в среде азота.

Данная технология обеспечивает более полное сгорание углерода и характеризуется образованием TiN и TiC на поверхности ферромагнитной матрицы. Результаты испытаний приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Производительность и качество обработанной поверхности материалов в зависимости от ФАП на основе нитридов и карбидов титана

Тип ФАП	Обрабатываемые материалы					
	Сталь ШХ15		Медь МЗ		Латунь Л63	
	Результаты обработки					
	G, г	Ra, мкм	G, г	Ra, мкм	G, г	Ra, мкм
Ж15КТ 200/315 мкм	0,658	0,08	1,293	0,09	1,516	0,08
Fe-TiN-TiC 200/315 мкм	0,656	0,05	1,267	0,05	1,243	0,06

Главным результатом исследований является снижение загрязнения обработанной поверхности. На рис. 3.7, б, показана поверхность этих ФАП, которая обладает более развитой микроструктурой, чем, например, ФАП на основе оксидов V и Ti, рис. 3.7, а, что приводит к повышению эффективности процесса резания. Наиболее целесообразно применять эти виды ФАП для декоративной обработки изделий.

Для поверхностного упрочнения порошков системы железо-титан-углерод использовали азотсодержащую плазму и установку УПУ-3Д. Порошки с размером частиц 100...200 мкм струей плазмы на основе технического азота пропускали через плазмотрон при следующих показателях режима его работы: сила тока – 200 А, напряжение – 30 В, расход плазмообразующего газа – 3,0 м³/ч, производительность по порошку – 4,5 кг/ч. Распыляемые порошки направляли на металлическую поверхность, на которой они кристаллизовались и осыпались в приемное устройство с водой. После сушки порошков производили оценку их магнитно-абразивных свойств. Изучение формы и типологии порошковых частиц показало, что при распылении в воде частицы имеют более развитую поверхность и в два раза более высокую твердость (до 9000 МПа), чем при распылении на воздухе.

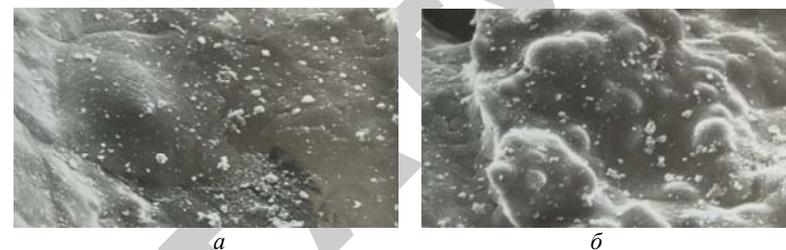


Рис. 3.7. Фотография частиц ФАП (×100):

а – на основе оксидов титана; б – на основе нитридов и карбидов титанов

На рис. 3.8 показаны дефекты поверхности стали ШХ15 после шлифования в виде прижога поверхности и структуры поверхностного слоя со сплошным залеганием аустенита, которые в процессе МАО устраняются путем размерного съема материала на требуемую глубину, составляющую диапазон от 10 до 100 мкм.

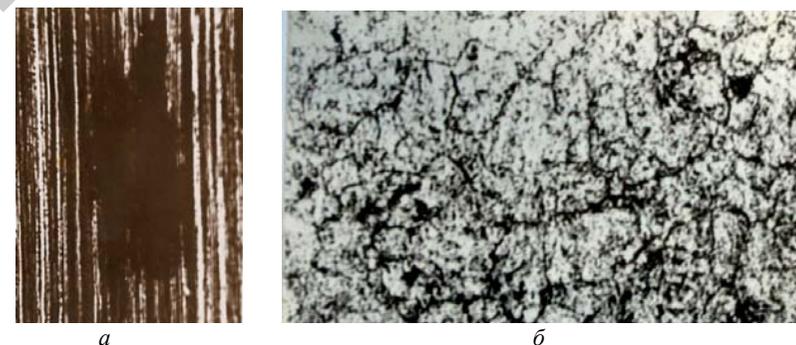


Рис. 3.8. Дефекты поверхности стали ШХ15 после шлифования:

а – прижог поверхности, увеличение ×150; б – структура поверхностного слоя со сплошным залеганием аустенита, увеличение ×250

На рис. 3.9 представлены фотографии поверхности стали ШХ15 до и после обработки методом МАО с использованием ФАП Ж15КТ и СОТС СинМА-1 (модифицированная), 2 % водный раствор, при следующих режимах: величина магнитной индукции, $B = 1$ Тл; скорость вращения детали, $V_{вр} = 1$ м/с; скорость осцилляции, $V_{осц} = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции, $A = 2$ мм; коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_3 = 1$; размерность ФАП, $\Delta = 100/160$ мкм (нижний и верхний пределы

размеров ФАП); величина рабочего зазора, $\delta = 1$ мм; время обработки, $t = 60$ с. Предшествующая операция перед МАО – шлифование.



Рис. 3.9. Фотографии поверхности стали 30X15 после обработки:
а – шлифование; б – МАО, $\times 100$

Поскольку величина размерного съема при МАО составила 30...40 мкм, а удельного массового – от 4,03 до 5 мг/см²·мин (табл. 3.6), то, как видно на рис.3.9, б, происходит устранение дефектного слоя обрабатываемого материала и осуществляются повышение микротвердости поверхностного слоя.

Таблица 3.6

Зависимость производительности обработки от содержания лигносульфоната в РТС

Вид РТС	Удельный массовый съем, ΔG , мг/см ² ·мин			
	Сталь 30X15	Дуралюмин Д16	Латунь Л63	Медь М3
1	2	3	4	5
СинМА-1 (базовая) Ж15КТ	5,64	7,25	24,22	21,2
СинМА-1 (модифицированная) Fe-TiN-TiC				
1 (5...7,5 %)	4,03	7,56	28,31	15,08

Окончание табл. 3.6

(7,5...10 %)	4,72	11,53	26,47	25,61
3 (10...12,5 %)	5,83	8,36	25,36	26,06
4 (12,5...15 %)	7,17	11,69	25,58	31,28
5 (15...17,5 %)	7,69	13,06	25,03	42,11
6 (17,5...20 %)	5,67	8,97	28,67	25,47
СинМА-2 (базовая) Ж15КТ	5,33	8,17	23,61	30,56
СинМА-2 (модифицированная) Fe-TiN-TiC				
1 (5...7,5 %)	5,83	15,11	28,62	27,72
2 (7,5...10 %)	6,22	13,67	33,92	28,31
3 (10...12,5 %)	6,69	18,28	35,31	30,69
4 (12,5...15 %)	6,83	12,39	35,11	32,22
5 (15...17,5 %)	8,47	10,47	35,92	41,69
6 (17,5...20 %)	7,22	8,14	35,69	40,14

Согласно табл. 3.7 и 3.8, при использовании СинМА-1 (базовая) и СинМА-1 (модифицированная) производится уменьшение шероховатости, что способствует формированию оптимального микро-рельефа, наиболее близкого к приработанному.

Представленные к испытаниям образцы – втулки $D \times d \times l = 40 \times 30 \times 50$ мм.

Исходная шероховатость – Ra_1 1,6...2,0 мкм при испытании СОТС и Ra_1 0,4...0,6 мкм – при испытании ФАП.

Выходные параметры процесса МАО – величина массового съема G (г) и шероховатость после обработки Ra_2 (мкм).

Таблица 3.7

Зависимость шероховатости после обработки от вида РТС

Вид РТС	Достигаемая шероховатость поверхности, Ra_2 , мкм			
	Сталь ШХ15	Дуралюмин Д16	Латунь Л63	Медь М3
СинМА-1 (базовая) Ж15КТ	0,21	0,24	0,17	0,16
СинМА-1 (модифицированная) Fe-TiN-TiC	0,13	0,16	0,11	0,12
СинМА-2 (базовая) Ж15КТ	0,22	0,16	0,26	0,19
СинМА-2 (модифицированная) Fe-TiN-TiC	0,15	0,12	0,18	0,13

Таблица 3.8.

Производительность и качество обработанной поверхности материалов в зависимости от ФАП на основе нитридов и карбидов титана

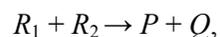
Тип ФАП	Обрабатываемые материалы					
	Сталь ШХ15		Медь М3		Латунь Л63	
	G, г	Ra_2 , мкм	G, г	Ra_2 , мкм	G, г	Ra_2 , мкм
Ж15КТ 200/315 мкм СинМА-1 (модифицированная)	0,715	0,06	2,05	0,07	1,985	0,05
Fe-TiN-TiC 200/315 мкм СинМА-1 (базовая)	0,786	0,04	2,16	0,04	1,632	0,03

3.2.2. Порошки на основе боридов титана TiB_2

Для используемых ФАП в качестве абразивного компонента применяются в основном тугоплавкие соединения на основе карбидов, оксидов, боридов и силицидов. Поэтому главными достоинствами СВС-метода являются отсутствие больших энергозатрат при достижении высоких температур, простота оборудования, быстрое протекание реакции [121, 122]. Оригинальность метода заключается в структурной макрокинетике при наличии фазовых превращений, учитывающей прямые и обратные связи между химическими реакциями и процессами переноса. Особенность СВС-метода характеризуется тем, что исходные, конечные, а иногда и промежуточные реагенты находятся в твердом состоянии даже при высоких температурах горения. Следует отметить, что при исследовании ФАП на основе СВС-метода в качестве абразивного компонента ранее применялись оксид алюминия Al_2O_3 и нитрид кремния Si_3N_4 . Однако эффективность их использования при обработке стали ШХ-15 ГОСТ 801–78 оказалась более низкой в отличие от обработки цветных сплавов (дуралюмин Д16 ГОСТ 21488–76 и медь М3 ГОСТ 859–78). На основании вышеизложенного в качестве абразивного компонента был выбран TiB_2 и проведены соответствующие его испытания.

Испытания были проведены на установке СФТ 2.150.00.00.000. Параметры и режимы МАО: величина магнитной индукции, $B = 0,9$ Тл; скорость резания, $V_p = 1,2$ м/с; скорость осцилляции, $V_o = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции, $A = 1$ мм; коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_z = 1$; величина рабочего зазора, $\sigma = 1$ мм; размерность зерна ФАП, $\Delta = 160/200$ мкм; время обработки, $t = 90$ с. Измерение величины магнитной индукции в рабочем зазоре производилось при использовании тесламетра Т-3. Образцами для испытаний служили втулки размерами $D \times d \times l = 36 \times 29 \times 32$ мм, материал – сталь ШХ-15 ГОСТ 801–78, 55...60 HRC. Исходная шероховатость поверхности $Ra_1 = 0,8...1,2$ мкм. СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 5 %-й водный раствор. В качестве базового использовался Fe-TiC ТУ 88-147.002–75.

Реакция прямого синтеза из элементов с образованием тугоплавких соединений протекает следующим образом:



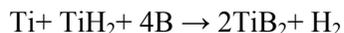
где R_1 – Ti, Zr, Hf, Nb, Ta;

R_2 – B, C, N, S;

P – конечный продукт (бориды, карбиды и т. д.);

Q – тепловой эффект реакции.

Данные тугоплавкие соединения обладают необходимой энергией связи между атомами, а их многокомпонентное синтезирование путем образования объемного вещества в ходе протекания процесса изготовления указывает на возможность создания экономичных ФАП для МАО. Однако основными трудностями изготовления являются высокая дисперсность реагентов (50...100 мкм), тепловой эффект реакции и реализация полноты тепловыделения. Это связано с тем, что традиционная структура ФАП состоит из абразивного (карбиды, оксиды и т. п.) и магнитного (железо, никель) компонентов. Температура процесса литья при изготовлении ФАП составляет диапазон 1500...1600 К, в то время как при СВС-методе она равняется 2300...3800 К, что характерно для высокоэкзотермических реакций. Поэтому главная проблема прикладного характера (именно изготовления ФАП) заключалась в расчете волны горения, установлении ее связи со структурой конечного продукта и определении пределов «твердопламенного горения». Как правило, СВС-продукты характеризуются высоким содержанием основной фазы и низкой концентрацией не прореагировавших компонентов, но в данном случае трудность состояла в определении неизотермического фильтрационного переноса газов по порам твердого вещества. Принцип фильтрационного горения осуществляется путем синтеза с участием следующих соединений:



и восстановительной реакции



Установлено, как можно получить абразивный компонент, следующий этап заключался в образовании ферромагнитного компонента и его соединений. Это было реализовано путем применения порошков, как чистого железа, так и его оксида. Данные порошки представляют собой одновременно и катализатор следующей реакции:



где α , β_i – коэффициенты.

Продукт представляет собой бесформенный спек, который затем перерабатывается в порошок механическим и (или) химическим способом.

На рис. 3.11, а показана поверхность ФАП, полученная в результате рекристаллизации при использовании СВС-метода и являющаяся режущим контуром. По сравнению с поверхностью порошка, изготовленной по технологии литья и приведенной на рис. 3.11, б, микрорельеф после СВС-метода характеризуется большей шероховатостью, а производительность обработки находится на одном уровне (табл. 3.9).

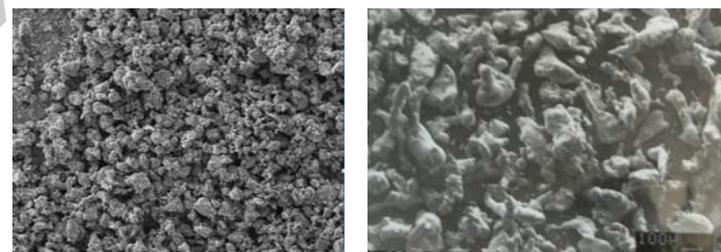


Рис. 3.11. Фотографии поверхности частиц ФАП $\times 100$ на основе: а – СВС-метода; б – полученного методом литья

Таблица 3.9

Производительность МАО и шероховатость поверхности при использовании различных ФАП

ФАП	Массовый съем G , мг	Шероховатость поверхности Ra_2 , мкм
Fe-TiB ₂	250...290	0,1...0,2
Fe-TiC	240...270	0,15...0,3

Данное обстоятельство объясняется более низким показателем магнитных свойств ФАП на основе СВС-метода ввиду особенностей технологии изготовления. Проверка была осуществлена баллистиче-

ским методом на установке мод. БУ-3А и показала, что магнитная проницаемость ФАП на основе СВС-метода на 20 % меньше, чем у Fe-TiC. Это вызывается большим содержанием абразивного компонента в общем массовом составе порошка. Таким образом, на основании проведенных испытаний установлено, что ФАП на базе СВС-метода является достаточной и полноценной заменой Fe-TiC при обработке методом MAO закаленных сталей.

В результате проведенных исследований установлено, что применение ФАП, полученного СВС-методом, отличается более низкой себестоимостью изготовления по сравнению с традиционно используемым методом при MAO термо обработанных (> 50 HRC) сталей.

3.2.3. Порошки на основе белого износостойкого чугуна

Подбор легирующих элементов, режимов распыления, а также различных видов последующей термической обработки позволяет избирательно влиять на структуру, форму и размеры частиц. Оптимальными магнитными и абразивными свойствами обладают полученные из расплавленного состояния ФАП, структура частиц которых представляет собой мартенситную или ферритную матрицу с включениями карбидов. При изготовлении литых ФАП важен правильный выбор карбидообразующего элемента.

Материалы для MAO и износостойкие материалы имеют много общего: они работают в режиме трения, а состоять, по возможности, должны из существенно отличающихся по твердости пластичной металлической матрицы и равномерно распределенных в ней абразивных включений, например, карбидов или боридов.

Современные белые износостойкие чугуны представляют собой отдельную группу промышленных сплавов, при затвердевании которых формируется карбидная фаза. Установлено, что высокая стойкость в условиях абразивного изнашивания типа микрорезания белых хромистых чугунов объясняется наличием в структуре значительного количества (20...50 %) твердых карбидных включений. Количество, тип и твердость карбидной фазы определяется содержанием и соотношением углерода и хрома. Для достижения максимальной износостойкости и удовлетворительной прочности чугуна

содержание углерода должно составлять 2,8...3,5 %, а хрома – 12...18 % [123, 124].

Для исследования были выбраны порошки, полученные распылением водой расплавов высокохромистого чугуна, содержащего 2,7...3,5 % C, 12...14 % Cr, 3,8...5,2 % V, 2,5...3,5 % Si, 1,0...1,2 % B. Особенностью его структуры является наличие карбидных фаз двух типов.

Сплавы эвтектического типа, обладающие повышенной жидкотекучестью и стойкостью к окислению предпочтительнее получать путем распыления расплава водой и последующего рассева с выделением нужных фракций.

Металлическая основа ФАП состоит из мартенсита и остаточного аустенита. Остаточный аустенит в этом сплаве метастабилен. В процессе MAO синергетическое воздействие магнитного поля, температурного фактора, упругих и пластических деформаций приводит к частичному распаду аустенита и повышению твердости поверхностного слоя порошка. В данной работе исследовали влияние температуры отпуска и длительности нагрева на структурные изменения и твердость ФАП. Повышение температуры нагрева до 820 К приводит к росту твердости до 7900 МПа, что оказывает положительное влияние на величину съема (табл. 3.10) и связано с частичным превращением остаточного аустенита в мартенсит и увеличением количества карбидной фазы.

Зерна ФАП в процессе полирования контактируют с поверхностью детали разными участками своего контура, отличающимися твердостью и геометрией, и, следовательно, разной способностью производить резание. Структура ФАП, получаемых из расплавов, представляет собой матрицу на основе железа с распределенными в ней включениями тугоплавких карбидов VC и (Cr,Fe)₇C₃. (рис. 3.12). Ввиду высоких значений поверхностного натяжения металлических расплавов, образующиеся из железа частицы порошка в основном приобретают сферическую форму (рис. 3.13).

Абразивные зерна, внедряясь в обрабатываемый материал, осуществляют своими микровыступами процесс резания поверхностного слоя. Повышению режущей способности ФАП должно способствовать обнажение из более мягкой ферромагнитной основы зерна (матрицы) абразивных компонентов. Этого можно

достигнуть путем химического травления ФАП. Химическое травление было использовано для повышения абразивных свойств порошка. В качестве травителя использовали 25 %-й раствор серной кислоты в воде. Продолжительность травления составляла 180 мин. В работе также исследовали возможность повышения режущей способности ФАП травлением порошка царской водкой. Съем металла травленным порошком с образцов разных сплавов больше, чем порошком базового состава.

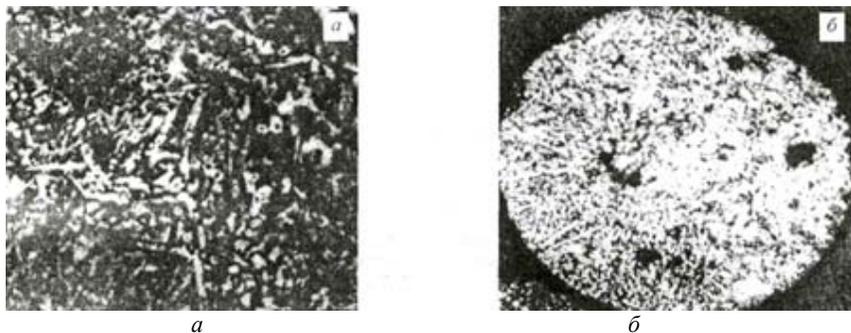


Рис. 3.12. Микроструктура (а) и форма (б) частиц ФАП на основе износостойкого чугуна $\times 200$:
а – микроструктура; б – форма

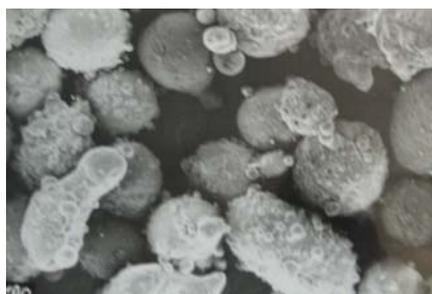


Рис. 3.13. Фотография частиц порошка на основе износостойкого чугуна $\times 100$

Например, микротвердость ферромагнитной матрицы находится в пределах – 6310...6350 МПа, а первичных карбидов – 12 150...12 400 МПа, а после МАО стали ШХ15 в течение 2 мин

эта микротвердость возросла до 7000...7100 МПа. Первичные и эвтектические карбиды белых хромистых чугунов устойчивы к высокотемпературному нагреву, что позволяет изменять структуру неметаллической основы в процессе термической обработки при практически неизменном количестве и расположении включений карбидов. Отпуск при температуре 470 К не влияет на структуру и твердость ФАП. При увеличении продолжительности отпуска до 60 мин начинается распад мартенсита, что снижает твердость. Повышение режущей способности ФАП способствует обнажению из более мягкой ферромагнитной матрицы абразивных компонентов. Это достигается путем химического травления ФАП царской водкой (смесь соляной и азотной кислот). Исследование проводили на установке СФТ.2.150.00.00.000 при следующих режимах: скорость резания, $V_p = 1 \dots 1,5$ м/с; магнитная индукция, $B = 0,8 \dots 1,2$ Тл; амплитуда осцилляции, $A = 2$ мм; величина рабочего зазора, $\delta = 1 \dots 3$ мм. В качестве образцов использовали втулки $D \times d \times l = 36 \times 29 \times 32$ мм, сталь – ШХ-15, твердость, 52...62 HRC, и $D \times d \times l = 36 \times 34 \times 32$ мм, дуралюмин – Д-16. Исходная шероховатость поверхности данных образцов составляет $Ra_1 1,6 \dots 2,5$ мкм. СОТС СинМА-1 применялись как базовые, так и модифицированные. Результаты исследования с использованием СОТС СинМА-1 (модифицированные) представлены в табл. 3.11.

Следует отметить отсутствие визуально наблюдаемого загрязнения поверхности деталей и рабочей зоны в отличие от применяемых в настоящее время ФАП Ж15КТ (ТУ 6-09-03-483–81) и ПолиММ-Т (ТУ 06459–81). Сферическая форма зерен обеспечивает высокую стойкость ФАП в процессе резания по причине их постоянной ориентации.

Распыленные порошки на основе высокохромистого белого чугуна обладают высокими экологическими характеристиками. На обработанных поверхностях изделий практически не остается следов загрязнений, что объясняется отсутствием свободного углерода. Такие порошки характеризуются постоянным повышением твердости ферромагнитной матрицы в процессе обработки, что приводит к их высокой износостойкости и прочности абразивной и магнитной составляющих. Разработанный ФАП является перспективным материалом, как для полирования, так и для процесса абразивного резания.

Таблица 3.10

Влияние различных видов обработки ФАП на параметры шероховатости и съема металла

Режим обработки ФАП	Параметры качества	Марка обрабатываемого материала			
		Д16 ГОСТ 21488–76		ШХ-15 ГОСТ 801–78	
		Длительность полирования, с			
		60	180	60	180
ФАП на основе износостойкого чугуна	Ra , мкм G , мг	0,3...0,4 45	0,25...0,4 150	0,15...0,2 50	0,1...0,15 180
То же, отжиг при $T = 820$ К	Ra , мкм G , мг	0,35...0,45 70	0,3...0,4 200	0,15...0,25 100	0,1...0,2 250
То же, травление царской водкой	Ra , мкм G , мг	0,4...0,5 70	0,3...0,4 200	0,2...0,25 50	0,1...0,3 250

Таблица 3.11

Влияние различных видов РТС на производительность и качество процесса МАО

Вид РТС	Параметры обработки	Марка обрабатываемого материала			
		Д 16 ГОСТ 21488–76		ШХ 15 ГОСТ 801–78	
		Длительность полирования, с			
		60	180	60	180
ФАП Порошки на основе износостойкого чугуна СОТС-СинМА-1 (модифицированная)	G Ra_2	55 0,25...0,35	180 0,25...0,35	75 0,10...0,15	230 0,05...0,13
То же, отжиг при $T = 820$ К СОТС-СинМА-1 (модифицированная)	G Ra_2	80 0,30...0,40	220 0,25...0,35	110 0,13...0,22	275 0,05...0,15
То же, травление царской водкой СОТС-СинМА-1 (модифицированная)	G Ra_2	85 0,3...0,4	215 0,2...0,3	65 0,1...0,15	275 0,05...0,26

Следует отметить отсутствие визуального наблюдаемого загрязнения поверхности деталей в самой рабочей зоне в отличие от применяемых в настоящее время Ж15КТ и ПолиМММ-Т. Сферическая форма частиц ФАП обеспечивает также высокую стойкость при транспортировании и в процессе хранения.

3.2.4. Порошки на основе аморфных и металлических сплавов

Развитие машиностроения и решение связанных с этим проблем, как общего, так и частного порядка требуют использования системного подхода с целью получения требуемого уровня показателей качества производственного процесса. В настоящее время ведутся работы, направленные на создание новых видов материалов для твердотельной электротехники, медицинской и аэрокосмической промышленности, восстановления деталей машин. Как известно, финишная обработка изделий из таких материалов занимает до 40 % в общей доле трудоемкости механической обработки. Поэтому одной из первоочередных задач, стоящих перед технологией машиностроения, как в области научного обеспечения, так и в промышленном производстве является снижение этой доли путем интенсификации традиционных и разработки новых высокоэффективных методов. Однако каждому из них сопутствует определенный набор из «узких мест», что уменьшает эффективность использования указанных выше методов для получения заданных качественных и эксплуатационных показателей. Как известно производительность любого процесса механической обработки находится на «лезвии индустриального ножа» [21]. Поэтому введение в рабочую зону концентрированного потока энергии в виде электрических разрядов, магнитного, плазменного и температурного воздействия позволяет интенсифицировать удаление требуемого слоя материала. Реализация наложения этого концентрированного потока представляет собой определенную научно-техническую проблему, решение которой позволяет повысить выходные показатели процесса.

Поэтому одним из перспективных направлений создания ФАП как однородных и одновременно с высокой степенью магнитных и режущих свойств является использование аморфных металлических

сплавов [125]. Данные сплавы не имеют кристаллического строения, и технология их получения связана со сверхскоростной закалкой из жидкого или газообразного состояния в твердое. Следствием такой аморфной структуры являются нетрадиционные для подобных кристаллических сплавов магнитные, механические и коррозионные свойства. Например, наряду с таким уровнем коэрцитивной силы, который относится к магнитомягким материалам диапазон гистерезисных потерь вместе с тем намного ниже, чем у кристаллических сплавов. Данные материалы обладают исключительно высокой механической твердостью и пределом прочности при растяжении. Также следует указать на крайне низкий коэффициент теплового расширения, что позволяет осуществлять сохранение режущих свойств в течение продолжительного периода контактирования инструмента и поверхности детали. Размерность зерен ФАП, используемая в процессе MAO в зависимости от вида обработки находится в пределах 63...630 мкм и более. Склонность к образованию аморфного металлического сплава определяется кинетикой процесса зарождения или кинетикой ранних стадий роста кристаллов и поскольку скорость закалки ($\sim 10^6$ К/с) протекает быстро, то теплота конденсации эффективно отводится на данный момент только через тонкую пленку. Поэтому полностью аморфные металлические расплавы представляют собой фольгу толщиной 10...20 мкм, полученную методами сплитинга и (или) спиннингования или ленты той же толщины путем непрерывной расплавки состава. Также подавление кристаллизации должно быть обеспечено отводом теплоты через вещество, которое характеризуется низкой теплопроводностью и теплообменом образца с охлаждающей средой посредством передачи теплоты и конвекции. Отсюда возникает ограничение размеров образцов, и исходным материалом для создания ФАП является лента, полученная путем закалки из расплава. Измельчение ленты производилось на шаровой мельнице до получения порошка с размерами частиц 10...20 мкм. Форма этих частиц в случае измельченного порошка представляет собой неправильные многогранники (рис. 3.14).

В качестве оборудования использовался станок СФТ 2.150.00.00.000. Образцами служили заготовки из стали ШХ-15 ГОСТ 801-78, 58...62 HRC, меди МЗ ГОСТ 859-78, дуралюмина Д16 ГОСТ 21488-76.

В качестве базового ФАП применялся Ж15КТ, размер зерна, $\Delta = 100/315$ мкм, СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5 %-й водный раствор. Параметры и режимы MAO: магнитная индукция, $B = 1$ Тл; величина рабочего зазора, $\delta = 1$ мм; скорость резания, $V_p = 1,5$ м/с; скорость осцилляции, $V_0 = 0,1$ м/с; время обработки, $t = 60$ с; коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_z = 1$; амплитуда осцилляции, $A = 1$ мм. Исходная шероховатость всех образцов до обработки MAO составляет $Ra_1 = 1 \dots 1,6$ мкм, выходными показателями являлись достигаемая шероховатость Ra_2 , мкм и величина массового съема материала, G , мг. Степень очистки образцов оценивалась органолептическим способом.



Рис. 3.14. Фотография частиц ФАП на основе аморфного металлического сплава, $\times 100$

Результаты исследований представлены в табл. 3.12. Анализ этих полученных результатов показывает, что абразивная способность ФАП на основе аморфных металлических сплавов имеет пониженные показатели в сравнении с Ж15КТ для легированной стали ШХ-15. Это объясняется меньшими по значению величинами физико-механических характеристик типа твердости, что характерно для абразивных материалов. Однако применение таких ФАП для финишной обработки цветных сплавов показало, что эффективность их использования является достаточной.

Таблица 3.12

Обрабатываемость материалов различными видами ФАП

Вид ФАП	Обрабатываемый материал	Достижимая шероховатость, Ra_2 , мкм	Величина массового съема, G , мг
Порошок на основе аморфного металлического сплава	M3	0,08	250
	D16	0,1	260
	ШХ15	1,2	180
Ж15КТ	M3	0,11	340
	D16	0,12	290
	ШХ15	0,07	540

3.2.5. Порошки на основе боридов железа

В современном машиностроении установилась тенденция использования малоотходных процессов формообразования деталей машин (точное литье, зубонакатывание, точная штамповка и т. п.). Одновременно растет доля отделочных операций (шлифование, полирование, доводка). К числу эффективных отделочных процессов относится магнитно-абразивная обработка, базирующаяся на применении магнитно-абразивных материалов в виде ферроабразивных порошков, гранул, суспензий, обладающих одновременно магнитными и абразивными свойствами. Эффективность МАО зависит от формы частиц ФАП, их гранулометрического состава, химической активности к обрабатываемому материалу, микротвердости абразивной составляющей, а также от технологичности изготовления и стоимости ФАП. Выбор материала, обеспечивающего требования по магнитным свойствам, не представляет особых трудностей. Наиболее высокую индукцию насыщения имеет сплав Fe-Co (40 % Co), но в связи с его высокой стоимостью предпочтение отдается железу.

Известен ФАП и способ его получения [126], который имеет следующий компонентный состав, мас. %: кремний – 7,5...2,0; углерод – 1,0...2,2; титан – 1,2...3,4; алюминий – 1,0...2,5; фосфор – 0,1...0,5; карбиды бора – 0,1...0,5; бориды железа – 0,3...0,9; железо – остальное.

Способ получения данного материала включает получение слитка железокремнистого сплава и его измельчение, карбоборирование в контейнере с порошкообразной борсодержащей смесью при нагреве, охлаждение смеси в жидкой среде, рассев на фракции. Недостатком данного материала и способа его получения является повышенная пористость синтезированных порошковых частиц, что снижает их магнитные свойства, а также низкое содержание карбидов бора вследствие замедленной диффузии бора при контакте твердых фаз. Кроме того, охлаждение материала в жидких средах связано с технологическими затруднениями.

Задачей настоящего исследования является повышение магнитных и абразивных характеристик ферромагнитного абразивного материала. Поставленная задача решается за счет того, что ферромагнитный абразивный материал содержит углерод, кремний, карбиды бора, бориды железа, железо и примеси при следующем соотношении ингредиентов, мас. %: углерод – 0,7...3; кремний – 0,3...3,6; карбиды бора – 0,6...8,0; бориды железа – 1...6; железо и примеси – остальное. В способе получения ферромагнитного абразивного материала, включающем смешивание распыленного порошка железоуглеродистого сплава и механически измельченного порошка ферробора, спекание смеси порошков, измельчение спека и его рассев, спекание смеси порошков осуществляют при температуре 1030...1200 °С в течение 30...60 мин, компоненты исходной смеси принимают при следующем соотношении, мас. %: порошок железоуглеродистого сплава – 40...80, порошок ферробора – 20...60. Размер частиц порошковой смеси выбирают, мкм: порошок железоуглеродистого сплава – 160...400, порошок ферробора – менее 100, причем нагрев смеси порошков, выдержку при температуре жидкофазного спекания и охлаждение осуществляют в графитовом тигле под слоем графита с размером частиц 1...10 мм.

Приведенное соотношение компонентов обеспечивает совокупность заданных магнитных и абразивных свойств порошкового материала.

Сопоставительный анализ с оригиналом показывает, что предлагаемый сплав отличается от известного содержанием кремния, углерода, боридов железа и не содержит титана, алюминия и фосфора, табл. 3.13 [127].

Выбранные пределы концентрации кремния и углерода обеспечивают высокие прочность, плотность и магнитные свойства сплава. Содержание в выбранных пределах карбидов бора и боридов железа придает сплаву высокие абразивные свойства. При содержании углерода менее 0,7 % затрудняется измельчение сплава и снижаются его абразивные свойства. При содержании углерода более 3 % уменьшаются магнитные свойства из-за повышения количества ледебуритной составляющей. При содержании кремния менее 0,3 % падает жидкотекучесть сплава и ухудшаются его литейные свойства, при концентрации данного элемента более 3,6 % сплав становится хрупким. При концентрации карбидов бора менее 0,6 % снижаются абразивные свойства порошка, при содержании их более 8 % падают магнитные свойства. Аналогичная ситуация наблюдается с боридами железа. При их содержании менее 1 и более 6 % падают, соответственно, абразивные и магнитные свойства материала.

В качестве примера осуществлено изготовление ферромагнитного абразивного материала, химический состав которого представлен в табл. 3.13.

В табл. 3.14 приведены результаты испытаний эксплуатационных свойств предлагаемого материала при обработке поверхности образцов на алюминиевой и медной основе. Наряду с опытными материалами проводили изготовление и испытания материала, выбранного за образец.

Сплавы, используемые для последующего насыщения бором, выплавляли в индукционной печи с кислой футеровкой, расплав распыляли водой либо получали в виде слитка, после чего осуществляли дробление и рассев на фракции. Частицы порошка железоуглеродистого сплава размером 160...400 мкм смешивали с механически измельченным порошком ферробора с размером частиц не более 100 мкм в соотношении (40...80 %):(20...60 %) и осуществляли жидкофазное спекание в графитовом тигле под слоем измельченного графита при температуре 1030...1200 °С в течение 30...60 мин, затем полученный спек охлаждали, размалывали и рассеивали на фракции. Критерием качества порошка служили следующие показатели: шероховатость обработанной поверхности, мкм, удельный съем металла, г/мин.

Химический состав опытных сплавов

Вид сплава	Уровень содержания компонентов	Содержание компонентов, мас. %							
		C	Si	BC _x	FeB _x	P	Ti	Al	Fe и примеси
Прототип	средний	1,60	8,75	0,30	0,65	0,30	2,3	1,7	остальное
Предлагаемый	нижний	0,70	0,30	0,60	1,00				
	верхний	3,00	3,60	8,00	6,00				
	средний	2,35	2,95	4,30	3,50				
	выше верхнего	3,30	3,95	8,80	6,60				
	ниже нижнего	2,06	0,27	0,54	0,90				

Таблица 3.14

Показатели MAO известного и предлагаемого ФАП

Латунь Л63		Бронза Бр АЖ9		Сплав Д 16	
Ra ₂ , мкм	G, г/мин	Ra ₂ , мкм	G, г/мин	Ra ₂ , мкм	G, г/мин
0,069	0,0169	0,058	0,0280	0,055	0,0150
0,040	0,0470	0,050	0,0230	0,055	0,0460
0,060	0,0264	0,055	0,0095	0,055	0,0140
0,054	0,0350	0,050	0,0180	0,060	0,0345
0,060	0,0140	0,055	0,0340	0,065	0,0280
0,063	0,0160	0,060	0,0105	0,070	0,0160

Ra₁ – исходная шероховатость поверхности, 1,6...2,5 мкм;
 Ra₂ – шероховатость поверхности после MAO, мкм;
 Q, г/мин - удельный съем материала при обработке.

Размер частиц ФАП 200/315 мкм.

Испытания материала проводили при следующих режимах MAO: магнитная индукция в рабочем зазоре, B – 1,0 Тл, скорость вращения детали, V_{вр} = 1,0 м/с, скорость осцилляции полюсных наконечников, V_о = 0,2 м/с, время обработки t = 60 с. СОТС – 1,5%-й водный раствор СинМА-1 ТУ 38. 5901176–91.

Из табл. 3.14 следует, что предлагаемый абразивный материал по удельному съему металла с обрабатываемой поверхности значительно превосходит прототип и не уступает известному порошковому материалу Ж15КТ, превосходя его по экономичности и экологической чистоте.

Для определения пределов значений температур нагрева при жидкофазном спекании, его продолжительности, а также состава смеси осуществляли опыты по описанной выше технологии и определяли оптимальные параметры технологии изготовления ФАП заявляемого состава. Результаты опытов приведены в табл. 3.15.

Повышение температуры нагрева смеси при спекании приводит к образованию жидкой фазы преимущественно сплава железо-бор, в то время как частицы синтезированного железоборидного сплава остаются в твердом состоянии. На границе жидкой и твердой фаз происходят ускоренная диффузия бора из жидкой фазы в твердую и диффузия углерода из объема твердой фазы на поверхность порошковой частицы с образованием устойчивого химического соединения B_4C . Продолжительность выдержки выбрана такой, при которой указанные процессы успевают произойти преимущественно на границе жидкой и твердой фаз, в результате чего частицы железоборидного сплава оказываются обедненными углеродом. При этом увеличиваются их магнитные свойства при сохранении прочности и плотности. При измельчении спека разделение частиц происходит преимущественно по бывшим границам жидкой и твердой фаз. При этом частицы ФАП сохраняют первоначальную форму и размеры, их центральная часть оказывается обедненной углеродом и имеет высокие магнитные свойства, а на поверхности частиц образуется прочный твердый слой из карбидов бора и боридов железа, обеспечивая материалу высокие абразивные свойства.

Из приведенных в табл. 3.15 результатов видно, что температура нагрева, продолжительность выдержки и соотношение порошковых составляющих в смеси оказывают существенное влияние на компонентный состав ферромагнитного абразивного материала. При соотношении компонентов порошковой смеси 40...80 % железоборидного сплава и 60...20 % ферробора нагрев до температур 1030...1200 °С и выдержка от 30 до 60 мин обеспечивают присутствие в материале карбидов бора и боридов железа на уровне,

соответственно, 0,6...0,8 и 1...6 мас. %, при котором материал обладает максимальными режущими свойствами.

Таблица 3.15

Определение технологических параметров способа изготовления ФАП

№ опыта	Состав порошковой смеси		Температура нагрева при спекании, °С	Продолжительность нагрева, мин	Содержание абразивных составляющих, мас. %		
	Железо-углеродистый сплав	Ферро-бор			BC _x	FeB _x	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8
1	30	7,0	1120	45			Охрупчивание материала
2	40	60			6,0	5,0	
3	60	40			3,2	3,5	
4	80	20			0,6	2,0	
5	90	10			0,5	0,9	
6	60	40	1030		3,2	3,5	
7			1200		8,0	6,0	
8			1000		3,0	3,0	
9			1250				Оплавление материала
10			1120	30	2,8	3,0	
11				60	6,5	4,0	
12				20	0,4	2,0	
13				50	6,5	4,0	

Примечание. Содержание бора в ферроборе 5,5 мас. %.

Таким образом, предлагаемый способ получения ФАП позволяет упростить его компонентный состав и обеспечивает высокие эксплуатационные свойства при обработке металлических изделий.

3.2.6. Порошки на основе ультрадисперсного магнетита и карбидов кремния

Создание нового вида ФАП достигается тем, что в магнитно-абразивном материале в виде гранул, содержащем ферромагнитную и абразивную составляющие в качестве абразивной составляющей используют карбид, например, кремния, а в качестве ферромагнитной – магнетит, при этом в материал дополнительно вводят полифункциональные добавки, например, олеиновую кислоту, в следующем соотношении, мас., %: карбиды кремния – 60...84, магнетит – 2,5...14, олеиновая кислота – остальное и дополнительно вводят модифицирующий полимер в пределах 5...10 мас., % [128].

В способе получения магнитно-абразивного материала, включающем синтез гранул абразивного материала и магнетита, гранулы абразивного материала модифицируют коллоидным раствором магнетита в дисперсной среде, при этом магнетит предварительно осаждают аммиаком из водных растворов солей железа и пептизируют в растворе олеиновой кислоты, а магнетит дополнительно модифицируют полимером.

Использование в качестве абразивной составляющей карбида кремния, а в качестве ферромагнитной составляющей – магнетита позволяет значительно удешевить стоимость предложенного ФАП. Введение в магнетит полифункциональных добавок позволяет стабилизировать коллоидный раствор магнетита. При этом модифицирующий полимер препятствует образованию на обрабатываемой детали маслянистой пленки, которая препятствует процессу шлифования. Поскольку обработку предложенным материалом ведут при помощи СОТС, в которую входят поверхностно-активные вещества, то применение СОТС обеспечивает эффективность процесса обработки, для которого необходимо сохранение взвешенного состояния гранул ФАП.

Введение модифицирующих добавок позволяет регулировать характер и глубину взаимодействия компонентов ФАП в процессе обработки детали. Предложенное соотношение масс позволяет получить материал с высокими эксплуатационными качествами и с наименьшими затратами. Синтез гранул абразивного материала и магнетита, при котором гранулы абразивного материала модифицируют коллоидным раствором магнетита в дисперсной среде, а технология

получения ФАП включает осаждение высокодисперсного магнетита и пептизацию его в растворе олеиновой кислоты, а также модификации полимером позволяет удешевить способ получения ФАП и обеспечить его высокие эксплуатационные показатели.

Перечень полученных образцов материала для магнитно-абразивной обработки и результаты их анализа представлены в табл. 3.16.

Способ получения ФАП заключается в модифицировании абразива магнетитом $Fe_3O_4(FeO \cdot Fe_2O_3)$. В качестве абразивной составляющей используют карбид кремния различной грануляции дисперсностью 63, 63...100, 100...200, 200...315 и карбид титана, размер частиц которого составляет 63...100 мкм. Магнетит осаждают аммиаком из водных растворов солей двух- и трехвалентного железа. Абразивный наполнитель вводят в свежеприготовленную суспензию высокодисперсного магнетита в легколетучем растворителе (гексане); полученную смесь энергично перемешивают до полного удаления растворителя.

Абразивный наполнитель вводят в предварительно приготовленный коллоидный раствор магнетита в дисперсионной среде (хлороформе), технология получения которого включает осаждение высокодисперсного магнетита и пептизацию его в растворе олеиновой кислоты в дисперсной среде (хлороформе) с последующим диспергированием коллоидного концентрата магнетита в требуемом количестве дисперсионной среды.

Третий и четвертый примеры модифицирования характеризуются одинаковой совокупностью операций, но различной последовательностью их проведения. В третьем примере ФАП дополнительно модифицируют полимером. Для этого первоначально получают по указанному выше второму примеру магнитно-абразивный инструмент. Далее его вводят в раствор полимера в органическом растворителе и при энергичном перемешивании последний удаляют. В четвертом примере абразивный наполнитель вводят в предварительно приготовленный коллоидный раствор магнетита, стабилизированный олеиновой кислотой и содержащий дополнительно модифицирующий полимер.

Перечень полученных образцов материала
для магнитно-абразивной обработки и результаты их анализа

Номер образца	Характеристика образца				
	Носитель	Содержание Fe в носителе мас. %	Дисперсность носителя, мкм	Содержание магнетита, %	Добавка мас. %
1	2	3	4	5	6
1	Карбид кремния	1,46	200...315	3,8	–
2		1,46	200...315	20	–
3		1,46	200...315	39,8	–
4		1,46	100...200	5,4	–
5		1,46	100...200	21,1	–
6		1,46	100...200	39,8	–
7		1,85	63...100	40,6	–
8	Карбид титана	1,85	63...100	2,5	–
9		1,85	63...100	19,2	–
10		1,85	63...100	41,8	–

Окончание табл. 3.16

1	2	3	4	5	6
11	Карбид кремния	1,46	200...315	4,8	Олеиновая кислота 2,0
12		1,46	200...315	7,1	Олеиновая кислота 2,0
13		1,46	200...315	6,2	Олеиновая кислота + модифицирующий полимер (2,0 + 5,0)
14	Карбид кремния	1,46	200...315	6,4	Олеиновая кислота + модифицирующий полимер (2,0 + 5,0)
15		1,46	200-315	5,8	Олеиновая кислота + модифицирующий полимер (2,0 + 5,0)
16		1,46	200-315	8,1	Олеиновая кислота + модифицирующий полимер (2,0 + 5,0)
17		1,46	200-315	14,2	Олеиновая кислота + модифицирующий полимер (2,0 + 5,0)
18		1,95	63	9,1	Олеиновая кислота + модифицирующий полимер (2,0+10,0)

Согласно электронно-микроскопическим наблюдениям и данным рентгенографии средний размер частиц магнетита, находящихся в суспензии и коллоидных растворах в виде не агрегированных изометрических частиц, составляет 11 нм (рис. 3.15).



Рис. 3.15. Фотография суспензии магнетита в коллоидном растворе $\times 400$

Результаты микроскопического исследования ФАП свидетельствуют, что модифицирование индивидуальным магнетитом не позволяет получить равномерного покрытия на поверхности карбида кремния. Наряду с покрытыми частицами абразива наблюдается примесь незакрепленного магнетита, количество которого растет при повышении его концентрации в МАМ свыше 15 мас. % (рис. 3.16).



Рис. 3.16. Фотография частицы порошка после модифицирования индивидуальным магнетитом $\times 100$

Кроме того, рост толщины покрытия приводит к округлению острых граней абразива. При обработке карбида кремния коллоидными растворами, содержащими наряду с магнетитом добавки олеиновой кислоты и полимера, примесей незакрепленного магнетита и округления острых граней не наблюдается (рис. 3.17).

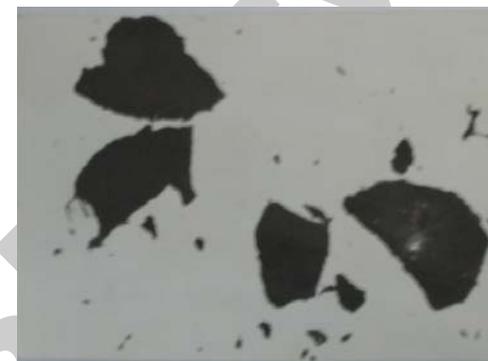


Рис.3.17. Фотография частицы порошка после модифицирования индивидуальным магнетитом, олеиновой кислотой и полимером $\times 100$

Проведенные исследования показали, что при использовании ФАП (примеры 1, 2) модифицированных индивидуальным магнетитом, изменений показателей шероховатости после обработки не происходит, а на поверхности деталей образуется темно-коричневая пленка, удаляемая керосином или органическими растворителями. Результаты рентгенографического анализа ФАП, обработанного индивидуальным магнетитом, свидетельствует о том, что при обработке ФАП деталей происходит частичное окисление магнетита ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$). Это отрицательно сказывается на магнитных характеристиках МАМ и, следовательно, на его удержании в рабочей зоне. Наибольший массовый съем материала наблюдается при исследовании ФАП, в состав которого помимо магнетита входят олеиновая кислота и полимер.

3.2.7. Порошки на основе быстрорежущей стали Р6М5

Основным фактором, определяющим технико-экономические показатели магнитно-абразивной обработки, является выбор ферроабразивного порошка. На данный момент, применяемая технология изготовления ФАП, характеризуется сложностью и многоступенчатостью, а также требует специализированного оборудования. Высокая цена компонентов значительно повышает стоимость традиционно используемых ФАП.

В настоящее время на инструментальных и металлообрабатывающих предприятиях образуется большое количество мелкодисперсных отходов быстрорежущих сталей. Такого рода отходы имеют следующие составы, которые представлены ниже в зависимости от видов СОТС.

Состав шламовых отходов стали Р6М5 с остатками СОТС на водной основе (%): металлическая микростружка – до 50, неметаллических включений – до 30, остаток СОТС – до 20; с остатками СОТС в виде индустриального масла И 12, И 20 ГОСТ 20799–88: металлическая микростружка – до 70, неметаллических включений – до 5, остатков масла – до 25. Из-за высокой дисперсности металлической фазы, большого количества абразива и высокой влажности отходы не утилизируются. Однако высокая твердость и режущие свойства металлической фазы, входящей в состав отходов, позволяют получать ФАП, пригодный для использования при МАО [129].

Полученный в результате сушки и сепарации данный ФАП представляет собой мелкодисперсные частицы быстрорежущей стали Р6М5-1 и имеет следующие физико-механические характеристики: насыпная плотность – $(2,2\text{--}2,3) \times 10^3$ кг/м³; текучесть – 20,5...21,5 С; микротвердость – 5500...7650 МПа; удельная поверхность – $(2,5\text{--}2,55) \times 10^3$ м²/кг; пикнометрическая плотность – $(5,05\text{--}5,1) \times 10^3$ кг/м³.

Данные физико-механические характеристики Р6М5-1, полученного из шламовых отходов, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ФАП. Они обладают достаточно высокими магнитными свойствами, которые в сравнении с ФАП Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81 отличаются не более, чем на 10...15 %. Гранулометрический состав находится практически в требуемых для МАО интервалах.

Частицы ФАП представляют собой микростружку, обладающую ярко выраженным зубчатым микрорельефом в виде острых граней, многочисленных зазубрин и микронеровностей поверхности. Их форма: изогнутая – около 50 %, вытянутая – около 30 % и осколочная – около 20 %. Толщина частиц колеблется в пределах 2...20 мкм, длина – 5...130 мкм. Микроструктура частиц состоит из мартенсита отпущенного, остаточного аустенита и карбидов. Использование ФАП из отходов стали Р6М5 позволяет резко снизить стоимость материалов для МАО по сравнению со стоимостью, например, ФАП Ж15КТ. Проведенные исследования показали, что наиболее целесообразно его применение для обработки цветных металлов и их сплавов. Данные исследования проводились на установке СФТ.2.150.00.00.000.

Технологические параметры и режимы выдерживались следующими: величина магнитной индукции, $B = 1$ Тл; скорость резания, $V_p = 1\text{--}2$ м/с; скорость осцилляции, $V_o = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции, $A = 1$ мм; величина рабочего зазора, $\delta = 1$ мм; коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_z = 1$; время обработки, $t = 60$ с.

Исходная шероховатость всех представленных образцов – $Ra_1 = 1,6\text{--}2,2$ мкм. Процесс МАО осуществлялся для финишной обработки как черных, так и цветных металлов. Качество обработки оценивалось по показателям достигнутой шероховатости, Ra_2 , мкм и блеску (т. е. светоотражательной способности) поверхностного слоя. Производительность – по величине удельного массового съема материала, G , мг/см²·мин. Образцы для обработки черных металлов втулки $D \times d \times L = 36 \times 30 \times 32$ мм. Материал – ШХ-15 ГОСТ 801–78, 55...60 HRC, СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 2 %-й водный раствор. Результаты сравнительных исследований представлены в табл. 3.17.

Таблица 3.17

Качество и производительность финишной обработки стали ШХ-15 с использованием различных ферроабразивных порошков

Вид ферроабразивного порошка	Микротвердость частиц ФАП, ГПа	Размер частиц ФАП, мм	Удельный массовый съем материала, G , мг/см ² ·мин	Достигнутая шероховатость поверхности, Ra_2 , мкм
Ж15КТ	12...13	0,16...0,2	12,1	0,11...0,14
Р6М5	10...11	0,16...0,2	7,9	0,09...0,12

Образцы для обработки цветных металлов представляют собой цилиндрические заготовки, изготовленные из пруткового материала меди МЗ ГОСТ 859–78, бронзы БрАЖ 9-4 ГОСТ 18175–72, латуни Л63 ГОСТ 15527–70, дуралюмин Д16 ГОСТ 21488–76. Размеры $D \times L = 40 \times 60$ мм. Смазочно-охлаждающее технологическое средство – СинМА-2 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор. Результаты сравнительных исследований представлены в табл. 3.18

Качество и производительность обработки цветных металлов
с использованием различных ферроабразивных порошков

Обрабатываемые материалы	Ферроабразивный порошок	Размер зерна, мм	Удельный массовый съём материала, G , мг/см ² ·мин	Достижимая шероховатость Ra_2 , мкм	Вид поверхности после обработки
Медь МЗ	Ж15КТ Р6М5-1	0,16...0,2 0,16...0,2	15,9 9,4	0,4...0,5 0,1...0,2	темный блестящий
Бронза БрАЖ 9-4	Ж15КТ Р6М5-1	0,16...0,2 0,16...0,2	10,7 8,5	0,3...0,5 0,1...0,15	матовый блестящий
Латунь Л63	Ж15КТ Р6М5-1	0,16...0,2 0,16...0,2	16,1 12,5	0,4...0,6 0,08...0,12	матовый блестящий
Дуралюмин Д16	Ж15КТ Р6М5-1	0,16...0,2 0,16...0,2	8,8 7,1	0,6...0,7 0,3...0,4	светлый блестящий

С целью отделения требуемого порошкообразного компонента шламовые отходы подвергались обработке. Схема технологического маршрута изготовления представлена на рис. 3.18. Сухая магнитная сепарация производилась магнитным сепаратором периодического действия, основанного на принципе псевдооживления отходов, содержащих ферромагнитный порошок, при помощи импульсного магнитного поля. Эффективность разделения магнитной и немагнитной фаз достигает 95...99 %.

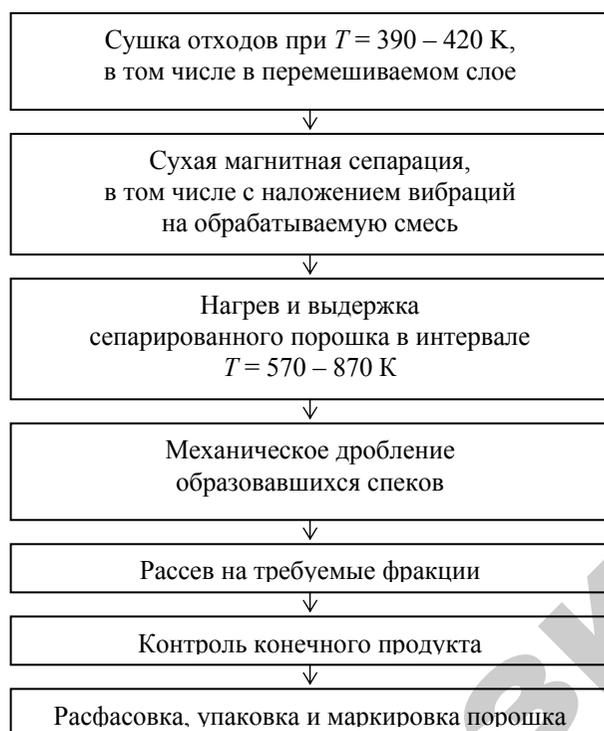


Рис. 3.18. Схема технологического маршрута изготовления порошка Р6М5-1

Использование данного ФАП в отличие от Ж15КТ, который при обработке цветных металлов придает слою детали темный или матовый оттенок, позволяет получать блестящую поверхность. Кроме того, поскольку порошок на основе Р6М5-1 является однокомпонентной

системой, объединяющей магнитную и абразивную составляющие в сравнении с двухкомпонентной типа Ж15КТ (железо и абразив), то стойкость первого превышает аналогичный показатель второго в 3...5 раз. Стоимость ФАП на основе Р6М5-1 также в 4...6 раз ниже стоимости традиционно применяемых, например, Ж15КТ.

3.3. Особенности обработки поверхностей быстрознашивающихся деталей оборудования пищевой промышленности

В связи с огромным значением работы по повышению эффективности использования оборудования пищевой промышленности весьма актуальной является проблема долговечности этого оборудования. Известно, что в большинстве случаев срок службы машин ограничен износом отдельных деталей.

Применяемые в хлебопекарном производстве полуфабрикаты, жидкие дрожжи и заторы для их приготовления, заквашенные термофильными молочнокислыми бактериями, ржаные закваски, ржаное тесто, опара, тесто из пшеничной муки и другие полуфабрикаты являются средствами, в которых накапливаются продукты брожения. Эти продукты брожения вызваны жизнедеятельностью дрожжей и кислотообразующими бактериями. Можно отметить, что из органических кислот, образующихся при брожении теста и заквасок основную роль играют молочная и уксусная кислоты. На их долю падает примерно 90 % кислотности этих полуфабрикатов. Следовательно, данные полуфабрикаты хлебопекарного производства представляют собой среды по одной уже кислотности агрессивные по отношению к материалам, в контакте с которыми они находятся. Кроме того, рабочие органы технологического оборудования, функционирующего на предприятиях пищевой промышленности должны обладать высокой износостойкостью. В противном случае существует возможность образования продуктов износа, а также отрыва более крупных частиц и их возможного разрушения, что недопустимо [130].

Одной из наиболее ответственных деталей оборудования хлебопекарной промышленности служит делитель теста, в частности его

головка. Проведенный анализ причины выхода из строя этой головки показал, что им является износ схватыванием I рода. Срок службы данной головки составляет 12 месяцев. Приобретение новых головок в нынешних условиях, как указывалось выше, связано с определенными трудностями. Вследствие этого была поставлена и решена задача по ремонту и восстановлению этих головок для их дальнейшего использования. Традиционно применяемой финишной обработкой для реализации данной задачи служило шлифование, однако создание присущего ему микрорельефа поверхности приводило в условиях повышенной биохимической коррозии к снижению срока службы деталей. Предложение, направленное на повышение этого показателя, заключается в замене шлифования методом MAO. Вместе с тем использование в качестве ФАП Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81 приводит к потемнению обрабатываемой поверхности цветных металлов из-за их насыщения остаточным углеродом.

Материалом делителя теста является – бронза БрАЖНМц ГОСТ 18175-72. ФАП ФАПД-1 ТУ РБ 00493801.001-00, внешний вид показан на рис. 3.19, зернистость $\Delta = 160/200$ мкм.



Рис. 3.19. Фотография частиц ФАПД-1, полученных в дуговой азотной плазме $\times 100$

Исследования MAO делителя теста производились с использованием станка мод. СФТ 2.150.00.00.000. Режимы MAO: величина магнитной индукции, $B = 1$ Тл; скорость вращения детали, $V_p = 1,5$ м/с; скорость осцилляции полюсных наконечников, $V_0 = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции, $A = 1$ мм; величина рабочего зазора, $\delta = 1$ мм;

время обработки, $t = 60$ с. Исходная шероховатость поверхности головки делителя теста до обработки методом MAO составляет $Ra_1 1,6 \dots 2,2$ мкм. Смазочно-охлаждающие технологические средства – СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 3 %-й водный раствор.

Известные в настоящее время способы получения порошков делятся на две группы: первичные (формирование исходной частицы порошка) и вторичные (воздействие на готовый порошок). С учетом достоинств и недостатков композиционных и литых ФАП, а также технологий их изготовления принято решение разработать технологию изготовления ФАП, включающую выполнение следующих операций: выплавка и заливка в слитки сплава с химическим составом, соответствующим химическому составу ФАП; дробление слитков сплава в порошок; рассев порошка.

В индукционной печи с графитовым тиглем выплавлены сплавы систем Fe-Ti-C и получены слитки. В процессе плавки под действием вихревых токов происходит интенсивное перемешивание расплава, в результате чего сплав получается однородным по химическому составу. Легирование расплавов осуществляется ферросплавами, которые вводят непосредственно в печь. Из слитков механическим измельчением получены порошки с размером частиц $0,2 \dots 0,4$ и $0,4 \dots 0,6$ мм.

При выборе материала для изготовления высокоэффективных порошков было принято во внимание, что титан не просто химически активный металл, но и особенно активно взаимодействует с газами с образованием нитридов и оксидов. Нитриды в сплавах титана являются не только самостоятельной, твердой фазой, но и при образовании карбонитридов способствуют повышению пластичности этих химических соединений.

Химико-термическая обработка ФАП может включать обработку порошка в дуговой азотной плазме, ионно-плазменную обработку, химическое травление с целью повышения шероховатости частиц ФАП, карбонитрацию.

Разрушение сырья при размоле происходит хрупким сколом с образованием сложного микрорельефа поверхности частиц. Частицы всех фракций имеют в основном осколочную неравновесную форму. На поверхности отчетливо видны включения, представляющие собой сложные соединения типа $TiFe_2$ и $TiFe$, рис. 3.20.

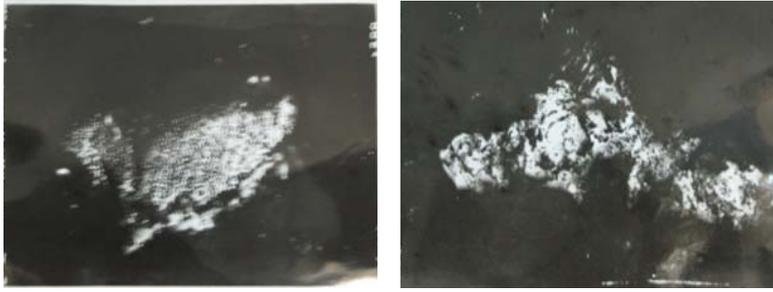


Рис. 3.20. Микрорельеф частиц ФАПД-1 $\times 100$

Обработку ФАП в дуговой азотной плазме осуществляли следующим образом. Исходный порошок, полученный измельчением кускового ферротитана в шаровой мельнице, с размером частиц 63...100 мкм и 100...200 мкм пропускали на установке УПУ-3Д через азотную плазму. В качестве плазмообразующего газа использовали технический азот, что и должно было обеспечить интенсивное химическое взаимодействие титана с атомарным азотом. Показатели режима работы УПУ-3Д следующие: сила тока – 200 А; напряжение – 90 В; расход азота – 3,0 м³/ч; производительность по порошку – 4,0 кг/ч. Такой режим работы УПУ-3Д используется для нанесения плазменных покрытий порошковым сплавом на никелевой основе типа СР-3. Порошок ФАПД-1 с размером частиц 63...100 мкм при таких режимах работы УПУ-3Д должен полностью расплавиться, перегреться и подвергнуться азотированию. Такой же порошок с размером частиц 100...200 мкм не успевал полностью расплавиться, т. е. частицы были в твердо-жидком состоянии. Для азотирования поверхностных слоев частиц условия не изменялись.

Обработка порошка в дуговой азотной плазме позволяет получать порошок различной формы в зависимости от теплофизических и кинетических параметров распыления. Обработка частиц 63...100 мкм приводит к заметному сглаживанию поверхности и острых граней, по внешнему виду порошки после распыления имеют в основном сферическую форму. Приближение формы частиц к сферической, отсутствие на поверхности частиц выступов и неровностей облегчает перемещение частиц относительно друг друга и приводит к повышению насыпной плотности и текучести порошка.

Порошки, получаемые плазменным распылением частиц размером 100...200 мкм, близки по форме частиц к порошкам после дробления, однако имеют менее развитую поверхность. Из-за больших скоростей охлаждения не происходит оплавление частиц, как это имеет место при обработке порошка мелких фракций.

Исследование структуры гранул после плазменного распыления позволяет судить о тех процессах, которые происходят в них при нагреве. В процессе распыления и кратковременного насыщения частиц азотом структура сплава во многом наследует признаки исходного состояния. Распыление на воздухе приводит к образованию мелкодисперсной структуры. Высокая скорость охлаждения при распылении в воду приводит к образованию в данном сплаве неравновесных фаз, распад которых сопровождается повышением микротвердости.

Таким образом, скорость охлаждения капель при распылении является важным параметром, влияющим на структуру и свойства распыленного порошка. Меняя технологические параметры распыления, можно изменить форму частиц и условия формирования структуры.

Упрочнение порошкового материала при плазменном распылении является результатом суммарного воздействия: а) образования нитридов легирующих элементов в процессе азотирования и б) частичного оплавления гранул.

Процесс финишной обработки головок делителя теста осуществляется указанным выше магнитно-абразивным материалом ФАПД-1 по схеме наружной МАО. В результате проведения этой обработки достигнута требуемая шероховатость поверхности Ra_2 0,4...0,6 мкм. Проведение производственных испытаний показали, что срок службы этих деталей, обработанных методом МАО, составляет в среднем 12 месяцев. Кроме того, сопоставление стоимости приобретаемой вновь головки и изношенной, но подвергшейся ремонту и восстановлению показывает, что их соотношение равно 1:0,6.

Применение МАО позволяет повысить долговечность этих деталей на 15...20 %. Установлено, что использование указанных выше материала и финишной магнитно-абразивной обработки позволяет снизить стоимость ремонта и восстановления изношенных головок делителя теста в сравнении с покупными в среднем на 40 %.

3.4. Влияние гранулометрического состава ферроабразивного порошка на эффективность обработки профиля зубчатого колеса

В процессе абразивной обработки деталей основную роль играет инструмент. Его свойства определяют качество получаемой поверхности детали. Особенностью абразивной обработки жестко связанным зерном является то, что инструмент представляет собой суммарный комплекс систем: абразив – связка (полимер, керамика, металл и др.). В случае МАО инструмент состоит из комплекса систем: абразив – связка – магнитное поле. Магнитное поле выполняет также функцию связки, но в отличие от жестко связанного абразива (шлифовальный круг, хон, и др.) данный вид связки эластичен, следовательно, и воздействие на обрабатываемую поверхность более избирательное. Эта особенность влияет на работоспособность ФАП различного гранулометрического состава в процессе обработки.

В исследовании ставилась задача:

1. Определить зернистость ФАП, позволяющую получить наименьшую шероховатость обрабатываемой поверхности зубчатого колеса.
2. Определить период технологической стойкости ФАП.
3. Определить влияние изменения геометрической формы ФАП на шероховатость поверхности детали в процессе ее обработки.
4. Разработать практические рекомендации по выбору параметров ФАП в процессе МАО зубчатых колес.

В качестве оборудования использовалась установка СФТ 2.150.00.00.000. Для просеивания ФАП использовался набор сит: 400, 315, 200, 160, 100, 50 мкм.

На основании ранее проведенных исследований в качестве оснастки использовались специальные наконечники для МАО сложно-профильных поверхностей в плоскости вращения.

Режимы обработки: вращение детали, $n = 12,5 \text{ мин}^{-1}$; амплитуда осцилляции, $A = 2 \text{ мм}$; скорость осцилляции, $V_{\text{ос}} = 0,1 \text{ м/с}$; магнитная индукция, $B = 1 \text{ Тл}$; рабочий зазор между наружным диаметром детали и эквидистантной поверхностью полюсных наконечников – $\delta = 1 \text{ мм}$.

Анализ результатов экспериментов [23] показывает, что влияние зернистости на процесс МАО не проявляется однозначно. Объясняется это тем, что с уменьшением зернистости порошка количество

зерен, контактирующих с деталью, увеличивается, обеспечивая меньшую шероховатость обрабатываемой поверхности (МАО цилиндрических поверхностей).

Сила резания, определяемая силой притяжения единичного зерна к обрабатываемой поверхности, является функцией ферромагнитной массы зерна. Но так как число контактов зерен с обрабатываемой поверхностью и глубина резания обратно пропорциональны величине зерна, то при увеличении зернистости съем металла уменьшается. Результаты сравнительных исследований работоспособности различных композиций порошков [118] показывают, что наиболее эффективен при МАО порошок на основе железа и карбида титана Fe-TiC.

Данные исследования проводились для обработки цилиндрических и фасонных поверхностей тел вращения. Этими же исследованиями установлено, что для обеспечения наименьшей шероховатости поверхности и наибольшего съема металла при МАО цилиндрических и фасонных поверхностей вращения необходимо применять порошок Fe-TiC (20 %) зернистостью $\Delta = 160/125 \text{ мкм}$.

Исследованиями [131] по магнитно-абразивной доводке сложно-профильного режущего инструмента (сверла, фрезы) установлено, что оптимальным размером зерна ФАП Fe-TiC для обработки является фракция 315/250 мкм, а для получения малой шероховатости установлено время доводки 8...15 мин.

На основании вышеприведенных исследований в качестве исследуемого ФАП был выбран Fe-TiC (20 %). В качестве образцов использовались шестерни 260-1005030 газораспределительного механизма двигателя Д-240 с модулем зуба $m = 2,5 \text{ мм}$ в количестве 15 шт.

3.4.1. Выбор зернистости ферроабразивного порошка

Для выбора зернистости ФАП, обеспечивающей максимальную производительность процесса и минимальную шероховатость, рассмотрим особенности контактирования абразивных зерен с реальным профилем обрабатываемой поверхности на основании ранее проведенных исследований [132].

На рис. 3.21 изображены контуры абразивных зерен, зарисованные по теневым изображениям при увеличении в 250 раз и наложенные на реальный профиль обрабатываемой поверхности. Исходная шероховатость профиля соответствует 6-му классу и также вычерчена с увеличением в 250 раз как по горизонтали, так и по вертикали. На приведенных контурах абразивных зерен не отражен их микропрофиль, поскольку при данном увеличении он не просматривается.

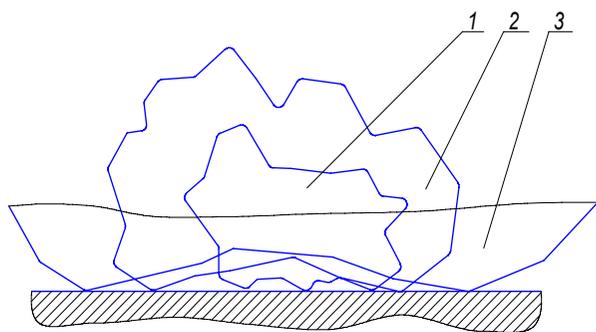


Рис. 3.21. Контактное взаимодействие абразивных зерен с реальным профилем обрабатываемой поверхности:

1 – зернистость 40 мкм; 2 – зернистость 80 мкм; 3 – зернистость 200 мкм

Из рис. 3.21 видно, что когда свободное абразивное зерно занимает устойчивое положение, контактирование с поверхностью происходит в нескольких точках. При этом радиусы округлений отдельных выступающих вершин абразивных зерен оказываются соизмеримыми с высотой неровностей исходного профиля обрабатываемой поверхности. Более крупные абразивные зерна имеют большие радиусы вершин и площадь контактирования и тем самым оказывают абразивное воздействие на большее число выступов неровностей поверхности детали. В шлифовальных кругах и других абразивных инструментах зерна жестко закрепляются связкой и описывают строго заданную траекторию независимо от реального профиля обрабатываемой поверхности. В процессе контактирования с обрабатываемой поверхностью абразивные зерна оставляют на ней совокупность рисок или микроцарапин. Чем крупнее абразивное зерно, тем больше риски и грубее поверхность. Небольшие

абразивные зерна оставляют более мелкие риски и обеспечивают получение более чистой поверхности.

В рассматриваемом способе обработки абразивное зерно, находящееся в зоне контакта, под действием уплотняющих сил постоянно прижимается к обрабатываемой поверхности и в относительном движении, перемещаясь по ней, огибает все неровности поверхности, встречающиеся на его пути.

Мелкое абразивное зерно (рис. 3.21), величина которого соизмерима с шагом неровностей поверхности, более точно копирует микропрофиль поверхности при своем движении и производит срез металла, как с вершин неровностей, так и во впадинах. Нивелирование поверхности в этом случае производится медленнее, и при заданном времени обработки шероховатость поверхности снижается на меньшую величину, чем в случае, если бы абразивное зерно удаляло металл только с вершин неровностей.

Крупное абразивное зерно своими размерами перекрывает шаг неровностей профиля обрабатываемой поверхности, вследствие чего в относительном движении больше касается выступов неровностей профиля, чем впадин. Поэтому срез металла в большей степени производится с вершин неровностей, нивелирование поверхности производится быстрее и при одном и том же времени обработки шероховатость снижается на большую величину по сравнению с процессом обработки мелким абразивным зерном.

Связанное абразивное зерно в шлифовальных кругах не может копировать микропрофиль обрабатываемой поверхности, вследствие чего размеры его при прочих равных условиях будут определять получаемую шероховатость. Поэтому с увеличением зернистости шероховатость при обработке, связанным абразивом возрастает.

Свободное абразивное зерно, как установлено исследованиями [35], копирует микропрофиль обрабатываемой поверхности, и тем эффективнее, чем меньше его размеры. Следовательно, при одинаковых режущих способностях мелких и крупных абразивных зерен уменьшение исходной шероховатости при крупном абразиве будет происходить интенсивнее.

Для определения зернистости ФАП обеспечивающей наименьшую шероховатость обрабатываемой поверхности детали выделялись следующие фракции ФАП: 400/315, 315/200, 200/160, 160/100,

100/50. Каждой фракцией обрабатывалась новая деталь в течении 180 секунд с периодичностью по 30 с. После каждого периода обработки замерялась масса детали и шероховатость рабочей поверхности зуба вдоль оси вращения детали. Результаты эксперимента отражены в зависимостях изменений масс деталей и шероховатостей рабочих поверхностей зубьев от времени обработки (рис. 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26).

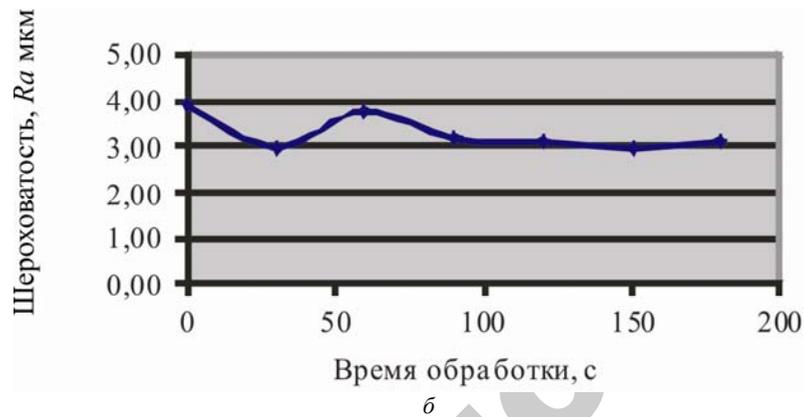
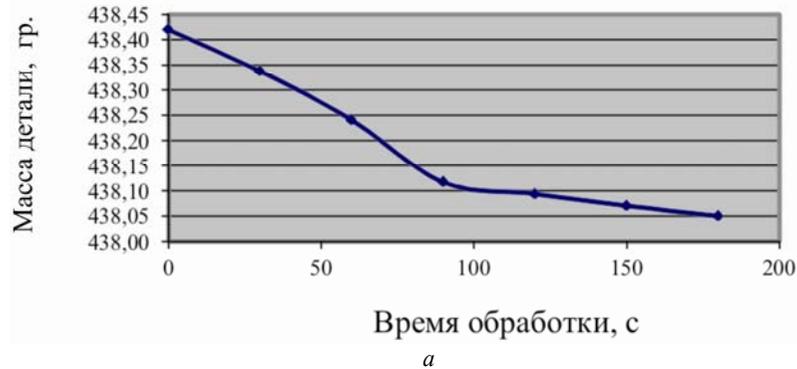


Рис. 3.22. Зависимости изменения массы детали (а), и шероховатости обрабатываемых поверхностей (б), от времени обработки фракцией ФАП $\Delta = 100/50$ мкм

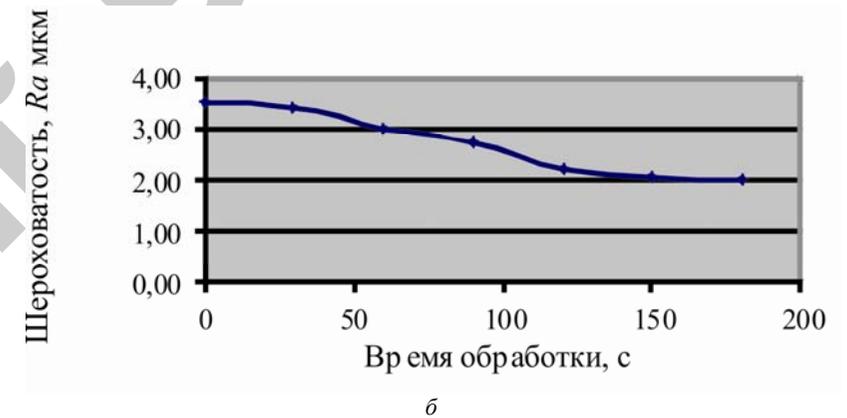
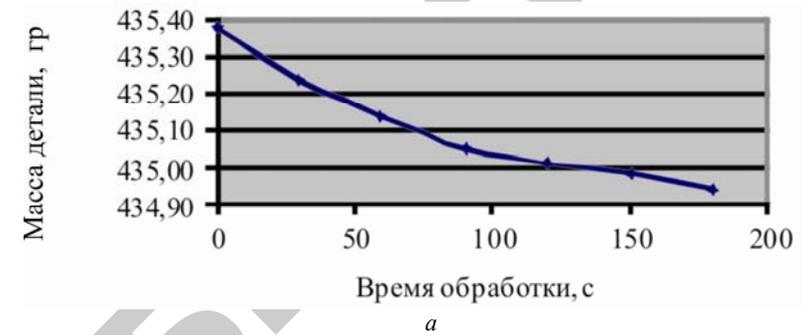
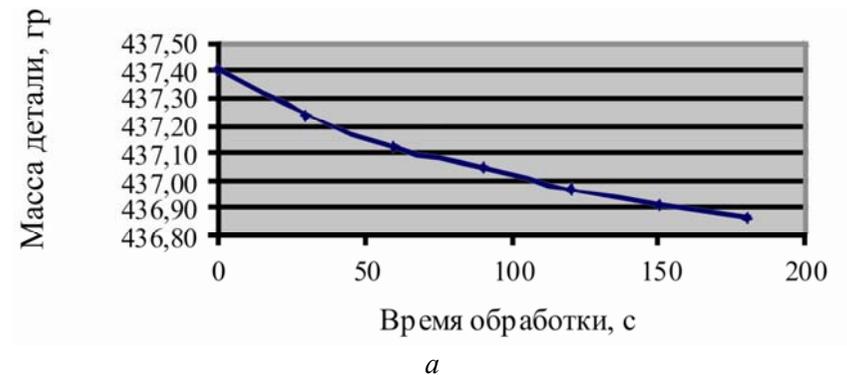


Рис. 3.23. Зависимости изменения массы детали (а), и шероховатости обрабатываемых поверхностей (б), от времени обработки фракцией $\Delta = 160/100$ мкм



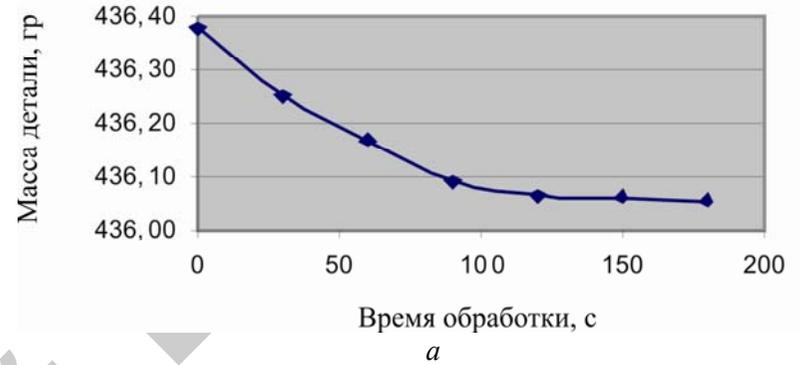
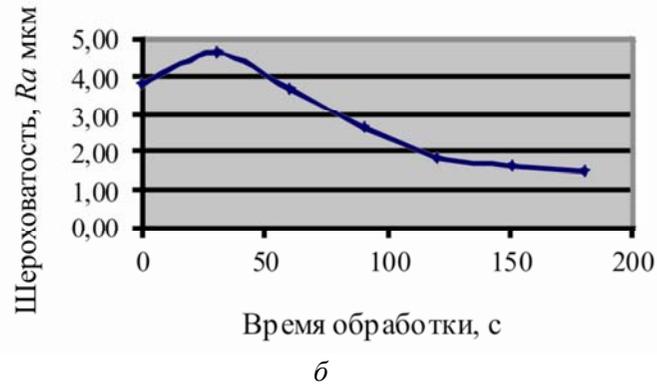


Рис. 3.24. Зависимости изменения массы детали (а), и шероховатости обрабатываемых поверхностей (б), от времени обработки фракцией $\Delta = 200/160$ мкм

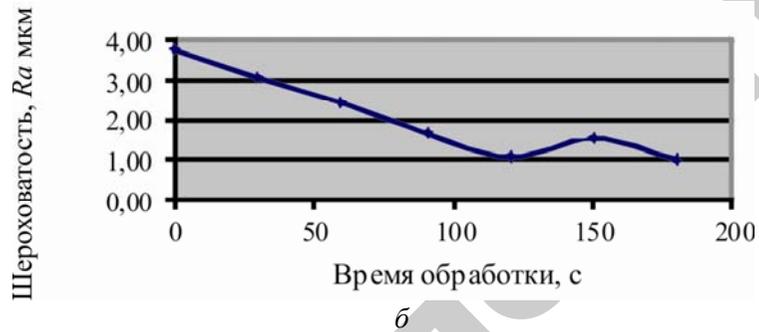
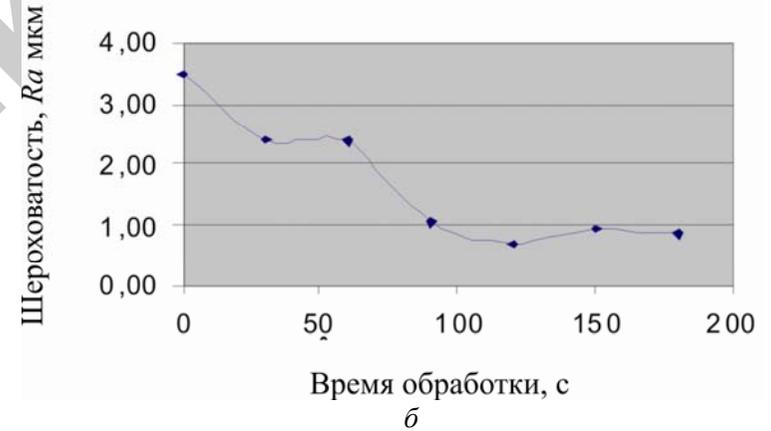
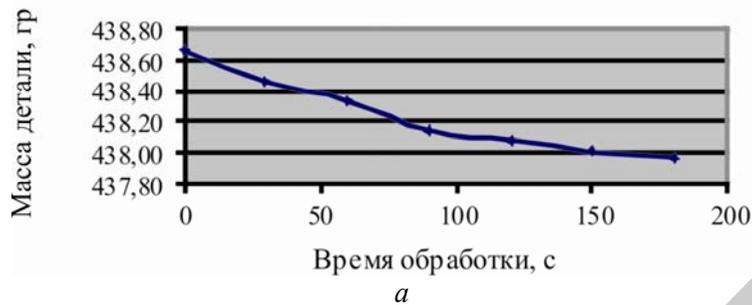


Рис. 3.26. Зависимости изменения массы детали (а), и шероховатости обрабатываемых поверхностей (б), от времени обработки фракцией ФАП $\Delta = 400/315$ мкм

Рис. 3.25. Зависимости изменения массы детали (а), и шероховатости обрабатываемых поверхностей (б), от времени обработки фракцией ФАП $\Delta = 315/200$ мкм

Анализ полученных данных, показал, что для процесса МАО зубчатого колеса целесообразно использовать фракцию ФАП зернистостью $\Delta = 400/315$ мкм, которая позволяет за 120...180 с обработки получить значение шероховатости $Ra_2 = 0,68...1,14$ мкм с исходной $Ra_1 = 3,5...4,5$ мкм.

3.4.2. Определение периода технологической стойкости порции ферроабразивного порошка

Технологическая стойкость (работоспособность) обрабатывающего инструмента (ФАП при МАО) является важнейшим фактором, влияющим не только на технико-экономические показатели процесса, но и на качество обработанных изделий. В различных схемах МАО дозу порошка засыпают в рабочую зону, используя многократно до тех пор, пока порошок не утратит режущих свойств, необходимых для получения стабильных результатов обработки. Поэтому стойкость порошка имеет первостепенное значение.

Под термином «период технологической стойкости» здесь, по аналогии с режущим лезвийным инструментом, будем понимать время T работы порции порошка между ее периодическими заменами, вызванными ухудшениями его режущих свойств.

С учетом сложности определения влияния различных факторов на стойкость порошка по исследуемой схеме МАО критериями оценки стойкости порошка были приняты изменение шероховатости обрабатываемой поверхности по параметру Ra (основной показатель процесса) и удельный съема металла q в единицу времени работы порошка.

Каждой фракции зернистости порошка был присвоен номер (табл. 3.19).

Таблица 3.19

Нумерация фракций по зернистости

Фракция	400...315	315...200	200...160	160...100	100...50	< 50
№	1	2	3	4	5	6

В качестве образцов использовались те же шестерни, что и в предыдущих исследованиях в количестве 27 шт., обработку осуществляли партиями по 9 шт., данные эксперимента взяты по средним значениям обработок всех партий. Первый образец обрабатывался 0,5 мин, каждый последующий образец обрабатывался на 0,5 мин больше предыдущего одной порцией порошка. Взвешивание образцов проводили перед обработкой (контроль) и после (опыт), на основании полученных данных построены зависимости изменения массового съема металла с образцов от времени работы ФАП (рис. 3.27).

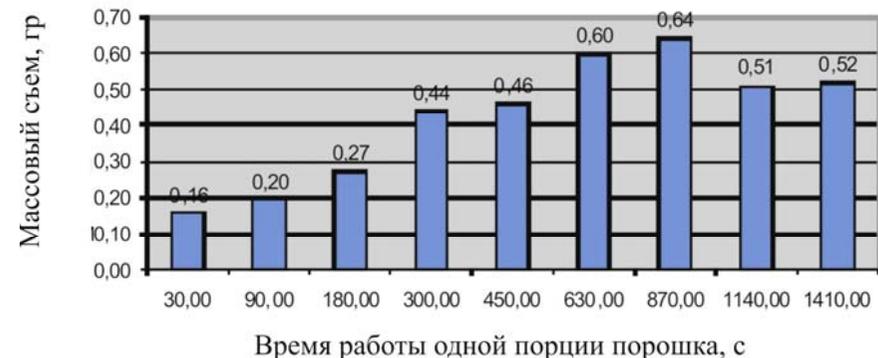


Рис. 3.27. Изменения массового съема металла с образцов от времени работы ФАП

В процессе эксперимента визуально наблюдалось, что при обработке образца № 9 ФАП становится пылевидным, утрачивает магнитные и абразивные свойства, уменьшается заполнение рабочей зоны, что способствовало уменьшению ферроабразивной щетки, покрывающей венец колеса. Суммарное время работы ФАП, составило 22,5 мин.

Во впадине зубчатого колеса сила магнитного поля прямо пропорционально зависит от объема ферромагнитной составляющей зерен. В результате дробления ферромагнитной составляющей зерна в процессе работы происходит уменьшение его намагниченности и, как следствие, уменьшение его давления на обрабатываемую поверхность. Кроме того, выкрошившаяся абразивная составляющая зерна не удерживается силами магнитного поля и под действием гравитационной силы выпадает из зоны обработки.

Для определения стойкости ФАП по съему металла рассчитали удельный массовый съем, разделив съем с каждого образца на время его обработки (рис. 3.28).

На основании зависимости (рис. 3.28) установлено, что съем металла с образцов 2...7 постоянен $q = 0,22...0,18$ г, суммарное время работы ФАП за этот промежуток времени обработки составило 14,5 мин. Следовательно, в течение этого времени ФАП сохраняет стойкость по съему металла с обрабатываемых поверхностей.

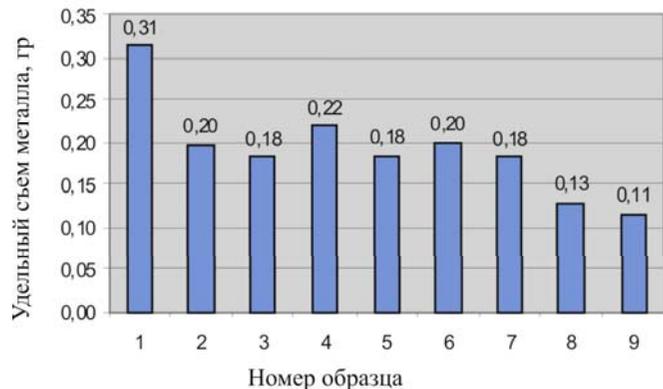


Рис. 3.28. Удельный массовый съем

После обработки образцов проводилось измерение шероховатости рабочих поверхностей зубьев. На основании полученных данных построена зависимость изменения шероховатости рабочих поверхностей зубьев от времени работы ФАП (рис. 3.29).

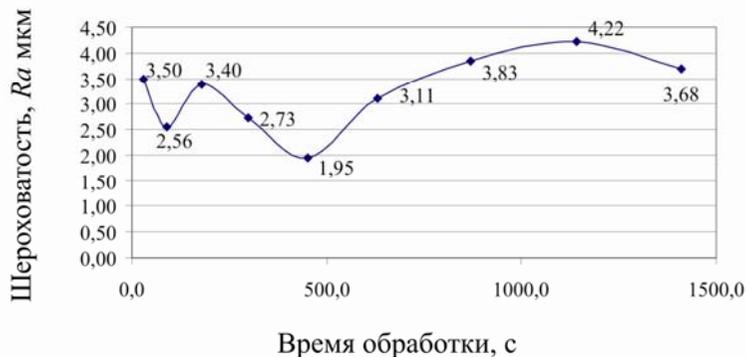


Рис. 3.29. Зависимость изменения шероховатости рабочих поверхностей зубьев от времени работы ФАП

На основании зависимости (рис. 3.29) установлено, что шероховатость уменьшается до обработки 6-го образца Ra_5 1,95 мкм, суммарное время работы ФАП за этот период составила 7,5 мин.

На основании полученных данных (рис. 3.26) строим зависимости $q = f(\tau)$ и $Ra = f(\tau)$ (рис. 3.30).

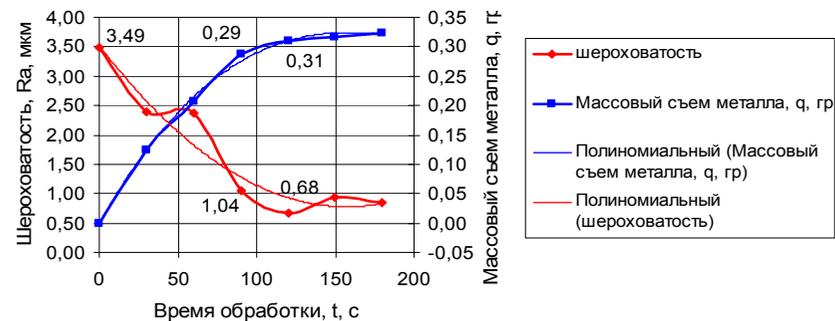


Рис. 3.30. Зависимости удельного сема и шероховатости поверхности от времени MAO зубчатого колеса

Зависимость $q = f(\tau)$ отражает изменение режущих свойств порции порошка по мере увеличения длительности ее работы. Зависимость $Ra = f(\tau)$ характеризует изменение шероховатости обрабатываемой поверхности с увеличением основного времени τ_0 на операции.

Снижение режущих свойств порции порошка в процессе MAO происходит из-за притупления абразивных частиц в составе композиционных зерен порошка, отделения их от ферромагнитной составляющей, насыщения порошка шламом, а также из-за частичного выбрасывания порошка из рабочей зоны. В связи с этим зависимость $q = f(\tau)$ носит степенной характер с показателем степени $\beta_1 < 1$ ($\beta_1 = 0,92$) [104]:

$$q = q_1 \tau^{\beta_1}$$

где q_1 – удельный съем материала за первые 1,5 мин обработки, г/с; τ – время обработки.

Исходная шероховатость составляет $Ra_{и}$ 3,0...3,5 мкм. В этом случае после операции MAO заданная конечная шероховатость может варьироваться в диапазоне $Ra_{к}$ 1,1...0,85 мкм.

Постепенное удаление припуска на операциях MAO сопровождается сначала быстрым, а затем замедляющимся снижением шероховатости поверхности (кривая изменения шероховатости). Изменение шероховатости описывается зависимостью:

$$Ra_k = Ra_n \cdot e^{-\beta_1^2 \tau},$$

На этапе быстрого снижения Ra происходит уменьшение исходной шероховатости, на втором этапе замедленного снижения Ra формируется шероховатость, характеристики которой зависят от режима МАО, свойств обрабатываемого материала и характеристик порошка.

Чтобы получить на обрабатываемых поверхностях заготовок во всей партии конечную шероховатость в заданном интервале значений $Ra_{\min} = 0,8 \dots Ra_{\max} = 1,04$ мкм, необходимо удалить с поверхности каждой заготовки за время τ_0 припуск, соответствующий удельному съему в интервале значений $q_3 = 0,29 \dots q_4 = 0,31$ гр (рис. 3.30). При обработке первой заготовки в порции порошка за время τ_0 должен быть достигнут нижний предел Ra_{\min} заданного интервала конечной шероховатости. Удельный съем на первой заготовке будет равен q_4 . При обработке последующих заготовок режущая способность порции порошка постепенно снижается. Соответственно уменьшится удельный съем на каждой следующей заготовке. Порцию порошка можно использовать до тех пор, пока на некоторой k -й заготовке значение удельного съема не составит значение q_3 , при котором шероховатость соответствует верхнему пределу Ra_{\max} заданного интервала.

На основании методики определения стойкости ФАП в процессе МАО [70] период технологической стойкости T порции порошка вычисляем по формуле

$$T = \left(\frac{q_1}{q_2} \tau_0 \beta_1 \right)^{\frac{1}{1-\beta_1}}. \quad (3.1)$$

Подставляя значения параметров q_1 , β_1 , τ_0 , получим:

$$T = \left(\frac{0,11}{0,13} 1,5 \cdot 0,92 \right)^{\frac{1}{1-0,92}} = 6,94 \approx 7,0 \text{ (мин)}.$$

В производственных условиях взамен периода стойкости порции порошка T , удобно использовать значение k . После обработки k -й заготовки производят замену порошка в рабочей зоне.

$$k = T / \tau_0. \quad (3.2)$$

В нашем случае число заготовок k , обрабатываемых в одной порции порошка с выполнением заданных требований по шероховатости, будет равно:

$$k = 7,0 / 1,5 = 4,6 \approx 4 \text{ (детали)}.$$

Таким образом, результаты исследований работоспособности выбранного ФАП показывают, что в течение 14,5 мин порошок сохраняет стойкость по массовому съему и 7...7,5 мин по минимальному значению шероховатости. Для объяснения разницы по стойкостям были проведены следующие исследования.

3.4.3. Влияния изменения фракционности ферроабразивного порошка в процессе МАО

Исходная фракция ФАП Fe-TiC $\Delta = 400/315$ мкм (рис. 3.31).

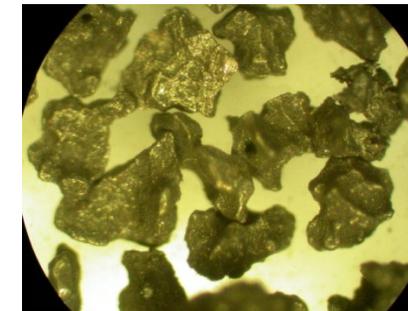


Рис. 3.31. Структура исходного ФАП Fe-TiC $\Delta = 400/315$ мкм ($\times 78$)

Просеивание отобранных проб ФАП в процессе работы через набор сит позволило установить следующие концентрации фракций:

1. Через 30 с работы ФАП фракция № 1 составила 92,3 %; № 2 – 6,45 % (рис. 3.32), остальные фракции составили 1,22 % от общей массы пробы.

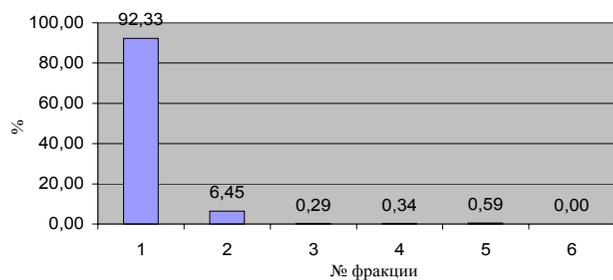


Рис. 3.32. Процентное соотношение фракций через 30 с работы ФАП

Наблюдается округление остроугольных кромок ФАП, появляется шлам (сколы ФАП и обрабатываемой поверхности детали, рис. 3.33).

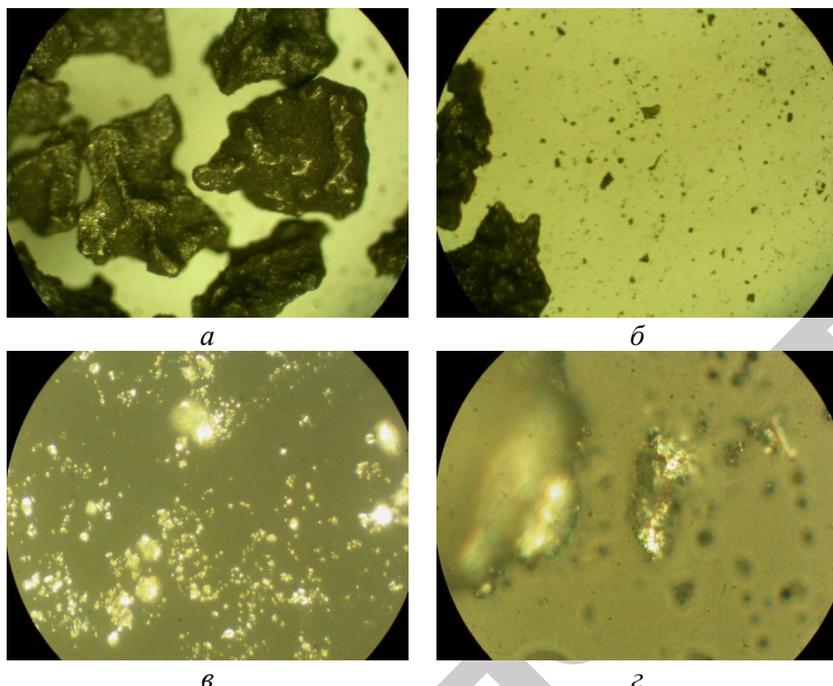


Рис. 3.33. Структура ФАП через 30 с работы:
а – X78; б – X78; в – X620; г – X1500

2. Через 90 с работы ФАП в два раза увеличивается количества шлама, фракция № 1 составляет 89,07 %; № 2 – 7,57 % (рис. 3.34), остальные фракции составляют 3,36 %.

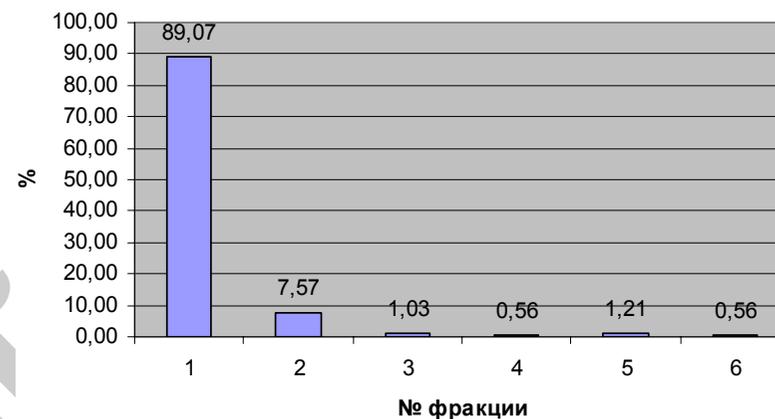


Рис. 3.34. Процентное соотношение фракций через 90 с работы ФАП

Структура ФАП через 90 с представлена на рис. 3.35.

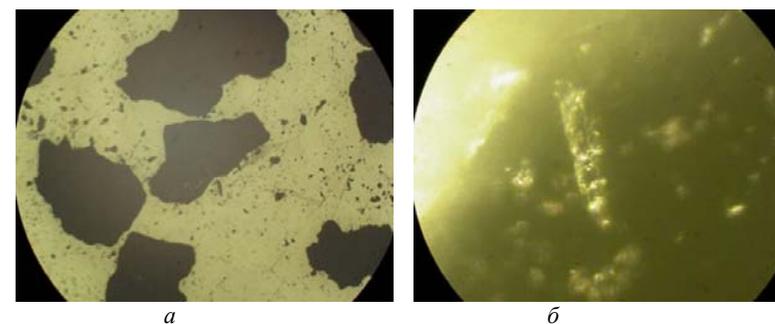


Рис. 3.35. Структура ФАП через 90 с работы:
а – X78; б – X620

3. Через 180 с работы ФАП фракция № 1 составляет 82,84 %; № 2 – 10,62 % (рис. 3.36), остальные фракции в сумме составляют 6,54 %.

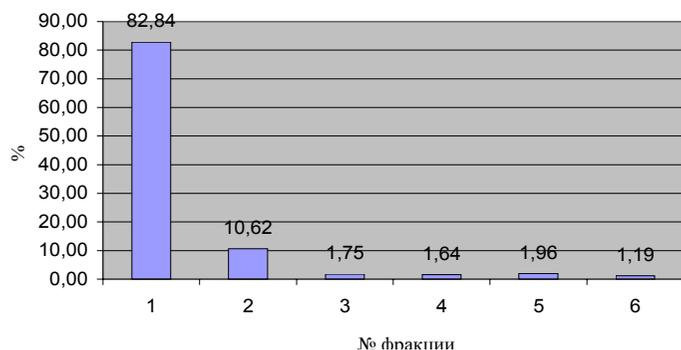


Рис. 3.36. Процентное соотношение фракций через 180 с работы ФАП

Структура ФАП через 180 с представлена на рис. 3.37.

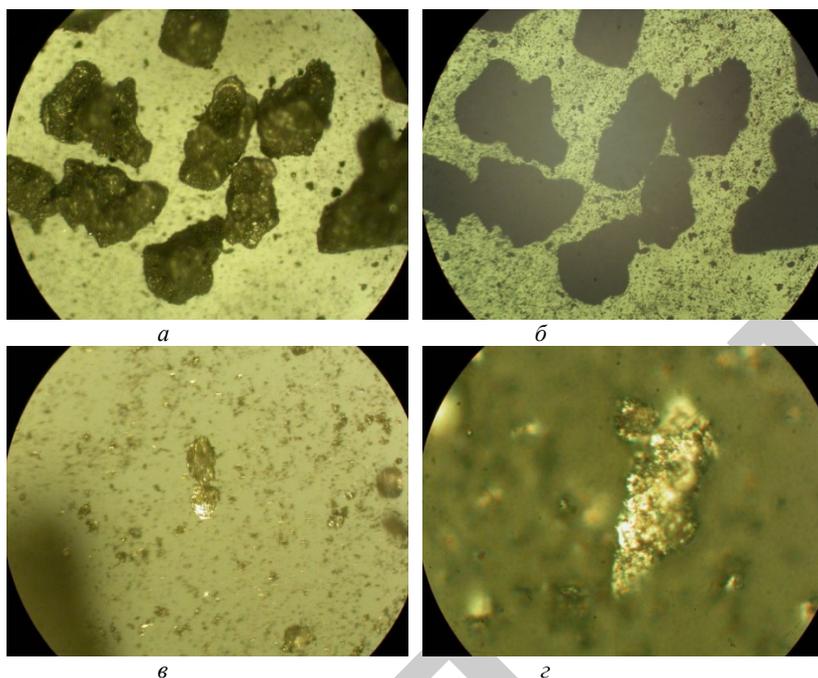


Рис. 3.37. Структура ФАП через 180 с работы:
а – X78; б – X78; в – X310; г – X1500

4. Через 300 с работы ФАП фракция № 1 составляет 76,78 %; № 2 – 12,5 % (рис. 3.38), остальные фракции суммарно составляют 11,07 %.

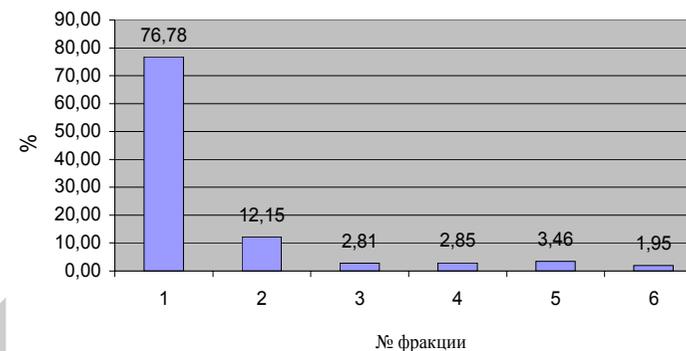
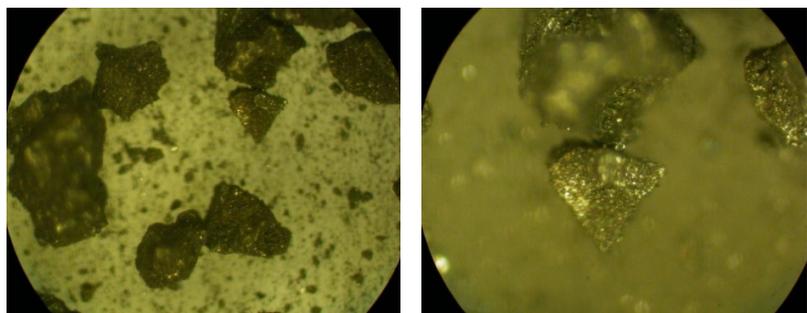


Рис. 3.38. Процентное соотношение фракций через 300 с работы ФАП

Анализ зависимости изменения шероховатости рабочих поверхностей зубьев от времени работы ФАП (рис. 3.29) показывает, что наименьшее значение шероховатости образца получено при таком соотношении фракций через 7 мин работы ФАП. Объясняется это тем, что ферритная составляющая зерна ФАП по твердости меньше твердости шлама, образованного в результате обработки поверхности образца с твердостью 62...64 HRC, частицы шлама притягиваются к зерну, вследствие его намагниченности, и внедряясь в него, образуют слой, препятствующий процессу обработки. Образуется абразивное зерно иного состава абразивной и ферритной частей. Роль абразива начинают выполнять срезанные гребни обрабатываемой поверхности. Из рис. 3.26 видно, что шероховатость после обработки 5-го образца (время работы ФАП 7,5 мин) начинает увеличиваться и при обработке 8-го образца имеет максимальное значение Ra 4,22 мкм (время работы ФАП 18 мин), большее, чем шероховатость исходной поверхности образца Ra 3,5 мкм.

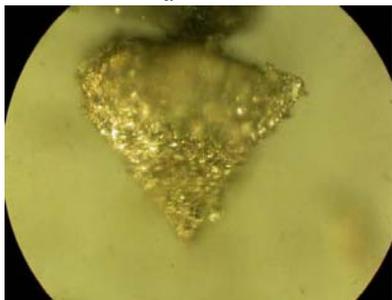
На основании вышесказанного установлено, что в целях обеспечения минимальной шероховатости обрабатываемой детали ФАП не эффективно использовать после 7,5 мин его работы.

Структура ФАП через 300 с представлена на рис. 3.39.



a

б



в

г

Рис. 3.39. Структура ФАП, отработавшего 300 с:
a – X78; *б* – X160; *в* – X310; *г* – X620

5. Через 450 с работы ФАП фракция № 1 составляет 65,57 %; № 2 – 14,64 % (рис. 3.40), остальные фракции составляют 19,8 %.

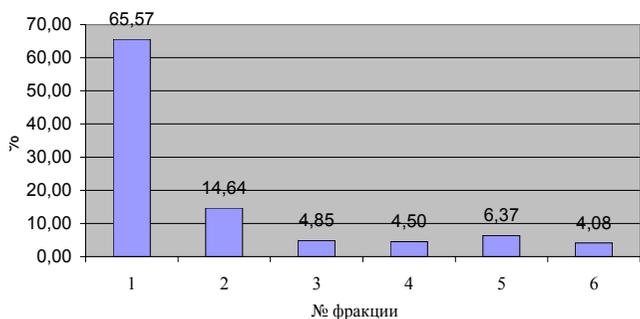
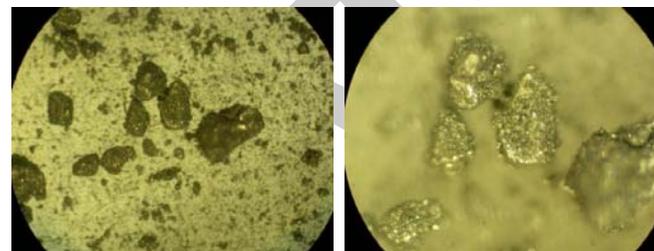


Рис. 3.40. Процентное соотношение фракций через 450 с работы ФАП

Структура ФАП через 450 с представлена на рис. 3.41.



a

б

Рис. 3.41. Структура ФАП, отработавшего 450 с:
a – X78; *б* – X160

6. Через 630 с работы ФАП фракция № 1 составляет 57,57 %; № 2 – 17,43 % (рис. 3.41), остальные фракции составляют 25 %.

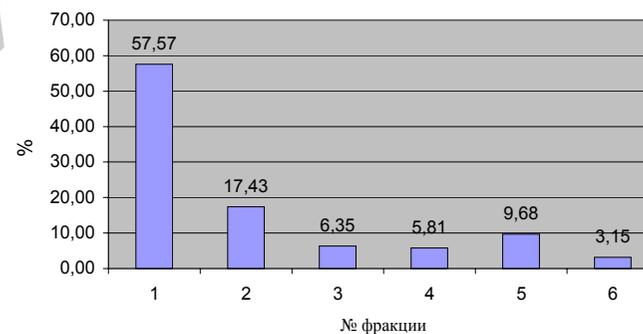
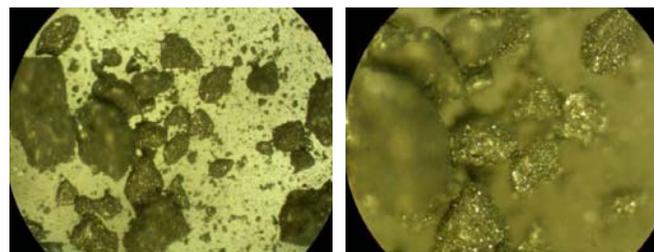


Рис. 3.42. Процентное соотношение фракций через 630 с работы ФАП

Структура ФАП через 630 с представлена на рис. 3.43.



a

б

Рис. 3.43. Структура ФАП, отработавшего 630 с:
a – X78; *б* – X160

7. Через 840 с работы ФАП фракция № 1 составляет 54,11 %; № 2 – 17,75 % (рис. 3.44), остальные фракции составляют 28,14 %.

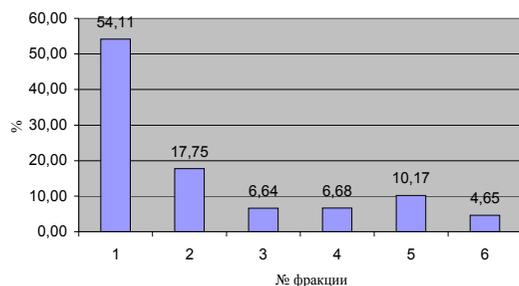


Рис. 3.44. Процентное соотношение фракций через 840 с работы ФАП

Структура ФАП через 840 с представлена на рис. 3.45.

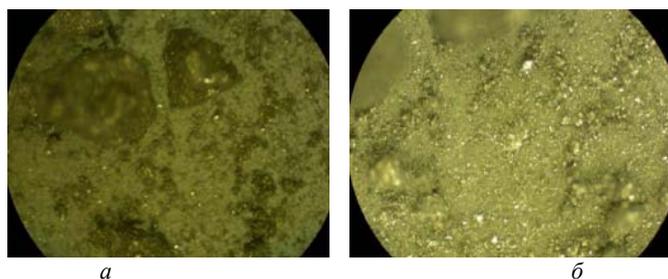


Рис. 3.45. Структура ФАП, отработавшего 840с:
а – X78; б – X160

8. Через 1080 с работы ФАП фракция № 1 составляет 50,56 %; № 2 – 18,23 % (рис. 3.46), остальные фракции составляют 31,21 %.

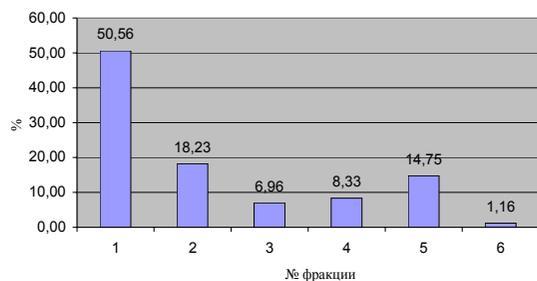


Рис. 3.46. Процентное соотношение фракций через 1080 с работы ФАП

Структура ФАП через 1080 с представлена на рис. 3.47.

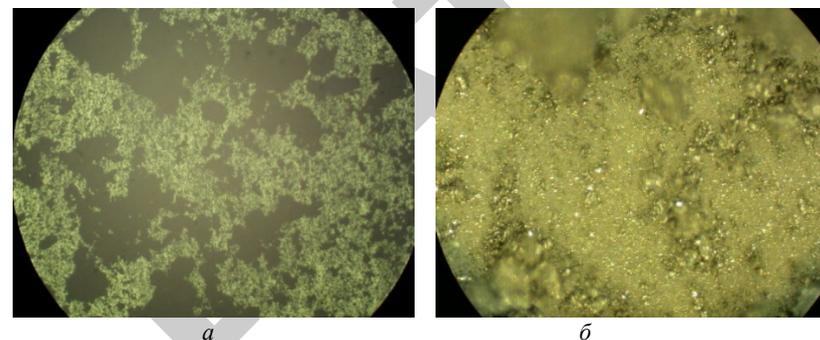


Рис. 3.47. Структура ФАП, отработавшего 1080 с:
а – X78; б – X160

9. Через 1350 с работы ФАП фракция № 1 составляет 40,3 %; № 2 – 20,58 % (рис. 3.48), остальные фракции составляют 39,12 %.

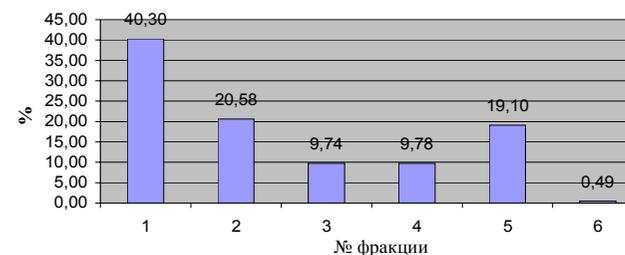
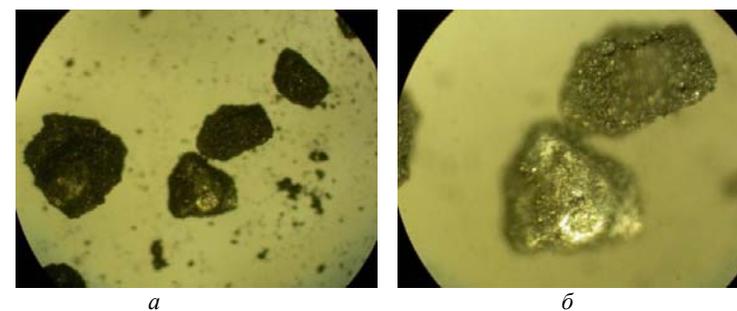


Рис. 3.48. Процентное соотношение фракций через 1350 с работы ФАП

Структура ФАП через 1350 с представлена на рис. 3.49.



а б

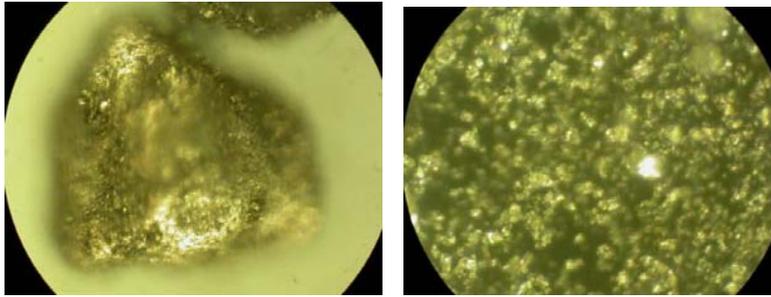


Рис. 3.49. Структура ФАП, отработавшего 1350 с:
 а – X78; б – X160; в – X310; г – X620

3.5. Оптимизация технологических параметров МАО при использовании порошков Fe-TiC

Задача планирования эксперимента по определению оптимального состава ФАП на основе V и Ti состоит в получении представления и нахождения приближенной зависимости математического ожидания результата процесса [133, 134]. Известно, что в общем случае исследование процесса происходит при неполном знании механизма его протекания. В связи с указанным выше, для сокращения числа опытов на первой стадии исследований был принят полином первой степени или линейная модель, которая достаточно точно предсказывает скорейшее улучшение параметров оптимизации ФАП. Кроме того, она оказалась вполне пригодна для описания процесса МАО сложнопрофильных поверхностей в данном интервале переменных факторов для определения оптимального количества массового состава ФАП. Только для описания почти стационарной области требуется адекватность математической модели, способной предсказать результаты экспериментов с достаточной точностью. Поскольку следует учитывать, что фактически речь идет о зависимости оценки математического описания от состава и количества компонентов ФАП, то число их состояний в пределах изменения параметра оптимизации должно быть максимальным.

Известно, что всякая модель должна быть средствами осмысления, действительности и постановки эксперимента, а также

инструментом прогнозирования. Следует иметь в виду, что получаемые таким образом регрессионные модели являются, как правило, первым этапом изучения явлений, лежащих в основе технологических процессов. Такой подход позволяет эффективно установить статистические связи между количественными величинами, характеризующими процесс, и отобрать в ряде случаев набор необходимых факторов.

Установлено, что оптимизация является выбором такого варианта управления процессом, при котором достигается экстремальное значение критерия, характеризующего его качество. Оптимизация в данном случае, поскольку постановка задачи представлена стохастическим способом, позволяет назначать параметры с заданным уровнем надежности. При этом обеспечивается надежность с высоким показателем доверительной вероятности, при котором возможные отказы, имеющие под собой случайную природу, компенсируются ростом производительности и падением себестоимости. Принципы технологической системы были заданы пределами, отделяющими эту систему от реальной ситуации, и определяли ее фиксацию. Проблема многокритериальной оптимизации является одной из центральных задач теории проектирования технологического процесса и управления им. Задачи установления влияния параметров предшествующего перехода на параметры последующего по своей сущности носят распределительный характер. Поэтому системный подход к назначению параметров процесса обеспечивается соответствующей процедурой оптимизации, при которой критерий оптимизации определяет цель оптимизации.

На основании изложенного выше поиск оптимальных ФАП для МАО был осуществлен методом математического планирования экспериментов. Параметром оптимизации были выбраны производительность процесса (массовый съем материала G , мг, и достигаемая шероховатость поверхности после обработки Ra_2 , мкм).

Для исследования процесса МАО деталей машин воспользовались известными методиками математического планирования эксперимента основанных на статистической обработке данных [20].

Функция $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ модели процесса МАО от K факторов представляется в виде квадратичного полинома (более высокий порядок применяется редко) [133]:

$$Y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq K} b_i X_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq K} b_{ij} X_{ij} + \sum_{1 \leq i \leq K} b_{ij} X_i^2, \quad (3.3)$$

который состоит из одного свободного члена с коэффициентом b_0 , из K , линейных членов с коэффициентами b_i , из K квадратичных членов с коэффициентами b_{ii} и $C_k^2 = \frac{K(K-1)}{2}$ парных сочетаний с коэффициентом b_{ij} , т. е. всего из L членов:

$$L = 1 + K + K + C_k^2 = \frac{(K+1)(K+2)}{2}.$$

Чтобы определить все L коэффициентов квадратичной модели, надо иметь план, в котором каждая переменная варьирует хотя бы на трех разных уровнях и соответствующая матрица нормальных уравнений которого не вырождена.

Для построения композиционных планов процесса MAO целесообразно применить метод Хартли [134].

Из табл. 3.20 видно, что использование планов Хартли весьма эффективно, когда имеются жесткие ограничения на число опытов. Кроме того, они эффективны при исследовании объектов с малым уровнем констант, если задачу построения квадратичной модели рассматривать как задачу построения обычной интерполяционной формулы. В этом случае различная точность определения коэффициентов уравнения, получаемого с помощью плана Хартли, не играет особой роли, поскольку все дисперсии этих коэффициентов имеют незначительные величины из-за малости $\sigma_2 \{y\}$.

Таблица 3.20

Число опытов по планам Хартли

Число опытов	Число констант $L = \frac{(K+1)(K+2)}{2}$	Число опытов по планам Хартли (Нак)
2	6	7
3	10	11
4	15	17
5	21	27
6	28	29
7	36	47

Применяем композиционный план Хартли типа $2k - p$, где p – число линейных эффектов, приравненных к эффектам взаимодействия. Этот план получается добавлением $2K$ «звездных точек» типа $(\pm\alpha, 0, \dots, 0)$, $(0, \pm\alpha, \dots, 0)$, $(0, 0, \dots, \pm\alpha)$ и центральной точки по $(0, 0, \dots, 0)$ к «ядру», образованному размерной репликой от ПФЭ типа $2k$, так что общее число точек в плане

$$N = N_1 + 2K + n_0, \quad (3.4)$$

где $N_1 = 2k - p$ – число опытов ядра плана.

В данном плане число линейных эффектов $p = 2$, число уравнений варьирования $\gamma = 5$, величина звездного плеча $\alpha = 2,646$.

Поскольку в плане $N = 7$ приравниваются к взаимодействиям два фактора, то задаются и два определяющих контраста: $1 = -X_1 X_2 X_3$; $1 = X_4 X_5 X_6$.

В качестве независимых переменных, на основании экспериментальных данных взяли следующие факторы: X_1 – относительная скорость обрабатываемой детали (скорость резания v_p); X_2 – осциллирующая скорость детали ($v_{осц}$); X_3 – объем подаваемого порошка в единицу времени (v_n); X_4 – амплитуда осцилляции (A); X_5 – время обработки (t); X_6 – магнитная индукция в рабочем зазоре (B); X_7 – рабочий зазор (δ). Параметрами оптимизации служили $Y_1 = Ra_2 \cdot 10^3$ – шероховатость поверхности после обработки и $Y_2 = \Delta Q$ – массовый съем металла.

Постоянными опытов были приняты степень заполнения порошком рабочей зоны $K_3 = 1$, ФАП Fe-TiC (15 %) зернистостью $\Delta = 315/200$.

Эксперимент проводили на установке СФТ 2.150.00.000. Образцами служили валы, представляющие собой тела вращения со сложнопровальной поверхностью из стали 25 ХГМ ТУ 14-1-3463–82 (57... 63 HRC).

Шероховатость поверхности до и после обработки замерялась в одном сечении оси образца (перпендикулярном). Затем вычислялось среднее значение шероховатости для образца:

$$Ra_2 = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Ra_i. \quad (3.5)$$

Условия опытов, матрица планирования и полученные результаты представлены в табл. 3.21. Все опыты распределялись во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Таблица 3.21

Условия опытов

Факторы	v_p , м/с	v_{ocn} , м/с	v_{np} , дм ³ /с	A, мм	t , с	B, Тл	δ , м
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
Основной уровень (0)	0,09	0,06	0,0025	3,0	90	1,0	1,2
Верхний уровень (+1)	0,10	0,1	0,0033	5,0	120	1,2	1,5
Нижний уровень (-1)	0,08	0,02	0,0017	1,0	60	0,8	0,9
Звездная точка (+ α)	0,17	0,23	0,0046	5,9	180	1,6	2,0
Звездная точка (- α)	0,06	0,012	0,0004	0,4	30	0,35	0,4
Основной интервал варьирования	0,01	0,04	0,0008	2,0	30	0,200	0,3
По α	0,055	0,109	0,0021	2,75	75	0,625	0,8

Для обработки на персональном компьютере (ПК) результатов опытов, полученных по матрице композиционного плана Хартли, был использован программный пакет *MathCAD-2001* для расчета коэффициентов, предсказываемых уравнением регрессии значений функций отклика для каждого опыта, отклонений предсказываемых значений от полученных в опыте и квадратов этих отклонений. Эта программа может быть использована композиционным планом Хартли, число строк и столбцов которого не больше, чем у матрицы плана $N = 7$. Коэффициенты регрессии модели определяли по формулам:

$$b_0 = a_6 \sum X_{ou} Y_u + a_3 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N X_{iu}^2 Y_u ;$$

$$b_i^* = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} Y_u - \sum (X_j X_l)_u Y_u}{a_1 - a_2} ;$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} Y_u}{a_1} ;$$

$$b_{ji}^* = \frac{a_1 \sum (X_j X_l)_u Y_u - \sum X_{iu} Y_u}{a_2 (a_1 - a_2)} ;$$

$$b_{ji} = \frac{\sum (X_j X_l)_u Y_u}{a_2} ;$$

$$b_{ii} = a_3 \sum X_{ou} Y_u + (a_4 - a_3) \sum X_{iu}^2 Y_u + a_5 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N X_{iu}^2 Y_u , \quad (3.6)$$

где b^* – коэффициент при факторе, который входит в любое взаимодействие определяющего контраста;

b_i – коэффициент при факторе, который не входит ни в одно из тройных взаимодействий определяющего контраста;

b_{ji} – коэффициент эффекта факторов, который входит в любое взаимодействие определяющего контраста;

b_{jil} – коэффициент эффекта факторов, который не входит ни в одно из тройных взаимодействий определяющего контраста.

Постоянные $a_1 \dots a_6$ определяются значением $N = 7$: $a_1 = 46$, $a_2 = 32$, $a_3 = -0,143$, $a_4 = 0,033$, $a_5 = 0,019$, $a_6 = 1$.

Для статистического анализа уравнений регрессии функции отклика $Y_1 = Ra_2 \cdot 10^3$ и функции отклика $Y_2 = \Delta Q$ был использован программный пакет *MathCAD-2001*.

Статистический анализ значимости коэффициентов моделей показал, что не все коэффициенты можно считать статистически значимыми с 98 %-ной доверительной вероятностью.

Итак, модель, определяющая характер зависимости шероховатости поверхности от технологических факторов, имеет вид

$$Y_1 = 54 - 8,34X_1 - 7,48X_3 - 9,23X_5 - 7,26X_6 + 4,25X_7 - \\ - 12,00X_1X_4 + 7,56X_1X_5 + 9,24X_1X_6 + 6,15X_2X_3 + 13,84X_5X_6 + \\ + 4,57X_{12} + 4,33X_{32} + 2,07X_{42} + 6,11X_{52} + 5,32X_{62}. \quad (3.7)$$

Модель, определяющая характер зависимости массового съема металла от технологических факторов:

$$Y_2 = 44,98 + 3,84X_1 + 8,93X_3 - 4,12X_4 + 11,34X_5 + 12,08X_6 + \\ + 14,27X_1X_2 + 3,92X_1X_3 - 6,01X_2X_3 - 5,12X_5X_7 - 5,11X_{12} - \\ - 6,70X_{22} - 4,08X_{32} - 1,97X_{42} - 3,98X_{52} - 3,96X_{62} - 5,97X_{72}. \quad (3.8)$$

Здесь по условию переход от кодированных (x_i) к натуральным (X_i) значениям факторов осуществляется по формулам:

$$X_1 = \frac{x_1 - 1,25}{0,35}; \quad X_2 = \frac{x_2 - 0,2}{0,07}; \quad X_3 = \frac{x_3 - 0,0025}{0,0008};$$

$$X_4 = \frac{x_4 - 2,5}{0,5}; \quad X_5 = \frac{x_5 - 30}{9}; \quad X_6 = \frac{x_6 - 0,9}{0,1}; \quad X_7 = \frac{x_7 - 1,2}{0,3};$$

Статистический анализ полученных уравнений регрессии (3.7) и (3.8) показал, что модель (3.7) адекватна при 5 %-м уровне значимости, а модель (3.8) – при 10 %-м.

После статистического анализа уравнений множественной регрессии было принято решение провести их геометрическую интерпретацию при помощи одномерных сечений функции отклика $Y_1 = Ra_2 \cdot 10^3$ и $Y_2 = \Delta Q$.

В общем виде уравнение записывается следующим образом:

$$Y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq K} b_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq K} b_{ij} X_{ij} + \sum_{1 \leq i \leq K} b_{ij} X_i^2,$$

Исходные данные для построения графиков зависимости шероховатости поверхности и массового съема металла от различных факторов

Функция отклика	Исследуемый фактор	Значение фактора				
		-2	-1	0	+1	+2
Y_1	X_1	82,47	71,03	54	47,11	53,21
	X_2	55,28	59,01	54	58,36	73,25
	X_3	78,34	67,49	54	52,74	61,00
	X_4	56,32	53,44	54	69,28	72,47
	X_5	88,24	72,69	54	43,11	48,92
	X_6	84,00	73,28	54	49,58	59,74
	X_7	53,98	52,14	54	71,03	73,00
Y_2	X_1	25,34	32,18	44,98	43,92	35,01
	X_2	28,30	38,24	44,98	38,29	22,10
	X_3	38,64	50,54	44,98	51,27	51,03
	X_4	46,28	48,32	44,98	38,47	32,80
	X_5	19,32	41,22	44,98	59,00	48,11
	X_6	12,95	37,11	44,98	57,11	52,07
	X_7	31,08	36,25	44,98	42,82	34,82

Зависимости, показанные на рис. 3.50, находятся в факторном пространстве, так как опыты проводились в пределах $-2,646 \leq X_i \leq +2,646$, а пределы экстраполяции были ограничены условиями $-2 \leq X_i \leq +2$.

Анализ каждой из приведенных на рис. 3.50 зависимостей, а также уравнений регрессии позволяет выявить характерные особенности магнитно-абразивной обработки. Видно, что из всех исследуемых технологических факторов наибольшее влияние на процесс оказывают магнитная индукция в рабочем зазоре B , время обработки t , скорость осцилляции v_o и объем порошка v_n .

Оптимизацию процесса магнитно-абразивной обработки поверхностей вращения производим по моделям (3.7) и (3.8), применив теорию графов [133, 134]. На рис. 3.51 построены графы взаимодействий между технологическими факторами, влияющими на шероховатость поверхности и массовый съем металла.

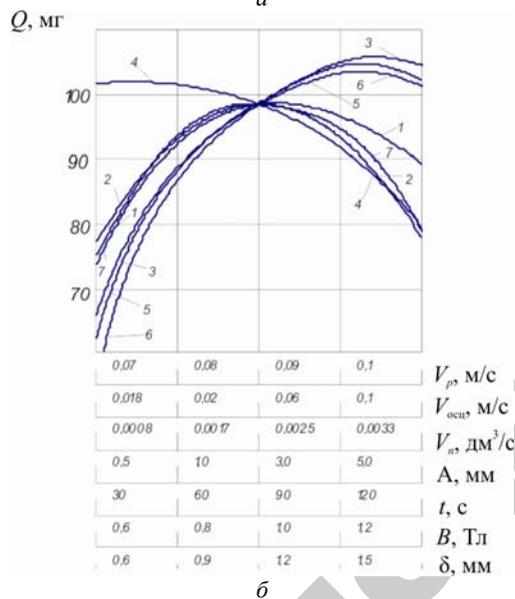
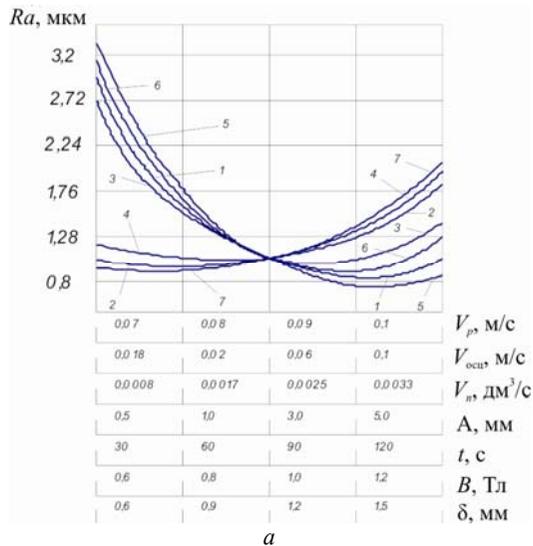


Рис. 3.50. Зависимость от технологических факторов шероховатости поверхности (а) и массового съема металла (б):

1 – скорость резания (v_p); 2 – скорость осцилляции ($v_{осц}$); 3 – объем подаваемого ФАП (v_n); 4 – амплитуда осцилляции (A); 5 – продолжительность обработки (t); 6 – магнитная индукция в рабочем зазоре (B); 7 – величина рабочего зазора (δ)

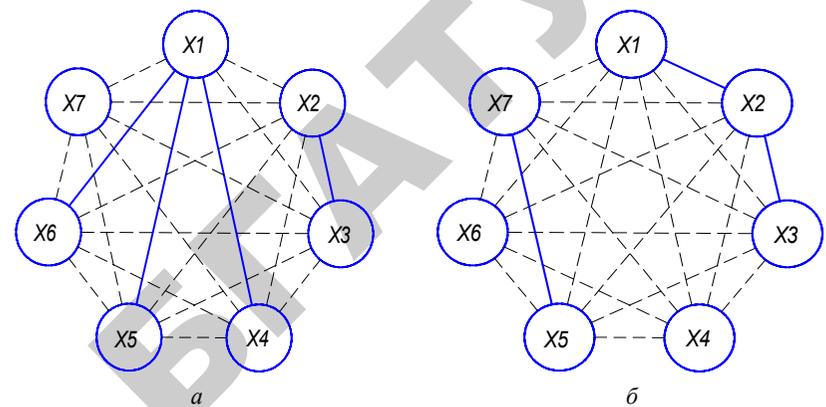


Рис. 3.51. Графы взаимодействия между факторами, влияющими на: а – шероховатость поверхности; б – массовый съем металла

Из анализа графа (рис. 3.51, а), построенного по модели (3.7) видно, что из модели можно выделить функцию $Y_{1,7}$ и искать ее оптимум независимо (вершина X_7 не связана с остальными): $Y_{1,7} = 4,25X_7 + 2,06X_{72}$.

Функция $Y_{1,7}$ имеет максимум в точке X_7 , координаты которой легко находятся из производной функции $Y_{1,7}$, приравненной нулю:

$$dy_{1,7} / dx_7 = 4,25 + 2 \cdot 2,06X_7 = 0,$$

$$X_{7opt} = -4,25 / 4,12 = -1,03.$$

Если вести процесс обработки при $X_7 = -1,03$, что соответствует $\delta \approx 0,9$ мм, то $Y_7 = 4,25(-1,03) + 2,06(-1,03)^2 = -2,19$.

Отняв величину Y_7 от коэффициента b_0 модели, получим новую модель магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей при оптимальном рабочем зазоре:

$$Y_1 = 51,81 - 8,37X_1 + 2,54X_2 - 7,48X_3 - 9,23X_5 - 7,26X_6 - 12,00X_1X_4 + 7,56X_1X_5 + 9,24X_1X_6 + 6,15X_2X_3 + 13,84X_5X_6 + 4,57X_1^2 + 4,33X_3^2 + 2,07X_4^2 + 6,11X_5^2 + 5,32X_6^2, \quad (3.10)$$

длину пути в которых сокращают на основе логического технико-экономического анализа сути процесса MAO сложнопрофильной поверхности при помощи (рис. 3.51, а). Во-первых, можно удалить факторы X_1 и X_4 на основе суждения: наименьшая шероховатость поверхности достигается при $X_1 = -1$, дальнейшее повышение скорости резания ухудшает шероховатость поверхности (рис. 3.51, а); значение $X_4 > 0$ дает резкое уменьшение шероховатости и увеличение массового съема металла (рис. 3.51, а, б), что приводит нас только к значениям $X_1 = +1$, $X_4 = +1$. Во-вторых, можно увеличить факторы продолжительности обработки X_5 и величины магнитной индукции X_6 ; значение $X_6 > +1$ понижает шероховатость поверхности и увеличивает массовый съем металла (рис. 3.51, а, б), что дает значения $X_5 = +1$; $X_6 = +1$. В-третьих, можно увеличить фактор X_2 на основе суждения: увеличение скорости осцилляции резко понижает шероховатость, что приводит к величине $X_2 = +1$. Логически выбранное значение $X_2 = +1$ не противоречит и направлению оптимизации Y_1 , так как $b_2 > 0$. Подставляя значения $X_1 = +1$; $X_2 = +1$; $X_4 = +1$; $X_5 = +1$; $X_6 = +1$ в модель (3.10), получаем новую модель $Y_{1,3}$, в которой оставшийся фактор X_3 взаимонезависим (цепной граф превратился в нулевой):

$$Y_{1,3} = 51,81 - 8,37(-1) + 2,54(+1) - 7,48X_3 - 9,23(+1) - 7,26(+1) - 12,00(-1)(+1) + 7,56(+1)(+1) + 9,24(-1)(+1) + 6,15(+1)X_3 + 13,84(+1)(+1) + 4,57(-1)^2 + 4,33X_3^2 + 2,07(+1)^2 + 6,11(+1)^2 + 5,32(+1)^2 = 88,46 - 1,33X_3 + 4,33X_3^2. \quad (3.11)$$

Повторяя процедуру, аналогичную поиску оптимума, находим X_{3opt} и $Y_{1,3opt}$:

$$dy_{1,3} / dx_3 = -1,33X_3 + 2 \cdot 4,33X_3 = 0;$$

$$X_{3opt} = 1,33 : 8,66 = 0,15;$$

$$Y_{1,min} = 88,46 - 1,33 \cdot 0,15 + 4,33 \cdot 0,15^2 = 88,36.$$

Таким образом, по результатам анализа модели (3.7) получены следующие оптимальные технологические факторы для MAO

сложнопрофильных поверхностей вращения, которые обеспечивают наименьшую шероховатость поверхности: $v_p = 0,08$ м/с; $v_{осц} = 0,1$ м/с; $v_n = 3,3 \cdot 10^{-3}$ дм³/с; $A = 5,0$ мм; $t = 120$ с; $B = 1,2$ Тл; $\delta = 0,9$ мм.

Из анализа графа (рис. 3.51, б), построенного по модели (3.8), видно, что из модели можно выделить функции $Y_{2,4}$ и $Y_{2,6}$ и искать их оптимумы независимо (вершины X_4 и X_6 не связаны с остальными), аналогично функции $Y_{1,7}$.

$$Y_{2,4} = -4,12X_4 - 1,97X_4^2 = 0;$$

$$dy_{2,4} / dx_4 = -4,12 - 2 \cdot 1,97X_4 = 0;$$

$$X_{4opt} = -4,12 / 3,94 = -1,05;$$

$$Y_{2,4} = -4,12X_4 - 1,97X_4^2 = -4,12(-1,05) - 1,97(-1,05)^2 = 2,15;$$

$$Y_{2,6} = 12,08X_6 - 3,96X_6^2 = 0;$$

$$dy_{2,6} / dx_6 = 12,08X_6 - 2 \cdot 3,96X_6 = 0;$$

$$X_{6opt} = 12,08 / 7,92 = 1,52;$$

$$Y_{2,6} = 12,08X_6 - 3,96X_6^2 = 12,08 \cdot 1,52 - 3,96 \cdot 1,52^2 = 9,21.$$

В результате проведенных вычислений имеем $X_{4opt} = -1,05$ и $X_{6opt} = 1,52$, что соответствует $A = 2,02$ мм и $B = 1,5$ Тл, а также $Y_{2,4} = 2,15$ и $Y_{2,6} = 9,21$.

Прибавив величину $Y_{2,4}$ и $Y_{2,6}$ к коэффициенту b_0 модели (3.8), получим новую модель MAO при оптимальных значениях рабочего зазора δ и магнитной индукции B :

$$Y_2^1 = 56,34 + 3,84X_1 + 8,93X_3 + 11,34X_5 + 14,27X_1X_2 - 6,01X_2X_3 - 5,12X_5X_7 - 5,11X_1^2 - 6,7X_2^2 - 4,08X_3^2 - 3,98X_5^2 - 5,97X_7^2. \quad (3.12)$$

Факторы полученной модели образуют цепные графы $X_1 - X_2 - X_3$; $X_5 - X_7$, длину пути которых сокращаем на основе логического технико-экономического анализа процесса MAO (рис. 3.51, б).

В результате сокращения длин графов модели (3.12) имеем $X_1 = -0,5$; $X_2 = 0$; $X_5 = +1$; $X_7 = 0$. Подставляя эти значения в модель (3.12), получаем новую модель $Y_{2,3}$, в которой оставшийся фактор X_3 взаимонезависим:

$$Y_{2,3} = 56,34 + 3,84(-0,5) + 8,93X_3 + 11,34(+1) + 14,27(-0,5)(0) - \\ - 6,01(0)X_3 - 5,12(+1)(0) - 5,11(-0,5)^2 - 6,7(0)^2 - \\ - 4,08X_3^2 - 3,98(+1)^2 - 5,97(0)^2 = 6,08 + 8,93X_3 - 4,08X_3^2; \quad (3.13)$$

$$Y_{2,3} = 8,93X_3 - 4,08X_3^2 = 0;$$

$$dy_{2,3} / dx_3 = 8,93 - 2 \cdot 4,08 = 0;$$

$$X_{3opt} = 8,93 / 8,16 = 1,09.$$

Продифференцировав уравнение (3.13) по независимому переменному X_3 и приравняв частное производное нулю, получим $X_{3opt} = 1,09$; $Y_{2,3 max} = 10,96$.

Таким образом, по результатам анализа модели (3.8) получены следующие оптимальные технологические факторы для МАО сложно-профильных поверхностей вращения, которые обеспечивают наибольший массовый съем металла: $v_p = 0,083$ м/с; $v_{осц} = 0,096$ м/с; $v_{п} = 3,32 \cdot 10^{-3}$ дм³/с; $A = 2,02$ мм; $t = 120$ с; $B = 1,5$ Тл; $\delta = 1,02$ мм.

Таблица 3.23

Оптимальные значения исследуемых технологических факторов

Факторы	Кодовое обозначение	Значение факторов	
		для функции отклика Y_1	для функции отклика Y_2
Скорость резания v_p , м/с	X_1	0,08	0,083
Скорость осцилляции $v_{осц}$, м/с	X_2	0,1	0,096
Объем ФАП $v_{п}$, дм ³ /с	X_3	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$3,32 \cdot 10^{-3}$
Амплитуда осцилляции A , мм	X_4	5,0	2,02
Время обработки t , с	X_5	120	120
Величина магнитной индукции в рабочем зазоре B , Тл	X_6	1,2	1,5
Величина рабочего зазора, δ , мм	X_7	0,9	1,02

Анализ приведенных данных табл. 3.23 показывает, что технологические режимы МАО, при которых достигается минимальная шероховатость поверхности, не обеспечивают максимального съема металла и наоборот. Поэтому в каждом конкретном случае для получения оптимальных технологических режимов нужно искать компромиссное решение.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ

4.1. Проектирование технологических процессов МАО

Проектирование технологических процессов (ТП) имеет целью дать подробное описание процессов изготовления детали с необходимыми технико-экономическими расчетами и обоснованиями принятого варианта из возможных. В результате составления технологической документации инженерно-технический персонал и рабочие получают необходимые данные и инструкции для реализации разработанного ТП на предприятии. Технологические процессы определяют необходимые средства производства для выпуска изделий (оборудование и средства технологического оснащения (СТО), режущий и контрольный инструмент), трудоемкость и себестоимость изготовления изделий. Все это служит основой для организации обеспечения производства основными и вспомогательными материалами, календарного планирования, технического контроля, инструментального и транспортного обеспечения, а также для определения производственных площадей, потребных топливно-энергетических ресурсов, рабочей силы и т. п. [135, 136].

В зависимости от условий производства и назначения применяются различные виды и формы технологических процессов. Вид определяется количеством изделий, охватываемых процессом (одно изделие, группа однотипных или разнотипных изделий).

Обработка этих видов поверхностей, как правило, регламентирована определенными способами и методами изготовления, для чего детали группируются по конструктивным признакам, размерностям, массе и общности технологического процесса их изготовления на классы, характеризующие технологическую классификацию.

При проектировании технологического процесса МАО используют формы карт на механическую обработку:

– маршрутную карту ГОСТ 3.1118–82, которая содержит описание технологического процесса изготовления и контроля изделия по всем операциям различных видов работ в технологической последовательности с указанием данных по оборудованию, оснастке, материальным и трудовым нормативам (рис. 4.1);

– операционную карту ГОСТ 3.1404–86, содержащую описание операции технологического процесса изготовления изделия с расчленением по переходам и указанием соответствующих данных по оборудованию, оснастке и режимам резания (рис. 4.2 *а, б, в*);

– карту эскизов ГОСТ 3.1105–84, содержащую графическую иллюстрацию технологической операции.

4.2. Технологическое оборудование для МАО поверхностей различного профиля

Движение ферроабразивных частиц в рабочем зазоре при МАО и интенсивность съема микронеровностей с обрабатываемой поверхности определяется характером действия на контактирующие частицы сил на различных стадиях процесса абразивного воздействия.

Оборудование и технологическая оснастка для МАО создаются как индивидуальные образцы, так и путем модернизации различных МРС. В последнем варианте разрабатывается принципиальная рабочая схема и механизмы привода обрабатываемых изделий и их осцилляция, рис. 4.3.



Рис. 4.3. Фотография рабочей зоны при МАО деталей:
а – типа «вал»; *б* – типа «диск»

ГОСТ 3.1118-82 форма 2																					
Дубл.																					
Взам.																					
Подп.																					
ГФУЛ 02190.00001Р										1	1										
Разраб.	Комик И.Ю.																				
Прое.	Сергеев Л.Е.																				
Н.контр.	Акопова С.С.																				
Т.контр.	Романова Т.К.																				
Уте.	Акулович Л.М.																				
Вал ротора										01											
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код наименования операции																
Б	Код наименования оборудования										СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Тпз	Тшт.
К/М	Наименование детали, об. единицы или материала										Обозначение код										
А01	1	1	6	005	слесарная					20121.00001Р					60121.00005Р						
Б02	Пресс гидравлический П414										слесарь 312 1 1 1 1					4 4,48					
Б03																					
А04	1	1	5	010	крулошлифовальная					20140.00001Р					60142.00001Р						
Б05	Крулошлифовальный станок мод.ЗМ151										шлиф 5 1 1 1 1					6,5 22,71					
Б06																					
А07	1	1	6	015	магнитно-абразивная обработка					20140.00001Р					60142.00001Р						
Б08	Установка для МАО										шлиф 5 1 1 1 1					6 30,41					
Б09																					
А10	1	1	5	020	слесарная					60101.00001Р											
Б11	Верстак слесарный										слесарь 3 1 1 1 1										
Б12																					
А13	2	1	2	025	контрольная					20102.00001Р					60102.00001Р						
Б14	Сталь ОПГ-1468-01-090А										контр 4 1 1 1 1										
Б15																					
Б16																					
МК										Маршрутная карта										5	

Рис. 4.1. Фрагмент технологического процесса изготовления детали с использованием метода МАО
«Маршрутная карта ГОСТ 3.1118–82»

ГОСТ 3.1404-88 форма 3																				
Дубл.																				
Взам.																				
Подп.																				
ГФУЛ 02100.00001Р										3	1									
Разраб.	Комик И.Ю.																			
Прое.	Сергеев Л.Е.																			
Н.контр.	Акопова С.С.																			
Т.контр.	Романова Т.К.																			
Уте.	Акулович Л.М.																			
Вал										П	О1		025							
Наименование операции				Материал				Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры				МЗ	КОИД				
Магнитно-абразивная обработка				Сталь 45 ГОСТ 1050-88				255...302НВ	кг	6,4	-				-	1				
Оборудование, устройство ЧПУ				Обозначение программы				То	Тв	Тпз	Тшт.	СОЖ								
Установка для МАО				-				24,2	6,21	6	30,41	Синхо - 1								
Р				ПИ	Д или В	L	t	i	S	n	V									
А01	20140.00001Р																			
О02	1. Установить заготовку и закрепить $T_{\text{в}}=1,2$																			
Т03	Патрон поводковый 7100-0003 ГОСТ 2675-80 тип 1; центр подшипный 7032-0043 ГОСТ 13214-79; люнет 4503-000																			
Б04																				
О05	2. Полировать поверхность, выдерживая размеры 1, 8 $T_{\text{о}}=3,0$ $T_{\text{в}}=0,67$																			
Р06					39,5	57	0,001	1			350	43								
Т07	ФАП – Полимам-М ТУ 06615-85, размерность зерна $\Delta=315/250$ мкм., коэффициент заполнения рабочего зазора $K3=1$																			
Т08	$V=1,1$ Тл, скорость осцилляции $V_0=0,4$ м/с, амплитуда осцилляции, $A=1,7$ мм., зазор $\delta=2,5$ мм.,																			
Т09	СИ микрометр гладкий МК75-2 ГОСТ 6507-78, профилограф-профилометр мод. 252 «Калибр»																			
Б10																				
О11	3. Полировать поверхность, выдерживая размеры 2, 9 $T_{\text{о}}=3,0$ $T_{\text{в}}=0,67$																			
Р12					39,5	55	0,1	1	1		350	43								
Т13	ФАП – Полимам-М ТУ 06615-85, размерность зерна $\Delta=315/250$ мкм., коэффициент заполнения рабочего зазора $K3=1$																			
OK										Операционная карта										14

ГОСТ 3.1404-86 форма 3										
Дубл.										
Взам.										
Подп.										
								ГФУЛ 02100.00001Р	3	2
								60142.00001Р	025	
Р	ПИ	Д или В	L	t	i	S	n	V		
T01	В = 1,1 Тл, скорость осцилляции V0 = 0,4 м/с, амплитуда осцилляции, А = 1,7 мм., зазор б = 2,5 мм.,									
T02	СИ микрометр гладкий МК 50-2 ГОСТ 6507-78, профилограф-профилометр мод. 252 «Калибр»									
T03										
O04	4. Полировать поверхность, выдерживая размеры 4, 12								To=3,8	Te=0,67
P05		45	100	0,1	1	1	350	50		
T06	ФАП – Полимам-М ТУ 06615-85, размерность зерна Δ=315/250 мкм., коэффициент заполнения рабочего зазора КЗ = 1									
T07	В = 1,1 Тл, скорость осцилляции V0 = 0,4 м/с, амплитуда осцилляции, А = 1,7 мм., зазор б = 2,5 мм.,									
T08	СИ микрометр гладкий МК 50-2 ГОСТ 6507-78, профилограф-профилометр мод. 252 «Калибр»									
O9										
O10	5. Полировать поверхность, выдерживая размеры 3, 10								To=3,8	Te=0,67
P11		45	40	0,1	1	1	350	50		
T12	ФАП – Полимам-М ТУ 06615-85, размерность зерна Δ=315/250 мкм., коэффициент заполнения рабочего зазора КЗ = 1									
T13	В = 1,1 Тл, скорость осцилляции V0 = 0,4 м/с, амплитуда осцилляции, А = 1,7 мм., зазор б = 2,5 мм.,									
T14	СИ микрометр гладкий МК 50-2 ГОСТ 6507-78, профилограф-профилометр мод. 252 «Калибр»									
15										
O16	6. Полировать поверхность, выдерживая размеры 5, 13								To=3,8	Te=0,67
P17		45	100	0,1	1	1	350	50		
OK	Операционная карта									15

б

ГОСТ 3.1404-86 форма 3										
Дубл.										
Взам.										
Подп.										
								ГФУЛ 02100.00001Р	3	3
								60142.00001	025	
Р	ПИ	Д или В	L	t	i	S	n	V		
T01	ФАП – Полимам-М ТУ 06615-85, размерность зерна Δ=315/250 мкм., коэффициент заполнения рабочего зазора КЗ = 1									
T02	В = 1,1 Тл, скорость осцилляции V0 = 0,4 м/с, амплитуда осцилляции, А = 1,7 мм., зазор б = 2,5 мм.,									
T03	СИ микрометр гладкий МК 50-2 ГОСТ 6507-78, профилограф-профилометр мод. 252 «Калибр», штангенциркуль ШЦ-1-150-0,05 ГОСТ 166-80									
O4										
O05	7. Полировать поверхность, выдерживая размеры 6, 11								To=3,8	Te=0,67
P06		45	40	0,1	1	1	350	50		
T07	ФАП – Полимам-М ТУ 06615-85, размерность зерна Δ=315/250 мкм., коэффициент заполнения рабочего зазора КЗ = 1									
T08	В = 1,1 Тл, скорость осцилляции V0 = 0,4 м/с, амплитуда осцилляции, А = 1,7 мм., зазор б = 2,5 мм.,									
T09	СИ микрометр гладкий МК 50-2 ГОСТ 6507-78, профилограф-профилометр мод. 252 «Калибр», штангенциркуль ШЦ-1-150-0,05 ГОСТ 166-80									
10										
O 11	8. Полировать поверхность, выдерживая размеры 7, 14								To=3,0	Te=0,67
P12		39,5	121	0,1	1	1	350	43		
T13	ФАП – Полимам-М ТУ 06615-85, размерность зерна Δ=315/250 мкм., коэффициент заполнения рабочего зазора КЗ = 1									
T14	В = 1,1 Тл, скорость осцилляции V0 = 0,4 м/с, амплитуда осцилляции, А = 1,7 мм., зазор б = 2,5 мм.,									
T15	СИ микрометр гладкий МК 50-2 ГОСТ 6507-78, профилограф-профилометр мод. 252 «Калибр», штангенциркуль ШЦ-1-150-0,05 ГОСТ 166-80									
16										
O17	12. Снять деталь и положить в демагнетизатор								To=0,32	
OK	Операционная карта									16

в

Рис. 4.2. Фрагмент технологического процесса изготовления детали с использованием метода МАО «Операционная карта ГОСТ 3.1404–86»

Оборудование для МАО включает следующие основные системы:

- магнитную, состоящую из электрических магнитных катушек на постоянном выпрямленном токе и предназначенную для удержания ФАП;
- механическую, обеспечивающую позиционирование и закрепление обрабатываемых деталей в зоне обработки и соотношения им рабочих и вспомогательных движений, а также выполняющую функцию несущей системы;
- электрическую, предназначенную для питания ЭМС, привода и управления механизации МРС;
- систему подачи СОТС и ФАП в зону обработки.

Станок СФТ 2.150.00.00.000, созданный на базе токарного станка 16К20, предназначен для магнитно-абразивной обработки деталей типа валов, штоков, гильз, поршней и других деталей типа тел вращения с прямолинейной и сложнопрофильной образующей. Общий вид станка показан на рис. 4.4.

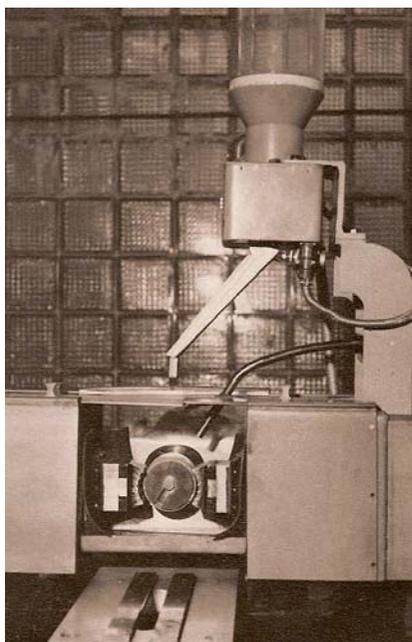


Рис. 4.4. Фотография рабочей зоны станка СФТ 2.150.00.00.000

Станок состоит из следующих основных узлов: электромагнитной системы с двумя намагничивающими катушками; механизма осцилляции, включающего электродвигатель со сменными шкивами, и узла осцилляции; механизма перемещения полюсных наконечников и пульта управления. Техническая характеристика установки приведена в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Техническая характеристика станка СФТ 2.150.00.00.000

Параметры	Значения
Магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл	0,8...1,3
Частота осцилляции полюсных наконечников, дв. ход/с	0...20
Амплитуда осцилляции полюсных наконечников, мм	1...5
Габариты обрабатываемых деталей, мм: – диаметр	10...160
Число намагничивающих катушек	2
Максимальный ток, подаваемый на катушки, А	6
Мощность электродвигателей осцилляции, кВт	1,0
Мощность электромагнитных катушек, кВт	0,6
Производительность обработки, дет/ч	10...100
Габариты устройства, мм: – длина – ширина – высота (с электродвигателями)	1800 380 800
Масса электромагнитного контура с приводом наконечников, кг	400

Устройство на немагнитных накладках устанавливается на направляющие базового станка. Центр полюсных наконечников рассчитан на высоту 200 мм. Если высота центров выбранного станка не совпадает с указанной, то необходимо заменить немагнитные накладки на нужный размер. Полюсные наконечники кинематически взаимосвязаны механизмом перемещения. Они сводятся или разводятся синхронно одной рукояткой с помощью винтовой пары.

Система подачи СОТС используется от базового станка. СОТС подается методом свободного полива.

Устройство соединяется кронштейном с суппортом станка для обеспечения продольного перемещения. Величину хода устройства, а значит и длину обрабатываемой части детали приближенно можно определить из соотношения:

$$L_{\text{обр}} = L_{\text{н}} - \left(\frac{L_{\text{м.с}}}{2} + L_{\text{суп}} \right),$$

где $L_{\text{обр}}$ – длина обработки детали;

$L_{\text{н}}$ – длина направляющих станка;

$L_{\text{м.с}}$ – ширина магнитной системы устройства;

$L_{\text{суп}}$ – длина суппорта станка.

Требуемая скорость вращения детали (скорость резания) устанавливается коробкой передач базового станка.

Рассмотрим порядок работы на станке СФТ 2.150.00.00.000. Обрабатываемую деталь закрепляют в цанге, оправке или патроне станка. На коробке передач устанавливают требуемое число оборотов. Затем деталь вводят в рабочую зону перемещением суппорта с устройством. Рукояткой сводят полюсные наконечники до регулируемого упора, при этом автоматически образуется необходимый рабочий зазор.

Эксцентричными втулками выставляется амплитуда осцилляции. При необходимости заменяют шкивы привода для установки требуемой скорости осцилляции. В рабочий зазор из бункера-накопителя или специальной емкости подается порция ФАП. Затем включается магнитное поле, подача СОТС и необходимые кинематические перемещения. После окончания цикла обработки деталь размагничивается, а полюсные наконечники отводятся в исходное положение, электромагнитную систему при необходимости перемещают на расстояние, удобное для замены детали. Размагничивание деталей производится демагнетизатором.

На описанном станке возможно применение загрузочных устройств и работа в автоматическом цикле.

Достоинством станка является то, что при необходимости его можно легко демонтировать, освободив базовый станок для выполнения других работ.

Основная область применения описанного оборудования – индивидуальное и мелкосерийное производство. Особенно эффективны станки в инструментальном производстве при наличии большой номенклатуры различных по размеру и форме деталей. Заранее подготовив необходимую оснастку (оправки, цанги, полюсные наконечники), можно свести к минимуму вспомогательное время. Применение таких станков позволяет ликвидировать ручной труд, повысить качество обрабатываемых поверхностей, значительно улучшить экологические условия работающих.

Решение задачи перевода производства на интенсивный путь развития связано с широким внедрением принципиально новых машин, обеспечивающих высокий уровень автоматизации и непрерывности выпуска продукции. Транспортное движение деталей при их обработке с использованием такого рода оборудования не должно ограничиваться технологическими факторами. Наиболее развитой формой создания машин, действующих согласно вышеуказанному принципу, служит отделение инструмента от исполнительных органов [137]. Крайне важным аспектом эффективности применения этого инструмента является реализация возможности полной эквидистантности между ним и деталью, подвергающейся обработке.

Это связано с тем, что общим геометрическим элементом предмета обработки является уже не точка или линия, а поверхность. Опыт конструирования оборудования для МАО показывает, что фактор сложности ограничивается четырьмя-пятью кинематическими цепями, что удовлетворяет требованию создания автоматической системы. Это указывает на рост стабильности данной системы, так как происходит не только выполнение основной технологической операции, но и передача, регулирование, фиксация и установка детали. Известно, что к числу основных условий, обязательных для перехода к автоматической системе машин, относятся кинематическая простота, универсальность машины и коэффициент ее использования. Производя анализ возможности включения магнитно-абразивного оборудования в эту систему, следует отметить, что все вышеуказанные условия выполняются. Производительность МАО изделий варьируется от 10 до 240 с в зависимости от их размеров, марки материала, конфигурации, условий качественных и эксплуатационных показателей. При проектировании и создании автоматической системы необходимо произвести согласование двух обязательных

функции машины – транспортной и технологической. Для процесса МАО характерна независимость между вышеуказанными функциями, что также обеспечивает реализацию возможности введения этого вида оборудования в такую систему.

В настоящее время разработан и создан роторный станок МАРС-15, предназначенный для реализации процесса МАО и общий вид которого показан на рис. 4.5. Данный станок представляет собой объемный механизм, сообщающий обрабатываемой детали в горизонтальной плоскости сложное вращательное и переносное движение, а в вертикальной – возвратно-поступательное или осциллирующее движение.



Рис. 4.5. Фотография рабочей зоны станка МАРС-15

Станок включает станину с концевым магнитопроводом, на котором находятся полюсные наконечники, имеющие концентраторы ЭМП. Внутреннюю часть магнитопровода охватывает электромагнитная система (ЭМС). Работа станка производится следующим образом: включается ЭМС, в рабочий зазор между полюсными наконечниками помещают деталь, туда же вводится ФАП, заполняющий данную зону.

Техническая характеристика станка МАРС-15

Параметры	Значение
Магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл	0,6...1
Частота осцилляции полюсных наконечников, дв. ход/мин	280
Амплитуда осцилляции полюсных наконечников, мм	0,8
Габариты обрабатываемых деталей, мм: – диаметр	2...10
Число намагничивающих катушек	2
Максимальный ток, подаваемый на катушки, А	5
Мощность электродвигателей осцилляции, кВт	0,79
Мощность электромагнитных катушек, кВт	0,79
Напряжение питания, В	380/220
Габариты устройства, мм: – длина – ширина – высота (с электродвигателями)	1700 1200 1600
Масса электромагнитного контура с приводом наконечников, кг	600

Станок состоит из центральной шестерни, приводимой в движение электродвигателем через клиноременную передачу водиларотора, на котором в подшипниках установлены шпиндели, несущие сателлиты и патроны для крепления обрабатываемых изделий. Ротор жестко соединен с нижним концом центрального вала, смонтированного в ползуне. Верхний конец центрального вала через телескопическую муфту соединен с электродвигателем. Осциллирующее движение изделия осуществляется нормальным кривошипно-ползунным механизмом от электродвигателя. Таким образом, пространственно-сложное движение обрабатываемое изделие получает от эпициклического и нормального кривошипно-ползунного механизмов.

Сообщая изделию дополнительную поперечную осцилляцию, заменяя его вращательное движение вокруг собственной оси на качательное или выполняя наружную и внутреннюю обмотки в виде неподвижных статоров, значительно интенсифицируют процесс съема металла за счет динамического уменьшения рабочего зазора

между изделием и полюсами магнита, что вызывает уплотнение абразивной массы порошка и увеличение силы резания в результате создания динамической концентрации магнитного поля в локальной зоне.

Рабочий цикл такого станка включает установку изделий в цанги шпинделей при крайнем верхнем расположении суппорта, ускоренный ход суппорта до опускания изделий в рабочую зону, включение вращения и осцилляции изделий и вращения магнитной системы, быстрый ход суппорта вверх и замену изделий.

Оборудование устанавливается на виброопоры, имеется два режима работы – наладочный и автоматический. В наладочном режиме все механизмы приводятся в действие независимо друг от друга в любой последовательности. Помещение, в котором размещается оборудование для МАО, удовлетворяет обычным требованиям, предъявляемым нормами СНИП и нет необходимости в наличии специального фундамента. Вместе с тем существует необходимость в обязательной пропитке электромагнитных катушек ввиду попадания на них капель и брызг СОТС. Также требуется производить демагнитизацию стальных деталей из-за явления остаточной намагниченности. Однако указанные операции не снижают эффективность использования оборудования для МАО. Так как для этого процесса отсутствует активный контроль на входе транспортного потока, нет необходимости в защите этого потока от нестандартных деталей и наличия пробных ходов. Регулирование положения детали минимально, а его показатели характеризуются большими значениями, например, радиального биения. Разноразмерность зазоров с двух сторон детали при ее обходе по рабочей зоне, определяемой по щупу, составляет 0,1 мм, что указывает на широкие технические возможности инструмента.

Таким образом, эта технологическая роторная система осуществляет процесс механической обработки на основе электромагнитного привода инструмента при его одноярусности путем вертикального расположения ротора в пространстве и поверхностным взаимодействием инструмента и изделия.

На рис. 4.6 представлена конструкция станка предназначенного для процесса МАО длинномерных изделий.

Станок СФТ 2.111.00.00.000 предназначен для обработки проволоки и длинномерных деталей из черных и цветных металлов, табл. 4.3.

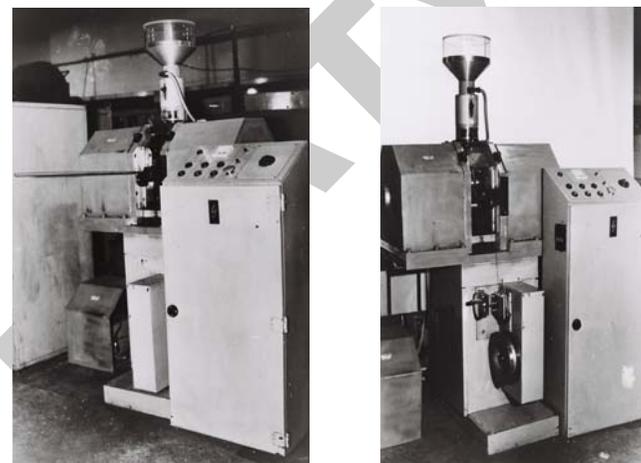


Рис. 4.6. Фотография станка для МАО длинномерных изделий:
а – длинномерные детали; б – проволока

Технические характеристики станка СФТ 2.111.00.00.000
Таблица 4.3

Параметры	Значения
Диаметр обрабатываемой проволоки, мм	0,5...3,0
Скорость протягивания проволоки, м/мин	2...6
Частота вращения полюсных наконечников, об/мин	800...1300
Величина рабочих зазоров, мм	1...5
Магнитная индукция в рабочей зоне, Тл	0,3...1,0
Параметры электрической питающей среды:	
– напряжение, В	380/220
– частота, Гц	50
– потребляемая мощность, кВт	2,5
Габариты, мм	
– длина	1400
– ширина	360
– высота	1735
Масса, кг	1200

Станок состоит из следующих основных узлов: станины, обрабатывающего блока, механизма подачи проволоки, правки и натяжения

проволоки, протяжки и укладки проволок, бункера-дозатора, станции и системы охлаждения, электрошкафа-пульта управления.

Обрабатывающий блок представляет собой магнитопровод с электромагнитными катушками и двумя парами полюсных наконечников, расположенными по обе стороны от оси обработки с возможностью синхронного вращения. Блок выполнен в виде двух головок, приводной и не приводной, причем подвижная часть каждой головки установлена с возможностью поворота вокруг центральной оси и перемещения вдоль нее. Головки установлены таким образом, что полюсные наконечники расположены соосно друг другу с зазором между ними и образуют рабочую зону станка. Регулирование рабочего зазора между торцами производится за счет изменения расстояния между подвижными частями головок. Поворотом головок устанавливается необходимая величина погружения проволоки в рабочую зону. С целью передачи вращения от приводной головки к не приводной, сердечники электромагнитных катушек оппозитных полюсов соединены между собой муфтами, что обеспечивает синхронный поворот подвижных частей головок. Регулировка расстояния между торцами полюсных наконечников (установка необходимых рабочих зазоров) производится вручную.

Конструкция станка обеспечивает выполнение необходимых для обработки проволоки функций: создание магнитного поля в рабочей зоне (включение электромагнитных катушек); движение подачи (продольное перемещение проволоки); движение резания (вращение порошковой абразивной массы совместно с полюсными наконечниками); подача в рабочую зону ферромагнитного порошка и подвод смазочно-охлаждающей жидкости. Управление кнопочное с пульта.

На рис. 4.7 представлена фотография рабочей зоны дисков-притиров с обрабатываемыми между ними шариками.

На рис. 4.8 показан станок АА 15.002 для МАО шариков с торообразной формой рабочей поверхности полюсов магнита, которая состоит из верхнего и нижнего полюсных наконечников электромагнита. Обработка шариков осуществляется ферромагнитным порошком в магнитном поле, создаваемом магнитной системой, состоящей из общего магнитопровода, сердечника с эксцентрично закрепленным на нем диском, катушек-соленоидов и сердечника с закрепленным на нем полюсным наконечником-диском. Сердечнику сообщается осциллирующее движение в осевом направлении.

Амплитуда и частота осцилляции задаются генератором в зависимости от условий обработки. Кроме того, регулируется амплитуда поперечных колебаний полюсных наконечников от нуля до величины, равной величине кольцевого зазора δ .



Рис. 4.7. Фотография рабочей зоны станка АА 15.002 для магнитно-абразивной обработки шариков

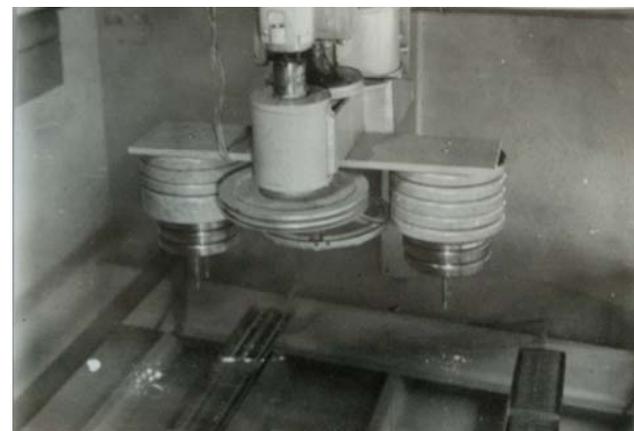


Рис. 4.8. Фотография станка АА 15.002 для магнитно-абразивной обработки шариков

Изделия обрабатываются следующим образом. Верхний полюсный наконечник в начале цикла находится в исходном поднятом положении, удерживается пружиной, обеспечивающей доступ

в рабочую зону. Подлежащие обработке шарики помещают на кольцевую канавку нижнего полюсного наконечника, подают ферромагнитный порошок и СОТС, а на катушки-соленоиды – напряжение. Под действием магнитного поля верхний полюсный наконечник притягивается к нижнему полюсу, занимая рабочее положение. Затем приводят во вращение оба полюсных наконечника.

При вращении верхний и нижний полюсные наконечники получают поперечное колебание заданной амплитуды и частоты. Одновременно включают генератор, и нижний полюсный наконечник начинает вибрировать. Частицы порошка выстраиваются в магнитном поле по периметру окружности рабочих канавок полюсов магнита и производят микрорезание поверхности шариков. Колебания дисков полюсных наконечников интенсифицируют процесс магнитно-абразивной обработки, способствуют равномерному съему металла и обеспечению требуемой точности геометрии (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Техническая характеристика станка АА.15.002

Параметры	Значения
Магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл	0,3...1,2
Габариты обрабатываемых деталей, мм: – диаметр	2...15
Число намагничивающих катушек, шт.	2
Максимальный ток, подаваемый на катушки, А	8
Мощность электродвигателей осцилляции, кВт	1,2
Напряжение питания, В	380/220
Габариты устройства, мм: – длина	900
– ширина	600
– высота (с электродвигателями)	500
Масса электромагнитного контура с приводом наконечников, кг	150

На рис. 4.9 представлен внешний вид станка для МАО плоскостей, который состоит из магнитной, механической и электрической систем.



Рис. 4.9. Фотография станка АС 10.008 для МАО плоскостей

Магнитная система включает магнитопровод, имеющий ярмо и два сердечника – верхний и нижний. На сердечники установлены катушки-соленоиды. В зависимости от обрабатываемого материала и режимов обработки изменяется конфигурация полюсных наконечников. Оба сердечника могут вращаться вместе с катушками либо самостоятельно (катушки в последнем случае стопорятся на ярме), что уменьшает инерционные силы. Обрабатываемое изделие крепится на столе, состоящем из плиты (диамагнитный материал) и ферромагнитной вставки с Т-образными пазами. Нижний сердечник устанавливается с минимальным зазором (0,05...0,1 мм) к ферромагнитной вставке стола для уменьшения потерь напряженности магнитного поля. Магнитная система и механизм стола монтируются на станине. Верхний сердечник снабжен приводом вращения от электродвигателя и приводом вертикальных перемещений от двигателя. Привод возвратно-поступательной подачи стола осуществляется от двигателя через винтовую передачу, а привод вращения сердечника – от двигателя (табл. 4.5).

Таблица 4.5
Техническая характеристика АС 10.008 обработки плоскостей

Параметры	Значения
Максимальная величина рабочего зазора, мм	5
Габариты обрабатываемых деталей, мм:	
– ширина	175
– длина	175
Число катушек намагничивающих катушек, шт.	7
Максимальная величина тока, А	3
Максимальная магнитная индукция, Тл	1,5
Максимальная частота вращения, об/мин:	
– шпинделя ротора	280
– ротора	0,5
– рабочего стола	330
Мощность электродвигателя, кВт	5
Габариты устройства, мм:	
– длина	1340
– ширина	1180
– высота (с электродвигателями)	1980
Масса, кг	2100

Работа станка производится следующим образом. Изделие закрепляется на ферромагнитной вставке стола. На катушки-соленоиды подается напряжение, и в рабочих зазорах между полюсным наконечником и нижним сердечником наводится магнитное поле от постоянного (пульсирующего) тока заданной напряженности. В рабочий зазор между сердечником и изделием поступают ФАП и СОТС. Затем последовательно включаются в работу электродвигатели, сообщающие сердечникам магнита вращательное движение через приводы, а столу с изделием – возвратно-поступательное движение.

Рабочий зазор и настройка станка на заданную высоту детали регулируются приводом и винтовой передачей.

Процесс магнитно-абразивной обработки происходит при двух движениях – вращении полюсов магнита и вращательно-поступательном перемещении детали. Сообщая полюсам магнита и изделию указанный выше комплекс движений, возможно при необходимости получить кинематических схем механизмов и обеспечить магнитную абразивную обработку плоскостей.

4.3. Расчет и конструирование инструмента для магнитно-абразивной обработки

4.3.1. Определение геометрических параметров инструмента для МАО отверстий

Обработка внутренних поверхностей в машиностроении является более сложной технологической задачей, чем наружных. Это связано с рядом причин и примером может служить тот факт, что согласно ISO в большом количестве порядок качества точности отверстия имеет более низкий показатель ($H7/k6$, $H8/h7$ и т. д.). Известно, что необходимость получения требуемых критериев надежности и долговечности деталей машин достигается также и использованием новых высокоэффективных методов механической обработки этих деталей.

Исходя из условий работы пары и механизма в целом, следует разрабатывать маршрут механической обработки, предусматривая так же и комплекс новых технологических решений. Одним из таких примеров ответственной контактной пары является опора качения в виде подшипникового узла. Вместе с тем, уровень ответственности как узла, так и самой машины, достаточно отличен в зависимости от ее назначения. Опора качения отдельных машин, используемых в определенных видах промышленности, должна иметь не только более высокий уровень показателей качества, но и увеличенный набор этих показателей, принадлежащих контролю и регистрации путем их измерения на необходимом оборудовании. Например, одним из таких показателей является наличие остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое детали, и получение которых связано с определенной технической проблемой. В первую очередь это вызвано комплексом температурно-деформационных процессов, происходящих в зоне отделения стружки от основного объема материала.

Решение данной проблемы заключается в создании универсального типа этого наконечника базирующегося на принципах общих законов электромагнетизма. При МАО отверстий используется ряд схем, однако наиболее эффективной является та, при которой применяется одинарные внутренние полюсные наконечники. Однако всякий раз

ввиду различия диаметров отверстий возникает необходимость в разработке новой конструкции этого наконечника, что резко увеличивает расходную часть себестоимости выпуска продукции [138]. Поэтому при некоторых допущениях, существенно не влияющих на разработку этого типа наконечника:

- магнитная индукция остается приблизительно постоянной от поверхности детали до определенной глубины и спадает к нулю по повышению этой глубины;

- плотность тока уменьшается на том же участке линейно и становится равной нулю на глубине, где исчезает магнитная индукция;

- предполагается методика расчета конструкции универсального типа внутреннего полюсного наконечника для МАО отверстий независимо от их диаметральных размеров.

Поскольку при МАО величиной определяющей давление инструментов, является магнитная индукция, то главной задачей при конструировании внутреннего полюсного наконечника ЭМС служит максимализация учета и эффективности ее действия. Поэтому методика определения оптимальных размеров внутреннего полюсного наконечника построена на конформном отображении профиля данного наконечника на окружность, электростатическое поле которой известно. Если будет установлено электростатическое распределение зарядов вдоль контура, то тем самым будет получено распределение плотности тока. Выявлено, что поле вне проводника потенциально и является одним и тем же как в случае покоя, так и в случае движения зарядов в осевом направлении. Кроме того, известно, что плотность тока тем больше, чем меньше радиус кривизны в рассматриваемом месте.

Решение главной задачи при МАО отверстий заключается в концентрации магнитного тока, поскольку он представляет собой величину постоянную $\Phi = \oint Bds$ [138]. Реализация – это решение производства путем уменьшения геометрических размеров проводника магнитного тока, т. е. внутреннего полюсного наконечника, но теперь проблемой становится то, какой должна быть его конфигурация. Ответом на данный вопрос и является установление распределения плотности тока вдоль контура сечения этого наконечника, на основании чего и следует производить его конструирование и изготовление.

Методика расчета выглядит следующим образом: допустим, что ищется поле в плоскости для кривой контура сечения, данного соотношения $z = x + jy$ для кривой контура сечения, заданного соотношением $F(x; y) = 0$. Если известна функции $w = f(z)$, конформно отображающая указанный контур (в нашем случае эллипс) на кривую $F(x; y) = 0$ в плоскости z то, проинтегрировав по z , получаем поле индукции этого контура в комплексной форме [139, 140]:

$$V = \frac{I\sqrt{2}}{2\pi\alpha} \ln f(z) + C, \quad (4.1)$$

где I – сила тока, А;

α – глубина проникновения тока и магнитной индукции, мм.

Выберем эллипс на плоскости согласно рис. 4.10.

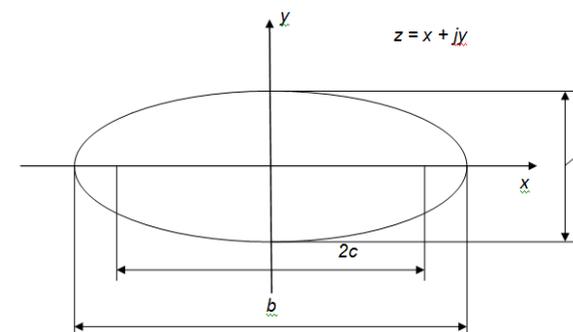


Рис. 4.10. Схема для определения геометрических размеров внутреннего полюсного наконечника

Линия контура задана уравнением

$$\left(\frac{2y}{d}\right)^2 + \left(\frac{2x}{b}\right)^2 = 1. \quad (4.2)$$

Расстояние между фокусами

$$2c = \sqrt{b^2 - d^2}.$$

Функция $w = f(z) = \frac{z}{c} + \sqrt{\left(\frac{z}{c}\right)^2 - 1}$ отображает пространство вне

окружности на пространство вне эллипса в плоскости z . Подставим $f(z)$ в формулу (4.2) и продифференцируем.

Получим

$$-\frac{dv}{dz} = \frac{I\sqrt{2}}{2\pi\alpha} \frac{1}{\sqrt{z^2 - c^2}}.$$

Поставим вместо z выражение $x + jy$, причем y возьмем согласно формуле (4.2). Тогда после расчета получим

$$\sigma_0 = \left| -\frac{dv}{dz} \right|_l = \frac{I\sqrt{2}}{\pi\alpha b} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{2x}{b}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{d}{b}\right)^2\right]}},$$

где l – распределение плотности тока вдоль контура.

Максимальная плотность тока на концах большой оси

$$x = \pm \frac{d}{b}.$$

$$\sigma_{0\max} = \frac{I\sqrt{2}}{\pi\alpha d}.$$

Минимальная плотность тока на концах малой оси $x = 0$.

$$\sigma_{0\min} = \frac{I\sqrt{2}}{\pi\alpha b}.$$

Отсюда

$$\frac{\sigma_{0\max}}{\sigma_{0\min}} = \frac{b}{d}.$$

Следовательно, если $\frac{b}{d} = 1$, т. е. для окружности, то $\frac{\sigma_{0\max}}{\sigma_{0\min}} = 1$

и магнитная индукция равномерно распределена вдоль ее контура и представляет величину относительно небольшую (0,1...0,4 Тл), особенно для диаметров более 60 мм, как это было установлено при помощи измерения тесламетром Т-3 при силе тока, подаваемого на катушки соленоидов ЭМС, равным 5 А. Ввиду того, что для производительного протекания МАО требуется величина магнитной индукции, составляющая диапазон 0,8...1,2 Тл, то на основе прямой связи $\sigma \rightarrow I \rightarrow B$ можно установить ее распределение вдоль контура одинарного внутреннего полюсного наконечника.

На основании данного расчета были изготовлены внутренние полюсные наконечники для МАО отверстий внутренних обойм роликовых радиальных сферических двухрядных подшипников № 3612 и 3622, диаметры посадочного отверстия которых составляет 60 и 110 мм соответственно. В качестве оборудования применяется станок ЭУ-6. Ферроабразивный порошок – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81, размер зерна, $\Delta = 100/160$ мкм. Смазочно-охлаждающие технологические средства – СинМА-1 ТУ38.5901176-91, 3 %-й водный раствор, капельная подача, удельный расход, 150...200 мл/мин.

Параметры и режимы МАО: величина магнитной индукции, $B = 1,1$ Тл; скорость резания, $V_p = 2...4$ м/с; скорость осцилляции, $V_o = 0,2...0,25$ м/с; амплитуда осцилляции, $A = 1...3$ мм; коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_z = 1$ мм; величина рабочего зазора, $\delta = 1$ мм, исходная шероховатость поверхности, $Ra_1 = 1,6...2,2$ мкм; время обработки, $t = 60...120$ с.

Выходными показателями служили достигаемая шероховатость поверхности, Ra_2 , мкм; величина размерного съема, мкм; величина остаточных сжимающих напряжений, МПа. Для определения использовалось следующее оборудование: микроскоп БМИ-1; прибор УРС-50И при учете смещения рентгеновской линии (211) α ; магнитная индукция в рабочем зазоре измерялась тесламетром Т-3.

Были проведены сравнительные исследования для данной схемы МАО путем измерений магнитной индукции в зонах I и III обойм подшипников обоих типов, рис. 4.11.

Результаты этих исследований приведены в табл. 4.6.

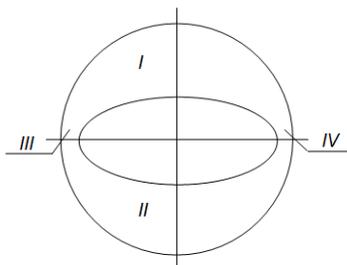


Рис. 4.11. Схема зон измерений магнитной индукции в рабочем зазоре

Таблица 4.6

Показатели качества подшипников после магнитно-абразивной обработки при различных типах внутреннего полюсного наконечника

Диаметр обрабатываемого отверстия, мм	b/d	Достижимая шероховатость поверхности, Ra_2 , мкм	Величина размерного съема, мкм	Величина остаточных сжимаемых напряжений, МПа	Показатели магнитной индукции, В, Тл	
					Зона I	Зона III
60	2,32	0,1...0,28	45...60	970	0,1	1,0
	1,45	0,77...0,92	10...15	610	0,25	0,7
110	2,16	0,16...0,3	35...55	890	0,15	0,95
	1,35	0,8...0,97	5...10	560	0,2	0,6

Анализ результатов показывает, что, как и предполагалось в соответствии с техническими положениями, большее значение величины магнитной индукции находится в тех зонах, где радиус кривизны меньше. На базе этих положений и проведенных измерений была осуществлена обработка методом MAO отверстий обойм данных подшипников при использовании универсального типа внутреннего наконечника. С целью выявления технологических возможностей этого типа наконечника были изготовлены его различные виды с отличными друг от друга показателями b/d . Для параметра $60 \text{ мм} - \frac{58 \text{ мм}}{25 \text{ мм}} = 2,32$ и $\frac{58 \text{ мм}}{40 \text{ мм}} = 1,45$, и диаметра $110 \text{ мм} - \frac{108 \text{ мм}}{50 \text{ мм}} = 2,16$ и $\frac{108 \text{ мм}}{80 \text{ мм}} = 1,35$.

В результате проведенных НИОКР разработан и создан универсальный тип одинарного внутреннего полюсного наконечника для MAO отверстий деталей машин независимо от их диаметральных размеров при обеспечении требуемых качественных характеристик данных деталей.

4.3.2. Основы проектирования рабочей зоны при магнитно-абразивной обработке

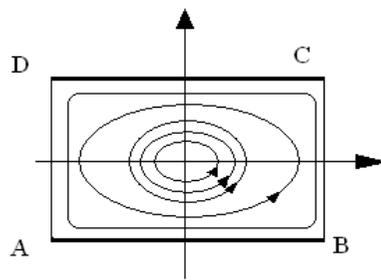
Известно, что при финишной обработке детали ее максимальные производительность и качество процесса достигаются среди прочих факторов также путем обеспечения равномерности давления инструмента P на поверхность изделия. Если при суперфинишировании и хонинговании минимизация отклонения этого давления осуществляется пригонкой рабочей поверхности инструмента по отношению к обрабатываемому профилю детали, то при MAO данный показатель определяется уже природой магнитного поля. Неравномерность давления инструмента P в виде блока – полюсный наконечник, магнитное поле и ФАП вызывается схождением линий так называемой «нулевой» работы «ферроабразивной щетки». Таким образом, если при суперфинишировании и хонинговании разница давлений P может быть обнаружена на любом участке рабочей поверхности абразивного бруска, то при MAO, как указывалось выше, падение значений этого давления находится в центре «ферроабразивной щетки». Следовательно, главным становится вопрос: существует ли закономерность в распределении давления на всей площади рабочей зоны при MAO или это распределение носит такой же случайный характер как при указанных выше финишных операциях. Кроме того, станет ясно, есть ли, например, необходимость усложнения кинематики процесса, заключающегося в введении дополнительных движений, что непременно скажется на особенностях конструкции электромагнитной системы [141].

Наиболее оптимальной конфигурацией границ, исследуемой аналитически, является прямоугольник, две противолежащие стороны которого должны быть эквипотенциалами, а две остальные имеют конечную магнитную проницаемость. Решение для определения влияния магнитного потока Φ на процесс съема материала

при МАО предлагается произвести путем установления картины магнитного поля во внутренней области рабочей зоны полюсного наконечника, обладающего именно этой конфигурацией. Основным условием, принимаемым в расчет, служит равномерность распределения тока I по поперечному сечению наконечника. В пределах таких областей определение магнитного поля описывается при помощи векторного потенциала. Значение составляющей z векторного потенциала A в любой точке внутри области, где протекает ток, удовлетворяет уравнению Лапласа.

$$\frac{\partial^2 A}{dx^2} + \frac{\partial^2 A}{dy^2} = 0. \quad (4.3)$$

Поле распределенного тока устанавливается путем наложения полей бесконечно большого числа элементарных линейных токов, в совокупности составляющих этот распределенный ток. На основании вышеизложенного распределение векторного потенциала определяется разложением в ряд.



a

б

Рис. 4.12. Поле внутри полюсного наконечника:
a – фотография полюсного наконечника; *б* – схема магнитного поля

В данном случае требуется установить поле внутри полюсного наконечника с большой магнитной проницаемостью (рис. 4.12, *a*) Картина магнитного поля представлена на рис. 4.12, *б*. Определение поля сводится, как указывалось выше, к нахождению векторной потенциальной функции A , которая удовлетворяет уравнению Лапласа и имеет постоянное значение на границе прямоугольника [142].

$$B_z = \frac{\partial A}{\partial y} = 0, \quad B_y = \frac{\partial A}{\partial x} = 0.$$

При этом решении применяется метод формирования соответствующего однородного уравнения и частного решения неоднородного. В данном случае однородное уравнение представляет собой уравнение Лапласа и в совокупности с неоднородным имеет общее решение.

$$A = -\frac{1}{2} \mu \mu_0 J \left(x^2 + \sum_{m=i}^{\infty} d_m \cos mx \operatorname{ch} my \right), \quad (4.4)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость;
 μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м;
 J – плотность тока, А/м²;
 m и d_m – постоянные, определяемые по граничным условиям, а именно:

$$d_m = \frac{(-1)^k \cdot 32a^2}{(2k+1)^3 \pi^3 \operatorname{ch}(2k+1) \frac{\pi b}{2a}};$$

$$m = \frac{\pi n}{2a};$$

где n – любое число.

Полное решение с учетом всех значений выглядит следующим образом:

$$A = -\frac{1}{2} \mu \mu_0 J \left[x^2 + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k 32a^2 \operatorname{ch} \frac{(2k+1)\pi y}{2a} \cos \frac{(2k+1)\pi x}{2a}}{(2k+1)^3 \pi^3 \operatorname{ch} \frac{(2k+1)\pi b}{2a}} \right]. \quad (4.5)$$

Присутствие члена $(2k+1)$ обеспечивает быструю сходимость ряда. Выражения для B_x и B_y определяются через соответствующие производные A_n и представлены зависимостями (4.6 и 4.7).

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y} = -\frac{1}{2} \mu \mu_0 J \left[\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k 16a \cdot sh \frac{(2k+1)\pi y}{2a} \cos \frac{(2k+1)\pi y}{2a}}{(2k+1)^2 \pi^2 ch \frac{(2k+1)\pi b}{2a}} \right]. \quad (4.6)$$

$$B_y = \frac{\partial A}{\partial x} = -\frac{1}{2} \mu \mu_0 J \left[2x - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k 16a \cdot ch \frac{(2k+1)\pi y}{2a} \sin \frac{(2k+1)\pi x}{2a}}{(2k+1)^2 \pi^2 ch \frac{(2k+1)\pi b}{2a}} \right]. \quad (4.7)$$

Наличие члена $(2k+1)^2$ также приводит к удобству расчетов и сходимости ряда, поскольку три или четыре члена ряда дают точность, значительно превышающую 1 %. Анализ уравнений (4.6) и (4.7) показывает, что в центре проводника прямоугольного сечения находится нейтральная зона, вокруг которой замыкается магнитный поток и происходит схождение линии нулевой работы.

Следовательно, если существует данная зона, то необходимо устранить негативные последствия ее присутствия в области обработки. Достижение такого результата производится путем введения дополнительного движения аналогично хонингованию-осцилляции. Практика показывает, что наиболее приемлемыми геометрическими размерами рабочей зоны при данной схеме MAO для производственного протекания процесса являются следующие показатели: длина – 60...80 мм, высота – 40...60 мм.

В качестве оборудования применялся станок СФТ 2.150.00.00.000. Образцами служили кольца подшипников $D \times d \times l = 36 \times 29 \times 32$ мм, сталь ШХ-15, ГОСТ 801-79, 58...62 HRC. Величина магнитной индукции, $B = 1$ Тл; скорость резания, $V_p = 1,5$ м/с; ФАП-Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81, размер зерна, $\Delta = 160/220$ мкм; коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_3 = 1$; СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 2 %-й водный раствор.

На основании нахождения векторной потенциальной функции при учете уравнения Лапласа представлено распределение магнитного поля внутри полюсного наконечника, характеризующее рабочую зону инструмента при MAO, что обеспечивает ее правильное конструирование, расчет режимов обработки и приводит к достижению требуемых производительности и качества.

4.3.3. Расчет и конструирование полюсных наконечников при магнитно-абразивной обработке наружных конических поверхностей

Обработка наружных цилиндрических поверхностей деталей производится по схеме, разработанной в работе [62]. Однако при MAO фасонных поверхностей типа тел вращения, когда труднее обеспечить непрерывный контакт ФАП с обрабатываемой деталью, данная схема не обладает требуемой производительностью [143].

Основное отличие схем MAO фасонных поверхностей от обработки цилиндрических заключается в том, что обрабатываемое изделие в первом случае совершает сложное движение, состоящее из двух вращательных и одного осциллирующего, а инструмент находится в стационарном положении. Это вызывает уплотнение ФАП в рабочем зазоре, что повышает его давление на обрабатываемую поверхность детали и соответственно увеличивает силы резания, приводя к более интенсивному размерному и массовому съему материала.

Установлено, что производительность любого способа формообразования определяется средней величиной площади поверхности деталей, образуемой в единицу времени и рассчитывается следующим образом [144]:

$$F_{\phi} = \frac{1}{T_{ц}} \sum_{i=1}^m b_m \cdot l_m, \quad (4.8)$$

где $T_{ц}$ – длительность всего рабочего цикла станка, мин;

b_m – длина образующей для каждого элемента поверхности, мм;

l_m – длина направляющей, мм.

Таким образом, повышение эффективности MAO фасонных поверхностей можно осуществить путем использования многопозиционной схемы обработки, а также увеличением количества формообразующих элементов, принимающих участие в процессе.

По данным [117], за 30 с обработки при перепаде диаметральных размеров до 6 мм производится равномерный съем по длине криволинейной образующей детали (материал – сталь У10А ГОСТ 1435-90, твердость 58...62 HRC) причем шероховатость уменьшается с $Ra_1 1,8...2$ до $Ra_2 0,1...0,2$ мкм. Однако при увеличении перепада

диаметральных размеров равномерность обработки резко падает. Следовательно, основной причиной этого является изменение численных значений рабочего зазора по длине обрабатываемой детали. Это также приводит к росту длины цепочек зерен ФАП и уменьшению величины магнитной индукции, определяющей их жесткость в рабочем зазоре. Предложение, направленное на устранение данного недостатка, заключалось в возможности регулирования режимами обработки. Но если ранее эффективность этого предложения была обусловлена относительно невысокими скоростями обработки, то в настоящее время современные типы роторных станков для МАО обладают производительностью в пределах 500...700 деталей в час. При таком темпе и автоматическом режиме обработки постоянное оперативное вмешательство в ход процесса практически исключено, и для выполнения условий его нормального протекания необходимо вводить систему активного контроля, что увеличивает себестоимость выпускаемой продукции.

Известно устройство [145] для МАО фасонных поверхностей с выполненными на рабочих поверхностях полюсных наконечников концентраторами магнитного потока (МП) в виде поясков (далее концентраторы МП), расположенных по взаимно сопряженным зеркально отражающим одна другую винтовыми линиями. Подъем этих линий на половине длины окружности равен длине обрабатываемого профиля, а расстояние между оппозитно установленными концентраторами МП определяется по формуле

$$H_1 = f(l) + 2\delta, \quad (4.9)$$

где $f(l)$ – функциональная зависимость величины диаметра детали от координаты точки профиля, мм;

l – расстояние от начала профиля до обрабатываемой точки, мм;

δ – рабочий зазор, мм.

Однако при использовании такого устройства элементарные участки поверхности сложной профильной детали, расположенные на разных диаметральных сечениях детали в ходе ее движения по круговому рабочему зазору обрабатываются неравномерно, что обусловлено разным временем нахождения каждого участка поверхности детали в рабочей зоне. Это происходит потому,

что наружные точки каждого диаметрального сечения детали находятся на разном расстоянии от оси вращения и соответственно имеют разную скорость перемещения. Чтобы избавиться от данного недостатка требуется уравнивать время нахождения каждого участка обрабатываемой поверхности в рабочей зоне, независимо от того, в каком сечении по высоте детали находится данный участок.

Требуется определить характер (вид) кривой, образованной концентраторами МП полюсных наконечников на их развертке, когда при вращении детали с угловой скоростью ω , одновременной осцилляцией со скоростью $V_{осц}$ и ее движении по круговому зазору с линейной скоростью $V(x)$ время обработки элементарных участков обрабатываемой поверхности является одинаковым для любой ее точки по всей высоте H обрабатываемой поверхности.

Будем исходить из условия равномерности съема материала для любой точки обрабатываемой поверхности. Данное условие будет выполнено, если каждая точка обрабатываемой поверхности будет находиться в контакте с ФАП в магнитном поле одинаковое время. Магнитно-абразивное устройство для реализации этого условия представлено на рис. 4.13.

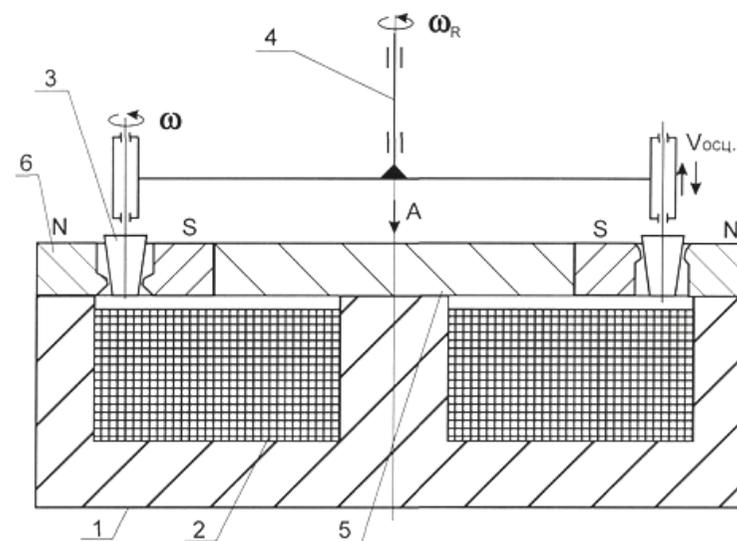


Рис. 4.13. Схема устройства для МАО конических поверхностей

Рассмотрим схему взаимодействия детали с концентратором МП в произвольном сечении перпендикулярно ее оси, которая показана на рис. 4.14.

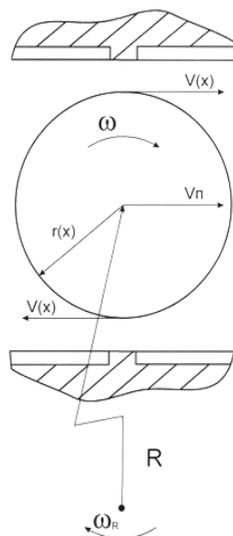


Рис. 4.14. Схема взаимодействия детали с концентратором МП в произвольном сечении перпендикулярно ее оси

Пусть S_1 и S_2 – путь, пройденный точкой окружности $r(x)$ вдоль концентратора МП для первого и второго полюсов магнитной системы, а t_1 и t_2 – соответственно время прохождения. Тогда

$$S_1 = (V(x) + V_n) \cdot t_1,$$

$$S_2 = (V(x) + V_n) \cdot t_2,$$

где $V(x)$ и V_n – соответственно линейная и переносная скорости движения точки.

Поскольку $V_n \ll V(x)$, то переносной скоростью пренебрегаем. Если еще учесть, что длина концентраторов для первого и второго полюсов магнитной системы в произвольном сечении перпендикулярно оси детали одинакова, то можно записать $S_1 = S_2 = S(x)$.

Таким образом, время прохождения точки окружности детали вдоль обоих полюсов одинаково ($t_1 = t_2$), что позволяет в дальнейшем рассматривать характер (вид) кривой, образованной концентратором МП на одном полюсе магнитной системы.

Рассмотрим развертку рабочей поверхности полюса магнитной системы. Запишем главное условие – постоянство времени нахождения любой точки обрабатываемой поверхности детали в контакте с ФАП:

$$\frac{S(x)}{V(x)} = \text{const},$$

выразив линейную скорость через угловую, получим

$$V(x) = \omega \cdot r(x),$$

или

$$\frac{S(x)}{\omega \cdot r(x)} = \text{const}.$$

Поскольку угловая скорость вращения детали постоянна, то

$$\frac{S(x)}{r(x)} = C = \text{const}.$$

Из рис. 4.15. следует, что

$$S(x) = w \cdot \text{tg}\alpha(x) = w \cdot f'(x),$$

где w – ширина концентратора МП вдоль оси детали;

α – угол между касательной к образующей концентратора МП и осью детали.

После преобразования получим

$$f'(x) = \frac{S(x)}{w} = \frac{C}{w} \cdot r(x)$$

и далее

$$f(x) = \frac{C}{w} \cdot \int_0^x r(x_i) \cdot dx_i + C_1. \quad (4.10)$$

Теперь определим константу C , для чего выразим значение кривой в конечной точке детали по высоте ($x = H$):

$$f(H) = \frac{2\pi R}{k}, \quad (4.11)$$

где k – число концентраторов магнитного потока на развертке поверхности радиуса R .

Приравняем формулы (4.10) и (4.11):

$$\frac{2\pi R}{k} = \frac{C}{w} \cdot \int_0^H r(x_i) \cdot dx_i.$$

После преобразований получим:

$$C = \frac{2\pi R w}{k \cdot \int_0^H r(x_i) \cdot dx_i}. \quad (4.12)$$

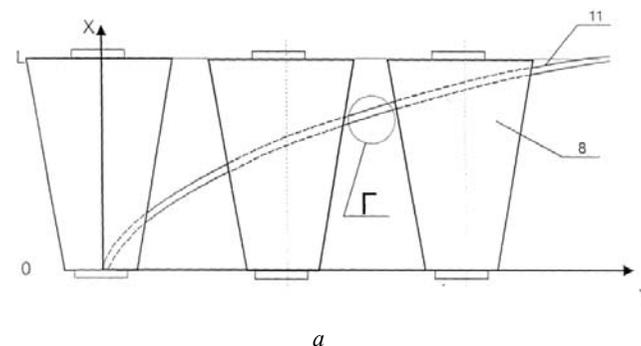
Подставляя формулу (4.12) в формулу (4.11), окончательно имеем

$$f(x) = \frac{2\pi R}{k \cdot \int_0^H r(x_i) \cdot dx_i} \cdot \int_0^x r(x_i) \cdot dx_i. \quad (4.13)$$

Согласно искомому уравнению, например, для конической формы обрабатываемой поверхности деталей расположение концентратора МП на полюсном наконечнике имеет вид одной ветви параболы

$$f(x) = \frac{2\pi R(a \cdot \frac{x^2}{2} + b)}{k \cdot \int_0^H (ax + b) dx}. \quad (4.14)$$

Для сравнительных испытаний были изготовлены три типа полюсных наконечников из стали 10 ГОСТ 1050–88. В первом случае использовались наконечники, применяющиеся для обработки цилиндрических деталей, во втором – с выполненными на них концентраторами МП в соответствии с формулой изобретения [145], в третьем – по уравнению (4.14) с высотой $w = 2$ мм. Детали, подверженные обработке, имели угол конуса $2\alpha = 30^\circ$ и верхний диаметр 15 мм. Материал – сталь 45 ГОСТ 1050–88. В качестве оборудования использовался двенадцатипозиционный роторный станок СМ 1180. Обработка деталей осуществлялась при следующих параметрах и режимах: магнитная индукция, $B = 1$ Тл; амплитуда осцилляции, $A = 1$ мм; частота осцилляции, $\omega_0 = 20$ дв.ход/с; частота вращения ротора $\omega_p = 0,6$ мин⁻¹; частота вращения шпинделя $\omega_{ш} = 65$ с⁻¹; время обработки одной детали, $t = 10$ с. Исходная шероховатость поверхности деталей Ra_1 составляет 1,6 мкм. После обработки на трех поперечных сечениях конуса деталей ($d_1 = 5$ мм, $d_2 = 8$ мм, $d_3 = 12$ мм) измерялась достигаемая шероховатость поверхности Ra_2 . В качестве ФАП применялся Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81 зернистостью $\Delta = 160/200$ мкм, а смазочно-охлаждающих технологических средств – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор.



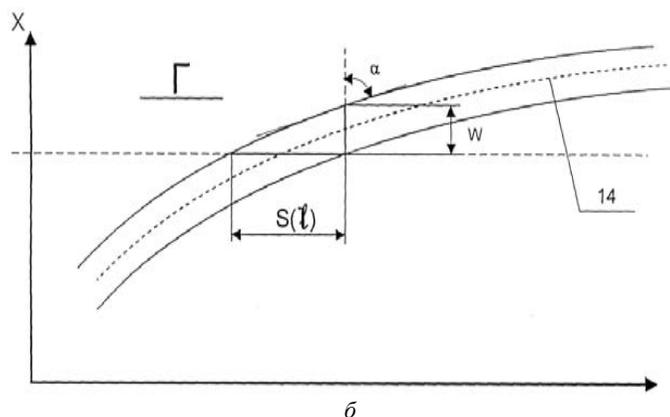


Рис. 4.15. Схема взаимодействия детали с концентратором МП в произвольном сечении параллельно ее оси:
а – деталь в целом; б – на участке концентратора

Результаты сравнительных исследований представлены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Сравнительная оценка эффективности использования различных магнитно-абразивных устройств

Магнитно-абразивное устройство	Диаметр поперечного сечения конуса детали, мм	Шероховатость поверхности деталей, Ra_2 , мкм	Отклонение от прямолинейности образующей поверхности, мкм
Первый вариант	5	1	29
	8	0,6	
	12	0,08	
Второй вариант	5	0,7	26
	8	0,2	
	12	0,1	
Третий вариант	5	0,12	18
	8	0,08	
	12	0,1	

Первым вариантом магнитно-абразивного устройства является устройство с полюсными наконечниками для обработки цилиндрических деталей $D = 15$ мм, вторым – с наконечниками, на рабочих поверхностях которых изготовлены концентраторы МП в соответствии с формулой изобретения [145], третьим – с наконечниками, на рабочих поверхностях которых изготовлены концентраторы МП в соответствии с формулой (4.14).

Установлено, что третий вариант магнитно-абразивного устройства обеспечивает равномерность съема материала за счет одинакового времени обработки для точек поверхности детали любого сечения и поэтому позволяет достичь более высоких показателей качества обработанных деталей в сравнении с известными вариантами обработки.

Применение полюсных наконечников на рабочих поверхностях, которых изготовлены концентраторы МП, чье положение на развертке поверхности наконечников определяется формулой

$$f(x) = \frac{2\pi R(a \cdot \frac{x^2}{2} + b)}{k \cdot \int_0^H (ax + b) dx}, \quad (4.15)$$

приводит к повышению качества поверхности фасонных (в данном случае конических) деталей, выражающегося в снижении отклонения от прямолинейности образующей поверхности и уменьшении шероховатости поверхности.

4.3.4. Оптимизация технологических параметров МАО отверстий

При изучении стохастических систем для описания их поведения в работе выделяют четыре группы моделей: эскизную, программную, комбинированную и локально-интегральную полиномиальную. Последняя применяется для решения практических задач, связанных с описанием и оптимизацией поведения системы, в данном случае технологического процесса [134].

Неизвестную функцию отклика $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ локально-интегральной модели процесса MAO от k факторов можно представить, например, в виде квадратичного полинома

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=j}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2. \quad (4.16)$$

Полиномом второй степени обычно удается описать стационарную область и, если поверхность отклика унимодельна (имеет единственную точку максимума), найти координаты экстремума Y , приравняв к нулю частные производные $dy/dx = 0$. Проведенные исследования показали, что процесс MAO достаточно полно описывается математическими моделями второго порядка, а также позволили отобрать для экспериментов наиболее значимые факторы, наметили область их определения и интервалы варьирования.

Для получения модели процесса MAO применили симметричный композиционный ортогональный план типа $N_1 = 2k$ (N_1 – число опытов в ядре плана), а общее число опытов $N = N_1 + 2k + n_0$ ($2k$ – число звездных точек, n_0 – число опытов в центре плана). На первом этапе нахождения оптимальных режимов и параметров MAO был использован метод кругого восхождения, который позволяет получить представление о функции отклика:

$$Y = f(X_i),$$

где Y – параметр оптимизации;

X_i – факторы (независимые переменные),

и описать поверхность отклика линейной моделью

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k,$$

где $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ – коэффициенты регрессии при соответствующих переменных.

Для получения модели процесса в качестве независимых переменных брались следующие факторы: X_1 – скорость резания, $V_{рез}$, м/с; X_2 – магнитная индукция, B , Тл; X_3 – амплитуда осцилляции, A , мм; X_4 – скорость осцилляции, $V_{осц}$, м/с; X_5 – исходная

шероховатость обрабатываемой детали, Ra , мкм; X_6 – время обработки, t , с. В качестве параметра оптимизации был принят массовый съем металла ΔQ , мг. В опытах постоянными принимались степень заполнения порошком рабочей зоны, $K_3 = 1$, порошок Ж15КТ, зернистость порошка, $\Delta = 160/100$ мкм, смазывающе-охлаждающие технологические средства – СинМА-1. Эксперименты выполняли на станке модели ЭУ-6. Образцами служили кольца подшипников из закаленной стали ШХ-15. Твердость 61...65 HRC.

Все опыты рандомизировались при помощи таблицы случайных чисел. Условия опытов, матрицы планирования и полученные результаты представлены в табл. 4.8, 4.9 и 4.10. Значимость коэффициентов регрессии проверяли по критерию Стьюдента, не все коэффициенты сопоставимы с 95 %-й доверительной вероятностью. Проверку адекватности модели осуществляли по критериям Фишера и Стьюдента. После реализации 1/8 реплики типа 2^{6-3} получено следующее линейное уравнение регрессии:

$$Y = 247,75 + 39,75X_1 - 19,75X_2 - 10,5X_3 + 22X_4 + 1,5X_5 + 4,75X_6.$$

Краткий анализ данного уравнения регрессии позволяет сделать ряд выводов. Прежде всего оказывается, что исходная шероховатость обрабатываемой детали (X_5) и время обработки (X_6) существенно не влияют на съем металла (коэффициенты b_5 и b_6 статически незначимы). Наиболее сильно процесс зависит от режимов резания (X_1 – скорости резания и X_4 – скорости осцилляции). Магнитная индукция (X_2), которая при MAO наружных поверхностей является превалирующим фактором не играет в MAO отверстий первостепенной роли.

Таблица 4.8

Матрица планирования и результаты опыта

Факторы	$V_{рез}$, м/с	B , Тл	A , мм	$V_{осц}$, м/с	Ra , мкм	t , с	ΔQ , мг
Основной уровень (X_i)	3,5	1	3	0,17	0,8	60	
Интервалы варьирования (ΔX_i)	0,5	0,1	1	0,05	10,175	5	

Верхний уровень (+1)	4	1,1	4	0,22	0,975	75	
Нижний уровень (-1)	3	0,9	2	0,12	0,625	45	
Код (X_i) X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	
Опыт 1 +	-	-	-	+	+	+	152
Опыт 2 +	+	-	-	-	-	+	269
Опыт 3 +	-	-	+	-	+	-	223
Опыт 4 +	+	-	+	+	-	-	259
Опыт 5 +	-	+	-	+	-	-	215
Опыт 6 +	+	+	-	-	+	-	336
Опыт 7 +	-	+	+	-	-	+	242
Опыт 8 +	+	+	+	+	+	+	286
	247,75	39,75	-19,75	-10,5	22	1,5	4,75
	$b_i \Delta X_i$	19,875	-1,975	-10,5	1,1	0,2625	71,25
Шаг (Δ_i)	1	-0,1	-1	0,05	0,001	5	
Опыт 9 +	3	1	3	0,22	0,625	60	204
Опыт 10 +	3	0,9	2	0,22	0,625	60	277
Опыт 11 +	4	0,9	2	0,27	0,625	60	306
Опыт 12 +	4	0,8	2	0,27	0,625	60	283

Таблица 4.9

Условия опытов

Факторы	$V_{рез}, м/с$	$B, Тл$	$V_{осц}, м/с$
	X_1	X_2	X_3
Уровень:			
- основной	4,0	0,9	0,22
- верхний (+1)	5,0	1,1	0,27
- нижний (-1)	3,0	0,7	0,17
- звездная точка (+ α)	5,6	1,2	0,3
- звездная точка (- α)	2,4	0,6	0,14
Интервал варьирования:			
- основной	1,0	0,2	0,05
- по α	1,6	0,3	0,08

Исходные данные для построения графиков зависимости съема металла от различных факторов

Функция отклика	Исследуемый фактор	Значения фактора				
		-2	-1	0	+1	+2
Y	X_1	232,9	244,5	251,3	253,3	250,5
	X_2	174,1	227,1	251,3	246,7	211,3
	X_3	179,1	225,9	251,3	255,3	237,9

Было реализовано 4 опыта крутого восхождения. Наибольший съем металла был зафиксирован в 3-м опыте. Движение по методу крутого восхождения было закончено, так как область оптимума не может быть описана линейной моделью. Чтобы изучить область оптимума, необходимо перейти ко второй стадии планирования – к исследованию почти стационарной области. На ней в качестве факторов, оказывающих наиболее значительное влияние на функцию отклика $Y(\Delta Q)$, судя по коэффициентам линейной регрессии, являлись: X_1 – скорость осцилляции, $V_{осц}$, м/с; X_2 – магнитная индукция, В, Тл; X_3 – скорость резания, $V_{рез}$, м/с. Кроме вышеуказанных ранее постоянными в опытах были приняты: амплитуда осцилляции, $A = 2,0$ мм, исходная шероховатость обрабатываемой детали, $Ra = 0,63$ мкм; время обработки, $t = 60$ с.

Окончательно модель, полученная после математического планирования второго порядка, имеет вид:

$$Y = 251,3 + 4,4X_1 + 9,8X_2 + 14,7X_3 - 5,1X_1X_2 - 6,9X_1X_3 + 2,6X_2X_3 - 2,4X_1^2 - 14,4X_2^2 - 10,7X_3^2. \quad (4.17)$$

Таким образом, с помощью этого метода получена модель (4.17) процесса МАО отверстий, которая позволяет определить степень влияния технологических факторов на параметры процесса и установить режимы обработки, обеспечивающие наибольший съем металла. Графическое изображение модели показано при помощи одномерных сечений функций отклика Y. Для этого из общей математической модели для параметров процесса составлялось

уравнение регрессии, которое включало в себя две переменные – исследуемый технологический фактор (аргумент) и функцию отклика. Значение всех остальных факторов стабилизировали на нулевых для данной матрицы уровней. В частности, для функции Y и фактора X_1 из соответствующего уравнения получаем выражение:

$$Y = 251,3 + 4,4X_1 - 2,4X_1^2.$$

Была составлена серия таких уравнений для функции Y , определяющих съем металла в зависимости от трех переменных: $X_1(V_{\text{осц}}$, м/с); $X_2(B, \text{ Тл})$; $X_3(V_{\text{рез}}$, м/с). По ним были рассчитаны исходные данные (табл. 4.11) для построения графика (рис. 4.16) в виде одномерных сечений в двумерной системе координат.

Анализ полученных моделей (4.17) позволил выявить степень влияния технологических факторов на функцию отклика – съем металла. Из всех исследованных факторов наибольшее влияние на процесс оказывают режимы резания (скорости резания и осцилляции), магнитная индукция, амплитуда осцилляции, время обработки и исходная шероховатость поверхности обрабатываемой детали.

Объяснение причины того, что режимы резания являются более значимыми факторами при МАО отверстий, следует искать в том, что обрабатываемая поверхность детали служит определенным барьером для удержания ферроабразивного порошка, заключенного в зазоре между внутренним полюсным наконечником и поверхностью. Создание изолированной зоны обработки предотвращает выброс из нее также СОТС и продуктов абразивного резания. При этом зерна порошка, а также их осколки в смеси с частицами диспергированного металла остаются в зоне обработки и в качестве свободного абразива производят пластическое деформирование, микро- и субмикрорезание поверхности детали. Данный факт является отличием от процесса МАО наружных поверхностей, где ФАП фиксируется в зоне только при наличии магнитных сил в рабочем зазоре, которые являются единственным формообразователем магнитной щетки. Таким образом, при МАО отверстий не происходит интенсивного расхода концентрации поверхностно-активных веществ в СОТС, сохраняется их относительное содержание, что позволяет обеспечить производительность обработки во времени и стабилизировать качество поверхности в заданный промежуток времени.

Исходные данные для построения графика в виде одномерных сечений в двумерной системе координат

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_{21}	X_{22}	X_{23}	Y
План 2^3											
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	242
2	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	219
3	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	225
4	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	220
5	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	252
6	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	209
7	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	222
8	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	182
Звездные точки											
9	+	+1,682	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	248
10	+	+1,682	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	236
11	+	0	+1,682	0	0	0	0	0	+2,83	0	229
12	+	0	+1,682	0	0	0	0	0	+2,83	0	193
13	+	0	0	+1,682	0	0	0	0	0	+2,83	248
14	+	0	0	+1,682	0	0	0	0	0	+2,83	195
Нулевые точки											
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	258
16	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	250
17	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46
18	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	254
19	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	262
20	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	260

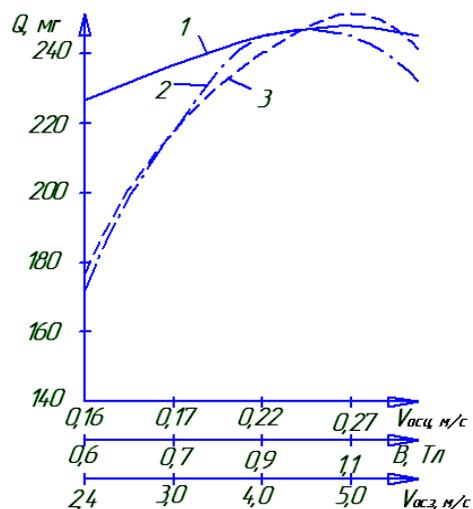


Рис. 4.16. Зависимость съема металла (сталь ШХ15):
1 – от скорости осцилляции; 2 – магнитной индукции; 3 – скорости резания

4.4. Особенности технологии магнитно-абразивной обработки поверхностей различного профиля

4.4.1. Обработка металлооптических элементов с высоким коэффициентом светотражения

В настоящее время в фотометрических приборах типа коллиматоров широко применяют как металлооптические, так и оптические элементы типа зеркал и линз. Коллиматор – оптическое устройство, предназначенное для формирования узких параллельных пучков лучей света или частиц. Коллиматоры применяются для выверки больших измерительных инструментов и определения их коллимационной ошибки, в спектральных приборах для получения пучков света, направляемых в диспергирующую систему, в разнообразных измерительных, испытательных и выверочных оптико-механических приборах и прицельных системах, а также для контроля направлений, плоскостности и прямолинейности изделий, для измерения и сравнения длин и углов.

Для достижения необходимой светоотражательной способности поверхностного слоя применяют различные методы финишной обработки и нанесения покрытий. Вместе с тем, обладая несомненным рядом достоинств, эти методы имеют и недостатки. К ним относят сложность оборудования, низкую долговечность покрытий, экологические проблемы. Однако необходимость получения заданных показателей качества продукции требует как интенсификации традиционных методов обработки, так и введение в производство новых [146].

Для достижения требуемого показателя светоотражательной способности металлооптических элементов была проведена MAO кольцевых дисков ($D \times d \times L = 90 \times 25 \times 2$ мм, материал – сталь 30, ГОСТ 1050–88). Оборудование – станок ЭУ-5, ФАП – ПФА Р6М5-1 ТУ 27-104-02–88, СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор, размер зерна, $\Delta = 100/160$ мкм. Параметры режима MAO: магнитная индукция, $B = 1$ Тл; угловая скорость шпинделя, $\omega = 50$ с⁻¹; скорость вращения детали, $V = 0,6$ м/мин; рабочий зазор, $\delta = 1$ мм; время обработки, $t = 180$ с; параметр шероховатости поверхности до обработки, Ra 0,3...0,5 мм. Блеск поверхности оценивали при дневном рассеянном свете на расстоянии 0,3 м визуально путем сопоставления с образцом-свидетелем при помощи лупы ЛИ-3 ($\times 10$) по ГОСТ 25706–83. В качестве образца-свидетеля использовали покрытие медь–олово, характеризующееся высоким коэффициентом отражения (80...75 %).

В результате проведенных испытаний установлено, что коэффициент светоотражательной способности гладкой однотонной поверхности, полученной MAO, на кольцевом диске – 75...70 %. Параметр шероховатости поверхности – 0,05...0,07 мкм. На поверхности дисков отсутствуют следы шаржирования инструментом, риски, царапины и другие дефекты.

Согласно ГОСТ 15150–69 при обработке зеркал и линз коллиматоров необходимо обеспечить следующие параметры: шероховатость поверхности по параметру Ra не более 0,0025 мкм; коэффициент светотражения – 85...95 %. При этом к минимальным значениям должны быть приведены такие параметры как хроматическая aberrация и шаржирование поверхностного слоя. Для достижения требуемого показателя светоотражательной способности металлооптических элементов была проведена MAO тонкого

сплошного диска ($D \times h = 100 \times 0,5$ мм). Оборудование – станок ЭУ-5, СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор. Параметры и режим МАО: магнитная индукция, $B = 0,9$ Тл; угловая скорость шпинделя, $\omega = 50$ с⁻¹; скорость осцилляции детали, $V_{\text{осц}} = 1,0$ м/мин.; амплитуда осцилляции, $A = 1 \dots 5$ мм; рабочий зазор, $\delta = 1$ мм; время обработки, $t = 210$ с; параметр шероховатости поверхности до обработки, Ra 0,4...0,6 мм. Светоотражательную способность поверхности оценивали при дневном рассеянном свете на расстоянии 0,3 м визуальным путем сопоставления с образцом-свидетелем при помощи лупы ЛИ-3 ($\times 10$) по ГОСТ 25706–83. В качестве образца-свидетеля использовали покрытие медь–олово, характеризующееся высоким коэффициентом отражения (80...75 %). Также использовался блескомер Ф-1.

Другим необходимым аспектом для достижения требуемой шероховатости поверхностного слоя металлооптических элементов является использование ФАП различной грануляции и морфологии. На первом этапе обработки применялся порошок на основе алмаза, $\Delta = 0,2/0,315$ мм (форма частиц порошка приведена на рис. 4.2, б), в течение $t = 30 \dots 45$ с. Затем осуществлялся процесс окончательного полирования порошком «Ферабраз–310» (форма частиц порошка приведена на рис. 4.17, а, б), $\Delta = 0,63/0,1$ мм, в течение $t = 135 \dots 150$ с.

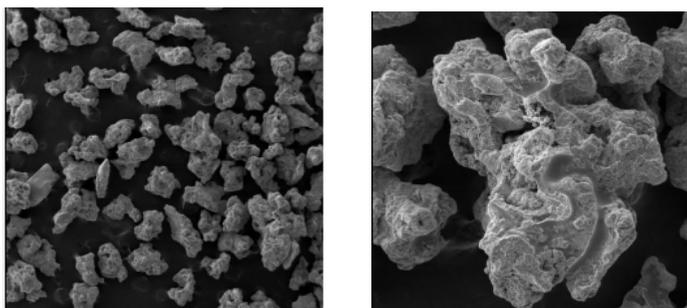


Рис. 4.17. Морфология порошка «Ферабраз–310»: а – $\times 20$, б – $\times 100$

В результате проведенных испытаний установлено, что коэффициент светоотражательной способности гладкой однотонной поверхности, полученной при МАО, составляет на металлооптическом элементе более 85 % (рис. 4.18).



Рис. 4.18. Фотография металлооптического элемента после МАО

Параметр шероховатости поверхности – 0,002...0,0025 мкм. На поверхности тонкого металлооптического элемента отсутствуют следы шаржирования инструментом, риски, царапины и другие дефекты.

4.4.2. МАО деталей игольчатых подшипников

Игольчатый подшипник применяется при ограниченных радиальных размерах узла и для обеспечения повышенных нагрузок при малых частотах его вращения (до 5 м/с). Такого рода узлами служат тихоходные высоконагруженные опоры типа поршневых головок шатунов, осей коромысел, подшипников карданных передач и др. Тела качения в данном виде подшипника представлены игольчатыми роликами малого диаметра (до 5 мм) и большой длины (до 50 мм). Главными источниками потерь, кроме общих для подшипников всех видов, в игольчатых, как бессепараторных, являются трение этих роликов между собой и их проскальзывание по беговым дорожкам. Установлено, что уровень этих потерь на трение определяется точностью изготовления тел качения и их шероховатостью. Опыт эксплуатации показывает, что качество точности должен составлять 5...6 (ГОСТ 6780–81), Ra 0,08...0,16 мкм [147]. Кроме того, частота вращения роликов очень высока в сравнении с самим подшипником (до 10 раз), поэтому эти ролики группируют в обойму игольчатого подшипника при условии, что разница отклонения по их диаметру

не превышает 2...3 мкм. Данное условие накладывает высокие требования к качеству их изготовления. В связи с изложенным процесс финишной обработки роликов является важной технологической задачей, определяющей высокие показатели работоспособности подшипникового узла.

Методом MAO обработали партию игольчатых роликов в количестве 20 шт. каждого типоразмера. Микроструктура роликов после закалки и отпуска состоит из скрытокристаллического мартенсита с мелкими карбидами. Образцы отжигали для придания цементиту зернистой формы. Закалку проводили при 800...820 °С с последующим отпуском при 150...170 °С. Твердость образцов составляла 61...65 HRC. В качестве образцов применяли заготовки для игольчатых роликов диаметром 2,0; 2,5; 3,0 и 3,5 мм и длиной 19,8 и 29,8 мм из стали ШХ15 ГОСТ 801–78. Для уменьшения содержания остаточного аустенита заготовки подвергали воздействию холода при температуре до –15 °С. Данные образцы обрабатывали шлифованием и MAO. Режимы обработки для MAO определяли величиной магнитной индукции ($B = 0,9...2$ Тл). Скорость вращения образцов варьировали от 0,5 до 2,5 м/с. Наличие такого давления приводит к отсутствию деформации тонкого ролика и достижению в зоне резания температуры, не превышающей 70 °С. Ферроабразивный порошок Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81, размер зерна, $A = 63/100$ мкм. СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 5 %-й водный раствор, расход 200 мл/мин. Время обработки ролика, $t = 30$ с, шероховатость поверхности ролика до обработки, $Ra_1 = 0,4$ мкм.

На рис. 4.19 представлены ролики диаметром $d = 2,0$ и 3,5 мм и длиной $L = 19,8$ и 29,8 мм после MAO. Степень точности равняется 3 (ГОСТ 6870–81). Согласно проведенным измерениям установлено, что параметр шероховатости цилиндрической поверхности роликов Ra_2 после обработки составляет 0,07...0,08 мкм, предельные отклонения среднего диаметра $\Delta L_{WS} = 3$ мкм (ГОСТ 25346–82); разноразмерность по диаметру $VD_{WP} = 3$ мкм; непостоянство диаметра $VD_{WP} = 1,5$ мкм; огранка – 1,5 мкм; бочкообразность – 1,5 мкм. На поверхности роликов отсутствуют трещины, раковины и очаги коррозии. В результате холодного травления кислотой не обнаружены пятна вторичной закалки и следы обезуглероживания поверхностного слоя. На рис. 4.20 представлены профилограммы поверхностного слоя после шлифования и MAO. Поверхность

образцов после MAO характеризуется большими по величине значениями относительной опорной длины профиля на одном и том же уровне его сечения. Это обеспечивает рост износостойкости игольчатых роликов и снижение потерь на трение. Топография поверхностного слоя после MAO отличается более развитым микрорельефом, чем после шлифования, что также служит положительным фактором, поскольку узкие и глубокие следы царапин зерен шлифовального круга могут явиться причиной возникновения питтинга.

Данные ролики после обработки методом MAO могут быть рекомендованы для сборки подшипников класса точности 5 и 6 (ГОСТ 520–71).



Рис. 4.19. Фотография внутренней обоймы:
а – игольчатого подшипника; б – роликов

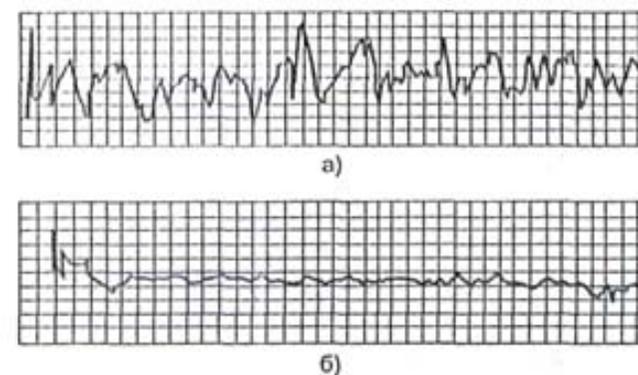


Рис. 4.20. Профилограммы поверхностного слоя:
а – после шлифования; б – MAO

4.4.3. MAO поверхностей инструмента для холодного выдавливания

В современном машиностроении широко используются высокопроизводительные процессы изготовления деталей холодным деформированием. В качестве инструментов для осуществления этих процессов используются стержневые инструменты сложного профиля (пуансоны), отличающиеся своей формой от плоскости, цилиндра и конуса. Установлено [148], что основными причинами их выхода являются: адгезия контактной части материала пуансона к материалу обрабатываемой поверхности (30 %), деформация (35 %) и скалывание рабочей части пуансона (35 %). При этом практика показывает, что качество поверхности стержневого инструмента сложного профиля играет существенную роль в надежности его работы, и поэтому вопрос повышения качества поверхностей инструментов крайне актуален.

Основные свойства поверхности инструмента формируются в процессе изготовления и, особенно, на отделочных операциях, поэтому проблеме их качества в технологических процессах уделяется особое внимание. Форма инструмента пуансона предопределила такую финишную операцию, как полирование. Полирование производится на настольных шлифовальных бабках НШ-01 с ручной подачей наждачной (шлифовальной) бумаги ГОСТ 5009–82 М40 к обрабатываемой поверхности. Существенным недостатком операции полирования является низкая производительность и высокий процент брака (до 10 %). Это связано с тем, что при ручном труде качество изготавливаемых изделий нестабильно и зависит от индивидуальных качеств рабочего.

Наиболее эффективными способами для обработки инструментов со сложным профилем рабочей части являются методы, основанные на использовании эластичной связки или незакрепленного абразива. Одним из перспективных методов обеспечения высокого качества рабочей поверхности является технология магнитно-абразивной обработки. При MAO инструментом является ферроабразивный порошок, который находится в рабочем зазоре в подвижно-координированном состоянии. Роль связки между абразивными зёрнами выполняет магнитное поле, обладающее упругими силами воздействия на зёрна порошка.

Примером тому служит создание автоматической линии по выпуску пуансонов для холодного выдавливания. Одним из «узких мест» при ее проектировании и создании является операция по их финишной обработке. Размерный съём материала при использовании метода полирования составляет 0,5...5 мкм, что не всегда устраняет дефекты после размерной обработки. Основную проблему этого метода представляет удержание паст или суспензий абразивного инструмента в зоне обработки при варианте применения специализированного оборудования. В случае автоматической системы требуется создание дополнительного механизма с целью постоянного контроля наличия, требуемой консистенции и количества пасты или суспензии в данной зоне, а также устранения отработанного материала в ходе протекания процесса.

Процесс MAO характеризуется величиной размерного съёма до 50...100 мкм в зависимости от силы тока, создающего магнитное поле, индукция которого определяет давление инструмента на обрабатываемую поверхность. Рабочая среда, магнитная проницаемость которой находится в пределах 8...20 мкГн/м, удерживается в зоне обработки вдоль магнитных силовых линий этого поля. При необходимости ее замены (стойкость ФАП до 20 мин) производится отключение тока и осуществляется сбор отработанного порошка. Второй вариант заключается в периодической подаче этого порошка в зону обработки при использовании бункера-дозатора. Важным фактором является реализация регулирования параметрами рабочей среды путем изменения величины силы тока, что, в конечном счете, определяет характер рабочего пространства, одновременно при протекании технологического процесса. На рис. 4.21 представлена фотография зоны MAO пуансона.

Однако технологические закономерности применения этого метода при обработке пуансонов еще недостаточно изучены, например, распределение магнитных потоков при обработке стержневого инструмента сложного профиля из современных материалов. В соответствии с этим поставлены и решены следующие задачи: исследовать абразивные и магнитные свойства и стойкость ФАП; исследовать влияние степени заполнения рабочей зоны ФАП на процесс MAO.

В качестве исходных материалов применялись порошки карбида титана (TiC), а также ФАП комбинированного состава Fe-Al₂O₃ и Fe-Al₂O₃ + (Ni-Co) с химической металлизацией электрокорунда

белого ЭБМ40 никелем и никель-кобальтовым сплавом в количестве 5 % от общего веса металлизированного порошка. ФАП готовился в этом случае в виде механической смеси в объемном отношении 1:1.

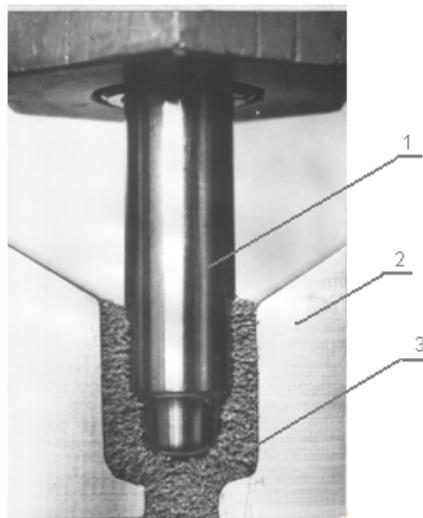


Рис. 4.21. Фотография зоны МАО пуансона:
1 – пуансон; 2 – полюсный наконечник; 3 – ферроабразивная щетка

Образцы обрабатывались при следующих технологических режимах: окружная скорость, $V_{\text{окр}} = 1,5$ м/с; скорость осцилляции, $V_0 = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции, $A = 2$ мм, магнитная индукция в рабочем зазоре, $B = 1$ Тл; коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_3 = 1$; величина рабочего зазора, $\delta = 1,2$ мм; зернистость порошка, $\Delta = 160/125$ мкм; СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор. Массовый съём металла определялся взвешиванием образцов до и после обработки на аналитических лабораторных весах ВЛТ–1 с точностью до 0,001 г. Исследование шероховатости поверхности образцов выполнялось на профилографе-профилометре модели 252 «Калибр».

На рис. 4.22 приведены исследования влияния продолжительности обработки на величину съема металла. При МАО съём металла носит монотонный характер, отличающийся постоянным ростом в течении всего периода обработки.

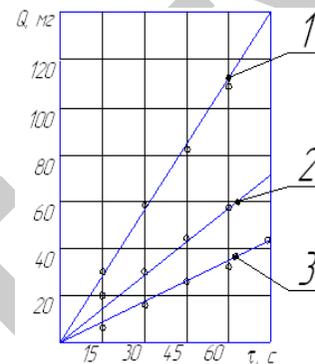


Рис. 4.22. Зависимость величины съема металла (Q) от времени (τ) обработки:
1 – Fe-TiC; 2 – Fe-Al₂O₃; 3 – Fe-Al₂O₃ + Ni-Co

На рис. 4.23 приведены исследования влияния продолжительности обработки на шероховатость поверхности. При МАО формирование микропрофиля происходит первые 15 с, в отличие от операции полирования. В пределах исследованного диапазона с увеличением длительности обработки шероховатость поверхности уменьшается, что обусловлено удалением исходных микронеровностей обрабатываемой поверхности ФАП.

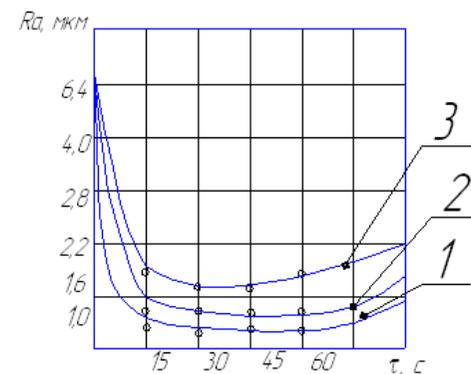


Рис. 4.23. Зависимость шероховатости (R_a) поверхности от времени (τ) обработки:
1 – Fe-TiC; 2 – Fe-Al₂O₃; 3 – Fe-Al₂O₃ + Ni-Co

Таким образом, для получения высокого массового съема металла и качества поверхности следует применять ФАП железо-карбид титана (Fe-TiC). Коэффициент заполнения рабочей зоны магнитно-абразивным порошком должен быть равен единице.

Использование метода МАО при финишной обработке пуансонов для холодного выдавливания позволило обеспечить получение шероховатости их поверхности, равной Ra 0,04...0,06 мкм при исходной Ra 0,12...0,18 мкм. Время обработки каждой детали составило 6...10 с в зависимости от ее размерности. Производственные испытания показали, что стойкость таких пуансонов в сравнении с традиционно обработанными повысилась на 15...20 %. Сила тока, используемого для создания ЭМП, составляет 4...5 А. ФАП, применяемый при обработке, имеет размерность $\Delta = 63/100$ мкм. Материал – Ж15КТ ТУ 6-03-483–81. СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 5 %-й водный раствор, расход 1...1,5 л/мин.

Применение метода МАО позволило повысить эксплуатационные характеристики пуансонов для холодного выдавливания, за счет снижения шероховатости их поверхности и уменьшить себестоимость изготовления ввиду реализации ввода оборудования для МАО в автоматическую линию.

Определены оптимальные параметры процесса МАО стержневого инструмента. Форма полюсного наконечника влияет на равномерность изменения сложного профиля детали по форме образующей. Результаты опытов показали, что после МАО стержневого инструмента обеспечивается формирование равномерной шероховатости поверхностного слоя.

4.4.4. Обработка поверхностей прядильных колец для текстильного производства

Для реализации прядильного производства, обеспечивающего изготовление текстильных изделий типа тканей, трикотажа, гардин, сетей, шнуров, канатов требуется из шерстяного, хлопкового и льняного волокна произвести формирование пряжи. Эта пряжа создается путем переработки, разрыхления и очищения данного волокна, которое после сушки и вытягивания образует ровницу, а затем дискретизацией, последующим кручением и сучением вырабатывается пряжа.

Основными направлениями совершенствования и повышения производительности прядильных машин являются увеличение их скоростных параметров; использование микропроцессоров с выводом основных параметров работы на дисплей; создание полуавтоматов и автоматов, а также их комплексов с единой системой управления технологическим процессом. К середине 20-го века кольцевые прядильные машины непрерывного действия вытеснили менее производительные и более сложные машины периодического действия. Вместе с тем современные кольцевые прядильные машины работают уже при такой частоте вращения веретен, при которой остается малый резерв для роста производительности машины. Этот рост возможен за счет автоматизации процесса съема початков с веретен, ликвидации обрыва пряжи и агрегатирования машин с мотальными автоматами в комплекс [149]. Как видно из приведенного анализа существенным фактором обеспечения эффективности работы указанных выше машин является снижение текущей обрывности, оценка которой производится при рассмотрении механизма привода веретен. Одной из его ответственных деталей служит прядильное кольцо со специально обработанной поверхностью, рис. 4.24.

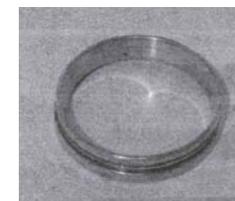


Рис. 4.24. Прядильное кольцо после МАО

Технологический процесс изготовления данных колец включает в себя комплекс токарных, сверлильных и фрезерных операций, закалку в защитной среде (в случае использования заготовки из стали) и шлифования. Однако, несмотря на правильное построение данного технологического процесса и применение высокоэффективных способов механической обработки, существует ряд определенных трудностей для реализации. Это связано с тем, что форма кольца представляет собой достаточно сложную поверхность для получения требуемых выходных показателей. Данное обстоятельство вызвано тем, что крутильно-мотальный механизм, в состав

которого и входят эти кольца, осуществляет несколько важных операций, а именно: кручение и наматывание пряжи. Для предотвращения ухода волокна в мычкоулавливатель при обрыве нити пряжи требуется установка устройства прерывания питания ровнищей. Данные устройства включают в себя магнитные или оптико-электронные системы, что повышает себестоимость изготовления текстильных изделий. Следовательно, в случае достижения показателя шероховатости поверхности, характеризующегося отсутствием узких и глубоких впадин и большой высоты микронеровностей, существует реальная возможность снизить уровень обрывности данной нити.

В качестве оборудования применяется станок СФТ 2.150.00.00.000. ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81 рис. 4.25, СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 5 %-й водный раствор. Размер зерна ФАП, $\Delta = 100/160$ мкм. Параметры и режимы обработки: величина магнитной индукции, $B = 1,1$ Тл; скорость вращения детали, $V_d = 2$ м/с; амплитуда осцилляции, $A = 3$ мм; величина рабочего зазора, $\delta = 1$ мм; коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_3 = 1$; время обработки, $t = 120$ с. Исходная шероховатость поверхности кольца $Ra_1 0,8 \dots 1$ мкм, материал кольца 40X13, 42...46 HRC. Выходными показателями служит величина массового съема материала, G , мг/г и достигаемая шероховатость поверхности, Ra_2 , мкм.

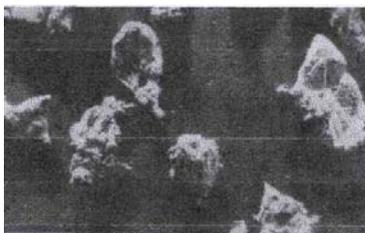


Рис. 4.25. Форма частицы ФАП Ж15КТ, ($\times 100$)

Согласно профилограммы поверхности прядильного кольца видно, что данные микронеровности вершин и впадин будут для протекающей по ним нитяи пряжи играть роль лезвия при условии ее дополнительного натяжения во время ее движения. Кроме того, прохождение нити по этой поверхности характеризуется ростом ее температуры, что вызывается, как указано выше, высокой частотой

вращения веретен (до $25\ 000$ мин⁻¹). Даже если в целом обрыва пряжи и не произойдет, то, во всяком случае, определенная часть волокон окажется перерезанной, что резко снизит прочность нити и может сказаться на других технологических пунктах. Как известно, процесс изготовления детали характеризуется копированием ее поверхности конфигурации формообразующего инструмента. Использование паст и суспензий при полировании характеризуется высоким уровнем расхода и низким размерным съемом материала (до 5 мкм) даже при обработке изделий, отличающихся правильной геометрической формой.

При отсутствии острых граней сформированная методом MAO топография поверхности, обеспечивает в отличие от шлифования уменьшение обрывности нити в среднем, как показали произведенные испытания, на 10...20 %. Рост эффективности действия крутильно-мотального механизма в свою очередь приводит к снижению числа отказов оборудования по вышеуказанным причинам и соответственно к повышению производительности труда и рентабельности предприятия. Для шлифования характерно возникновение высокой температуры (до 800 °С) в зоне обработки, что приводит к концентрации напряжений, а, следовательно, возникновению прижогов. Данное явление становится следствием увеличения числа отказов, что в конечном результате сказывается на производственных показателях предприятия. На рис. 4.26 представлена топография поверхности прядильного кольца после шлифования и MAO. В табл. 4.12 приведены результаты производительности качества обработки прядильных колец.

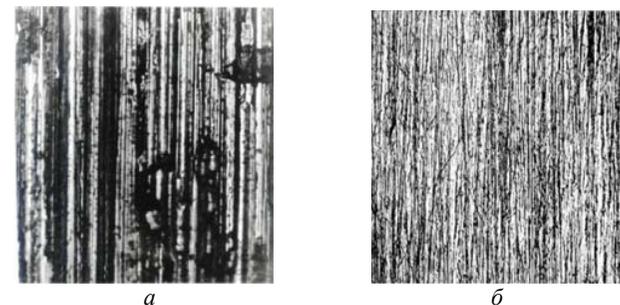


Рис. 4.26. Топография поверхности прядильного кольца: а – шлифование, ($\times 150$); б – MAO, ($\times 150$)

Таблица 4.12

Показатели производительности и качества обработки прядильных колец после шлифования и МАО

№	Метод обработки	Величина массового съема материала, G , мг	Достижимая шероховатость, Ra_2 , мкм
1	Шлифование	1600	0,1–0,4
2	МАО (30 с обработки)	215	0,2–0,3
3	МАО (60 с обработки)	330	0,09–0,15
4	МАО (90 с обработки)	380	0,03–0,06
5	МАО (120 с обработки)	410	0,01–0,02

В результате проведенных испытаний установлено, что применение МАО как финишной операции позволяет получить на сложнопровальной поверхности прядильных колец в местах их рабочего контакта с нитью пряжи шероховатость, Ra_2 0,01...0,02 мкм. Данные показатели шероховатости обеспечивают снижение обрывности нити пряжи до 20 %, что повышает эффективность прядильного производства.

4.4.5. Зачистка острых кромок и заусенцев магнитно-абразивной обработкой

К МАО, как способу доводки кромок на режущих инструментах и деталях, впервые обратился L. G. Simjian [150]. Он предлагал перемещать вверх-вниз изделие в контейнере, заполненном стальной стружкой, и при движении вниз включать магнитное поле индуктора. Низкая производительность процесса не привлекла широкого внимания производителей к этому изобретению в свое время.

Метод МАО внедряется в жесткой конкуренции с традиционными и принципиально новыми технологическими процессами, среди которых можно отметить удаление заусенцев электрохимическим методом [151], тепловым воздействием [152], пневмомеханическим способом [153], при помощи лазера [154], электролитическим методом [155], размерных инструментов [156].

Опыт отечественных предприятий показывает, что скругление фасок и удаление заусенцев различных изделий после токарных

операций производится в основном лезвийным инструментом типа резцов, сверл, зенкеров и т. п. с использованием большой доли ручного труда. В процессе зубо- и шлиценарезания на торцах зубьев и шлицевых валов образуются острые кромки и заусенцы, которые ухудшают качество зацепления и снижают срок службы в результате скола острых кромок. В связи с этим для их устранения используют такие методы, как электрохимический, тепловой, фрезерование, строгание, шлифование.

Однако применение лезвийного инструмента для скругления фасок и удаления заусенцев требует наличия многопозиционных или нескольких однопозиционных станков, как, например, для обработки зубчатых колес; тепловой метод достаточно энергоемок и для его реализации необходимо соответствующее аппаратное оформление; электрохимический также характеризуется специальными источниками питания электрическим током и устройствами для подачи, сбора, хранения и очистки рабочей жидкости, кроме того, необходимо размещение технологического оборудования в отдельных помещениях, что связано с учетом специфических требований безопасности труда; шлифованию свойственны расход остродефицитных и дорогостоящих материалов и частые переточки инструмента.

Ввиду этого поставлена задача определения возможности использования метода МАО для указанных выше технологических операций (в частности, после токарной обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей и зубо- и шлицешлифования). В качестве оборудования применялись экспериментальные установки: для наружной МАО – П-80, для внутренней – ЭУ-6 с оппозитно расположенными магнитными полюсами электромагнитной системы. Для устранения заусенцев и скругления фасок после токарной обработки образцами служили круг $\varnothing 40$ мм и труба $D \times d = 42 \times 34$ мм, сталь 20 ГОСТ 1050–88, после зубошлифования – зубчатые колеса с $m = 2$ мм, сталь 40X ГОСТ 4543–71, 41...45 HRC; после шлицешлифования – шлицевые валы с $m = 3$ мм, сталь 40X ГОСТ 4543–71, 35...40 HRC. Параметры и режимы обработки методом МАО данных заготовок: величина магнитной индукции, $B = (0,6...1,2)$ Тл; скорость резания, $V_p = 0,8...1,4$ м/с; скорость осцилляции, $V_o = 0,15...0,25$ м/с; амплитуда осцилляции, $A = 0,5...1,5$ мм; величина рабочего зазора, $\delta = 0,5...1$ мм; ферроабразивный порошок – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81; зернистость ФАП, $\Delta = 100/315$ мкм; смазочно-охлаждающие

технологические средства СинМА-1 ТУ 38.5901176–91 с капельной подачей; время обработки, $t = 0,5...3$ мин.

Устранение заусенцев на кромочных выступах заготовки определяется их расположением в пространстве и размерами, а также процессом образования. Например, диапазон размеров заусенцев при зубо- и шлицешлифовании составляет $0,04...0,07$ мм по высоте и $0,01...0,03$ мм по толщине, в то время как при токарной обработке размеры соответственно равнялись $0,2...0,5$ и $0,1...0,2$ мм. Данные отличия потребовали указанного выше расширения применяемых параметров и режимов МАО. Профиль кромки пруткового материала и труб измерялся со стороны внешней и внутренней цилиндрических поверхностей и торца заготовки, а зубчатых колес и шлицевых валов, во-первых, по наружному диаметру и торцу зуба и, во-вторых, по наружному диаметру и рабочей поверхности зуба. Критерием степени скругления фаски при обработке методом МАО был выбран ее радиус, который определялся согласно ГОСТ 10948–84 (для пруткового материала и труб), ГОСТ 13755–81 (для зубчатых колес) и ГОСТ 6033–80 (для шлицевых валов с эвольвентным профилем зуба) при помощи шаблонов.

На рис. 4.27, а показаны результаты измерений на каждом отрезке времени обработки путем отметки, сделанной на обрабатываемой поверхности зубчатого колеса после шлифования по наружному диаметру. Шлифовальный круг образует заусенцы во взаимно перпендикулярных плоскостях, что усложняет последующую операцию как лезвийным, так и жесткосвязанным абразивным инструментом. МАО, обладая подвижно скоординированным зерном в режущем инструменте, устраняет этот недостаток, связанный с пространственным расположением заусенцев, снимая их по обеим поверхностям и производя зачистку поверхности и скругление фасок.

Заусенцы, полученные зубо- и шлицешлифованием, были полностью устранены за 45 с, а применение пакетного способа обработки уменьшает это время в $8...10$ раз. Одновременно достигается требуемое скругление кромки в течение 60 с обработки. На основании проведенных исследований установлено, что обработка методом МАО кромок зубчатых колес и шлицевых валов и снятие заусенцев осуществляются с высокими производительностью и качеством. Например, для указанного типоразмера (прутковый материал $\varnothing = 40$ мм) диапазон радиусов скругления составил $0,2...0,3$ мм; для

труб $D \times d = 42 \times 34$ мм – $0,2...0,3$ мм; для зубчатых колес – $0,2...0,3$ мм и для шлицевых валов – $0,2...0,25$ мм, что соответствует требованиям приведенным выше госстандартов.

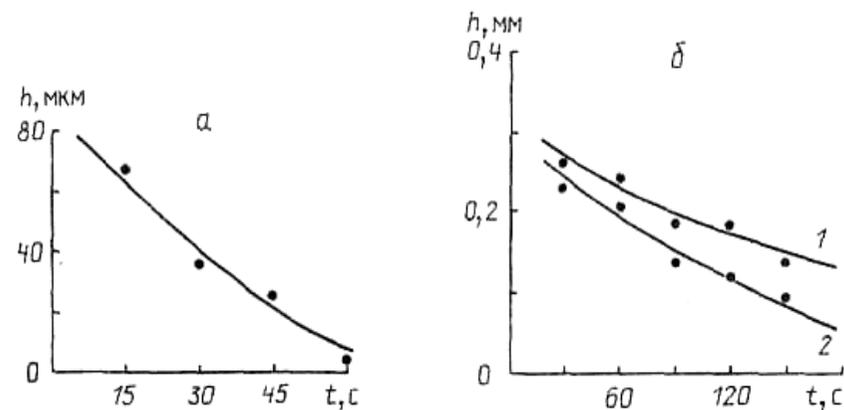


Рис. 4.27. Зависимость размерности заусенцев, образованных: а – зубошлифованием; 1 – токарной обработкой в результате продольного и 2 поперечного б – точения; от времени, затраченного на их удаление

На рис. 4.27, б показаны результаты экспериментальных данных, характеризующих параметры заусенцев, которые образованы токарной обработкой. Заусенцы, полученные при продольном точении, не были ликвидированы за 3 мин обработки методом МАО и при «жестких» режимах ($B = 1,1...1,2$ Тл). Высота исходного контура по сравнению с обработанным уменьшилась примерно вдвое (с $0,3...0,35$ до $0,18...0,22$ мм). Заусенцы, образованные поперечным точением, устраняются полностью, например, при его исходной высоте $0,25...0,3$ мм их удаление происходит за 1 мин обработки. Скругление фасок в обоих случаях отвечает требованиям госстандартов и удовлетворяет как по производительности, так и по размерным параметрам.

В работе [157] авторы, в своих исследованиях занимаясь округлением кромок (рис. 4.28) на зубчатом колесе шестеренчатого насоса, сравнили четыре процесса финишной обработки кромок.

На рис. 4.29 показаны поперечные сечения кромки зуба до финишной обработки и после округления кромки разными способами.

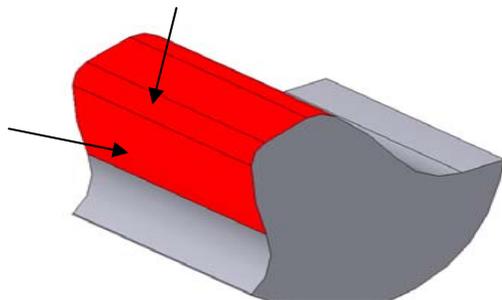


Рис. 4.28. Обрабатываемая поверхность зуба
(стрелками показаны скругленные продольные кромки зуба)

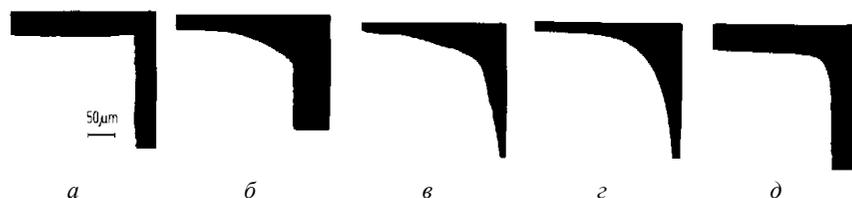


Рис. 4.29. Форма кромки в поперечном сечении:
а – до обработки; б – после скругления щеткой; в – электрохимическим способом; г – абразивной лентой; д – MAO

Наиболее точное приближение поперечной формы кромки к дуге окружности получено после магнитно-абразивной обработки с обеспечением меньших значений радиуса округления и с равномерным округлением кромки по всей длине зуба (табл. 4.13).

Таблица 4.13.

Результаты скругления кромок зубьев стального зубчатого колеса

Способ обработки кромок	Радиусы на кромках, мкм	
	на ножке зуба	на головке зуба
Металлической щеткой	60	200
Электрохимический	100	100
Абразивной лентой	60	150
Магнитно-абразивный	60	60

Исследования показали, что на шестернях 260-1006244 ($m = 2,5$ мм) из стали 18 ХГТ (62...64 HRC) после MAO образуется ок-

ругление продольной кромки зуба $r = 40...50$ мкм. Измерения геометрической точности обработанных деталей подтвердили округление продольных кромок зуба после MAO. Продольная кромка зуба после обработки соответствует ГОСТ 16531–83.

Это объясняется тем, что магнитный поток концентрируется на кромке ферромагнитного материала и ферроабразивная «щетка» у этой кромки действует с большей эффективностью, чем на остальной части детали. Существенных отличий по съему заусенцев, скруглению фасок как в продольном, так и поперечном сечениях шлица и зуба отмечено не было, что позволяет рекомендовать данный метод для проведения этой технологической операции. Резкие перепады диаметральных размеров, которые свойственны зубчатому контуру шестерен и шлицевых валов, не являются препятствием для целенаправленного формообразования деталей с притуплением острых кромок и удалением заусенцев.

4.4.6. MAO закаточных роликов для консервного производства

Техническое перевооружение в современных условиях предприятий пищевой промышленности направлено на создание и освоение сложных поточных автоматизированных линий [158]. Это связано с тем, что приоритет внедрения безотходных технологий требует перехода на перспективные методы обработки пищевых продуктов типа СВЧ-технологии, ИК-излучения и асептического консервирования. Правильная организация труда в этом направлении обеспечивается также и созданием машин по упаковке и консервированию данных продуктов. Традиционными видами тары для их хранения и транспортировки служит стеклянная и консервная металлическая. Одной из проблем, которая стоит перед производством продуктов питания, является укупорка, или, иначе говоря, герметичное соединение крышки с корпусом или горлом тары. Требуемый уровень качества такой операции достигается обжатием фланца крышки и корпуса этой тары путем обкатывания на основе их деформирования. Несмотря на широкое внедрение полиэтиленовой пищевой тары на базе полипропилена стеклянная и металлическая имеют ряд преимуществ: долговечность, надежность, возможность оборота.

Операция обкатывания консервной тары производится путем предварительного прогиба фланца крышки и затем окончательного уплотнения шва при помощи закаточных роликов, являющихся ответственными деталями одноименного механизма. Герметичный двойной шов с целью длительной сохранности пищевого продукта во многом зависит от профиля и размеров рабочей части указанных выше роликов, а так же их качества. Основными требованиями, предъявляемыми к этой части роликов служит получение высоких показателей относительной опорной поверхности t_p и ее шероховатости Ra и соблюдение макрогеометрических отклонений типа некруглости и отклонения профиля продольного сечения. Достижение результата данной технической задачи обеспечивается применением современных методов механической обработки, в частности, и финишной. Выглаженный микрорельеф поверхности роликов, отсутствие его узких и глубоких впадин и острых вершин существенно повышает работоспособность и безотказность их действия. Вследствие минимизации этих дефектов на поверхности жести крышек банки резко снижает количество рисок и царапин, предваряющих образование питтинга. Кроме того, уменьшается расход дефицитного олова и дорогостоящих лакокрасочных изделий, предназначенных для защиты от коррозии.

Применение формообразующей токарной обработки в полной мере не обеспечивает выполнение указанных выше требований к рабочей части роликов, поскольку материалом для них служат легированные или углеродистые инструментальные стали типа У10 ГОСТ 1435–74. В связи с изложенным, существует необходимость использования финишных операций после соответствующей термообработки этих роликов.

Были проведены исследования, направленные на определение технологических возможностей метода МАО закаточных роликов. Оборудование – станок СФТ 2.150.00.00.000. ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81, размерность зерна, $\Delta = 100/160$ мкм, коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_3 = 1$. СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор, капельная подача, 100...150 мл/мин. Параметры и режимы обработки: скорость вращения детали, $V_{вр} = 2,9$ м/с; скорость осцилляции, $V_o = 0,3$ м/с; амплитуда осцилляции, $A = 2$ мм; величина рабочего зазора, $\delta = 3$ мм; величина магнитной индукции, $B = 1,1$ Тл. Шероховатость роликов,

предназначенных для проведения испытаний, до обработки данным методом составляла Ra_1 1,4...1,8 мкм. Материал У10 ГОСТ 1435–90, твердость 58...62 HRC. В роли критерия качества обработки были приняты: шероховатость поверхности после обработки Ra_2 , формируемой в течение 1 мин и вид образуемого профиля при учете величины его отклонения. Величину отклонения $\Delta = d_{max} - d_{min}$ определяли согласно ГОСТ 10356–86 для седлообразного и бочкообразного профиля роликов. Для цилиндрического профиля устанавливалось отклонение профиля продольного сечения. Использование первоначальной традиционной схемы обработки методом МАО показало, что эффективность съема материала на впадине роликов не является достаточной. В связи с этим было предложено образование замкнутой рабочей зоны путем размещения на участках, свободных от полюсных наконечников немагнитных пластин. Это обусловлено тем, что в силу кинематических факторов процесса часть порции ФАП перемещается от одной части полюсных наконечников к другой и происходит ее заклинивание. Увеличение доли ФАП в этих зонах полюсных наконечников и отсутствие равномерности его распределения в рабочей зоне приводит к ухудшению качества обработки. В результате же реализации данного предложения обеспечивается, как указывалось выше, более равномерное распределение порции ФАП в рабочем зазоре и возможность его концентрации по всему профилю закаточных роликов. Однако следующим вопросом является то, какой должна быть величина зазора именно на этих участках. Поэтому вторая серия опытов проводилась при использовании немагнитных пластин, выполненных из стали 12Х18Н9Т ГОСТ 5632–74, имеющих выступы типа зубчатого контура. Данные выступы шириной 2 мм следовали от края пластин к центру рабочей зоны и зазор между пластиной и деталью изменяли шагом $0,1\delta$, где δ – величина рабочего зазора между полюсным наконечником и поверхностью ролика. Для каждого размера зазора обрабатывалась партия из 3-х роликов. Результаты испытаний представлены в табл. 4.14. Данные результаты свидетельствуют, что создание замкнутой рабочей зоны при наличии зазоров, составляющих диапазон $(0,3...0,6)\delta$, обеспечивает получение требуемых качественных характеристик. Диапазон величин выступов до $0,3\delta$ приводит к излишнему задерживанию массы частиц ФАП в середине рабочего зазора и как следствие

вызывает как интенсивный износ пластин, так и снижение качества обработки роликов. Размещение пластин, величина выступов которых больше $0,7\delta$ не обеспечивает в должной мере перемещение частиц ФАП к середине зазора вследствие чего не достигается необходимый размерный съем материала.

Таблица 4.14.

Показатели качества обработки закаточных роликов при изменении рабочего зазора

Величина зазора, мм	Вид получаемого профиля	Шероховатость Ra_2 , мкм	Величина отклонения, мкм
0,1 δ	Седлообразный	0,28	14
0,2 δ	Седлообразный	0,24	9
0,3 δ	Цилиндрический	0,19	4
0,4 δ	Цилиндрический	0,17	3
0,5 δ	Цилиндрический	0,19	2
0,6 δ	Цилиндрический	0,18	2
0,7 δ	Бочкообразный	0,21	5
0,8 δ	Бочкообразный	0,28	13
0,9 δ	Бочкообразный	0,31	22

Также был реализован способ, когда в качестве немагнитных пластин использовался плоский алюминиевый лист Д16 ГОСТ 4784–74 толщиной 2 мм. Предлагаемая схема обработки с применением этого варианта была осуществлена при условии, что этот зазор составляет $0,5\delta$. Результаты испытаний представлены в табл. 4.15, где первым вариантом является схема при отсутствии немагнитных пластин, вторым – при наличии немагнитных пластин из стали 12Х18Н9Т ГОСТ 5632–74 и зазоре между поверхностью ролика и данной пластины равном $0,5\delta$, третьим – при наличии плоского алюминиевого листа Д16 ГОСТ 4784–74 толщиной 2 мм. Визуальный осмотр поверхности роликов показал, что при их обработке с использованием третьего варианта схемы на этой поверхности происходит также и образование рисок от заклинивания частиц ФАП. На поверхности роликов, обработанных по схемам первого и второго вариантов, данные риски отсутствуют.

Таблица 4.15.

Показатели качества обработки закаточных роликов в зависимости от схемы обработки

Вариант схемы обработки	Время обработки, с	Шероховатость, Ra_2 , мкм	Вид профиля	Величина отклонения, мкм
Первый	55	0,29	Бочкообразный	24
Второй	30	0,19	Цилиндрический	2
Третий	45	0,25	Бочкообразный	20

Таким образом, установлена и реализована возможность эффективной и качественной обработки методом MAO закаточных роликов (рис. 4.30), как финишной операции, а также разработана и создана схема такой обработки, производительность использования которой обеспечивает требуемые качественные характеристики данных роликов. Представлены топография поверхности закаточных роликов и микрорельеф поверхности закаточных роликов после использования MAO на рис. 4.31 и 4.32.



Рис. 4.30. Фотография закаточного ролика после MAO



Рис. 4.31. Топография поверхности закаточных роликов после использования MAO, $\times 100$

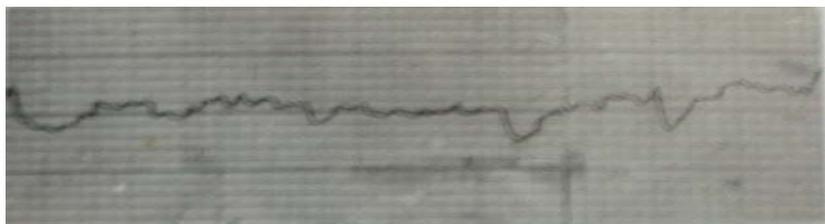


Рис. 4.32. Микрорельеф поверхности закаточных роликов после использования MAO, ВУ = 200, ГУ = $40 \cdot 10^3$

4.4.7. Обработка поверхностей рукояток управления коммутационной аппаратуры

Анализ процессов изготовления сложно профильных поверхностей деталей машин показывает недостаточность существующих методов обработки и сложность реализации потенциальных возможностей технологических операций. Одним из таких видов деталей машин являются рукоятки управления коммутационной аппаратуры, рис. 4.33, выполненные из алюминиевого сплава АЛ-3 ГОСТ 2685–75. Известно, что при финишной обработке алюминиевых сплавов следует учитывать специфичность их физико-химических характеристик. Это и более высокий, чем у стали, коэффициент линейного расширения, а также пониженный (в сравнении с другими материалами) модуль упругости. Ввиду этого при окончательной обработке таких сплавов следует применять интенсивное охлаждение, специализированное оборудование и другой уровень режимов резания. Основная проблема обработки сложнопрофильных поверхностей заключается в обеспечении эквидистантности движения инструмента по поверхности изделия. Поэтому из-за конфигурации и размеров рукояток управления ($L = 30$ мм, $d = 8$ мм) использование шлифовальных кругов и лент достаточно проблематично. Различные методы полирования алюминиевых сплавов характеризуются либо трудностью удаления дефектов, образованных предшествующей механической обработки, либо возможностью реализации процесса съема материала только для ограниченного количества марок материала.

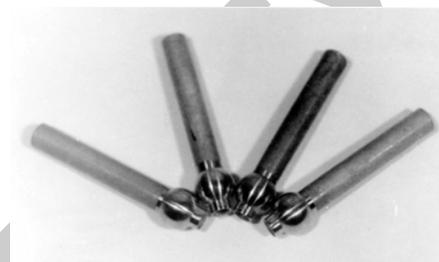


Рис. 4.33. Фотография рукояток управления коммутационной аппаратуры

Процесс диспергирования материала в ходе протекания MAO носит характер избирательного и ориентированного микрорезания, определяемого наличием электромагнитного поля. Однако традиционно используемая схема MAO наружных поверхностей и ее конструктивное оформление не отвечает технологическим возможностям процесса обработки рукояток управления коммутационной аппаратуры. Решение этой задачи непосредственно связано с разработкой и внедрением принципиально нового типа станков, которые обеспечивают высокую степень автоматизации и непрерывности производства. Например, роторные системы, транспортное движение которых согласовано таким образом, чтобы перемещение заготовок для каждой последующей обработки не имело остановок в их общем потоке. Использование роторных машин приводит к сокращению производственных площадей и рабочей силы в 4...5 раз, а продолжительность рабочего цикла отработки уменьшается в сотни раз [159]. Главное отличие роторных станков от традиционно применяемого оборудования машин заключается в его размещении в замкнутых конвейерах. Основным признаком, отражающим сущность технологического процесса и определяющим его характер, служит отношение двух компонентов этого процесса, а именно инструмента и обрабатываемого изделия. Этот критерий вследствие его общности позволяет, согласно классификации Л. Н. Кошкина, считать процесс MAO поверхностным взаимодействием указанных выше компонентов, к каким, например, относится электроэрозионная обработка. Данный класс процессов соответствует более высоким стадиям развития технологии обработки по сравнению с точечным и линейным контактом режущего инструмента и детали. Следующим этапом этого развития является реализация их объемного взаимодействия.

Основным ограничением для осуществления поверхностного и объемного взаимодействия компонентов технологического процесса служит, во-первых, то, что питание роторных машин и межоперационная передача обрабатываемых деталей может быть осуществлена только для изделий типа тел вращения, во-вторых, при их обязательной осевой ориентации. Отсутствие выполнения данных требований резко усложняет кинематику процесса и не обеспечивает необходимого времени для выполнения, как передачи, так и обработки изделий других типоразмеров. Кроме того, следует указать, что в качестве инструмента при роторной обработке выступает не только лезвийный и абразивный инструмент, но и термическое воздействие, ультразвук и т. д. поэтому необходимо отметить, что существует ограниченность технологических возможностей самого инструмента, как и при других видах механической обработки изделий. Например, химическое полирование обеспечивает необходимый уровень светоотражательной способности только на чистом алюминии или его сплавах с обязательным содержанием магния [160].

Примером такой обработки служит обработка деталей, имеющих усеченную форму. Для испытания использовались полусные наконечники (материал – сталь 10 ГОСТ 1050–88), выполненные согласно [161] и в соответствии с формулой (4.15). Высота концентраторов МП составляла $w = 2$ мм, рис. 4.34.

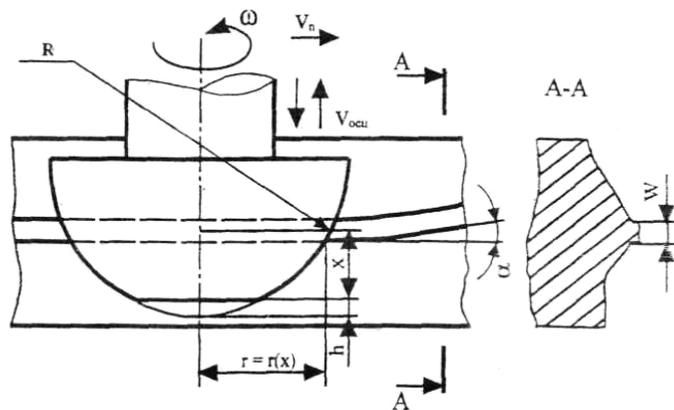


Рис. 4.34. Схема МАО сложно профильных поверхностей

Детали сообщается вращение вокруг собственной оси с угловой скоростью ω , движение по кольцевому рабочему зазору с линейной скоростью v и осциллирующее движение со скоростью $v_{\text{осц}}$. При вращении детали осуществляется последовательная обработка всех элементарных участков ее сложнопрофильной поверхности. Конструкция полусных наконечников с концентраторами МП высотой w выполненными в соответствии с формулой (4.15), обеспечивает постоянный рабочий зазор между поверхностями деталей и полусного наконечника. Эта формула носит универсальный характер и, например, для поверхности в виде усеченной сферы она принимает вид

$$f(x) = \frac{2\pi n \cdot v}{\omega} \cdot \frac{\arcsin \frac{R-x}{R+h}}{\arcsin \frac{R-H}{R+h}} \quad (4.18)$$

Необходимо указать, что роторная система в виде станка МАРС-15 может осуществлять многопредметную обработку изделий при условии выполнения возможности крепления этих изделий в патроне шпинделя. Например, рукоятки управления коммутационной аппаратуры имеют различную конфигурацию головки, однако согласно своей конструкции обладают одинаковым диаметром стержня. Это позволяет без дополнительной замены патрона производить установку рукояток с различной конфигурацией головок, исключить выполнение вспомогательного цикла и осуществить процесс обработки ввиду особенностей режущего инструмента в виде ферроабразивного порошка, что увеличивает производительность роторной машины.

Конструктивно замкнутая магнитная система станка МАРС-15 находится внутри станины и отделяется от зоны обработки изоляционным материалом, чтобы избежать попадания рабочей среды (ферроабразивный порошок и смазочно-охлаждающие технологические средства) на катушки соленоида. Станок действует в полуавтоматическом режиме. Указанный выше комплекс движений детали создает условия для увеличения давления ФАП на обрабатываемую поверхность в сравнении с традиционной схемой МАО, обеспечивая рост производительности и равномерность объема металла (рис. 4.35).



Рис. 4.35. Зона обработки рукояток управления коммутационной аппаратуры на станке MAPC-15

Параметры и режимы MAO рукояток управления коммутационной аппаратуры: скорость резания, $2,5 \dots 3,5$ м/с; частота подачи ротора, $n = 0,5$ об/мин; амплитуда осцилляции, $A = 2,5$ мм; величина рабочего зазора, $\delta = 1$ мм; магнитная индукция, $B = 0,9$ Тл; коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_z = 1$; время обработки, $t = 10$ с. В качестве ФАП использовался ПФА Р6М5-1 ТУ 27-104-02-86, смазочно-охлаждающие технологические средства – СинМА-1 ТУ 38.5901176-91 3 %-й водный раствор. Оценка обработанной поверхности детали производилась сравнением с эталоном. Регулирование жесткости ферроабразивной «щетки» в зоне обработки производится изменением величины силы тока. В результате реализуется возможность силового воздействия инструмента на поверхностный слой материала, осуществляя варьирование напряженностью магнитного поля.

Ввиду этого, рассматривая указанную выше роторную систему, следует отметить ее энергетическую компактность, позволяющую в сравнении с традиционной схемой MAO резко увеличить производительность обработки (10 и 60 с соответственно).

Установлено, что при использовании метода MAO осуществлена декоративная обработка рукояток коммутационной аппаратуры из алюминиевых сплавов АЛ-3 ГОСТ 2685-75, отвечающая требованиям технической документации.

4.4.8. MAO наружных поверхностей поршневых колец

Гальванические покрытия нашли широкое применение в различных отраслях машино- и приборостроения. Они придают изделиям повышенную термо- и коррозионную стойкость, а так же обеспечивают долговечность в процессе эксплуатации узлов и агрегатов. Прочность сцепления покрытия с металлом подложки является одной из важнейших характеристик, определяющих физико-механические показатели изделий. Именно финишная обработка основного металла должна обеспечить требуемую шероховатость поверхности, необходимую для сцепления осаждаемого материала с поверхностью.

В их число входят и хромовые покрытия, в частности, поршневых чугунных колец, условия работы которых характеризуются повышенной температурой и износом. Минимальная толщина слоя хрома на таких кольцах должна составлять 120 мкм [162]. Технология хромирования в производственных условиях предусматривает температуру электролита $t = 55$ °С, которая недостаточна для интенсивной диффузии хрома в подложку. В связи с этим соединение хрома с поверхностью чугунного кольца обеспечивается, в основном, за счет сил механического сцепления.

Следовательно, решающее влияние на прочность данного сцепления при прочих равных условиях оказывает характер микрорельефа основного металла, то есть микро- и субмикронеровности его поверхности. Образцами служили поршневые кольца из высокопрочного чугуна. Микроструктура чугуна состояла из сорбита отпуска с фосфидной эвтектикой – в виде отдельных зерен, размер глобулей графита – 60...80 мкм. Включения цементита не допускались. Твердость находилась в пределах 94...102 НВ. Содержание углерода $C - 2,8 \dots 3,4$ %.

Количественное и качественное определение прочности хромового покрытия поршневых колец является достаточно сложной задачей и производится только на специально подготовленных образцах и оборудовании. Это связано с тем, что на результаты измерений оказывает влияние большое количество случайных факторов. При исследованиях проводились измерения шероховатости хромового покрытия, прочности сцепления с основным металлом и равномерность распределения осадка по периметру кольца. Прочность

сцепления должна превышать прочность на сдвиг внутри слоя хрома в осевом направлении, так как отделение частиц покрытия недопустимо. Для оценки прочности сцепления был использован метод излома, по которому у годного кольца при его изломе не должно быть отслоения хромового покрытия от поверхности основы. Кроме того, возможна проверка качества покрытия как на наружной цилиндрической поверхности изделия, так и на его фаске. Необходимо отметить, что на результаты испытаний указанным методом влияет целый комплекс механических свойств, включая силу сцепления, уровень внутренних напряжений в покрытии, предел прочности на изгиб. В зависимости от размера и количества графитовых включений по периметру кольца предел прочности на изгиб может значительно изменяться. Соответственно изменяется и максимальная нагрузка, при которой происходит разрушение изделия. Применение данного вида контроля дает наиболее полную картину физического явления, что гарантирует высокие эксплуатационные свойства кольца, обеспечивая полный износ хромированного слоя без его разрушения за время всего цикла работы. Измерение шероховатости и запись микропрофиля поверхности производились на профилографе ПП-201 и микроскопе МИС-11.

Финишная обработка колец перед нанесением хромовых покрытий включала: суперфиниширование, магнитно-абразивную обработку и крацевание (обработка металлическими щетками). Для устранения погрешности, связанной со структурными и размерными колебаниями, образцы были изготовлены из одной партии отливок. Финишная обработка производилась одновременно всеми указанными выше методами и с минимально возможным временным разрывом между процессом обработки и хромированием. Воздействие гальванического процесса устранялось загрузкой всех исследуемых образцов на одной оправке в одни и те же растворы и ванны, что обеспечивало адекватные условия очистки и обезжиривания поверхности и нанесения покрытия.

Ранее проведенные исследования [163] показывают, что прочность сцепления покрытий с основой увеличивается при параметрах обработки, формирующих собственный микрорельеф МАО. Поэтому варьирование режимами осуществлялось следующим образом: скорость вращения, $V_{вр} = 5$ м/с; рабочий зазор, $\delta = 1$ мм; зернистость ферроабразивного порошка, $\Delta = 160/200$ мкм, рис. 4.36.

Смазочно-охлаждающие технологические средства – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, ФАП Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81.

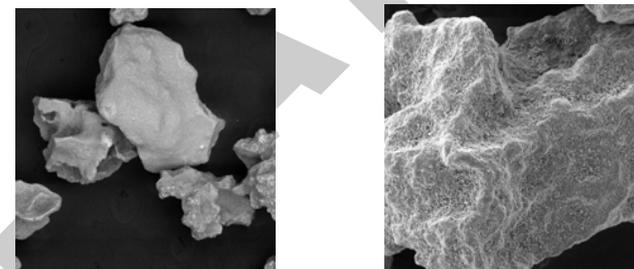


Рис. 4.36. Форма частиц ФАП:
а – $\times 20$; б – $\times 100$

Переменными факторами являлись: магнитная индукция, $B = 0,8 \dots 1,1$ Тл; амплитуда осцилляции, $A = 1 \dots 3$ мм; скорость осцилляции, $V_o = 0,15 \dots 0,25$ м/с; время обработки, $t = 45 \dots 120$ с. Оборудование – магнитно-абразивный станок МАС-1.

Поршневое кольцо и вид ее поверхности ($\times 120$) представлены на рис. 4.37.

Для измерения толщины покрытия на поперечном разрезе поршневого кольца использовали микроскопический метод.

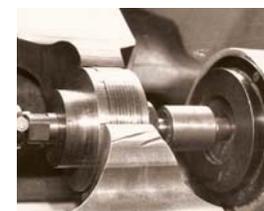
Оценка качества сцепления покрытия с подложкой характеризовалась частотой скалывания

$$K_c = \frac{n}{Nm}, \quad (4.19)$$

где n – количество изломов кольца;

m – количество его сколов;

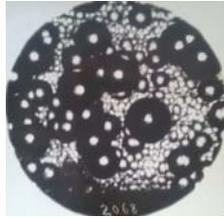
$N = 20$ – число колец в партии, шт.



а



б



в

Рис. 4.37. Рабочая зона обработки:
а – поршневых колец; б – поршневое кольцо;
в – вид ее поверхности ($\times 120$)

При испытаниях методом излома были обнаружены следующие виды сколов:

1. Скол на границе раздела хром-чугун.
2. Скол в верхних слоях поверхности кольца. В этом случае сила сцепления покрытия с чугуном превышает предел прочности чугуна на разрыв и покрытие можно считать качественным.
3. Скол в толще хромового покрытия, происходящий по причине:
 - а) отслаивания хрома ввиду его чрезмерной хрупкости при качественном сцеплении с чугуном;
 - б) отслаивания из-за дефектов хромового покрытия, вызванных нарушениями гальванического процесса.

Анализ показывает, что основным недостатком суперфиниширования является невозможность обработки боковых фасок одновременно с цилиндрической наружной поверхностью колец. Последнее обстоятельство вызывает образование в местах сопряжения фасок с цилиндром переходных буртиков с очень малым радиусом скругления, что отрицательно сказывается на прочности хромового покрытия. В связи с этим обработка боковых фасок производится с высокой долей ручного труда путем постоянной переустановки каждого поршневого кольца.

Результаты испытаний представлены в табл. 4.16. На качество хромового покрытия в производственных условиях отрицательное воздействие оказывают также изменение структуры основного металла, в особенности количество графитных включений, и колебания диаметральных размеров.

Таблица 4.16.

Прочность сцепления хромового покрытия

Метод обработки	Количество изломов	Количество сколов по фаске кольца	Количество сколов по наружной поверхности	Показатель прочности, К
Суперфиниширование		3	1	0,05
МАО	4	0	5	0,04
Крацевание		1	5	0,033

Ранее было установлено, что оптимальная шероховатость поверхности изделий из чугуна для МАО достигается при следующем соотношении [164]:

$$\frac{\Delta\text{ФАП}}{D_r} = 2,5 - 3, \quad (4.20)$$

где $\Delta\text{ФАП}$ – размер режущего зерна ФАП, мкм;

D_r – средний диаметр глобул графитных включений, мкм.

Кроме того, выявлено, что МАО по производительности уступает суперфинишированию, однако шероховатость поверхности после МАО ниже. После крацевания съем металла практически не наблюдается и некоторое уменьшение шероховатости происходит за счет пластического деформирования микровыступов от предшествующей обработки.

Выявлено, что колебания толщины покрытия по периметру наблюдаются при любом виде обработки и объясняются неточной установкой электродов в процессе хромирования, табл. 4.17. Как было указано выше, сцепление хромового покрытия с металлом кольца обеспечивается силами механического взаимодействия. Однако для получения хорошего сцепления необходимо, чтобы растущий осадок воспроизводил кристаллическую структуру металла катода [165].

Таблица 4.17.

Характеристики хромового покрытия при различных методах обработки

Метод обработки	Исходная шероховатость, Ra , мкм	Толщина хромового покрытия, мкм				
		Номер сечения				
		1	2	3	4	5
Суперфиниширование	0,28	190	190	200	210	200
МАО	0,24	180	190	200	190	190
Крацевание	1,57	190	180	190	190	200

Обработанные различными методами поверхности поршневых колец имеют отличия как по высоте микронеровностей, так и по их характеру. Согласно данным, приведенным в табл. 4.18 и на рис. 4.38, видно, что метод обработки оказывает влияние на шероховатость хромового покрытия. Поверхность образцов после суперфиниширования и МАО имеет примерно одинаковую шероховатость, однако величина микронеровностей хромового осадка в обоих случаях существенно различается. Для оценки соотношения шероховатости поверхности основного металла к высоте микронеровностей хромового покрытия был введен коэффициент изменения шероховатости

$$K_{ш} = \frac{Ra_x}{Ra_1}, \quad (4.21)$$

где Ra_x – шероховатость хромового покрытия, мкм;

Ra_1 – шероховатость поверхности перед хромированием, мкм.

$$\frac{K_{шМАО}}{K_{шСФ}} = 2,56.$$

Согласно полученным результатам такое различие объясняется тем, что чередующиеся через строго определенные интервалы выступы и впадины на поверхности при суперфинишировании приводят при нанесении покрытия к равномерному распределению плотности тока по всей поверхности. Методом МАО невозможно

достичь строгой периодичности шага микронеровностей. В этом случае неравномерное распределение плотности тока на поверхности вызывает неоднородность структуры и неравномерность толщины покрытия. На участках с повышенной плотностью тока, количество выделившегося металла (толщина покрытия) будет больше. Уменьшение числа неровностей, приходящихся на единицу длины профиля поверхности, ослабляет эффективность выравнивающего действия осадка. Скорость этого действия падает с увеличением толщины покрытия. При нанесении покрытия наблюдается эффект положительного и отрицательного выравнивания, который заключается в том, что более интенсивное осаждение покрытия происходит во впадинах и выступах микропрофиля. Это приводит к уменьшению глубины впадины в первом случае и увеличивает размер выступа во втором. При МАО образуется микро-рельеф с симметричным отношением выступов и впадин. Их величина и тип имеют стохастический характер. Для такого профиля геометрическое выравнивание будет заключаться в копировании достигаемого методом МАО микро-рельефа.

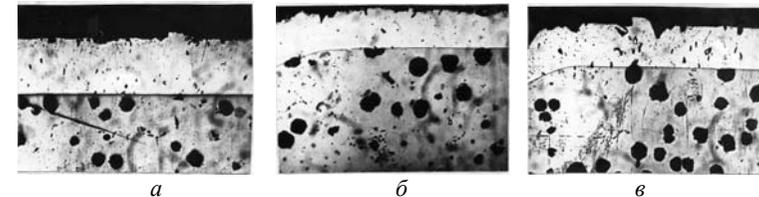


Рис. 4.38. Фотографии микрошлифов хромового покрытия на поверхности поршневого кольца, обработанного различными методами $\times 60$: а – суперфиниширование; б – магнитно-абразивная обработка; в – крацевание

Таблица 4.18.

Влияние вида обработки на шероховатость хромового покрытия

Метод обработки	Исходная шероховатость, Ra_1 , мкм	Шероховатость после нанесения покрытия, Ra_2 , мкм	Коэффициент изменения шероховатости, $K_{ш}$
Суперфиниширование	0,25	15	60
МАО	0,22	34	154
Крацевание	1,55	46	30

На рис. 4.39 и 4.40 показаны топография и профилограммы поверхности поршневого кольца, обработанного различными методами. Различие в шероховатости хромового покрытия, зависит от состояния свободного графита. Его обнажения при МАО, приводит к высокой чистоте металлической основы, но усугубляет структурную неоднородность поверхностного слоя, как и при крацевании. Данный факт оказывает решающее значение на условия осаждения покрытия.

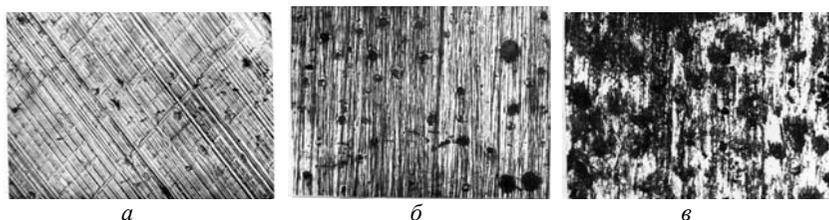


Рис. 4.39. Топография поверхности поршневого кольца, обработанного различными методами ($\times 100$):

a – суперфиниширование; *б* – магнитно-абразивная обработка; *в* – крацевание

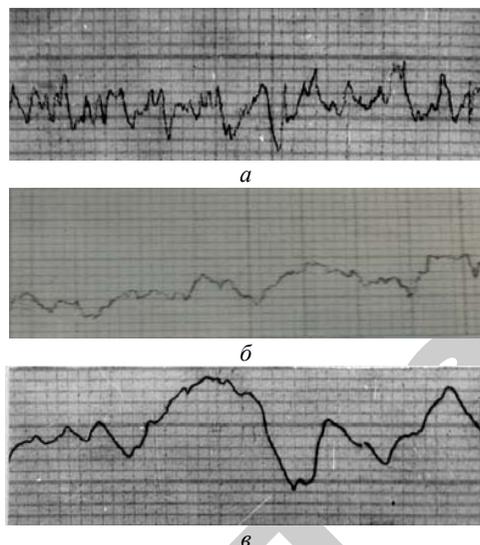


Рис. 4.40. Профилограммы поверхности поршневого кольца, обработанного различными методами:

a – суперфиниширование; *б* – магнитно-абразивная обработка; *в* – крацевание ВУ-200, ГУ- 4×10^3

При методе МАО осуществляется обнажение графитных включений на поверхности, что приводит к увеличению шероховатости хромового покрытия в сравнении с суперфинишированием.

При крацевании происходит размазывание графита по металлической основе, в связи с чем ухудшаются условия электроосаждения покрытия и возрастает его шероховатость.

По влиянию на качество хромового покрытия указанные выше методы финишной обработки можно расположить следующим образом: а) суперфиниширование, б) МАО, в) крацевание.

4.4.9. МАО поверхности шариков

Широкое применение обработки шариков объясняется простотой реализации и достаточностью результатов при формообразовании сферической поверхности. Вместе с тем задача повышения производительности процесса обработки шариков с высокой степенью точности особенно актуальна на сегодняшний день. Однако общей проблемой предлагаемых решений остается трудность реализации кинематики процесса, которая должна обеспечивать трехосное вращение шариков в рабочей зоне. Поэтому при поиске оптимального решения постоянно приходится делать выбор между двумя требованиями: недопустимостью ухудшения качества обрабатываемых шариков, с одной стороны, и возможностью использования схем доводки, существующих в крупносерийном и массовом производстве шариков, с другой стороны.

Основное требование для достижения необходимой шероховатости и точности сферической поверхности заключается в соблюдении одинаковых условий обработки всех участков обрабатываемой поверхности. Поэтому даже незначительная разноразмерность шариков по диаметру в партии часто не позволяет добиться эквидистантного движения инструмента по обрабатываемой поверхности.

Одним из путей решения данной проблемы является применение метода МАО [166...168]. В отличие от известных схем доводки шариков возможно использование не только кинематических и динамических факторов процесса, но и воздействия магнитных полей. При МАО необходимая равномерность обработки достигается изменением положения оси мгновенного вращения шариков, что

положительно сказывается на производительности и качестве доводки деталей в форме шара.

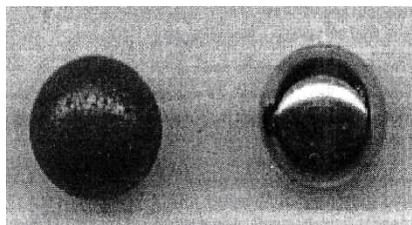


Рис. 4.41. Фотография шариков до (слева) и после (справа) MAO

На операции окончательной доводки обрабатывались шарики из стали ШХ15 ГОСТ 801–78, HRC 58...62 диаметром от 2 до 4 мм, соответствующие техническим требованиям по 40 степени точности ГОСТ 3722–81, рис. 4.41. При необходимости изменение частоты вращения (вращение нижнего сердечника шпинделя) осуществляется посредством замены сменных шкивов. Температура нагрева притиров не превышала 70...75 °С. Для обработки использовалась паста, имеющая в своем составе ряд компонентов, среди которых масло индустриальное И-40А ГОСТ 20799–75, фракция С₁₇...С₂₀ синтетических жирных кислот, окись хрома ОХА-0 ГОСТ 2912–79. Заполнение пастой канавки нижнего притира производится либо на станке при отключенной ЭМС, либо путем его снятия и крепления на столе, например, слесарного верстака.

Режимы процесса MAO шариков представлены в табл. 4.19, где P – рабочее давление в пневмоцилиндре; n – частота вращения верхнего диска; I – сила тока электромагнитной катушки; d – диаметр рабочей канавки диска.

Таблица 4.19.

Режимы MAO шариков

Диаметр обрабатываемых шариков, мм	P , атм.	n , мин ⁻¹	I , А	d , мм
2...2,5	1,2	200	2,5	140
2,5...3	1,9	200	2,5	235
3...3,5	2,5	200	3	235
3,5...4	2,8	320	3	235

Биение диска, не более: радиальное – 0,1 мм; торцевое – 0,05 мм. Несоосность верхнего и нижнего сердечников, не более – 0,1 мм. Параметры электрической питающей сети: U – 380 В, f – 50 Гц. Диапазон магнитной индукции в рабочей зоне: 0,3...1,2 Тл (в зависимости от величины силы тока, подаваемого на электромагнитные катушки).

На рис. 4.42 представлена рабочая зона дисков-притиров для размещения обрабатываемых шариков.

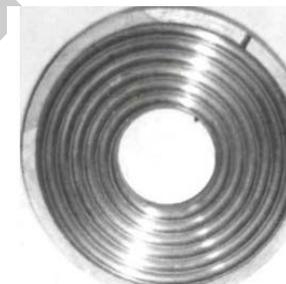


Рис. 4.42. Фотография диска-притира для обработки шариков

Затем осуществляется укладка партии шариков и установка верхнего притира, используя шарики в качестве базы. Выполняется требуемая фиксация притиров и подключение электродвигателя и катушек ЭМС. Устанавливается рабочее давление в пневмоцилиндре, которое при автоматическом отключении электродвигателя необходимо привести к нулю. После достижения необходимого размера шариков путем их выборочного замера в ходе протекания процесса MAO они собираются, промываются нефрасом С 50/170 ГОСТ 8505–80 и просушиваются сжатым воздухом или протираются хлопчатобумажной тканью по ГОСТ 21790–93. Также следует убрать остатки пасты с поверхности притиров. В случае переточки притиров ввиду износа требуется произвести их приработку как при наличии магнитного поля, так и в его отсутствие при давлении 0,5...2 атм в течение 3...4 мин. Переточку притиров лучше всего осуществлять по фаскам канавок, а не по их тороидальной образующей. Катастрофический износ притиров определяется как один из вариантов быстрым перемещением стрелки индикатора, что указывает на необходимость прекращения обработки.

Объекты экспериментальных исследований и контролируемые параметры

Объект исследований	Контролируемые параметры	Обозначение
Резец РКС-1	Шероховатость поверхности Съем металла	Ra Q
Процесс магнитно-абразивной обработки	Зернистость порошка Время обработки Величина рабочего зазора	Δ t δ

МАО сочетает в себе одновременно действие магнитного поля и процессы, которые протекают при взаимодействии обрабатываемой поверхности с порошковым магнитно-абразивным инструментом, – микрорезание, микроудары абразивных частиц, пластическая деформация в поверхностной зоне. Совокупность влияний различных факторов создает предпосылки для изменения физико-механических свойств поверхностных слоев материала [169].

Установлено, что высокие параметры шероховатости поверхностей конической части корпуса и твердосплавной вставки в сочетании с улучшением их физико-механических свойств после МАО обеспечат рост работоспособности и износостойкости резцов.

При исследовании влияния магнитной индукции B , значение которой изменялось в пределах 0,8...1,2 Тл, остальные параметры принимали постоянными, равными: $V_{рез}=1,8$ м/с, $\delta = 1,0$ мм, $A = 2$ мм, $A_{вс} = 0,5$ мм, порошок Fe-TiC зернистостью 315/250 мкм.

Исследование проводилось на резцах РКС-1, изготовленных на предприятии «Универсал» (г. Солигорск). Заготовка корпуса резца получена токарной обработкой. Магнитно-абразивную обработку проводили на установке СФТ 2.150.00.00.000 оснащенной специальной наладкой и оппозитными полюсными наконечниками, показанными на рис. 4.44. Режимы обработки: $B = 1$ Тл, $V_{рез}=1,8$ м/с, рабочий зазор $\delta = 1$ мм, амплитуда осцилляции $A = 2$ мм, $A_{вс} = 0,5$ мм, время магнитно-абразивной обработки составляло $t = 180$ с; ФАП Fe-TiC зернистостью 250/315 мкм.

В качестве технологической жидкости использовали водный раствор с 3...4 %-м содержанием триэтаноламина или Аквапола 12.

Для получения требуемого размера шариков и их необходимой степени точности следует учитывать то, что показания индикатора при проведении приблизительного контроля снимаются только при установившемся режиме обработки. В процессе обработки шариков достигнута 16 степень точности по ГОСТ 3722–81. Следует указать, что шероховатость поверхности в основном снижалась в начальный период (до 5 мин), а затем практически не изменялась. Уменьшение овальности и гранности происходит в течение всего времени обработки и достигает своих максимальных значений к окончанию процесса обработки. Также равномерно осуществляется съем материала, рис. 4.43.

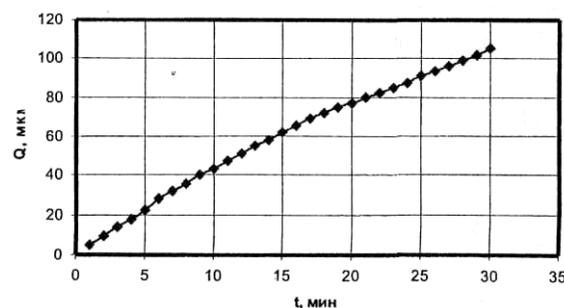


Рис. 4.43. Зависимость съема материала (Q , мкм) от времени обработки (t , мин) шариков $d = 3$ мм методом МАО

Таким образом, путем применения магнитно-абразивной обработки шаровой сферы экспериментально установлены геометрические размеры обрабатываемых шариков, что позволяет произвести реализацию процесса. В результате использования данного процесса установлено, что достигаемая точность составляет 16 ГОСТ 3722–81 при предшествующей обработке методом МАО 40 для шариков диаметром от 2 до 4 мм.

4.4.10. МАО поверхностей поворотных и проходческих резцов

Объекты экспериментальных исследований и контролируемые параметры представлены в табл. 4.20.

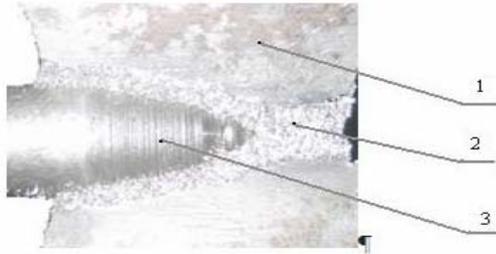


Рис. 4.44. Вид рабочей зоны при МАО резцов РКС-1:
1 – полусный наконечник; 2 – ферроабразивная щетка; 3 – поворотный резец

На рис. 4.45 представлены зависимости съема металла от величины рабочего зазора. Рабочий зазор определяет количество зерен порошка, участвующих в обработке, непосредственно влияя на жесткость ФАП. При уменьшении рабочего зазора жесткость порошка увеличивается. Наименьший рабочий зазор должен превышать размеры зерен порошка.

Увеличение рабочего зазора приводит к снижению производительности за счет уменьшения сил резания (уменьшение жесткости ФАП). Зависимость массового съема металла от величины рабочего зазора носит экстремальный характер с максимумом съема при $\delta = 0,8 \dots 1$ мм.

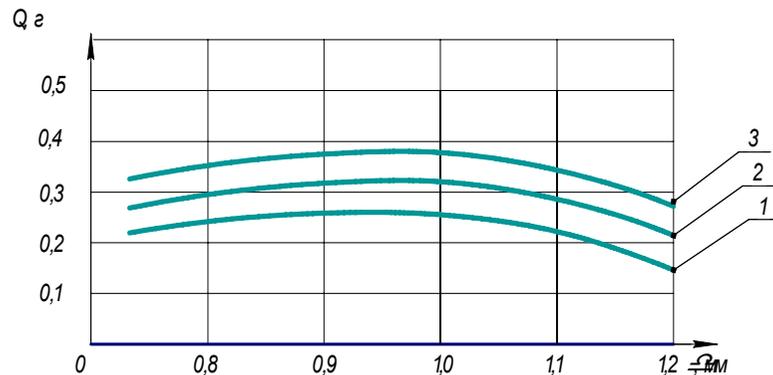


Рис. 4.45. Зависимость величины съема металла Q от величины рабочего зазора δ (условия обработки $t = 2,5$ мин; $V_{рез} = 2,0$ м/с):
1 – $\Delta = 150$ мкм; 2 – $\Delta = 250$ мкм; 3 – $\Delta = 350$ мкм

На рис. 4.46 представлены результаты исследования влияния продолжительности обработки на шероховатость конической части резца. В пределах исследованного диапазона с увеличением длительности обработки шероховатость поверхности уменьшается, что обусловлено удалением исходных микронеровностей обрабатываемой поверхности ФАП.

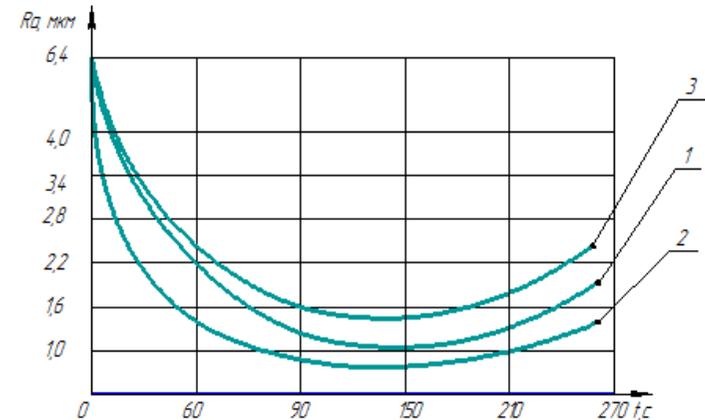


Рис. 4.46. Зависимости параметра шероховатости поверхности Ra от времени обработки t (условия обработки: $\delta = 1,0$ мм, $V_{рез} = 2,0$ м/с):
1 – $\Delta = 150$ мкм; 2 – $\Delta = 250$ мкм; 3 – $\Delta = 350$ мкм

На рис. 4.47 приведены графические зависимости шероховатости поверхности от величины рабочего зазора. Из данных зависимостей следует, что наиболее приемлемой величиной рабочего зазора, позволяющей достигать оптимальной шероховатости, является $0,9 \dots 1,0$ мм.

Показано, что процесс активного формирования микропрофиля при МАО происходит первые $60 \dots 240$ с. В дальнейшем происходит преимущественное сглаживание микронеровностей определяемых наследственностью обработки, которые получены на стадии предшествующей токарной обработки. При этом микропрофиль поверхности характерный для МАО не изменяется. Таким образом, после МАО обеспечивается формирование равномерной шероховатости поверхностного слоя поворотных резцов.

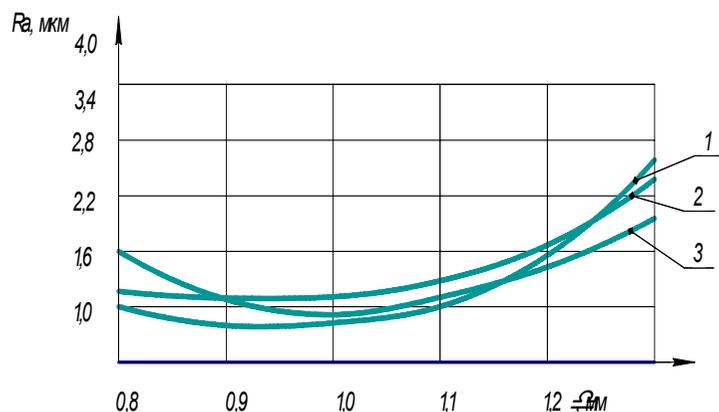


Рис. 4.47. Зависимости параметра шероховатости Ra обрабатываемой поверхности от величины рабочего зазора δ (условия обработки $t = 2,5$ мин; $V_{рез} = 2,0$ м/с):
 1 – $\Delta = 150$ мкм; 2 – $\Delta = 250$ мкм; 3 – $\Delta = 350$ мкм

Рекомендуемые параметры полюсных наконечников для различных поверхностей обрабатываемых деталей приведены в табл. 4.21, где указана необходимость профилирования полюсных наконечников, а в особых случаях – отсутствие этого профилирования и применение наконечников для деталей правильной цилиндрической формы.

Таблица 4.21

Рекомендуемые формы полюсных наконечников для MAO резцов РКС-1

№ п/п	Размер обрабатываемой поверхности, мм	Угол конуса	Форма полюсного наконечника
1	$\varnothing 10 \dots 40$, $L_{max} = 60$	$0 \dots 15^\circ$	Цилиндрическая, эквидистантная диаметру
2	$\varnothing 25 \dots 40$, $L_{max} = 30$	$16 \dots 30^\circ$	Цилиндрическая, эквидистантная диаметру
3	$\varnothing 10 \dots 15$, $L_{max} = 20$	$31 \dots 45^\circ$	Цилиндрическая, эквидистантная диаметру
4	$\varnothing 20 \dots 50$, $L_{max} = 60$	$46 \dots 60^\circ$	Коническая с углом 53°
5	$\varnothing 10 \dots 15$, $L_{max} = 20$	$61 \dots 75^\circ$	Цилиндрическая, эквидистантная диаметру
6	$\varnothing 20 \dots 40$, $L_{max} = 60$	$61 \dots 75^\circ$	Коническая с углом 68°

Таким образом, исходя из полученных результатов теоретического и экспериментального исследования и моделирования процесса MAO, установлена возможность его эффективного использования данного процесса для финишной обработки инструмента типа поворотных резцов для проходческих и очистных комбайнов и определены параметры полюсных наконечников.

4.4.11. MAO деталей оборудования хлебопекарного производства

Важную роль в необходимом подъеме пищевой промышленности играют качество и уровень обслуживающей ее базы машиностроения. Основными задачами, стоящими перед этой отраслью, являются повышение долговечности и надежности используемого оборудования и создание условий для его рациональной эксплуатации. Обеспечение роста срока службы оборудования для пищевой промышленности определяется сокращением объема ремонтных работ, уменьшением расхода запасных частей и простоя машины в ремонте. Крайне важна бесперебойность работы оборудования таких предприятий пищевой промышленности, как хлебозаводы. Поэтому вопрос снабжения запасными частями – один из наиболее острых. Их изготовление в мастерских хлебозаводов обходится достаточно дорого, а детали часто оказываются низкого качества.

Одной из важных и ответственных деталей оборудования хлебозаводов является делитель теста, в частности его головка, посредством которой осуществляется дозирование подачи теста в печные формы. Делитель теста и головка представляют собой конструкцию типа корпус-вал при обязательном отсутствии жидкой консистенции смазочного материала ввиду специфических требований хлебопекарного производства. Необходимо отметить, что в данном случае имеет место в основном окислительное изнашивание [170]. Оно является наименее разрушительным и срок эксплуатации деталей работающего оборудования значительно возрастает в сравнении с другими видами износа. Также необходимо учитывать и фактор повышенной биохимической коррозии. Известно, что титруемая кислотность хлебных полуфабрикатов может колебаться в пределах $3 \dots 14^\circ$ Неймана, а pH – от 6 до 4,2 [171].

Органические кислоты (в основном молочная и уксусная), образующиеся при брожении полуфабрикатов хлебопекарного производства, составляют примерно 90 % кислотности всех полуфабрикатов. В связи с этим вопрос о коррозионной стойкости материалов, из которых изготовлены детали хлебопекарного оборудования, непосредственно соприкасающиеся с полуфабрикатами, имеет большое практическое значение.

На рис. 4.48, *a* приведена представленная к восстановлению головка делителя типа ШЗ-ХДУ-33 после 12 мес. эксплуатации. Материал головки – бронза БрАЖНМц (ГОСТ 18175–72). Поверхность покрыта пленками оксидов и мелкими рисками, что свидетельствует о наличии сопутствующего абразивного изнашивания. Суммарный износ достигает 0,3...0,5 мм.

Изготовление мелких партий таких деталей для крупных и средних предприятий, обладающих необходимой материальной базой и наличием требуемого материала, во многом нецелесообразно. Небольшие же предприятия в нынешних условиях часто не имеют необходимого сортамента (наружный диаметр этой головки 210 мм).

Оптимальным способом восстановления изношенной поверхности головки делителя теста является газотермическое напыление. Разработанная технология восстановления головки делителя теста ШЗ-ХДУ-33 включает подготовку поверхности под напыление, непосредственно напыление и заключительные токарную и финишную операции. Подготовка поверхности заключается в устранении на требуемую глубину изношенного слоя путем токарной обработки на станке 16К20 и последующей дробеструйной обработки дробью технической (ГОСТ 11964–81).

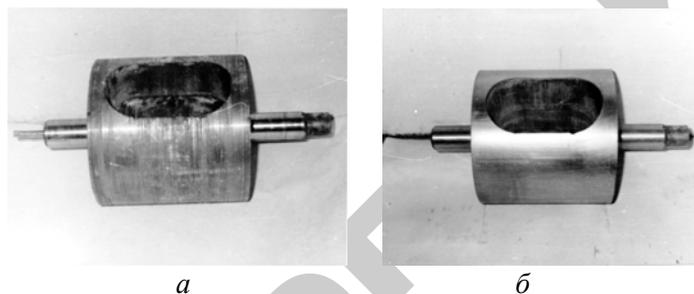


Рис. 4.48. Фотографии головки делителя теста ШЗ-ХДУ-33: *a* – до; *b* – после восстановления

Наличие оригинального оборудования для напыления поверхности и ее финишной обработки позволяет с минимальными затратами и в сжатые сроки выполнить восстановление головки.

Напыление производят бронзовым порошком, применяемым в порошковой металлургии, например ПР-БрОФЮ-3 (ТУ 48-42-3–85), с помощью термораспылительной горелки *Mogul-U9*, работающей на пропан-бутан-кислородной смеси. Прочность сцепления напыленного материала с основой детали находится в требуемых пределах и, как показали результаты соответствующих производственных испытаний, срок службы восстановленных головок составляет тот же период времени, что и покупных. Наличие остаточной пористости составляет 8...10 % от всего объема напыляемого материала. Толщина напыленного покрытия достигает 4...5 мм на радиус восстанавливаемой детали.

Заключительная стадия восстановления головки делителя теста ШЗ-ХДУ-33 – обеспечение требуемого посадочного размера, сопрягаемого с корпусом делителя теста, токарной и шлифовальной обработкой. Токарную выполняют, как указывалось выше, на станке 16К20 проходными резцами по ГОСТ 18878–73, а шлифовальную – на круглошлифовальном станке ЗБ161 кругом алмазным АСМ зернистостью № 25 твердостью СМ1 на связке Б1 (скорость круга, $v_k = 20...40$ м/с, подача, $S = 1, 4...2$ м/мин, глубина резания, $t = 0,01...0,05$ мм). Однако образование присущего шлифованию микрорельефа способствует питтингу поверхности и снижает долговечность детали. Поэтому замена данной операции магнитно-абразивной обработкой на станке СФТ 2.150.00.00.000 позволяет повысить истирающую способность материала. Режимы обработки: магнитная индукция, $B = 1,1$ Тл, скорость резания, $v_0 = 1,2$ м/с, скорость осцилляции, $V_0 = 0,1...0,2$ м/с, амплитуда осцилляции, $A = 1$ мм, рабочий зазор, $\delta = 1$ мм, коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_z = 1$. Смазочно-охлаждающие технологические средства – СинМА-1 и СинМА-2 (ТУ 38.5901176–91), ферроабразивный порошок – ФАПД-1 (ТУ РБ 00493801.001–00), зернистость $\Delta = 160/200$ мкм (рис. 4.49).

Результаты проведенных испытаний для оценки износостойкости рабочих поверхностей головок делителей теста ШЗ-ХДУ-33 (ГОСТ 23.220□84) показали, что средняя интенсивность изнашивания после магнитно-абразивной обработки и шлифования $8,2 \cdot 10^{-8}$ и $12,2 \cdot 10^{-8}$ соответственно. Очистку деталей после окончательной

обработки выполняли нефрасом С 50/170 (ГОСТ 8508–80). Стоимость восстановленной и покупной головок выражается соотношением 0,6:1. Показатель шероховатости после финишной обработки Ra 0,6...0,8 мкм, что соответствует требованиям технической документации рис. 4.48, б.



Рис. 4.49. Форма частиц ФАП ФАПД-1 ($\times 100$), полученных карбонитрацией

Таким образом, применение разработанного технологического процесса восстановления головки делителя теста ШЗ-ХДУ-33 позволило повысить многократность ее использования и соответственно технико-экономические показатели производства продукции. Кроме того, напыляемый материал обеспечивает минимальное время приработки в условиях эксплуатации с материалом контртела – сталь коррозионно-стойкая 12ХН9Т, ГОСТ 5632–72.

4.4.12. Обработка профиля зубьев мелко модульных зубчатых колес

Среди различных методов производства мелко модульных ($m \leq 2,5$ мм) зубчатых колес применяется процесс холодного накатывания, который позволяет получить зубчатые колеса 6...7 степени точности по ГОСТ 1643–81. Однако в результате взаимного скольжения заготовки и инструмента (накатника) друг относительно друга на противоположных рабочих сторонах профиля зуба заготовки материал течет в разных направлениях. Такой характер деформации металла по этим сторонам зуба создает трудности в получении симметричного профиля. В итоге этого течения наружный диаметр обрабатываемого колеса

увеличивается. Рассматривая в заготовке после накатывания полученный зуб в отдельности, можно видеть наплывы металла. Несмотря на ряд мер, направленных на устранение данного недостатка, полностью удалить этот наплыв не удается [172].

На практике оптимальным способом решения этой проблемы является шлифование по наружному диаметру зубчатого колеса после закалки. Но при такой обработке на зубьях образуется большое количество заусенцев и острых кромок. Кроме того, не исключаются присущие шлифованию прижоги поверхностного слоя, часто наблюдаемые визуально.

Для устранения перечисленных недостатков процесса шлифования требуется последующая финишная обработка, к видам которой можно отнести притирку, зубохонингование и электрохимическую обработку. Вместе с тем данные методы имеют ряд характерных недостатков. К ним относятся: высокая продолжительность процесса обработки, низкая стойкость инструмента, экологическая вредность производства и т. п. Кроме того, например, практически ограничивает использование зубохонингования малый модуль рассматриваемых зубчатых колес.

Поэтому в связи с ростом требований к качеству выпускаемой продукции все больше ощущается необходимость использования новых методов финишной обработки, одним из которых является MAO. При MAO обрабатываемая деталь помещается между полными наконечниками электромагнитной системы при установленном зазоре δ , в которой подается ФАП и СОТС.

С помощью механического привода детали сообщается вращательное и осциллирующее движение, а силами магнитного поля зерна ФАП, удерживаемые в зазоре, прижимаются к поверхности детали и производят ее обработку.

Проблема финишной обработки зубчатых колес, и в частности MAO, заключается в сложности съема материала заготовки ввиду переменного по величине диаметра окружности впадин и выступов данных колес. Для физики электромагнетизма, следовательно, и для MAO, это связано с тем, что по мере удаления какого-либо тела от проводника с током, вокруг которого согласно закона Ампера образуется магнитное поле, воздействие последнего на данное тело ослабевает [97]. Падение напряженности поля, являющейся силовой характеристикой, приводит соответственно к уменьшению давления ФАП на обрабатываемую поверхность, а в конечном итоге

и к снижению съема материала. По данным [173], магнитное поле, проникающее в паз, затухает на глубине, примерно равной его ширине. Следовательно, чем меньше модуль зубчатого колеса, тем эффективнее происходит процесс съема материала обрабатываемого изделия данным методом. Кроме того, положительным фактором данного процесса служит то, что контур зуба имеет эвольвентный профиль (его условно можно считать трапецеидальным), что увеличивает эффективность доступа ФАП в рабочую зону и повышает качество обрабатываемых поверхностей. Вторым достоинством, является то, что острая кромка зуба представляет собой концентратор магнитного потока и именно здесь будет наибольшая его плотность. Это обеспечивает рост давления ФАП и соответственно массовый съем материала.

На основании вышеизложенного были проведены исследования, направленные на оценку технологических возможностей метода MAO при обработке мелкомодульных зубчатых колес ($m = 1,5$ мм).

Основная задача обработки методом MAO заключалась в скруглении фаски зубчатого колеса по контуру, устранении заусенцев, образованных предшествующей операцией шлифования по наружному диаметру колеса, и снижении шероховатостей рабочей поверхности зуба.

Были проведены экспериментальные исследования MAO зубчатого колеса, материал – сталь 40X ГОСТ 4543–71, 40...44 HRC, модуль 1,5 мм, угол наклона зуба – 12°. Оборудование – установка СФТ 2.150.00.00.000, ФАП–Ж15КТ (ТУ 6.09.03.483–81), СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3 %-й водный раствор. Параметры и режимы обработки: величина магнитной индукции, $B = 1$ Тл; скорость резания, $V_p = 1,5$ м/с, скорость осцилляции, $V_o = 0,15$ м/с, амплитуда осцилляции, $A = 1,5$ мм, коэффициент заполнения рабочего зазора, $K_z = 1$, величина рабочего зазора, $\delta = 1$ мм.

Обязательным условием этого процесса является реверсирование вращения заготовки. Полное время обработки составляет 60 с, из них соответственно 30 с – вращение по часовой стрелке и 30 с – против. Возможно использование пакетного способа обработки при наличии разделительных колец толщиной 1...3 мм. Общая длина пакета вдоль оси обработки должна равняться в среднем 70 мм.

После MAO детали, если они изготовлены из ферромагнитного материала, в обязательном порядке должны быть демагнетизированы с целью исключения остаточной намагниченности.

Испытаниями установлено, что после обработки методом MAO (для сравнения на рис. 4.50 представлены зубчатые колеса после различных методов обработки):

- на торцах зубьев образуются закругления в форме запятой, ширина которой уменьшается в направлении дна впадины зуба;
- зона обработки характеризуется полным отсутствием заусенцев и следов термического разложения закалочной среды, часто имеющих место после нарушений технологического процесса термообработки;

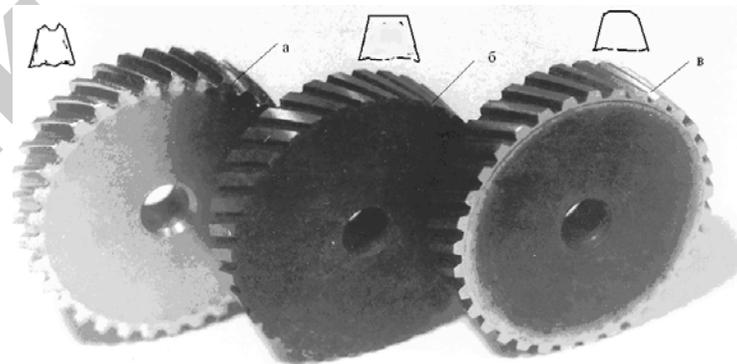


Рис. 4.50 Фотографии заготовок зубчатого колеса:
а – после накатывания; б – после термической обработки и шлифования;
в – после MAO

- воздействие магнитного поля на поверхность обрабатываемого изделия приводит к образованию остаточных напряжений сжатия и улучшению ее структуры, что обеспечивает рост долговечности;
- угол фаски на боковой поверхности зуба находится в пределах 30...350°, ширина фаски – не более 0,8 мм.

Таким образом, на основании проведенных испытаний установлено, что в качестве эффективного метода финишной обработки мелкомодульных зубчатых колес выступает процесс MAO, позволяющий получить высокие эксплуатационные характеристики этих деталей.

4.4.13. MAO поверхностей длинномерных изделий

При изготовлении деталей машин одним из важных факторов выполнения технологического процесса является качество поверхности заготовок для последующей обработки. Предъявляемые при этом требования следующие: отсутствие заусенцев, трещин, расслоений, остатков смазочного материала, а также чистота и гладкость поверхности. Однако даже подготовленные к дальнейшей механической обработке или нанесению покрытий заготовки подвергаются агрессивному воздействию окружающей среды (температурные перепады, влажность и т. д.) при длительной транспортировке или хранении. Грунтование поверхности заготовок с целью предотвращения отрицательных последствий коррозии способно защитить их на 25...30 суток в условиях складских помещений и на 5...15 суток на открытых площадках [162]. Существует ряд способов очистки поверхности заготовок, однако отсутствие их универсальности вынуждает обычно искать свой конкретный вариант. Не каждое предприятие одновременно имеет оборудование для галтовки изделий, дробеметные установки и может использовать химическое травление. Кроме того, воздействие какого-либо указанного выше способа может привести к дальнейшему ухудшению поверхностного слоя заготовок, например, увеличению роста «шиферного» излома из-за ударного воздействия дроби на возможные места присутствия этого излома. Следует отметить, что важное значение при выборе способа очистки имеют форма заготовок и их геометрические размеры. Также, например, прутки подката калиброванной стали (ГОСТ 7417–75) после волочения через фильеру в случае их промывания в растворе щелочи или горячей мыльной воде могут иметь остатки этих продуктов на своей поверхности. Причиной этого служат низкая культура производства, изношенность оборудования, нарушения технологического процесса. Это в свою очередь приводит к тому, что данные химические агенты активно взаимодействуют с поверхностью станочного оборудования, особенно зажимных приспособлений, в частности цанг. Данная ситуация приводит к преждевременному износу дорогой технологической оснастки токарно-револьверных станков и полуавтоматов.

В настоящее время разработан метод магнитно-абразивной обработки и оборудование для его реализации [174...176]. Его основная

особенность заключается в наличии подвижно-координированного зерна в связке инструмента, обусловленного присутствием магнитного поля в отличие от жесткого закрепления при шлифовании и свободного – при полировании. Величина размерного съема в зависимости от вида обрабатываемого материала и подаваемого на катушки соленоидов электромагнитной системы тока составляет от 5 до 50 мкм. Образование краевых условий, присущих МП, приводит к увеличению воздействия ФАП на границе раздела сред (например, сталь – воздух) на данный материал. Это вызывает рост его массового съема в данном месте, что обеспечивает скругление фасок и возможность удаления мелких заусенцев, присутствие которых негативно влияет на последующие механические операции.

ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81, размер зерна, $\Delta = 100/160$ мкм, смазочно-охлаждающие технологические средства – СинМА-1 ТУ 38.59-01176-91, 3 %-й водный раствор. Параметры и режим обработки: магнитная индукция, $B = 1$ Тл; ток, $I = 5$ А; скорость вращения полюсных наконечников, $V_{вр} = 6$ м/с; скорость протягивания пруткового материала, $V_{п} = 2,9$ м/мин.

Крепление и подачу заготовок производили путем их установки в специальном приспособлении. На обрабатываемой поверхности заготовки перед MAO были обнаружены риски, полученные в результате ее транспортирования стропами, имеющими оборванные или сломанные нити проволоки. Кроме того, в условиях хранения заготовки из-за того, что в цехе имеется травильное отделение с кислотными ваннами, выявлено наличие очагов коррозии, размеры которых составляют 5...10 мм. Глубина отдельных рисков путем зачистки и измерения диаметра микрометром МЗ 100 ГОСТ 6507–80 в зачищенном месте составляла 6 мкм.

После проведения MAO установлено, что на поверхности заготовок отсутствуют следы продуктов коррозионного воздействия, механических частиц и масляных пленок. Размерный съем материала до 10 мкм приводит к получению микронеровностей, характеризующихся выглаженностью вершин и впадин, что способствует снижению скапливания агрессивных продуктов на поверхности обработанного изделия.

Наиболее приемлемой схемой обработки данным методом заготовок из проката, в частности калиброванной стали ГОСТ 7417–75, является схема с эксцентрично установленной парой конических

полюсных наконечников. Эти наконечники могут иметь кольцевую или зубчатую (хотя зубчатая более сложна в изготовлении) форму профиля (рис. 4.51).

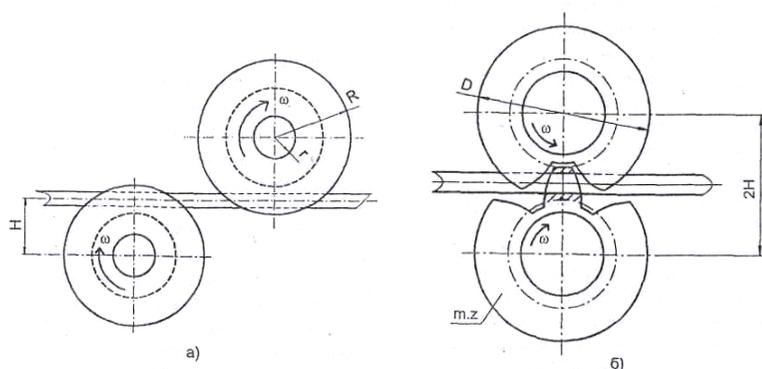


Рис. 4.51. Схема MAO:

a – с кольцевой; *б* – зубчатой формой полюсных наконечников

В обоих случаях заготовка получает поступательное движение подачи вдоль своей оси и осуществляет перемещение между парой полюсных наконечников. Вращение этих наконечников приводит тому, что наружные поверхности кольцевых (или зубчатых) зон через заполняемый рабочей средой (ФАП и СОТС) зазор находятся в контакте с обрабатываемой поверхностью заготовки. Таким образом, ось этой заготовки, которая может иметь круглый, шестигранный или квадратный профиль, является касательной к поверхностям зон полюсных наконечников. При MAO происходит постоянная переориентация зерен ФАП, что приводит к более полному использованию их режущей способности и увеличению эффективности съема материала. Для получения данных о технологических возможностях MAO для очистки длинномерных деталей ($L/D > 10$) из калиброванной стали перед их механической обработкой были проведены соответствующие испытания

Проволока, используемая для изготовления различных изделий, должна быть очищена от оксидных пленок, загрязнений и остатков смазочного материала. С этой целью ее подвергают химическому травлению и электрохимической очистке, что экологически небезопасно. Ниже особенности MAO проволоки рассматриваются на примере схемы с кольцевыми полюсными наконечниками.

Достоинством данной схемы наряду с простотой изготовления является низкая трудоемкость расчета топографии магнитного поля. Форма полюсных наконечников способствует равномерному распределению напряженности магнитного поля в рабочей зоне, благодаря чему обеспечивается требуемое качество обработки. К недостаткам схемы можно отнести следующее: синхронное вращение эксцентрично установленных двух пар полюсных наконечников характеризуется повышенным радиальным биением ферроабразивной «щетки» вследствие интенсивной вибрации проволоки, что снижает качество обработанной поверхности. Устранить этот недостаток можно путем выбора оптимального расстояния между осями пар полюсных наконечников.

Обрабатываемая проволока, получая поступательное движение подачи вдоль своей оси, перемещается между парами полюсных наконечников. При вращении полюсных наконечников частицы ФАП оказывают силовое воздействие на обрабатываемую поверхность, осуществляя абразивное резание. Полюсные наконечники могут не только вращаться, но и при одновременном качательном движении поворачиваться относительно оси проволоки, для чего в конструкции установки для MAO предусмотрены ролики и направляющие.

При поступательном движении проволоки обрабатывается только половина ее поверхности. Для обработки другой половины служит вторая пара полюсных наконечников, которая установлена с другой стороны проволоки со смещением вдоль оси относительно первой на величину межосевого расстояния этих пар A .

Как показали испытания, расстояние A существенно влияет на выходные показатели процесса MAO. При $A < 0,2D$ (здесь D – диаметр полюсных наконечников) взаимодействуют обе пары полюсных наконечников; при этом нарушается целостность режущей «щетки» и снижается эффективность обработки. При $A > D$ увеличивается габарит установки, повышается магнитное сопротивление элементов магнитопровода, уменьшается магнитная индукция и снижается интенсивность процесса.

Для определения показателей производительности и качества обработки при использовании схемы с кольцевыми полюсными наконечниками были проведены испытания различных установок с $A < 0,2D$; $A = (0,2...1)D$ и $A > D$. Проволоку обрабатывали при

следующих параметрах режима: магнитная индукция, $B = 0,9$ Тл; окружная скорость полюсных наконечников, $V_0 = 6...7$ м/с; скорость протягивания проволоки, $V_{пр} = 2,9...4,2$ м/мин; сила тока, подаваемого на электромагнитные катушки, $I = 4$ А. Применяли ФАП марки Ж15КТ с размером зерна 160/200 мкм и 3 %-й водный раствор СинМА-1 в качестве СОТС. На рис. 4.52 представлена рабочая зона для магнитно-абразивной обработки проволоки.

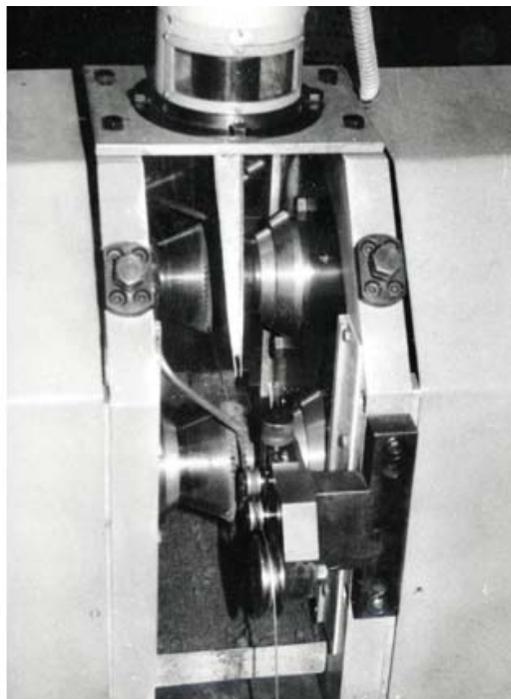


Рис. 4.52. Фотография рабочей зоны для MAO проволоки

Обрабатываемый материал – прутки $d = 19,8$ мм, сталь 40 ХН, ГОСТ 7417-75. Параметры и режимы процесса MAO: величина магнитной индукции, $B = 1$ Тл; скорость вращения полюсных наконечников, $V_{вр} = 6$ м/с; скорость протягивания прутков, $V_{пр} = 2,9$ м/мин; сила тока, подаваемого на электромагнитные катушки, $I = 5$ А. ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81, размер зерна, $\Delta = 160/200$ мкм, смазочно-охлаждающие технологические средства –

СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 5 %-й водный раствор. Шероховатость поверхности прутка до обработки составляла $Ra_1 0,8...1$ мкм. На рис. 4.53 представлена конструкция полюсных наконечников, предназначенных для реализации процесса MAO длинномерных изделий.

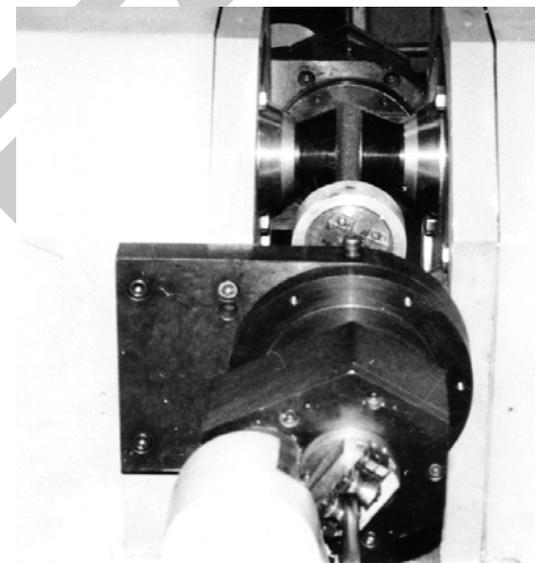


Рис. 4.53. Фотография рабочей зоны электромагнитной системы при MAO длинномерных изделий

На поверхности проволоки и прутков до обработки обнаружены риски, царапины и пятна ржавчины глубиной до 0,08 мм, что превышает допустимые показатели в среднем в 1,5 раза. В результате MAO при использовании кольцевых полюсных наконечников с $A = (0,2...1)D$ глубина дефектов на обработанной поверхности уменьшилась до 0,02...0,03 мм. На проволоке и прутках полностью отсутствуют следы коррозии, эмульсионных и масляных пленок и механических частиц. Обработанная поверхность отличается высокой отражающей способностью. При съеме материала до 10 мкм в процессе MAO на поверхности проволоки образуется микрорельеф без глубоких и острых рисок при отсутствии дефектов поверхностного слоя.

4.4.14. MAO дорожек внутренних обойм подшипников

Известно, что подшипники качения являются основными видами опор в машинах и механизмах. Работоспособность тяжело нагруженных подшипниковых узлов в значительной степени зависит от шероховатости и точности обработки посадочных поверхностей.

Установлено, что подшипники, изготовленные из обычных шарикоподшипниковых сталей типа ШХ-15 и т. д. ГОСТ 801–78 удовлетворительно работают при температурах ниже 200...220 °С [177]. При их повышении мартенсит переходит в троостит отпуска, что сопровождается падением твердости и резким снижением долговечности изделия. Тяжелонагруженные и крупные подшипники находятся в более напряженном состоянии трущихся поверхностей. Поэтому их обоймы выполняются с цементируемыми рабочими поверхностями по специальным техническим условиям из стали 12Х2Н4А и 20Х2Н4А. Например, глубина цементированного слоя достигает 5...6 мм, а продолжительность процесса цементации составляет 120...150 ч при температуре 850...900 °С. После цементации заготовку подвергают отжигу при $t = 800$ °С. Затем осуществляется закалка при $t = 750$...800 °С и отпуск при $t = 180$...200 °С [178]. Данной технологической характеристикой подчеркивается трудоемкость всего производственного процесса по изготовлению подшипников качения, а также роль финишных операций, как завершающих и потому на которые падает особая ответственность по обеспечению требуемых эксплуатационных свойств деталей.



Рис. 4.54. Фотография кольца подшипника

В качестве образцов использовались кольца подшипников $d_{\text{вн}} = 215$ мм из стали 12Х2Н4А (ГОСТ 4543–71), твердостью 61...63 HRC, рис. 4.54. Финишная обработка деталей по заводской

технологии состояла из шлифования и последующего хонингования, по сравняваемой – из шлифования и магнитно-абразивной обработки [179]. Режущим инструментом при MAO является ферроабразивный порошок Ж15КТ ТУ 6-09-03-483–81 на основе карбидов титана, размерность которого составляет 160/200 мкм.

Согласно специальным техническим условиям структура подшипниковых сталей должна состоять из скрытокристаллического или мелкокристаллического мартенсита и мелких избыточных карбидных включений.

На рис. 4.55 показана исходная структура стали 12Х2Н4А после цементации, закалки и отпуска. Данная структура имеет типовую морфологию кристаллов в составе твердого раствора (мартенсита) и полностью отвечает особенностям фазовых мартенситных превращений [180].



Рис. 4.55. Структура стали 12Х2Н4А после термообработки (цементация, закалка, отпуск), $\times 100$

Известно, что тяжело нагруженные подшипниковые узлы требуют постоянного подвода масла для поддержания режима жидкостной смазки и отвода тепла, выделяющегося при трении. Необходимым условием контакта при этом виде смазки является требование, чтобы минимальный зазор между рабочими поверхностями был не менее суммы средних высот микронеровностей данных поверхностей [181]. В соответствии с современными представлениями о режиме работы подшипникового узла, для сохранения параметров жидкостного трения следует иметь оптимальное значение шероховатости поверхностного слоя $Ra = 0,08$...0,63 мкм. При неупорядоченном расположении микронеровностей, образованных традиционными методами обработки, наиболее благоприятным является профиль, обладающий развитой несущей поверхностью [182].

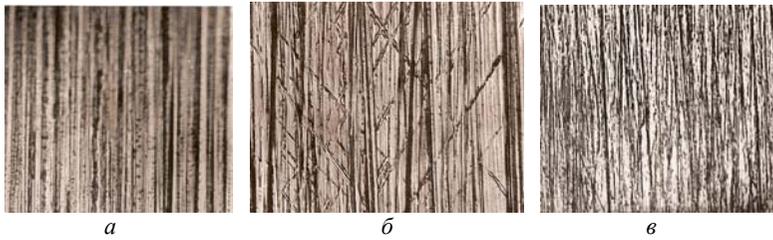


Рис. 4.56. Топография поверхности стали 12Х2Н4А после финишной обработки ($\times 150$):

a – шлифование; *б* – хонингование; *в* – магнитно-абразивная обработка

На рис. 4.56 показана топография поверхности деталей после различных операций финишной обработки. Шероховатость после шлифования, хонингования и МАО составляет Ra 0,6; 0,2 и 0,1 мкм соответственно.

Профилограммы поверхностей после таких методов обработки представлены на рис. 4.57.

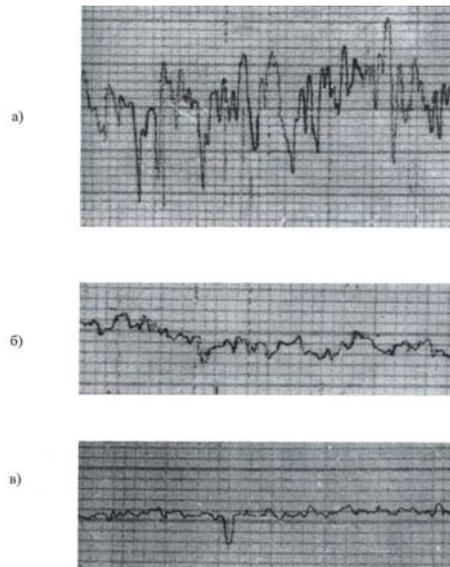


Рис. 4.57. Профилограммы поверхности стали 12Х2Н4А после финишной обработки:

a – шлифование; *б* – хонингование; *в* – магнитно-абразивная обработка; ($\Gamma Y - 200, \text{BY} - 4 \cdot 10^{-3}$)

Для поверхностного слоя, созданного шлифованием, характерна большая высота микронеровностей, чем для хонингования и МАО, что может привести к снижению его несущей способности и повышению вероятности падения давления в масляном слое. МАО образует наиболее приближенный к оптимальному микрорельеф, который, однако, по сравнению с хонингованием отличается меньшей упорядоченностью. Вместе с тем присутствует рост выглаженности вершин и впадин микронеровностей, что увеличивает действительную площадь контакта трущихся поверхностей. Согласно [183], контактная жесткость и износостойкость поверхностей тем выше, чем больше их опорная площадь и меньше углы профиля микронеровностей, что и характерно для слоя, созданного МАО.

На рис. 4.58 показана поверхность после шлифования, когда под действием высокой температуры процесса происходят локальные фазовые и структурные превращения. Это проявляется в виде «шлифовочных прижогов» и сопровождается потемнением обработанного участка, в отдельных случаях обнаруживаемого визуально. Структурные превращения в этих местах приводят к локальным объемным изменениям, вызывающим рост внутренних напряжений разного знака. Если напряжения превышают временное сопротивление металла, происходит разрыв поверхностного слоя в центре или на границах участка «прижога», как в точке наибольшей их концентрации. Возникновение микротрещин на поверхности резко снижает сопротивление усталости изделия [183].

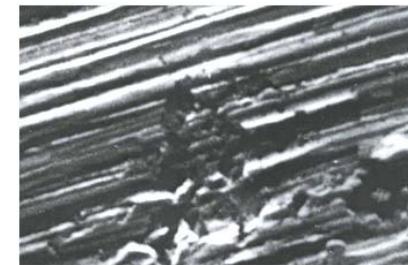


Рис. 4.58. Дефект поверхности стали 12Х2Н4А после шлифования, $\times 500$

В табл. 4.22 представлены данные по определению остаточных напряжений в поверхностном слое деталей после различных операций финишной обработки. Поскольку при МАО процесс преимущественно

носит характер тонкого пластического деформирования, то происходит образование сжимающих напряжений, как и после хонингования.

При шлифовании высоколегированной закаленной стали, в результате вторичной закалки, образуется поверхностный слой, имеющий аустенитно-мартенситную структуру. Этот слаботравящийся белый слой, открытый В. П. Кравз-Тарнавским в 1928 г., обладает повышенными по сравнению с основным металлом твердостью и хрупкостью. Его структура отличается от структуры стали после обычной закалки повышенным содержанием остаточного аустенита (до 80 %) и увеличенным параметром кристаллической решетки. Поскольку пластической деформации в первую очередь подвергаются зерна остаточного аустенита, то в процессе обработки скопления дислокаций сосредотачивается именно в аустенитной фазе, что часто приводит к образованию микро- и макротрещин. В связи с этим при циклическом воздействии контактных нагрузок деформированные зоны остаточного аустенита служат концентраторами напряжений и способствуют снижению прочности [183].

Таблица 4.22.

Величина остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое после различных методов финишной обработки

Метод обработки	Величина остаточных напряжений, МПа
Исходное состояние (цементация, закалка, отпуск)	660
Шлифование	750
Хонингование	810
Магнитно-абразивная обработка	980

На рис. 4.59 показана структура поверхностного слоя стали 12Х2Н4А после шлифования (а), хонингования (б) и МАО (в). При травлении детали после шлифования на ее поверхности выявлены границы зерен остаточного аустенита. Глубина этого слоя составляет 30...50 мкм. Как указывалось выше, в деталях, подвергающихся контактным циклическим нагрузкам, на последующих финишных опера-

циях следует удалять образовавшийся белый поверхностный слой. После хонингования и МАО структура имеет мелкодисперсное строение с равномерно распределенными мелкими округленными зернами карбидов. Такая структура способствует росту контактной прочности и износостойкости и в полной мере соответствует требованиям специальных технических условий.

В табл. 4.23 представлены сравнительные результаты определения остаточного аустенита и размеров кристаллической решетки в поверхностном слое деталей после различных методов обработки. Время обработки при МАО в среднем составляет 60 с.



а



б



в

Рис. 4.59. Микроструктура поверхностного слоя: а – после шлифования; б – хонингования; в – МАО

Таблица 4.23.

Влияние метода финишной обработки на количество остаточного аустенита и величину блоков когерентного рассеяния

Метод обработки	Остаточный аустенит, %	Размер областей когерентного рассеяния, нм
Исходное состояние (цементация, закалка, отпуск)	20,7	36,7
Шлифование	25,1	48,2
Хонингование	16,2	43,9
МАО	14,8	42

Применение таких финишных операций как хонингование и МАО приводит к устранению дефектного слоя глубиной 50 мкм и образованию характерного микрорельефа и структуры поверхности, обеспечивающих более качественные характеристики материала по сравнению со шлифованием. В отличие от хонингования, МАО обеспечивает увеличение остаточных сжимающих напряжений на поверхности деталей в среднем на 20 % при равных размерах областей когерентного рассеяния.

4.5. Технологическая себестоимость процесса магнитно-абразивной обработки зубчатого колеса

Результаты проделанной работы были апробированы и внедрены в условиях производства РУП «Экспериментальный завод ИМСХ НАН Беларуси». Осуществлена МАО зубчатых венцов: колеса АДП – 130 – 1700 – 103 и вала первичного АДП – 130 – 1700 – 101 узла коробки передач автомобиля ЗИЛ – 130 (рис. 4.60), изготавливаемых на вышеприведенном предприятии.



а



б

Рис. 4.60. Зубчатое колесо АДП – 130 – 1700 – 103 (а), вал первичный АДП – 130 – 1700 – 101 (б) коробки передач автомобиля ЗИЛ – 130

Проведем сравнение себестоимости процесса зубохонингования (базовый) и МАО [184,185].

Технологическая себестоимость процесса окончательной обработки определяем по формуле:

$$C = Z + O_{\text{соц}} + M + A + P + Z_{\text{пр}} + \Pi, \quad (4.22)$$

где Z – заработная плата рабочего, руб.;

$O_{\text{соц}}$ – отчисления на социальные нужды, руб.;

M – материальные затраты, руб.;

A – амортизационные отчисления по оборудованию, руб.;

P – затраты на ремонт и техническое обслуживание, руб.;

$Z_{\text{пр}}$ – прочие затраты, руб.;

Π – общепроизводственные расходы, руб.;

Расходы на оплату труда рабочего

$$Z = T_{\text{шт}} \cdot C_{\text{т.ст}} \cdot K_{\text{т.н}}, \quad (4.23)$$

где $T_{\text{шт}}$ – штучное время обработки одной детали, ч;

$C_{\text{т.ст}}$ – тарифная ставка рабочего, руб.;

$K_{\text{т.н}}$ – тарифная надбавка ($K_{\text{т.н}} = 1,4 \dots 2,5$).

Тарифная ставка

$$C_{\text{т.ст}} = T_{\text{н.т.о}} \cdot C_{\text{ч}} \cdot K_{\text{т.р}}, \quad (4.24)$$

где $T_{\text{н.т.о}}$ – нормативная трудоемкость отдельной операции ($T_{\text{н.т.о}} = T_{\text{шт}}$), ч;

$C_{\text{ч}}$ – часовая тарифная ставка рабочего, руб/ч;

$K_{\text{т.р}}$ – тарифный коэффициент данного разряда работы.

Отчисления на социальные нужды включают социальное страхование, пенсионный фонд, фонд занятости населения и производятся от всех видов оплаты труда

$$O_{\text{соц}} = (3 \cdot R) / 100 \%, \quad (4.25)$$

где R – процент отчислений на социальные нужды, равный 30 %.

Расчет заработной платы по базовому варианту.

Штучное время хонингования зубчатой поверхности детали

$$T_{\text{шт}}(1) = T_o(1) + T_b(1) + T_{\text{доп}}(1), \quad (4.26)$$

где $T_o(1)$ – основное время хонингования зубчатой поверхности детали, ч, ($T_o(1) = 0,016$ ч);

$T_b(1)$ – вспомогательное время хонингования детали, ч ($T_b(1) = 0,12$);

$T_{\text{доп}}(1)$ – дополнительное время на обслуживание рабочего места и отдых, ч ($T_{\text{доп}}(1) = 0,04$).

$$T_{\text{шт}}(1) = 0,016 + 0,12 + 0,04 = 0,176 \text{ ч.}$$

Тарифная ставка станочника, ($C_{\text{ч}}(1) = 443,8$ руб/ч, $K_{\text{т.р}}(1) = 1,57$, для станочника 4-го разряда по единой тарифной сетки с 1 ноября 2006 г.)

$$C_{\text{т.ст}}(1) = 0,176 \cdot 443,8 \cdot 1,57 = 123,09 \text{ руб.}$$

Расходы на оплату труда станочника

$$З(1) = 0,176 \cdot 123,09 \cdot 2,0 = 43,32 \text{ руб.}$$

Отчисления на социальные нужды

$$O_{\text{соц}}(1) = 43,32 \cdot 30 / 100 = 12,99 \text{ руб.}$$

Расчет заработной платы оператора МАО.

Расчет заработной платы оператора МАО аналогичен расчету заработной платы станочника, но 1-го разряда, т. к. данный процесс не требует высокой квалификации обслуживающего персонала.

Штучное время МАО зубчатой поверхности детали:

$$T_{\text{шт}}(2) = T_o + T_b + T_{\text{доп}},$$

где $T_o(2)$ – основное время МАО зубчатой поверхности детали, ч, ($T_o(2) = 0,03$ ч);

$T_b(2)$ – вспомогательное время МАО детали, ч ($T_b(2) = 0,06$);

$T_{\text{доп}}(2)$ – дополнительное время на обслуживание рабочего места и отдых, ч ($T_{\text{доп}}(2) = 0,04$).

$$T_{\text{шт}}(2) = 0,03 + 0,06 + 0,04 = 0,13 \text{ ч.}$$

Тарифная ставка станочника, ($C_{\text{ч}} = 282,7$ руб/ч, $K_{\text{т.р}} = 1,0$, для 1-го разряда по единой тарифной сетки с 1 ноября 2006 г.)

$$C_{\text{т.ст}}(2) = 0,13 \cdot 282,7 \cdot 1,0 = 36,75 \text{ руб.}$$

Расходы на оплату труда

$$З(2) = 0,13 \cdot 282,7 \cdot 2,0 = 73,5 \text{ руб.}$$

Отчисления на социальные нужды

$$O_{\text{соц}}(2) = 73,5 \cdot 30 / 100 = 22,05 \text{ руб.}$$

Материальные затраты

Материальные затраты состоят из стоимости электроэнергии $C_{\text{эл}}$ и стоимости абразивных материалов C_a .

$$M = C_{\text{эл}} + C_a. \quad (4.27)$$

Расчет материальных затрат на хонингование

$$M(1) = C_{\text{э}}(1) + C_a(1),$$

$$C_{\text{эл}}(1) = (W \cdot C_w \cdot T_o \cdot \eta) / 60, \quad (4.28)$$

где W – мощность электродвигателя, кВт (для хонинговального станка 18,0 кВт);

C_w – действующий тариф электроэнергии, руб/кВт·ч ($C_w = 145,06$ руб/кВт·ч);

η – коэффициент загрузки электродвигателя, равный 0,75.

$$C_{эл}(1) = (18,0 \cdot 145,06 \cdot 18 \cdot 0,75) / 60 = 587,5 \text{ руб.}$$

$$C_a(1) = k \cdot C_{a.к}, \quad (4.29)$$

где k – коэффициент потерь абразивного материала при обработке ($k = 0,01$);

$C_{a.к}$ – стоимость 1 кг абразивного хона ($C_{a.к} = 24$ тыс. руб.).

$$C_a(1) = 0,01 \cdot 24000 = 240 \text{ руб.}$$

$$M(1) = 587,5 + 240 = 827,5 \text{ руб.}$$

Расчет материальных затрат на МАО

$$C_{эл}(2) = (W_1 + W_2 + W_3) \cdot C_w \cdot T_o \cdot \eta / 60, \quad (4.30)$$

где W_1, W_2, W_3 – мощность электродвигателей главного привода станка, мощность электродвигателей осцилляции и мощность электромагнитных катушек соответственно ($W_1 = 13,0$ кВт; $W_2 = 1,0$ кВт; $W_3 = 0,6$ кВт).

$$C_{эл}(2) = (13,0 + 1,0 + 0,6) \cdot 145,06 \cdot 2 \cdot 0,75 / 60 = 52,95 \text{ руб.},$$

$$C_a(2) = k \cdot C_{a.п}, \quad (4.31)$$

где k – коэффициент потерь абразивного материала при обработке ($k = 0,01$);

$C_{a.п}$ – стоимость 1 кг ФАП Fe-TiC – 15 % ТУ 38.59011 76–91 ($C_{a.п} = 14$ тыс. руб./кг).

$$C_a(2) = 0,01 \cdot 14000 = 140 \text{ руб.},$$

$$M(2) = 52,95 + 140 = 192,95 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления

Амортизационные отчисления определяем по формуле

$$A = (T_o \cdot B \cdot a) / (100 \cdot \Phi_d \cdot k_3), \quad (4.32)$$

где a – годовая норма амортизационных отчислений, %;

B – балансовая стоимость оборудования. В нашем случае балансовая стоимость – стоимость зубошлифовального станка, руб.;

Φ_d – действительный годовой фонд времени работы, ч;

k_3 – коэффициент использования оборудования по времени, 0,85.

Амортизационные отчисления на хонингование

$$A(1) = (0,016 \cdot 12305000 \cdot 10) / (100 \cdot 1934 \cdot 0,85) = 11,97 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления на МАО

$$A(2) = (0,03 \cdot 3217500 \cdot 10) / (100 \cdot 1934 \cdot 0,85) = 5,87 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт и техническое обслуживание оборудования, %

Затраты на ремонт и техническое обслуживание определяются из выражения:

$$P = (T_o \cdot k_3 \cdot p \cdot B) / 100 \cdot \Phi_d, \quad (4.33)$$

где P – годовая норма отчислений на ремонт и техническое обслуживание оборудования, %.

Расчет затрат на ремонт и техническое обслуживание для хонинговального станка:

$$P(1) = (0,016 \cdot 0,85 \cdot 4 \cdot 12305000) / (100 \cdot 1934) = 3,46 \text{ руб.}$$

Расчет затрат на ремонт и техническое обслуживание установки для МАО:

$$P(2) = (0,03 \cdot 0,85 \cdot 4 \cdot 3217500) / (100 \cdot 1934) = 1,69 \text{ руб.}$$

Прочие затраты

Прочие затраты принимаем в размере 3 % от ($3 + O_{соц} + M + A + P$).

Расчет прочих затрат на хонингование:

$$Z_{\text{пр}}(1) = (43,32 + 12,99 + 827,5 + 11,97 + 3,46) \cdot 0,03 = 26,97 \text{ руб.}$$

Расчет прочих затрат на MAO:

$$Z_{\text{пр}}(2) = (73,5 + 22,05 + 192,95 + 5,87 + 1,69) \cdot 0,03 = 8,88 \text{ руб.}$$

Таким образом, технологическая себестоимость финишной обработки по двум вариантам составит:

$$C(1) = 43,32 + 12,99 + 827,5 + 11,97 + 3,46 + 26,97 = 926,21 \text{ руб.};$$

$$C(2) = 73,5 + 22,05 + 192,9 + 5,87 + 1,69 + 8,88 = 304,89 \text{ руб.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Широко применяемая в машиностроении финишная обработка фасонных поверхностей и криволинейных участков гибкими абразивными инструментами обеспечивает копирование профиля обрабатываемой поверхности за счет податливости связки. Это позволяет выравнивать глубины резания отдельными абразивными зернами. Методы, основанные на использовании свободного абразива, допускают более равномерное распределение режущих кромок относительно обрабатываемых поверхностей, а также их переориентацию и перемещение в процессе обработки. Финишная обработка поверхностей закрепленным и свободным абразивом наиболее приемлема для обработки поверхностей простой геометрической формы. При использовании этих методов для обработки поверхностей сложной геометрической формы возникают проблемы неравномерного съема металла на сопрягаемых (труднодоступных) участках профиля. Потому обработка гибкими абразивными инструментами и свободным абразивом не может гарантировать качество поверхностей сложного профиля как по геометрической форме, так и по шероховатости поверхности.

Методы финишной обработки сложнопрофильных поверхностей подвижно-скоординированными абразивными частицами основаны на создании режущего контура инструмента путем самоустанавливания абразивных частиц по контуру обрабатываемой поверхности, копируя ее геометрию. Роль связующего элемента выполняет энергия магнитного поля, создающая упругие силы воздействия на абразивные частицы порошка. Способность магнитного поля изменять давление абразивных частиц на обрабатываемую поверхность позволяет объединять в одном рабочем цикле чистовую и финишную обработку.

Суть явлений и происходящие процессы в зоне обработки при MAO рассмотрены в монографии с позиций свойств «рабочей технологической среды», которая включает компоненты: внешнее магнитное поле + ФАП + СОТС. Комплексное рассмотрение рабочей технологической среды на предмет рационального подбора материалов ФАП, СОТС и топографии магнитного поля позволило разработать методологию технологического обеспечения обработки сложнопрофильных поверхностей.

При магнитно-абразивной обработке поверхностей сложной геометрической формы на участках сопряжения различных поверхностей нарушаются однородность ферроабразивной щетки и режимы резания. Это вызвано возникновением в этих зонах градиента магнитной индукции и изменением кинематических параметров процесса резания. Предложено распределение магнитного поля в рабочем зазоре и вычисление его параметров производить путем решения граничной задачи с краевыми эффектами для уравнений Максвелла и закона Био-Савара-Лапласа. Разработан численный метод расчета электромагнитного поля с использованием ресурса ПЭВМ и программного пакета *Mathematica-4*.

Предложены новые виды ферроабразивных порошков и методы их получения. Эффективность магнитно-абразивной обработки зависит от формы ферроабразивных порошков, их гранулометрического состава, химической активности к обрабатываемому материалу, микротвердости абразивной составляющей, а также от технологичности изготовления и их стоимости. Установлено, что оптимальными магнитными и абразивными свойствами обладают ферроабразивные порошки, полученные из расплава. Их структура представляет собой мартенситную или ферритную матрицу с включениями карбидов. При изготовлении литых ферроабразивных порошков важен правильный выбор карбидообразующего элемента. Подбор легирующих элементов, режимов распыления, а также различных видов последующей термической обработки позволяет избирательно влиять на структуру, форму и размеры частиц.

Важным компонентом рабочей технологической среды при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей являются смазочно-охлаждающие технологические средства, активирующие процесс съема металла. Установлено, что наибольшей способностью к адсорбции при магнитно-абразивной обработке обладают поверхностно активные вещества. Приведенные результаты исследований базируются на работах П. А. Ребиндера, в которых эффект адсорбционного понижения прочности металлов объясняется присутствием поверхностно-активных веществ. Действие адсорбции понижает поверхностную энергию металла, способствует зарождению пластических сдвигов и развитию дефектов при значительно меньших напряжениях. Поверхностные дефекты представляют собой микроскопические и субмикроскопические трещины

и щели клиновидного сечения, в которых свободная поверхностная энергия возрастает от нуля до максимально нормального значения на поверхности тела. Наличие микротрещин в поверхностном слое приводит к снижению прочностных характеристик изделия, существенно отличающихся от теоретических значений. Положительная роль микротрещин заключается в том, что проникая в них ПАВ способствует снижению усилия деформаций.

Таким образом показано, что значение физико-механических параметров и геометрических характеристик поверхностного слоя детали после магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей, определяется совместным действием абразивного резания, пластического выглаживания микронеровностей, химических реакций активных веществ и электромагнитных явлений в зоне обработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулович, Л. М. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, В. Я. Лебедев. – Минск : БГАТУ, 2012. – 316 с.
2. Дружинский, И. А. Сложные поверхности : математическое описание и технологическое обеспечение / И. А. Дружинский. – М. : Машиностроение, 1985. – 264 с.
3. Брегалов, И. Г. Моделирование процесса формообразования на станках с ЧПУ // СТИН. – 1998. – № 2. – С. 12–16.
4. Карелин, И. М. Бескопирная обработка цилиндрических деталей машиностроения / И. М. Карелин, И. Г. Брегалов. – М. : Машиностроение, 1996. – 188 с.
5. Маляренко, А. Д. Технологические основы управляемого формообразования / А. Д. Маляренко, И. П. Филонов. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ БГПА, 1999. – 212 с.
6. Налян, Г. А. Создание процессов обработки сложнопрофильных деталей схемами поверхностного формообразования с поступательными циклическими движениями : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. : 05.03.01 / Г. А. Налян ; Груз. Техн. Ун-т. – Тбилиси : 1990. – 36 с.
7. Тимченко, А. И. Технология изготовления деталей профильных бесшпоночных соединений / А. И. Тимченко. – М. : ВНИИ-ТЭМР, 1998. – 160 с.
8. Филонов, И. П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович, А. С. Козерук. – Минск : Дизайн ПРО, 1995. – 208 с.
9. Юнусов, Ф. С. Формообразование сложнопрофильных поверхностей шлифованием / Ф. С. Юнусов. – М. : Машиностроение, 1987. – 248 с.
10. Ящерицын, П. И. Обработка изделий со сложным профилем в магнитном поле / П. И. Ящерицын, Т. Л. Деев, Л. М. Кожуро // Вестник машиностроения. – 1994. – № 3. – С. 42–44.
11. Kochan, D. Fräsbearbeitung geometrisch komplexer Form mit doppelt gekrümmten Flächen / D. Kochan, K. N. Lehe // Fertigungstechnik und Betrieb. – 1985. – Vol. 35, N 8. – P. 450, 477–480.

12. Danilov, V. A. Analysis of and methods for enhancing machining of non-circular surfaces of profile joints / V. A. Danilov // Soviet engineering Research. Allertonpress, Inc. – 1991. – Vol. 11. – N 1. – P. 67–72.
13. Радзевич, С. П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ / С. П. Радзевич. – Киев : Вища школа, 1991. – 192 с.
14. Зарайский, Л. А. Механическая обработка гребных винтов / Л. А. Зарайский. – Л. : Судпромгиз, 1957. – 168 с.
15. Кулаков, Ю. М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков. – М. : Машиностроение, 1979. – 216 с.
16. Якимов, А. В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А. В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1981. – 312 с.
17. Ермаков, Ю. М. Разработка высокопроизводительных способов механической обработки резанием и металлорежущих станков на основе исследования взаимосвязи способов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Ю. М. Ермаков ; Моск. гос. техн. Ун-т им. Н. Э. Баумана. – М. : 1994. – 32 с.
18. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 264 с.
19. Энциклопедия машиностроения. Т. III. Технология изготовления деталей машин / А. М. Дальский [и др.]. – Машиностроение, 2000. – Т. 3. – 420 с.
20. Рыжов, Э. В. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Киев : Наукова думка, 1989. – 190 с.
21. Ящерицын, П. И. Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении / П. И. Ящерицын. – Минск : Наука и техника, 1974. – 606 с.
22. Кудинов, А. А. Сравнительная оценка технического уровня технологий формообразования и контроля в механообрабатывающем производстве / А. А. Кудинов // Вестник машиностроения. – 1998. – № 7. – С. 30–32.
23. Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 326 с.
24. Киселев, С. П. Полирование металлов / С. П. Киселев. – Л. : Машиностроение, 1967. – 118 с.

25. Ящерицын, П. И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П. И. Ящерицын, А. К. Цокур, М. Л. Еременко. – Минск : Наука и техника, 1973. – 148 с.
26. Соколов, С. П. Обработка деталей абразивными брусками / С. П. Соколов, З. И. Кремень. – Л.: Машиностроение, 1967. – 124 с.
27. Тамаркин, М. А. Технологические основы оптимизации процессов обработки свободными абразивами : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / М. А. Тамаркин. – Ростов-на-Дону, ДГТУ : 1995. – 285 с.
28. Бабичев, А. П. Вибрационная обработка деталей машин / А. П. Бабичев. – М. : Машиностроение, 1974. – 134 с.
29. Бабичев, А. П. Конструирование и эксплуатация вибрационных станков для обработки деталей / А. П. Бабичев, Л. К. Зеленцов, Ю. М. Самодумский / – Ростов : изд-во Ростовского государственного университета, 1981. – 160 с.
30. Бабичев, А. П. Проблемы вибрационной технологии / А. П. Бабичев // Вестник ДГТУ. – 2001. – Т. 1. – № 2. – С. 5–21.
31. Бурштейн, И. Е. Объемная вибрационная обработка / И. Е. Бурштейн, В. В. Балицкий, А. Ф. Духовский. – М. : Машиностроение, 1981. – 52 с.
32. Обработка деталей свободным абразивом в вибрирующих резервуарах / М. Н. Карташов [и др.] ; под общей ред. М. Н. Карташова. – Киев : Вища школа, 1975. – 188 с.
33. Упрочняемость закаленных шлифованных сталей при вибрационной обработке / А. П. Бабичев [и др.] // Вестник машиностроения. 1980. – № 7. – С. 55–59.
34. Кулик, В. К. Прогрессивные процессы обработки фасонных поверхностей / В. К. Кулик, Ю. В. Петриков, В. В. Изотов. – Киев : Техника, 1987. – 176 с.
35. Орлов, П. Н. Процессы доводки прецизионных деталей пастами и суспензиями / П. Н. Орлов, Ю. И. Нестеров, В. А. Полухин. – М. : Машиностроение, 1975. – 55 с.
36. Гребенщиков, И. В. Роль химии в процессах полирования / И. В. Гребенщиков // Качество поверхности деталей машин. – М. : изд-во АН СССР, 1957. – Т. 3. – С. 17–28.
37. Трилисский, В. Д. Технология и оборудование для объемной центробежно-ротационной обработки деталей / В. Д. Трилисский. – М. : НИИМАШ, 1983. – 53 с.

38. Технология и оборудование для объемной центробежно-ротационной обработки деталей / В. Д. Трилисский [и др.] ; под общей ред. В. Д. Трилисского. – М., 1989. – 39 с.
39. Мнджоян, К. А. Эффективность абразивно-жидкостной обработки с прерывистой подачей струи / К. А. Мнджоян, Н. В. Аветисян // Станки и инструмент. – 1977. – № 8. – С. 35.
40. Пичко, А. С. Струйно-абразивная обработка поверхности отверстий цилиндрических деталей / А. С. Пичко // Вестник машиностроения. – 1978. – № 10. – С. 65–67.
41. Ящерицын, П. И. О характере разрушения закаленной стали ШХ 15 абразивной струей / П. И. Ящерицын, В. А. Полипчик // Труды ВНИАШ. – № 10. – М. : НИИМАШ, 1970. – С. 78–83.
42. Довнар, С. А. О механизме разрушения при струйной гидроабразивной обработке металлических поверхностей / С. А. Довнар // Доклады АН БССР. – 1962. – Т. 6. – № 12. – С. 777–779.
43. Резников, А. Н. Справочник. Абразивная и алмазная обработка материалов / А. Н. Резников [и др.] ; под ред. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 390 с.
44. Безъязычный, В. Ф. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении / В. Ф. Безъязычный [и др.] ; под общ. ред. В. Ф. Безъязычного. – М. : Машиностроение, 2007. – 538 с.
45. Лурье, Г. Б. Шлифование деталей в барабанах с планетарным вращением / Г. Б. Лурье, А. Н. Синотин // Вестник машиностроения. – 1974. – № 8. – С. 38–40.
46. Подвигин, Б. С. Механизированная зачистка деталей в центробежно-планетарной установке / Б. С. Подвигин, В. В. Розенблаг // Вестник машиностроения. – 1980. – № 4. – С. 65–66.
47. Усанкин, И. Г. Шероховатость поверхностей деталей при полировании шарами в планетарных центробежных установках / И. Г. Усанкин // Вестник машиностроения. – 1980. – № 9. – С. 57–58.
48. Фролов, А. И. Установка УОР-2 с планетарным вращением барабанов / А. И. Фролов // Информ. Листок № 267-76. – Ярославль : Яросл. ЦНТИ, 1976. – 3 с.
49. Иванова, В. Ф. Установка для центробежно-абразивной обработки деталей / В. Ф. Иванова // Информ. Листок № 532-75. – Свердловск : Свердл. ЦНТИ, 1975. – 4 с.

50. Трилисский, В. О. Шпиндельная центробежно-ротационная установка для отделочно-зачистной обработки деталей / В. О. Трилисский [и др.] // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента : межвуз. сб. науч. тр. – Пенза : Пенз. политехн. институт. – 1981. – Вып. 10. – С. 63–67.

51. Воронцов, В. Н. Особенности процесса полирования поверхностей камерным методом / В. Н. Воронцов, В. Б. Батищев // Абразивы. Научно-технический реферативный сборник / № 11. – М. : НИИМАШ. – 1975. – С. 1–4.

52. Ящерицын, П. И. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива / П. И. Ящерицын, А. Н. Мартынов, А. Д. Гридин. – Минск : Наука и техника, 1978. – 244 с.

53. Мартынов, А. Н. Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами / А. Н. Мартынов – Саратов : Изд-во СГУ, 1981. – 212 с.

54. Лурье, Г. Б. Шлифование абразивными лентами / Г. Б. Лурье – М. : Высшая школа, 1980. – 47 с.

55. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск : Наука и техника, 1977. – 256 с.

56. Иванов, Ю. И. Определение составляющих тангенциальной суммарной силы при шлифовании алмазными лентами / Ю. И. Иванов, Н. В. Носов // Изв. вузов. Машиностроение. – М. : МВТУ им. Н. Э. Баумана. – 1980. – № 10. – С. 127–131.

57. Панько, Л. А. Повышение эффективности шлифования абразивной лентой / Л. А. Панько, Н. В. Костин, В. П. Антонов // Станки и инструмент. – 1976. – № 7. – С. 32–36.

58. Сагарда, А. А. Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А. А. Сагарда, И. Х. Чеповецкий, Л. Л. Мишнаевский. – Киев : Техніка, 1974. – 179 с.

59. Дриц, М. Е. Материаловедение и технология конструкционных материалов / М. Е. Дриц, М. А. Москалев. – М. : Высшая школа, 1990. – 448 с.

60. Устройство для магнитно-абразивной обработки заготовки с электрохимическим растворением ее поверхностного слоя: пат. № 12120 Респ. Беларусь, С1РБ, МКИ В24В31/00 / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, Е. В. Сенчуров [и др.] ; БГАТУ – № а20071192; заявл. 2007.10.01, опубл. 2008.06.30. – 5 с.

61. Способ внутреннего шлифования: а. с. 55507 СССР, МПК В 24b 37/00/ Н. И. Каргалов ; – №123546/25-8 ; заявл. 1.04.38 ; опубл. 2.10.39, Бюл. № 8. – 3 с.

62. Коновалов, Е. Г. Основы электроферромагнитной обработки / Е. Г. Коновалов, Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1974. – 272 с.

63. Ящерицын, П. И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев, А. И. Барботько. – Минск : Наука и техника, 1976. – 302 с.

64. Сакулевич, Ф. Ю. Роль смазывающе-охлаждающих жидкостей при магнитно-абразивной обработке / Ф. Ю. Сакулевич, Н. Я. Скворчевский. – Минск : Наука и техника, 1981. – 68 с.

65. Шулев, Г. С. Физико-технические основы обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками : автореф. дис. ... канд. техн. наук : / Г. С. Шулев ; Физико-технический ин-т АН БССР. – Минск : 1965. – 22 с.

66. Минин, Л. К. Магнитно-абразивное полирование наружных поверхностей вращения высокоточных деталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : / Л. К. Минин ; Физико-технический ин-т АН БССР. – Минск : 1975. – 24 с.

67. Хомич, Н. С. Исследование возможности получения ферромагнитных частиц с заданными линейно-геометрическими характеристиками / Н. С. Хомич // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С.59–66.

68. Жданович, В. И. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : / В. И. Жданович ; Физико-технический ин-т АН БССР. – Минск : 1974. – 23 с.

69. Майборода, В. С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей : дис. канд. ... техн. наук : / В. С. Майборода ; Киев. политех. ин-т. – Киев : 1988. – 170 с.

70. Барон, Ю. М. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса абразивной обработки деталей машин в магнитном поле : автореф. дис. ... канд. техн. наук : / Ю. М. Барон ; Ленингр. политех. ин-т. – Ленинград : 1969. – 18 с.

71. Благодарная, О. В. Технологическое обеспечение качества рабочих поверхностей швейных игл магнитно-абразивным полиро-

ванием : дис. ... канд. техн. наук : / О. В. Благодарная ; Бел.-Рос. ун-т. – Могилев : 2012. – 182 с.

72. Method and the device for magnetic abrasive machining of partes : patent WO № 00/51784 / G. Kremen ; etc 09/262, 637 ; заявл. 14.09.1999 ; опублик. 08.09.2000. – WIPO. – № 9 – 6 с.

73. Kodacsy, J. Magneto-abrasives Polieren und Entgraten Witerenwikelte Feinbearbeitung // J. Kodacsy. – Tech. Rdsch. – 1990. – Vol. 82. – N 37. – S. 76–79.

74. Yamaguchi, H. Development of a new presision internal machining processing on alternating magnetic field / H. Yamaguchi, T. Shinmura, M. Takenada // Prec eng. – 2003. – N 27. – P. 51–58.

75. Zhen Bing, H. Magnetic Field assisted Finishing of Ceramics. Part 3. On the Thermal aspects of Magnetic abrasive Finishing (MAF) of Ceramics Rollers / H. Zhen Bing, R. Komanduri // Journal of Tribology, 1998 –Vol. 120. – P. 660-667.

76. Wantuch, E. Magnetic-abrasive Beatbeitung / E. Wantuch, H. Zutze // New Fertigungs technologies. – 2002. – N 5. – S. 232–237.

77. Хомич, Н. С. Высококачественное полирование крупногабаритных валов / Н. С.Хомич // Советский экспорт. – 1983. – № 5. – С. 5.

78. Способ магнитно-абразивной обработки: а. с. 1585124 СССР : МПК В 24 в 31/112 / В. Ф. Чеботаев, С. А. Михалькова. №440778/25-08 ; заявл. 11.04.88 ; опублик. 15.08.90 // Бюл. № 30, 1990. – 5 с.

79. Устройство для объемной полировки деталей: а. с. 1558648 СССР : МПК В 24 в 31/112 / Д. Ф. Устинович, Н. Я. Скворчевский. № 4330352/31–08 ; заявл. 17.11.87 ; опублик. 23.04.90 // Бюл. № 15, 1990. – 4 с.

80. Устройство для упрочнения канавок поршней: а. с. 1553219 СССР : МПК В 24 в 31/112 / В. И. Щербаков, Н. Н. Дорожкин, И. Ф. Марченко, Б. П. Борисов. № 434 9762/ 28-08 ; заявл. 04.12.87 ; опублик. 30.03.90 // Бюл. № 12, 1990. - 6 с.

81. Устройство для объемной полировки: а. с. 1071411 СССР : МПК В 24 в 31/10 / В. Н.Чачин, Ф. Ю. Сакулевич, Л. А. Олендер. № 2513230/ 25-08 ; заявл. 26.07.77 ; опублик. 07.02.84 // Бюл. № 5, 1984. – 5 с.

82. Устройство для объемной полировки: а. с. 403537 СССР : МПК В 24 в 31/10 / Е. Г.Коновалов, Ф. Ю.Сакулевич, Л. М.Кожуро и др. № 1666214/25-8 ; заявл. 03.6.1971 ; опублик. 26.10.1973 // Бюл. № 43, 1973. – 6 с.

83. Способ абразивной обработки: а. с. 1310176 МПК В24В31/112 / Н. П. Морозов, Н. С. Хомич, Л. С. Бойко и др. № 3834768/31-08 ; заявл. 03.01.1985 ; опублик. 15.05.1987 // Бюл. № 18, 1987. – 5 с.

84. Способ магнитно-абразивной обработки: а. с. 878523 СССР : МПК В 24 в 31/10 / Ф. Ю. Сакулевич, Л. К. Минин, Ю. А. Базарнов и др. № 2160620/08 ; заявл. 04.08.75 ; опублик. 07.11.81 // Бюл. № 41, 1981. – 6 с.

85. Устройство для магнитно-абразивной обработки: а. с. 1201109 СССР : МПК В 24 в 31/112 / Ю. М. Барон, С. П. Приходько. № 3744060/25-08 ; заявл. 10.04.84 ; опублик. 30.12.85 // Бюл. № 48, 1985. – 4 с.

86. Устройство для полирования поверхностей магнитно-абразивным порошком: а. с. 776890 СССР : МПК В 24 в 31/10 / Ю. М. Барон, И. А. Ро, Н. А. Бойцов. № 2730390/25-08 ; заявл. 28.02.79 ; опублик. 07.11.80 // Бюл. № 41, 1980. – 4 с.

87. Устройство Сертакова для магнитно-абразивной обработки деталей: а. с. 1528649 СССР : МПК В 24 в 31/ 112 / Б. Н. Сертаков. № 4351648/25-08 ; заявл. 29.12.87 ; опублик. 15.12.89 // Бюл. № 46, 1989. – 4 с.

88. Устройство для магнитно-абразивной обработки изделия сферической формы: а. с. 466097 СССР : МПК В 24 в 31/10 / Е. Г. Коновалов, Ф. Ю. Сакулевич, Л. А. Олендер и др. № 1904743/25-8 ; заявл. 10.04.73 ; опублик. 05.04.75 // Бюл. № 13, 1975. – 4 с.

89. Майборода, В. С. Основи створэння і використання порошкового магнітноабразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь : автореф. дис. ... д-ра технических наук : 05.03.01 / В. С. Майборода. ; Киев. политех. ин-т. – Киев, 2001. – 36 с.

90. Майборода, В. С. Кинетика формирования микропрофиля поверхности режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке / В. С. Майборода, Н. В. Ульяненко // Вісник СумДУ. № 2, 2003. – С. 104–111.

91. Сурков, А. Н. Разработка и исследование высокоэффективного способа шлифования сложнопрофильных поверхностей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Сурков ; Самарск. гос. техн. ун-т. – Самара : 2004. – 21 с.

92. Ящерицын, П. И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1988. – 270 с.

93. Хейфец, М. Л. Организация и управление технологическими системами, использующими комбинированные воздействия / М. Л. Хейфец, П. И. Ящерицын // РАН. Проблемы машиностроения и надежности машин, 1994. № 6. – 66–76 с.

94. Ящерицын, П. И. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск : Физико-технический институт, 1997. – 416 с.

95. Гордиенко, А. И. Структурные и фазовые превращения в титановых сплавах при быстром нагреве / А. И. Гордиенко, А. А. Шипко. Минск, 1983. – 228 с.

96. Куликовский, А. Г. Магнитная гидродинамика / А. Г. Куликовский, Г. А. Любимов. – М. : Логос, 2005. – 326 с.

97. Евдокимов, Ф. Е. Теоретические основы электротехники / Ф. Е. Евдокимов. – М. : АСАДЕМІА, 2004 – 560 с.

98. Оликер, В. Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В. Е. Оликер. – М. : Металлургия, 1990. – 176 с.

99. П. И. Ящерицын, Скоростное внутреннее шлифование / П. И. Ящерицын, П. И. Караим. – Минск : Наука и техника, 1980. – 280 с.

100. Гусак, А. А. Высшая математика. Т. 1. – Минск : ТетраСистемс, 2009. – 544 с.

101. Гусак, А. А. Высшая математика. Т. 2. – Минск : ТетраСистемс 2009. – 448 с.

102. Мышкис, А. Д. Лекции по высшей математике / А. Д. Мышкис. – М. : Наука, 1969. – 640 с.

103. Гнесин, Г. Г. Принципы создания магнитно-абразивных материалов / Г. Г. Гнесин, М. Д. Крымский, Л. Н. Тульчинский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР. – 1980. – С. 17–25.

104. Николов, В. Обработка на равнини повърхни с феромагнитни прахове / В. Николов // Научни трудове на ВТУ «Ангел Кънчев». Сер. Технология на машиностроенето и металорежещи машини. – 1981. – Т. XXIII. – С. 33–37.

105. Порошковые магнитные материалы // под ред. И. Д. Радомысльского и Л. Н. Тучинского. – Киев : Наукова думка, 1984. – 142 с.

106. Гридасова, Т. Я. Магнитно-абразивные материалы из расплавов и методика их испытаний / Т. Я. Гридасова [и др.] // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С. 49–59.

107. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение, 1986. – 172 с.

108. Крымский, М. Д. Оптимизация свойств магнитно-абразивного материала на основе железа и карбида кремния / М. Д. Крымский, О. А. Катрус, А. И. Дубров // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С. 25–33.

109. Билык, И. И. Получение магнитно-абразивных порошков с неравномерным распределением абразивной составляющей / И. И. Билык, А. Н. Степанчук // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С. 43–46.

110. Степанчук, А. Н. Исследование и оптимизация условий получения магнитно-абразивных материалов на основе композиции Fe-B / А. Н. Степанчук, А. В. Карасева, В. С. Ратошнюк // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С. 47–49.

111. Тодоров, Н. Х. Система за автоматизирано проектиране на процеси за MAO / Н. Х. Тодоров, Р. Д. Пиперкова // Докл. III Международ. н.-т. сем. по технологиям финишной обработки «АМО'87» (г. Варна, окт. 1987 г.). – Варна, 1987. – С. 82–86.

112. Македонски, Б. Развитие комбинированных завершающих технологических процессов в НРБ // Проблемы машиностроения и автоматизации. – Москва, Будапешт, 1989. – № 25. – С. 21–28.

113. Крымский, М. Д. Методика оценки абразивной способности порошковых магнитно-абразивных материалов / М. Д. Крымский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С. 84–92.

114. Барон, Ю. М. Физические основы работы магнитно-абразивных материалов / Ю. М. Барон // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АН УССР, 1980. – С. 10–17.

115. Барон, Ю. М. Технология абразивной обработки в магнитном поле / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение, 1975. – 127 с.

116. Сакулевич, Ф. Ю. Объемная магнитно-абразивная обработка / Ф. Ю. Сакулевич, Л. М. Кожуро. – Минск : Наука и техника, 1978. – 168 с.

117. Крымский, М. Д. Влияние формы магнитно-абразивных зерен на их режущую способность / М. Д. Крымский // Порошковая металлургия. – 1983. – № 6. – С. 83–85.

118. Оликер, В. Е. Особенности выбора оптимальной формы частиц магнитно-абразивного порошка. / В. Е. Оликер, А. Ф. Жорняк, Т. Я. Гридасова // Порошковая металлургия. – 1983. – № 10. – С. 81–86.

119. Андриевский, Р. А. Порошковое материаловедение / Р. А. Андриевский. – М. : Металлургия, 1991. – 208 с.

120. Скворчевский, Н. Я. Структура и свойства ферроабразивных порошков на основе оксидов тугоплавких металлов / Н. Я. Скворчевский [и др.] // Весці АНБ. Сер. фіз.-тэхн. навук, 1994. – № 2. – С. 8–12.

121. Мержанов, А. Г. Научные основы, достижения и перспективы развития процессов твердопламенного горения / А. Г. Мержанов // Известия АН РФ, 1997. – № 1. – С. 8–32.

122. Мержанов, А. Г. Процессы горения в химической технологии и металлургии / А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская // Доклады АН СССР, 1972. – Т. 204. – № 366. – С. 77–79.

123. Гридасова, Т. Я. Магнитно-абразивные материалы из расплавов / Т. Я. Гридасова [и др.] // Порошковая металлургия, 1980. – № 7. – С. 86–89.

124. Гарбер, М. Е. Безникелевые белые чугуны для изготовления абразивостойких деталей / М. Е. Гарбер [и др.]. – М. : Металлургия, 1971. – 226 с.

125. Материал для магнитно-абразивной обработки : пат. № 11082 С1, МКИ В24Д3/06, С22С45/0 / А. П. Ракомсин, М. И. Сидоренко, Л. И. Сергеев [и др.] ; ОАО “МАЗ” . – № а20061056 ; заявл. 2006.10.27 ; опубл. 2008.06.30 ; Бюл. № 23, 2008. – 4 с.

126. Способ получения магнитно-абразивного порошка : а. с. 677813 СССР : МКП В22F9/16 / Н. А. Басуев, А. Б. Кочкарёв. №3541782/22-02 ; заявл. 21.01.1983 ; опубл. 07.02.1985 // Бюл. № 5, 1985. – 4 с.

127. Ферромагнитный абразивный материал и способ его получения : пат. №6028 С1, МКИ С22С33/02, 29/14, 29/02, В24Д3/34, В22F9/04 / Ю. Г. Орлов, Л. Р. Дудецкая, Л. Е. Сергеев [и др.] ; ГНУ ФТИ НАН Беларуси . – № а20000194 ; заявл. 2000.02.29 ; опубл. 2004.03.30 ; Бюл. № 12, 2004. – 4 с.

128. Магнитно-абразивный материал в виде гранул и способ его получения : пат. № 7136 С1 МКИ В24Д3/34 / П. И. Ящерицын, А. П. Ракомсин, Л. Е. Сергеев [и др.] ; ОАО «МАЗ» . – № а20000863 ; заявл. 2000.09.20 ; опубл. 2002.03.30 ; Бюл. № 18, 2002. – 5 с.

129. Способ получения материала для магнитно-абразивной обработки : пат. № 8085 с1, МКИ В24Д3/00, В22F8/00 / П. И. Ящерицын, А. П. Ракомсин, Л. Е. Сергеев [и др.] ; ОАО «МАЗ» . – № а20030426 ; заявл. 2003.05.13 ; опубл. 2004.12.30 ; Бюл. № 31, 2004. – 4 с.

130. Авдеева, А. В. Коррозия в пищевых производствах и способы защиты / А. В. Авдеева. – М. : Пищевая промышленность, 1965. – 242 с.

131. Миронов, А. М. Повышение эффективности магнитно-абразивной обработки зубчатых колёс механическим уплотнением ферроабразивного порошка в рабочей зоне : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. М. Миронов. – ГНУ ФТИ НАНБ, Минск, 2007. – 24 с.

132. Сергеев, Л. Е. Магнитно-абразивная обработка деталей машин / Л. Е. Сергеев, А. М. Миронов. – УМЦ Минсельхозпрод РБ, 2004. – 72 с.

133. Новик, Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М.: Машиностроение ; София : Техника, 1980. – 304 с.

134. Ашмарин, И. П. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов / И. П. Ашмарин, Н. Н. Васильев, В. А. Амбросов. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1974. – 176 с.

135. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения. Учебник для вузов / Б. М. Базров. – М. : Машиностроение, 2005. – 736 с.

136. Солнышкин, Н. П. Технологические процессы в машиностроении / Н. П. Солнышкин, А. Б. Чижевский, С. И. Дмитриев. – Санкт-Петербург : Изд. СПбГТУ, 2001. – 344 с.

137. Кошкин, Л. Н. Роторные и роторно-конвейерные линии / Л. Н. Кошкин. – М. : Машиностроение, 1982. – 336 с.

138. Матвеев, М. Н. Обыкновенные дифференциальные уравнения / М. Н. Матвеев. – Санкт-Петербург : Специальная литература, 1996. – 240 с.

139. Бугров, С. Я. Дифференциальное и интегральное исчисление / С. Я. Бугров, С. М. Никольский. – М. : Наука, 1984. – 320 с.

140. Скворчевский, Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 192 с.

141. Kampschulte, G. Magnesisches Nechsfeld und Relativbewegung senken Fehlerrate beim magnet-abrasiven Feinschleifen / G. Kampschulte // Maschinenmarkt. 1990. – Vol.96. – № 41. – S. 54–59.

142. Бинс, К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсен. – М. : Энергия, 1970. – 215 с.

143. Yascheritsin, P. I. The comparative appraisal of quality characteristics of holes after different finishing methods / P. I. Yascheritsin, L. E. Sergeev, M. I. Sidorenko // Adv. Perform. Mater, 1997. – V. 4. – №. 3. – P. 337–347.

144. Дикушин, В. И. Основные данные для проектирования металлорежущих станков / В. И. Дикушин. – М. : Машгиз, 1949. – 214 с.

145. Устройство для магнитно-абразивной обработки деталей : а. с. 403537 СССР : МПК В24В31/10 / П. И. Ящерицын, В. В. Смоляк, Ю. А. Базарнов [и др.]. № 2584400/25-08 ; заявл. 01.03.1978 ; опубл. 30.01.1984 // Бюл. № 2, 1984. – 4 с.

146. Ящерицын, П. И. Теория резания / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн. – Минск : Новое знание, 2005. – 512 с.

147. Орлов, П. Н. Основы конструирования : справочно-методическое пособие. Кн. 2. / П. Н. Орлов. – М. : Машиностроение, 1988. – 544 с.

148. Иконников, А. М. Совершенствование технологии магнитно-абразивной обработки фасонных поверхностей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. М. Иконников ; Алтайский политехнический институт имени И. И. Ползунова. Барнаул, 2004. – 18 с.

149. Кобяцкая, Е. Е. Экономическая теория и текстильная промышленность / Е. Е. Кобяцкая. – М. : Московская государственная текстильная академия им. А. Н. Косыгина, 1999. – 128 с.

150. Sharpening or Polishing Device : patent № US2735231 / L. G. Simjian. May 22, 1953 – 8 с.

151. Patent № US4326933A Electro-chemical deburring method / W. M. Bloomquist, W. E. Sabatka etc. – United States Patent and Trademark Office. – 06/037,297 заявл.09.05.1979, опубл. 27.04.1982, № 4. – 5 с.

152. Patent №US4826541A Method of thermal deburring of metal parts/ V. P. Bozhko 07/165,269 заявл.30.04.1986, опубл.02.05.1985, 4 с.

153. Patent №US 4685192A Appliance for removal of burrs on flame-cut slabs; blooms and billets/ E. P. Braun 06/788,472 заявл.17.10.1985, опубл. 11.08.1987, № 8 – 4 с.

154. Patent №SE9701240 Deburring method/Neumann K.-E. 09/214,734 заявл.07.07.1997, опубл.11.01.1999, № 1 – 5 с.

155. Patent №US205670 ELECTROLYTIC DEBURRING APPARATUS AND METHOD/ M.R. Rohrbeck, 20100072077, заявл. 10.04.2008 , опубл. 25.03.2010, № 3 – 5 с.

156. Patent № EP0338015 A1 Method and apparatus for cutting and deburring tubes/ L. Thorell, EPO, EP19880900605, заявл.18.12.1987, опубл.25.10.1989, №10 –5 с.

157. Dehof, A. Magnetabrasives Entgrateu der Zahnstiznkanten von Zahnradern / A. Dehof, R. Krull, W. Mattkell // Werkstatt und Betrieb. – 1984. – V. 117. – S. 2–4.

158. Драгилев, А. И. Технологические машины и аппараты пищевых продуктов / А. И. Драгилев, В. С. Дроздов. – М. : Колос, 1999. – 376 с.

159. Клусов, И. А. Технологические системы роторных машин / И. А. Клусов. – М. : Машиностроение, 1976. – 232 с.

160. Белецкий, В. М. Справочник. Алюминиевые сплавы / В. М. Белецкий, В. А. Кривов ; под общей редакцией академика РАН И. Н. Фридляндера. – Киев : «КОМИНТЕХ», 2005. – 365 с.

161. Устройство для магнитно-абразивной обработки деталей : пат. № 5246 С1, МКИ Р24В31/10 / П. И. Ящерицын, А. П. Ракомсин Л. Е. Сергеев [и др.] ; ОАО «МАЗ» . – № а1999054 ; заявл. 1999.07.01 ; опубл. 2003.06.30 ; Бюл. № 20, 2003. – 7 с..

162. Справочник технолога-машиностроителя / под редакцией А. М. Дальского [и др.]. – Т.1. – М. : Машиностроение, 2003. – 656 с.

163. Скворчевский, Н. Я. Научные основы повышения эффективности магнитно-абразивной обработки созданием сверхсильных магнитных полей и новых технологических сред : автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. – Минск : БГПА, 1994. – 36 с.

164. Сакулевич, Ф. Ю. Магнитно-абразивная обработка точных деталей / Ф. Ю. Сакулевич, Л. К. Минин, Л. А. Олендер. – Минск : Вышэйшая школа, 1977. – 286 с.

165. Мельников, П. С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении / П. С. Мельников. – М. : Машиностроение, 1979. – 296 с.

166. Shinmura, T. Method of finishing abrasive machining of internal surfaces / T. Shinmura, H. Iamaguchi. // Trans. of Jap. Soc. Mech. Eng., 1993. – Vol. 59. – № 560. – P. 1261–1267.

167. Kampschulte, G. Noch am Anfang Schleifnuttel, Relativbewegung, Feldcharakter und Bearbeitung – Schlanker beeinflussen das Ergebnis beim Magnet-abrasiven Feinheiten / G. Kampschulte // Maschinenmarkt, 1990. – V. 96. – № 38. – S. 71–81.

168. Shinmura, T. A new Process for Precision Finishing of Silicon Nitride Fine Ceramics by the Application of Magnetic abrasive machining using Chromium – oxide Abrasives mixed with Iron Particles / T. Shinmura, F. H. Wang // J. Int. Japan. Soc. Prec. Eng., 1994. – Vol. 28. – № 3. – P. 229–231.

169. Бабич, В. Е. Технология финишной магнитно-абразивной обработки сборного породоразрушающего инструмента : автореф. дис ... канд. техн. наук / В.Е. Бабич. ГНУ ФТИ НАНБ, Мн. 2009. – 20 с.

170. Прейс, Г. А. Повышение износостойкости деталей оборудования предприятий пищевой промышленности / Г. А. Прейс. – М. : Машгиз, 1963. – 282 с.

171. Коррозия и защита от коррозии / под ред. И. В. Семенов. – М. : Физматлит, 2002. – 334 с.

172. Лындин, В. А. Инструмент для накатывания зубьев и шлицев повышенной точности / В. А. Лындин. – М. : Машиностроение, 1988. – 144 с.

173. Брынский, Е. А. Электромагнитные поля в электрических машинах / Е. А. Брынский, Я. Б. Данилевич, В. И. Яковлев. – Л. : Энергия, 1979. – 176 с.

174. Никифоров, А. Д. Современные проблемы науки в области технологии машиностроения / А. Д. Никифоров. – М. : Высшая школа, 2006. – 356 с.

175. Wu, J. Studies on magnetic abrasive machining/ Wu J., Wang M., Zuo D. // Trans. Nanjing Univer. Aeron. and Astron. – 1997. – V. 14, N 1. – P. 44–49.

176. Shinmura, T. Study on magnetic abrasive finishing/ T. Shinmura, Takazawa K., E. Hatano // CIRP Ann. – 1990. – V. 39, N 1. – P. 325–328.

177. Подшипники качения. Справочник // под ред. В. Н. Нарышкина, Р. В. Коросташевского. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.

178. Ящерицын, П. И. Новое в технологии шлифования сферических поверхностей / П. И. Ящерицын, Г. П. Кривко, М. Л. Еременко. – Минск : Вышэйшая школа, 1982. – 144 с.

179. Tanaka, H. Fundamental study on magnetic field assisted lapping with rubber magnet / H. Tanaka, K. Shimuzi // Res. Repts Fac. Eng. Kagoshima Univ. 1990. – № 32. – P. 63–67.

180. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник. / под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. – Т. 1, кн. 2. – М. : Metallurgiya, 1991. – 462 с.

181. Гаркунов, Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 1989. – 328 с.

182. Трение, изнашивание и смазка. Справочник / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – Кн. 1. – М. : Машиностроение, 1978. – 400 с.

183. Ящерицын, П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Минск : Вышэйшая школа, 1990. – 512 с.

184. Королев, А. В. Учебно-методическое пособие для экономического обоснования дисциплины проектов студентов, обучающихся по специальностям: 74.06.03 «Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве»; 74.06.06 «Материально-техническое обеспечение агропромышленного комплекса» / А.В. Королев, Г.А. Силкович. – Минск : Изд-во БАТУ, 2003. – 26 с.

185. Миклуш, В. П. Организация ремонтно-обслуживающего производства и проектирование предприятий технического сервиса АПК / В. П. Миклуш, Т. А. Шаровар, Г. М. Уманский ; под ред. В. П. Миклуша. – Минск : Ураджай, 2001. – 662 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

РЕПОЗИТОРИЙ БГАПУ

Научное издание

Акулович Леонид Михайлович,
Сергеев Леонид Ефимович

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ
МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ

Ответственный за выпуск *М. А. Прищепов*
Редактор *В. А. Гошко*
Компьютерная верстка *А. О. Лабун*
Дизайн и оформление обложки *И. А. Усенко*

Подписано в печать 13.12.2013. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 21,62. Уч.-изд. л. 16,9. Тираж 100 экз. Заказ 414.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
ЛП № 02330/0552984 от 14.04.2010.
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.
Пр-т Независимости, 99-2, 220023, Минск.