

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев

## ОСНОВЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Минск  
БГАТУ  
2014

УДК 621.923

Акулович, Л. М. Основы профилирования режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2014. – 280 с. : ил. – ISBN 978-985-519-734-9.

Приведены особенности образования профиля режущего контура инструмента при магнитно-абразивной обработке металлических поверхностей сложной геометрической формы, выявленные в результате научных исследований. Установлены механизмы формирования топографии магнитного поля в рабочей зоне при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей. Исследованы режущие и магнитные свойства рабочих технологических сред и выявлено их влияние на производительность съема материала. Разработаны принципы управления устойчивостью процесса магнитно-абразивной обработки с учетом явлений его самоорганизации.

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

Табл. 28. Ил. 126. Библиогр. : 144 назв.

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор О. Г. Девойно,  
кандидат технических наук, доцент В. А. Лойко

ISBN 978-985-519-734-9

© БГАТУ, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Ведущая роль в обеспечении интенсивного развития народного хозяйства Республики Беларусь принадлежит машиностроению, которое призвано обеспечить 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.

Растущие требования к повышению производительности машин и появление металлообрабатывающего оборудования с расширенными технологическими возможностями обуславливают использование в конструкциях деталей с поверхностями сложного профиля. Современный уровень развития техники характерен существенным увеличением диапазона и усложнением форм используемых рабочих поверхностей деталей и одновременным повышением требований к точности их обработки. Расширение диапазона использования деталей с рабочими поверхностями сложной формы 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, увеличить надежность, ресурс, к.п.д. и улучшить другие эксплуатационные характеристики машин в целом.

Повышенные требования к точности и качеству сложнопрофильных поверхностей приводят к необходимости совершенствования процессов их изготовления. В условиях высокой конкуренции требуется своевременная и быстрая подготовка производства к выпуску нового изделия, а также переоснащение производства современным, высокопроизводительным оборудованием. Решение

этих задач основано на применении технологических систем с гибкими (изменяющимися) элементами, что позволяет сократить сроки переналадки оборудования на выпуск новой номенклатуры изделий. Создание математических моделей, методов анализа и синтеза решений, связанных с оценкой пространственной точности станочных систем на стадии проектирования позволяет находить оптимальные решения. При этом возникает научная задача разработки комплексной точностной модели станка, охватывающей широкий спектр вопросов при обработке сложнопрофильных деталей.

На геометрическую точность поверхностей деталей при их обработке влияет комплекс погрешностей на всем пути преобразования информации в системе чертеж – готовая деталь. Основная доля погрешностей возникает при непосредственном формировании профиля поверхности в процессе обработки детали, в выполнении, которого участвует вся технологическая система. От каждого элемента технологической системы в комплексе зависит получение заданного качества обработки деталей, а также производительность и себестоимость их обработки. На технологическую систему в процессе обработки действуют различные внутренние и внешние факторы, которые могут привести к отклонению хода технологического процесса обработки от заданного, ухудшающего его выходные показатели. Например, в результате действия внутренних и внешних факторов возникают упругие деформации элементов технологической системы, их износ, вибрации, тепловые деформации, что ухудшает, в первую очередь, качество обработки, а также влияет на производительность и себестоимость обработки.

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.

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.

К одному из перспективных способов финишной обработки эластичным инструментом относится 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.

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. Однако 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.

## 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ

Современная промышленность располагает достаточно большим числом методов и способов обработки, обеспечивающих получение заданной формы, геометрической точности и параметров шероховатости рабочих поверхностей. При этом нередко механическая обработка является единственно возможным методом получения требуемого качества поверхности.

Устойчивая тенденция к усложнению формы и геометрической структуры рабочих поверхностей деталей и к ужесточению требований к точности их формообразующей обработки наблюдается в течение длительного периода времени. По оценкам экспертов около 10 % деталей машиностроения ограничиваются поверхностями сложной формы (скульптурными поверхностями деталей) и эта доля (а не только общее количество) постоянно увеличивается по мере совершенствования автоматизированных систем конструирования и изготовления систем класса CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Machining).

Формообразующая обработка сложных поверхностей деталей характерна высокой трудоемкостью и большой долей ручных доводочных операций. Например, трудоемкость обработки поверхностей пера лопатки современного газотурбинного двигателя достигает 60...85 % общей трудоемкости изготовления лопатки, при ручных доводочных операциях до 70 % трудоемкости изготовления лопаточного аппарата или 30...40 % в общей трудоемкости изготовления всего двигателя.

Отличие формы и геометрической структуры сложных поверхностей является причиной имеющихся особенностей в технологии обработки ограниченных ими деталей. Поэтому многокоординатная обработка деталей с рабочими поверхностями такого типа характерна выраженной нестационарностью всех ее основных параметров: допусков удаляемого припуска и сечений срезаемых слоев, текущих значений кинематических геометрических показателей режущих кромок инструмента, допустимых в текущий момент времени критическими величинами скорости резания, подачи и др. Руководствуясь только интуитивным представлением о сложности поверхностей, отметим, что поверхности технических форм могут

быть относительно простыми, сложными и весьма сложными по форме, как, например, некоторые поверхности ювелирных изделий, для которых трудно указать область их инженерного применения. Несмотря на то, что поверхности инструмента материально существуют не всегда, они всегда могут быть материализованы (ограничивая при этом исходное инструментальное тело) и поэтому их следует рассматривать как поверхности технических форм.

Если некоторая поверхность может быть материализована, то, во-первых, необходимо уметь обрабатывать ее и, во-вторых, обрабатывать ее наилучшим образом, а именно: в полном соответствии с требованиями чертежа при минимальных затратах времени и средств на обработку. Процесс обработки должен быть максимально эффективным, а технологическая система и сформированная технологическая среда должны эксплуатироваться при этом с наибольшей отдачей. Поверхности технических форм имеют самую разнообразную, в том числе и очень сложную форму, что характерно для рабочих поверхностей лопаток газотурбинных двигателей, корабельных гребных винтов, для рабочих поверхностей штампов, применяемых в технологии изготовления панелей кузовов легковых автомобилей, для рабочих колес гидронасосов, лопастей роторов гидротурбин и многих других деталей.

По виду режущего инструмента существующие методы можно разделить на лезвийную и абразивную обработку жестко-связанным, свободным и подвижно-скоординированным зерном.

### 1.1. Обработка поверхностей лезвийным инструментом

Тело каждой детали ограничено поверхностями – отдельно взятая деталь любого изделия представляет собой совокупность рабочих и нерабочих поверхностей. Рабочая поверхность является конструктивно необходимым элементом каждой детали. Все рабочие и многие нерабочие поверхности деталей подвергаются формообразующей механической обработке на металлорежущих станках. В зависимости от характера траекторий рабочего движения, расположения режущих элементов лезвийного инструмента относительно обрабатываемых деталей фактические геометрические параметры в движении отличны по абсолютной величине и направлению от гео-

метрических параметров в статическом состоянии. Отсутствие какой-либо системы исследования как используемых в практике, так и возможных принципиальных кинематических схем резания является большим препятствием для развития научно обоснованного комплексного анализа новых методов обработки, новых оригинальных конструкций инструментов и станков. Основными методами при обработке сложных поверхностей с помощью настроенных кинематических цепей, воспроизводящих движение обрабатываемой детали относительно лезвийного инструмента, являются методы настройки, обкатки и использование фасонного режущего инструмента. Конструктор должен стремиться создать кинематическую схему, обладающую минимальным количеством связей для получения наибольшей точности и максимальной универсальностью для получения семейства кривых при данной настроенной цепи. Методы синтеза механизмов можно подразделить на две группы:

1) позволяющие создавать механизмы, теоретически точно воспроизводящие заданную траекторию или заданную зависимость между перемещением звеньев;

2) позволяющие создавать механизмы, воспроизводящие заданную траекторию приближенно, но обеспечивающие необходимую точность.

Обработка сложных поверхностей значительно упрощается, если для воспроизведения контура поверхности создан экономически оправданный механизм, описывающий данную кривую или поверхность. В действительности, за отдельными исключениями, когда удалось создать машины, полностью обеспечивающие воспроизведение необходимой сложной поверхности, приходится применять методы приближенного синтеза и вводить корректирующие устройства механизма для получения требуемой формы поверхности.

В технике весьма часто приходится встречаться с цилиндрическими или более сложными поверхностями, профили которых имеют весьма сложную форму. Особенно это заметно на аэродинамических профилях крыльев, лопастях, лопатках, применяемых при обтекании среды (жидкости и газы) при больших скоростях.

Обычно при обработке всякого рода двусторонних лопаток операцию резания производят дважды по каждой стороне отдельно; это обстоятельство делает процесс обработки прерывным, вызывает необходимость перестановки обрабатываемых деталей и увеличивает

вспомогательное время на обработку и стоимость детали. В последнее время сделано много попыток по созданию оборудования, обеспечивающего непрерывную обработку резанием (точение или фрезерование) деталей, имеющих в сечении неправильную форму. Первые попытки по подобной обработке делались следующим образом – детали сообщали вращательное движение вокруг выбранной продольной оси вращения, а режущему инструменту приходилось по копиру проходить линейный путь в пределах  $r_2 - r_x = \Delta$ , где эти величины соответствуют в полярной системе координат наибольшему и наименьшему радиус-вектору профиля детали. Очевидно, что заметная величина  $\Delta$  при резких переходах, что соответствует малым углам поворота детали, вызывает рост ускорений и больших нагрузок. Возникающие при изменении перемещения суппорта переходные процессы вызывают вибрацию деталей и, как следствие, обработанную поверхность невысокого качества с пониженной точностью.

Более сложной является задача сочетания движения режущего инструмента и обрабатываемой детали при обработке по методу обкатки. В этом случае необходимо обеспечить определенную скорость вращения фасонного режущего инструмента, длина средней окружности которого представляет длину обкатываемого участка, например, при точении и при долблении. При такой схеме работы профиль режущего инструмента представляет собой кривую, огибающую ряд последовательных положений профиля обрабатываемой детали при качении начальной прямой детали по начальной окружности инструмента. К недостаткам метода следует отнести: сложность проектирования и изготовления инструмента; наличие специфических особенностей в виде переходных кривых в местах соприкосновения профилей между собой.

На сегодняшний день наблюдается постоянный прогресс САМ-технологий, совершенствуется современный инструментарий создания различных стратегий обработки. Одновременно сохраняет свою актуальность следующая задача: разделить обрабатываемые поверхности на локальные участки и с помощью различных схем программирования траектории перемещения инструмента, достигнуть приемлемой точности обработки поверхности при удовлетворительной стойкости инструмента.

В контексте решения этой задачи следует отметить, что геометрия поверхности параллельного переноса не изменится, если направляющую кривую сделать образующей, т. е. все выше приведенные расчеты можно провести по двум направлениям, а затем сравнить условия резания – ширину срезаемого слоя и скорость резания. Аналитически установлено, что колебание значений элементов геометрии среза возрастает на участках с отрицательной гауссовой кривизной [1]. Следует отметить, что при обработке сложно-профильных поверхностей – поверхностей с переменной кривизной, неизбежно различие условий резания в процессе формообразования и, как следствие, возникновение погрешностей обработки.

Снизить возникающие отклонения можно путем построения подпрограммы коррекций на локальных участках траектории, основанных на изменении подачи с целью поддержания постоянного значения площади среза.

Например, профилирование фасонных режущих инструментов представляет собой сложную инженерную проблему, сущность решения которой заключается в том, чтобы определить всю информацию о геометрии рабочих поверхностей, необходимую для изготовления инструмента. Чтобы решить задачу профилирования инструмента относительно простой конструкции, достаточно найти профиль некоторого (обычно нормального) сечения его задней (при известной передней) или передней (при известной задней) поверхности. Например, профилирование призматического фасонного резца сводится к нахождению профиля нормального сечения его задней поверхности; круглого фасонного резца – к нахождению профиля осевого сечения его задней поверхности; затылованных дисковых фрез – к отысканию профиля нормального сечения затылованной задней поверхности и т.д. Найденных параметров профиля нормального сечения задней поверхности достаточно для изготовления такого инструмента. Вопрос о сущности решения задачи профилирования усложняется, когда речь идет о профилировании более сложных фасонных режущих инструментов, например, инструментов, работающих по методу обката – затылованных червячных фрез и др.

Единственно правильной постановкой задачи профилирования фасонных режущих инструментов следует считать такую, при которой найденное решение позволяет однозначно ответить на все

принципиальные вопросы формообразования рабочих поверхностей режущего инструмента. В таком аспекте сущность решения проблемы профилирования режущего инструмента сводится к нахождению полной геометрической информации о рабочих поверхностях фасонного режущего инструмента и формы его режущей кромки, совпадающей с линией пересечения рабочих поверхностей инструмента.

Проблема профилирования фасонных режущих инструментов в такой постановке является наиболее полной и имеет законченную форму. Она включает в себя нахождение исходной инструментальной поверхности и формообразование его рабочих поверхностей.

В качестве примера рассмотрим одну из схем изготовления зубчатых колес «фрезерование – шевингование – термообработка» (рис. 1.1), по которой изготавливают зубчатые колеса не выше восьмой степени точности.

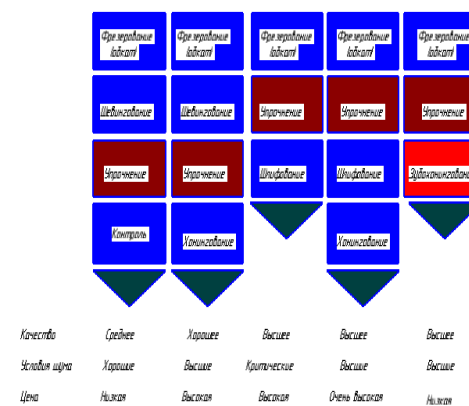


Рис. 1.1. Современные технологические процессы изготовления зубчатых колес

Схема «фрезерование – шевингование – термообработка – хонингование» не получила широкого применения в СНГ. Схема «фрезерование – термообработка – шлифование» применяется в станкостроении и при изготовлении специальных зубчатых колес. Две наиболее современные схемы: «фрезерование – термообработка – силовое хонингование» и «фрезерование – термообработка – шлифование – хонингование» практически не применяются

изготовителями массовых зубчатых колес в СНГ. Причина такого отставания технологий изготовления зубчатых колес в СНГ от зарубежных связана с отсутствием необходимого оборудования.

В СНГ имеются отдельные изготовители отдельных станков и инструментов, которые не в состоянии предложить комплект всего зубообрабатывающего оборудования, инструментов, средств контроля и средств механизации так, как сегодня предлагают фирмы Gleason, Liebherr, Samputensili (ZN 125 (200...), LCC, K 300 и др.)

Для снижения уровня шума в современных технологических процессах эффективно применяется силовое зубохонингование охватывающим хонем (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Силовое зубохонингование охватывающим хонем

Силовое зубохонингование охватывающим хонем осуществляется путем синхронизированного вращения хона и обрабатываемого зубчатого колеса, хон выполняется в виде зубчатого колеса с внутренними зубьями.

В результате применения силового зубохонингования охватывающим хонем достигается эффективное снижение шума, устраняются следы предыдущих обработок, улучшается текстура поверхности и гарантируется шероховатость  $Ra < 0,3$  мкм, обеспечиваются высокие остаточные сжимающие напряжения до  $800...1200$  Н/мм<sup>2</sup>, повышается износостойкость и сопротивление к микропиттингу.

Силовое зубохонингование может эффективно заменять зубошлифование при необходимости обеспечения 5...7 качества точности по DIN (рис. 1.3).

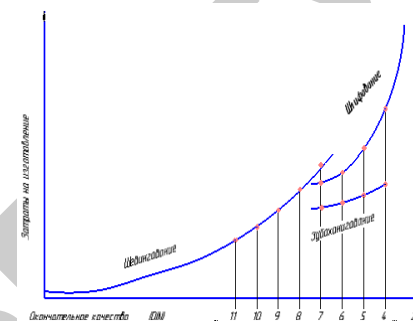


Рис. 1.3. Результаты применения силового зубохонингования

Припуск под зубохонингование составляет не более 0,04...0,08 мм на сторону, обороты хона достигают 1000 в минуту. Время зубохонингования составляет 30...50 с.

Охватывающий хон может изготавливаться как металлическое зубчатое колесо с внутренними зубьями с нанесением слоя CNB, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, алмазов или их различных сочетаний гальваническим покрытием, как цельное зубчатое колесо из синтетического корунда на эпоксидной основе, из корунда на специальной керамической связке, многокомпонентное из различных абразивных материалов.

Многокоординатная обработка является перспективным методом изготовления деталей сложной формы. На рис. 1.4 показаны примеры деталей с криволинейными поверхностями.

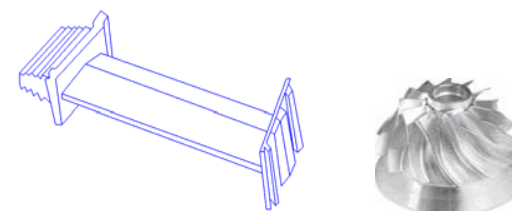


Рис. 1.4. Примеры деталей с криволинейными поверхностями

Описание сложнопрофильных поверхностей таких деталей производится сплайн-методами, что позволяет применять CAD/CAM-моделирование для адекватного управления станочной системой.

Такие детали могут быть обработаны на станках с многокоординатной кинематикой и элементами, расширяющими их формообразующие возможности за счет изменения угловой ориентации взаимодействующих компонентов – инструмента и заготовки. Для этого многокоординатный станок оснащается специализированными изменяемыми элементами – высокотехнологичной оснасткой в виде глобусных столов или поворотных инструментальных головок. Для управления формообразованием и точностью многокоординатных станков требуется разработка методов аналитического описания криволинейных поверхностей сложных деталей. Для автоматизации программирования обработки сложных деталей на станках с ЧПУ необходимо развитие и совершенствование метода описания геометрической информации на основе аналитических сплайн-функций.

Представленные детали обрабатываются при помощи контурного фрезерования, которое является в настоящее время наиболее производительным и точным методом изготовления деталей криволинейного профиля. Характерной особенностью процесса контурного фрезерования является криволинейная траектория движения геометрического центра инструмента [2]. Обеспечение такой траектории движения возможно лишь постоянным изменением скоростей подач по координатным осям, сопровождаемым динамическим воздействием со стороны сил инерции, представляющих собой противодействие материальной точки изменению ее скорости. Таким образом, можно сделать вывод, что контурное фрезерование всегда сопровождается действием сил инерции, влияние которых можно оценить, рассмотрев динамику процесса.

Процесс контурного фрезерования предусматривает относительные движения заготовки и инструмента, которые определяют изменение величин координатных скоростей, вызывающее дополнительные динамические возмущения, которые, в свою очередь, оказывают влияние на окончательную точность обработки.

Таким образом, для описания более точной картины формирования точности обработки криволинейной поверхности на фрезерном станке с ЧПУ необходимо дополнительно рассмотреть процесс контурной обработки как динамический и выявить влияние текущей кривизны контура на точность обработки. На современном этапе актуальной задачей становится разработка и управление тех-

нологическим процессом на основе трехмерного представления изделия. Причем в данном случае речь идет о полной автоматизации технологического проектирования, в основу которого положена трехмерная математическая модель изделия, полученная из конструкторских подразделений. Главная особенность трехмерных моделей заключается в том, что внутри математического описания формы модели содержатся данные о структуре изделия в целом и отдельных деталей как набора поверхностей или элементов формы.

На сегодняшний день многие автоматизированные системы проектирования предоставляют возможность конструктору создавать математические модели деталей и изделий в виде параметрических трехмерных моделей. Среди таких систем можно отметить известные на мировом рынке программные продукты Unigraphics, Catia, Pro/Engineer, SolidWorks. Из российских систем параметрические возможности при трехмерном моделировании лучше всего реализованы в T-FLEX CAD.

Как правило, контур используемых на операциях фрезерования криволинейных поверхностей заготовок не совпадает по форме с контуром готовой детали. Причем это различие может быть весьма существенным. Это предопределяет изменение припуска на обработку вдоль контура в широких пределах, что приводит к постоянному изменению сил резания, и как следствие, возникновению погрешности обработки. В настоящее время выбор режимных параметров процесса контурной обработки производится без учета возможного динамического воздействия, обусловленного кривизной контура. Это приводит к значительным погрешностям обработки (особенно на чистовых переходах), вследствие смещения расчетной траектории движения инструмента.

На рис. 1.5 изображена схема реализации черновой обработки линзообразного участка поверхности.

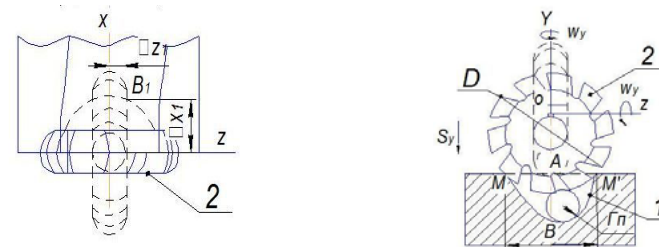


Рис. 1.5. Схема черновой обработки линзообразного участка поверхности детали



Пример способа винтового черного фрезерования фасонных [3] поверхностей представлен на рис. 1.5. Он включает использование инструмента с тороидальной производящей поверхностью, которому сообщают три одновременных движения подачи, два из которых поступательные, которые осуществляют нормально и параллельно к базисной плоскости и согласуют с возвратно-вращательным движением подачи в базисной плоскости для периодического касания инструментом обрабатываемой поверхности одновременно в двух точках на противоположенных сторонах профиля. В моменты касания возвратно-вращательное движение реверсируют. Для повышения производительности возвратно-вращательное движение подачи, главное движение фрезы и движение подачи, нормальное к базисной плоскости, устанавливают в соответствии с приведенными соотношениями.

Для повышения производительности при черновой обработке возвратно-вращательное движение подачи  $\omega_Y(n_Y)$ , главное движение фрезы  $\omega_V(n_V)$  и движение подачи  $S_Y$ , нормальное к базисной плоскости, устанавливают со следующими соотношениями:

$$\omega_Y = \frac{\omega_V Z S_3}{2\pi R_x} \quad (1.1)$$

$$n_Y = \frac{n_V Z S_3}{2\pi R_x} \quad (1.2)$$

$$S_Y = S_{Y3} Z \cdot 2^{\pi\omega} V = 4^{\pi} t^{\omega} Y, \quad (1.3)$$

где  $Z$  – число зубьев дисковой радиусной фрезы;

$S_3$  – максимальное значение подачи на зуб при черновой обработке, мм/зуб;

$R_x$  – максимальное расстояние от оси ОУ, мм;

$S_{Y3}$  – подача на зуб стола станка вдоль оси ОУ, мм/зуб;

$S_Y$  – подача стола станка вдоль оси ОУ, мм/мин;

$t$  – максимальная возможная глубина резания для фасонной фрезы, полукруглого профиля  $t = (0,8...0,9) r$ , мм;

$r$  – радиус тороидального участка профиля инструмента, мм;

$n_Y$  – число оборотов стола станка вдоль оси ОУ, об/мин;

$n_V$  – число оборотов шпинделя, об/мин;

$\omega_V = 2^{\pi} \cdot n_V$ , рад/мин;

$\omega_Y = 2^{\pi\omega} \cdot n_Y$ , рад/мин.

Предлагаемый способ позволяет вести черновую обработку за счет определенного соотношения между величинами формообразующих движений.

Обработку производят на четырех координатных станках с ЧПУ, фрезерных или шлифовальных, с вращательным движением стола с заготовкой, имеющей заданный профиль  $l$ . Инструменту сообщают главное движение  $\omega_V$ , подводят до касания с заготовкой в точке, равноудаленной от противоположенных сторон профиля, после этого инструменту задают два движения подачи  $S_Y$  вдоль оси ОУ и  $\omega_Y$  вокруг оси ОУ. В результате вырабатывается припуск линзообразной формы до касания инструментом противоположных сторон профиля в точках М и М'. Далее инструменту сообщают дополнительное движение подачи, причем его согласуют с двумя движениями  $S_Y$  и  $\omega_Y$ . Таким образом, инструмент, совершая возвратно-вращательное движение подачи вокруг оси ОУ от одной до другой стороны профиля и постоянно опускаясь к дну канавки по оси ОУ до точки В, имеющей радиус профиля  $r$ , полностью обрабатывает профиль в данном сечении. Для обеспечения построчной подачи в конце прохода инструменту сообщают два дискретных перемещения вдоль осей ОZ и ОX –  $\delta_{z1}$  и  $\delta_{x1}$ .

Так как за один оборот инструмента вокруг оси ОZ его режущая кромка перемещается на угол  $\phi_Z$ , равный  $2\pi$  радиан, за это же время  $\tau$  вокруг оси ОУ инструмент поворачивается на угол  $\phi_Y$ , выраженный в радианах:

$$\phi_Y = \frac{Z S_3}{R_x}, \quad (1.4)$$

поскольку:

$$\frac{\omega_V}{\omega_Y} = \frac{\phi_Z \tau}{\phi_Y \tau} = \frac{2\pi R_x}{Z S_3}, \quad (1.5)$$

то:

$$\omega_Y = \frac{\omega_V Z S_3}{2\pi R_x}.$$

Следовательно:

$$n_Y = \frac{n_V Z S_3}{2\pi R_x}. \quad (1.6)$$

За половину оборота инструмента таким образом, максимальная глубина резания  $t$  при черновой обработке будет обеспечиваться за 0,5 оборота инструмента вокруг оси ОУ. При этом количество резов фрезы  $K$  в направлении оси ОУ:

$$K = \frac{1}{S_{Y3}},$$

где  $S_{Y3}$  - подача на зуб в направлении оси ОУ. За то же время  $K$  равно количеству резов половины периметра линзообразного участка

$$K = \frac{\pi R_x}{S_3}.$$

Таким образом:

$$\frac{t}{S_{Y3}} = \frac{\pi R_x}{S_3}.$$

Отсюда:

$$S_{Y3} = \frac{t S_3}{\pi R_x}.$$

Следовательно:

$$S_3 = \frac{\omega_Y 2\pi R_x}{\omega_V Z}.$$

После подстановки получим:

$$S_{Y3} = \frac{2t\omega_Y}{\omega_V Z}; \quad (1.7)$$

$$S_Y = S_{Y3} Z 2^{\pi\omega},$$

где  $S_Y$  – минутная подача (мм/мин) в направлении оси ОУ.

Такое же соотношение между скоростями подачи и главным движением должно обеспечиваться и на участках, обрабатываемых с возвратно-вращательным движением с той лишь разницей, что угол, определяющий точки реверсирования, зависит от подачи  $S_Y$  и  $S_Z$ .

Однако этот способ не может быть использован для чистовой обработки фасонных поверхностей, поскольку не установлены соотношения между поступательным движением подачи  $S_Y$ , возвратно-вращательным движением подачи  $\omega_Y$  и главным движением инструмента  $\omega_V$ , которые определяют максимальную производительность процесса, требуемую для чистовой обработки.

Другой способ финишной обработки поверхностей вращения деталей, преимущественно цилиндрических поверхностей шеек колеччатых валов, при котором установленной на токарном станке детали придают вращение относительно оси обрабатываемой поверхности со скоростью окружной подачи [4]. Фрезерный инструмент устанавливается перпендикулярно к образующей обрабатываемой поверхности, сообщают ему вращение относительно собственной оси со скоростью резания и обеспечивают ему возможность поступательного перемещения вдоль образующей обрабатываемой поверхности со скоростью продольной подачи (рис. 1.6)

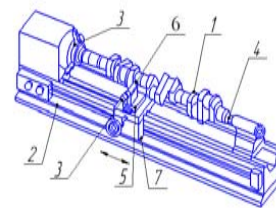


Рис. 1.6. Способ финишной обработки поверхностей вращения деталей

Для этой цели используют универсальный токарный станок 2. Коленчатый вал 1 крайними коренными шейками устанавливают соответственно в патроне 3 и центре 4 задней бабки станка 2, и центрируют относительно осей вращения коренных шеек. Далее на суппорте 5 станка 2 закрепляют шпиндельную головку с торцово-шаберной фрезой 6. Установка фрезы 6 предусматривает ориентацию оси ее вращения в положение, которое должно быть перпендикулярным образующей цилиндрической поверхности обрабатываемой шейки вала 1, а также иметь смещение оси вращения относительно образующей в тангенциальном направлении на величину «е», которая определяется в зависимости от диаметра обрабатываемой шейки. В последующем передней бабкой станка 2 сообщают вращение коленчатому валу 1 со скоростью окружной подачи, а фрезу 6 приводом шпиндельной головки вращают со скоростью резания. При этом радиальная подача фрезы 6 с необходимым врезанием на установленный припуск, как и продольная ее подача, вдоль образующей цилиндрической поверхности шейки вала 1 обеспечиваются суппортом 5 и кареткой 7 станка 2. В процессе обработки за счет смещения оси вращения фрезы 6 производится механическое шабрение обрабатываемой поверхности по прерывистой винтовой линии. Вследствие этого поверхность, обработанная таким образом, представляет собой совокупность прерывистых винтовых линий, которые чередуются между собой и взаимно пересекаются. Ширина таких линий определяется формой шаберной пластинки фрезы 6, а также размером ее режущей кромки, углом наклона и глубиной резания. Тем самым полученная после обработки поверхность представляет собой сетчатую приближенно ромбическую структуру из микролунок, как и классический рисунок после обработки традиционным шабером.

Достаточно эффективно решая задачу интенсификации процесса резания, обработка практически не изменяет характер микрорельефа обработанной поверхности. Микронеровности на ней располагаются по винтовой незамкнутой линии с незначительным ( $1...3^\circ$ ) углом подъема, что создает условия для непродуктивного вывода части смазки (круговой оборот смазки без образования полноценного гидродинамического клина) и бокового вывода смазки из зоны трения при вращении обработанной поверхности во вкладыше подшипника скольжения. Кроме того, после выглаживания поверх-

ности, т.е. вследствие пластической деформации поверхностного слоя значительно сокращается площадь микровпадин, не удерживая смазку, что снижает способность поверхностного слоя противостоять износу при работе в паре трения.

Способ обработки цилиндрических зубчатых колес с круговой или арочной формой зуба шевингованием-прикатыванием [5], включающий свободный обкат инструмента. Данный инструмент имеет режущие кромки, смещенные по винтовой поверхности обрабатываемого колеса. При этом зацепление инструмента с обрабатываемым колесом выполняют внеполюсным. Обработку ведут с периодической радиальной подачей после каждого из  $2...4$  рабочих циклов, включающих поворот инструмента в прямом и обратном направлениях. Количество оборотов равно числу зубьев обрабатываемого колеса. Радиальная подача происходит в течение  $1...2$  циклов выхаживания, включающих поворот инструмента в прямом и обратном направлениях на количество оборотов, равное числу зубьев обрабатываемого колеса. При этом используют инструмент, число зубьев которого не имеет общих множителей с числом зубьев обрабатываемого колеса кроме единицы.

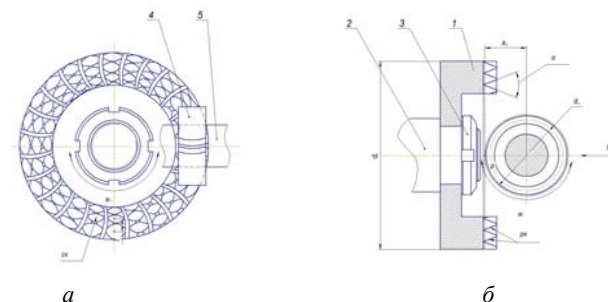


Рис. 1.7. Схема способа обработки цилиндрических зубчатых колес шевингованием-прикатыванием: а – главный вид, б – вид сбоку

На рис. 1.7 изображена схема способа обработки цилиндрических зубчатых колес шевингованием-прикатыванием. Инструмент 1 выполнен в виде плоского производящего колеса, установленного на цилиндрическую оправку 2, и жестко закреплен на ней гайкой 3. Заготовка-колесо 4 установлена свободно на цилиндрическую оправку 5.

Способ обработки цилиндрических зубчатых колес шевингованием-прикатыванием пригоден для обработки заготовки-колеса с предварительно формообразованными высокопроизводительными методами: литья, пластического деформирования, механической обработки и др. зубьями.

Заготовку-колесо 4 устанавливают свободно на цилиндрическую оправку 5 и вводят в плотное (беззазорное по боковым сторонам) зацепление с инструментом 1. После чего инструменту 1 сообщают вращательное движение – движение обката в прямом и обратном направлениях с установленной угловой скоростью. Указанное движение является рабочим потому, что при нем осуществляется срезание тонких слоев стружки и выглаживание боковых поверхностей зубьев заготовки-колеса 4 за счет профильного скольжения режущих кромок инструмента 1 по боковым поверхностям зубьев заготовки-колеса 4. Обработка боковых поверхностей зубьев по всей их длине обеспечивается при соблюдении двух условий: во-первых, наличием режущих кромок, смещенных на соседних зубьях инструмента 1 друг относительно друга, образованных в результате пересечения боковых поверхностей его зубьев с винтовыми поверхностями стружечной канавки; во-вторых, отсутствием общих множителей чисел зубьев инструмента и обрабатываемой заготовки-колеса 4. Формообразование боковых поверхностей зубьев обрабатываемой заготовки-колеса 4 совершается за количество оборотов инструмента 1, равное числу зубьев обрабатываемой заготовки-колеса 4. Далее производят врезание - сближение пересекающихся под углом  $90^\circ$  осей инструмента 1 и заготовки-колеса 4, с прерывистой подачей  $S$  на величину  $0,03...0,05$  мм. За полный цикл обработки, для удаления всего припуска с боковых поверхностей зубьев заготовки-колеса 4 необходимо осуществить от двух до пяти рабочих циклов. При достижении номинального межосевого расстояния  $a_n$  подачу врезания  $S$  прекращают.

Однако для повышения качества обработки после окончания рабочих циклов необходимо осуществлять выхаживание – вращение инструмента в прямом и обратном направлениях. Это должно производиться на номинальном межосевом расстоянии и на пересекающихся под углом  $90^\circ$  осях, что приводит к росту трудоемкости и себестоимости процесса.

Способ обработки моноколеса газотурбинного двигателя концевыми фрезами на станках с ЧПУ [6], включающий черновую обработку, при которой прорезают межлопаточные пазы в радиальном направлении, и чистовую обработку, при которой фрезеруют профиль пера лопатки по высоте. При черновой обработке межлопаточные пазы прорезают таким образом, чтобы каждый паз имел переменную ширину, уменьшающуюся в направлении ступицы моноколеса. Полученный при этом профиль пера лопатки имеет пирамидально-распределенный припуск, увеличивающийся в направлении ступицы моноколеса, причем перед чистовой обработкой профиль пера лопатки с пирамидально-распределенным припуском условно разделяют по высоте (рис. 1.8).

Предварительно обработанную заготовку моноколеса ГТД, выполненную в виде кольца, устанавливают на приспособление для обработки, которое крепят на столе многоцелевого обрабатывающего центра. Стол перемещается по направляющим и имеет возможность поворота на  $360^\circ$ . Обработку проточной части моноколеса осуществляют фрезой, которая, вращаясь вокруг собственной оси со скоростью резания, перемещается в трех осях: X, Y, Z.

Перед началом черновой обработки задают величину припуска 1 по торцу 2 лопатки и по ступице 3 моноколеса. Величина припуска 1 по торцу 2 лопатки 4 задается минимально возможной и учитывает деформацию лопатки 4 после черновой обработки и операции термообработки.

При черновой обработке прорезают межлопаточные пазы в радиальном направлении таким образом, чтобы каждый паз имел переменную ширину, уменьшающуюся в направлении ступицы 3 моноколеса, а полученный при этом профиль пера лопатки 4 имел пирамидально-распределенный припуск, увеличивающийся в направлении ступицы 3 моноколеса. При этом каждый паз обрабатывается последовательно по каждому уровню 5 (впадине) между лопатками 4 на моноколесе, начиная с первого уровня 5 и до n-го уровня 5. Обработка выполняется до тех пор, пока межлопаточное пространство не будет полностью освобождено на всю глубину до ступицы в радиальном направлении.

Глубина каждого паза зависит от применяемого инструмента и возможности доступа в зону обработки. Ширина каждого уровня 5 паза зависит от конструкции лопаток 4 и величины припуска 1, задан-

ного на лопатке 4 для данного уровня. Ширина каждого последующего уровня 5 паза меньше ширины предыдущего уровня 5, уменьшение ширины обрабатываемых пазов 5 формирует по высоте лопатки 4 неравномерное (пирамидальное) распределение припуска 1.

Перед чистовой обработкой полученный профиль пера лопатки 4 с пирамидально распределенным припуском 1 условно разделяют по высоте на 2...4 участка. Фрезерование профиля пера лопатки 4 осуществляют путем последовательной обработки каждого из участков лопатки 4. Обрабатывая первый участок, сначала выполняют выравнивание припуска 1 первого участка 5 пера лопатки 4 до получения припуска, равномерно распределенного, эквидистантного по профилю пера лопатки 4. Черновой припуск на лопатке 4 по высоте оставшихся частей, который увеличивается к ступице 4, обеспечивает необходимую жесткость при обработке. При обработке по высоте лопатки 4 получается ступенчатое продольное сечение, которое постепенно обрабатывается по частям. Фрезерование частей выполняют последовательно для всех лопаток 4 моноколеса, переходя от одной части на следующую. При фрезеровании последующей части поверхности лопатки 4 предшествующие части не обрабатываются. После чистового фрезерования пера лопатки 4 по всей высоте выполняют чистовую обработку ступицы 3 и сопряженного радиуса между ступицей 3 и лопаткой 4.

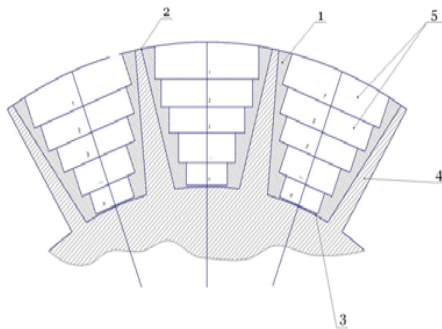


Рис. 1.8. Способ обработки моноколеса газотурбинного двигателя

Недостатком способа является то, что при чистовой обработке лопаток с небольшой толщиной и большой высотой пера возникают упругие отгибы и вибрации от сил резания при фрезеровании. Упру-

гие отгибы пера лопатки снижают точность обработки и искажают теоретический профиль пера лопатки. Вибрации, возникающие при обработке, повышают шероховатость поверхностей пера лопаток, а также могут проявляться в виде глубоких волнообразных дроблений, требующих ручной слесарной зачистки. Также вибрации при обработке снижают стойкость используемого инструмента.

Способ обработки сложных фасонных поверхностей, включающий сообщение инструменту в виде тела вращения с криволинейной производящей поверхностью одновременно трех согласованных движений, лежащих в одной плоскости профилирования. Одно из движений является вращательным в плоскости образующей инструмента и два – поступательными движениями [7]. Используют инструмент с производящей поверхностью в виде тора, а вращательное движение инструмента согласуют с двумя поступательными с обеспечением касания инструмента в каждой точке обрабатываемой поверхности. При этом инструменту задают возвратно-качательные движения вокруг центра профильного сечения тороидальной поверхности инструмента из условия обеспечения при перемещении по профилю обрабатываемой поверхности качательных движений в пределах максимально возможного угла, обеспечивающего использование максимально возможной длины режущей кромки, и из условия качания инструмента в пределах угла, обеспечивающего неврезание инструмента в заготовку на ее необрабатываемых участках.

Обработка профиля поверхности осуществляется инструментом в виде тела вращения с тороидальной производящей поверхностью. Обработку производят на станке с ЧПУ (фрезерном или шлифовальном) с вертикальной или горизонтальной осью вращения шпинделя и с вертикальной осью вращения стола с одновременным программным управлением по четырем координатам. Инструменту сообщают главное движение  $D_r$ , подводят к заготовке, используя перемещения по оси  $X_1$  и  $Y_1$  таким образом, чтобы инструмент совершил радиальное врезание до касания тороидального профиля инструмента начальной точки  $A_1$  профиля обработанной поверхности, т.е. в точке начала качательного движения. Затем заготовке сообщают три одновременно согласованных движения подачи  $D_s(m_{z1})$ ;  $D_s(x_1)$ ;  $D_s(y_1)$  таким образом, чтобы инструмент последовательно касался обрабатываемого профиля в точках  $A_2$ ,  $A_3$ , одновре-

менно перекатываясь вокруг центра  $O$  профильного сечения тороидальной поверхности инструмента против часовой стрелки на угол, определяемый с одной стороны нормальными условиями резания, которые в этом случае характеризуются предельным положением режущей кромки. В точке  $A_3$  вращательное движение  $D_s(m_{z1})$  реверсируют, одновременно продолжая согласованные движения подачи  $D_s(x_1)$ ;  $D_s(y_1)$  по профилю.

При моделировании траектории относительного движения инструмента необходимо точно рассчитывать возможные углы поворота инструмента, как по часовой стрелке, так и против нее, которые зависят от положения инструмента на профиле и глубины резания  $t$ , и определяются следующими условиями: с одной стороны, использованием максимально возможной длины режущей кромки, а с другой – неврезанием звеньев инструментального блока в необрабатываемые участки заготовки.

На рис. 1.9 изображена схема последовательных этапов обработки сложной криволинейной поверхности.

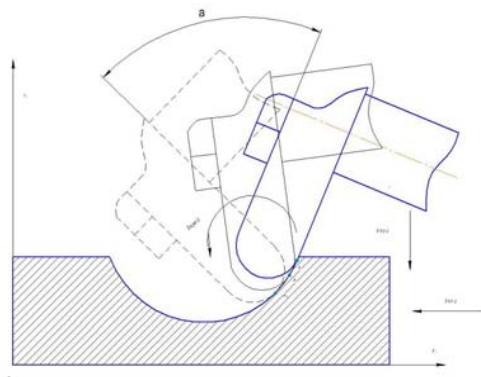


Рис. 1.9. Схема последовательных этапов обработки сложной криволинейной поверхности

Таким образом, для лезвийного инструмента требуется либо изготавливать инструмент со сложным профилем, либо осуществлять сложные кинематические движения при обработке, что не позволяет в значительной мере повысить качество многих изделий.

## 1.2. Обработка поверхностей абразивным инструментом

### 1.2.1. Абразивная обработка жестко-связанным, свободным и подвижно-скоординированным зерном

Абразивную обработку поверхностей можно разделить на обработку жестко-связанным, свободным и подвижно-скоординированным зерном.

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 значения. Способность электромагнитного поля интерферировать, т. е., взаимодействуя, усиливать или ослаблять сцепление частиц абразивного порошка между собой, а также изменять их давление на обрабатываемую поверхность детали, создает возможность объединения в одном рабочем цикле черновой, чистовой и финишной операций. При взаимодействии частиц механической связки интерференции не наблюдается и изменение давления абразивного инструмента на обрабатываемую поверхность осуществляется дискретно механизмами станка.

Для обоснования необходимости исследования метода магнитно-абразивной обработки поверхностей и определение места, которое может занять данный метод в технологических процессах изготовления деталей, необходимо сопоставить этот способ с известными методами механической обработки, которые в общем случае могут быть использованы для отделочной обработки наружного профиля деталей. К числу таких методов можно отнести: шлифование, суперфиниширование, доводка, полирование и др.

В настоящее время наибольшее распространение имеет абразивная обработка связанным зерном абразивного порошка, обеспечивающая высокую производительность и точность детали  $tq$  и возможность обработки высокотвердых материалов.

Шлифование – процесс тонкого скоростного микрорезания, применяется как отделочная операция и позволяет получать детали 8...6 квалитетов точности с шероховатостью  $Ra$  0,32...0,63 мкм. Современное оборудование дает возможность после шлифования получать детали по 5 квалитету точности с шероховатостью рабочих поверхностей  $Ra$  0,08...0,16 мкм при исходной шероховатости  $Ra$  0,63...1,25 мкм, полученной предварительным шлифованием. На (рис. 1.10) показана схема шлифованием кругом.



Рис. 1.10. Схема сложнопрофильного шлифования

При шлифовании твердых сплавов в поверхностном слое возникают высокие остаточные напряжения, растяжения и появляются микротрещины. В работе [8] установлено, что трещины могут достигать глубины 0,1...0,5 мм. Образовавшиеся микротрещины являются следствием больших растягивающих напряжений, возникающих при больших температурах в зоне контакта круга и заготовки. Для сплавов ВК 8 и ВК 15 обнаружено также снижение до 2 раз предела прочности при изгибе по сравнению с первоначальным.

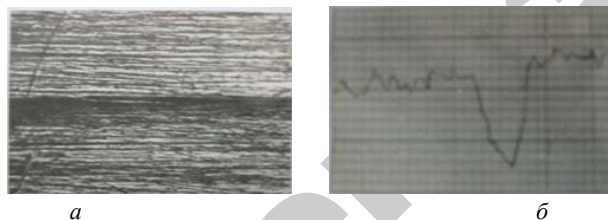


Рис. 1.11. Дефекты поверхностного слоя после шлифования: а – трещина; б – профилограмма

Процесс шлифования сопровождается высокими температурами (1373...1673 °С), возникающими в зоне контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью [9]. Это существенно изменяет структурное и напряженное состояние металла в поверхностном слое, вследствие чего происходит образование прижогов и адгезии на поверхности обрабатываемого металла. При этом около 80 % выделяющегося тепла поглощается поверхностью детали. Поэтому температурное воздействие при шлифовании оказывает доминирующее влияние на формирование свойств поверхностного слоя [10]. Это обуславливает широкое применение различных составов СОТС и способов подачи их в зону обработки [11].

Повышению качества обрабатываемых поверхностей способствует шлифование кругами на бакелитовой связке с графитовым наполнителем, а также алмазное и эльборное шлифование. Эти виды шлифования при более высокой производительности позволяют достигать шероховатости, соответствующей  $Ra$  0,04...0,08 мкм, и получать детали с высокими физико-механическими характеристиками поверхностного слоя [12,13].

Отсутствие карманов для сбора и последующего удаления из зоны резания стружки диспергированного материала вызывает засаливание абразивного инструмента, снижение эффективности шлифования и является дополнительным источником повышения температуры изделия. Эффект засаливания абразивного инструмента наиболее часто имеет место при шлифовании вязких материалов и сталей до их термической обработки. Возникновение вокруг вращающегося с большой скоростью шлифовального круга плотных потоков воздуха затрудняет доступ смазывающе-охлаждающей жидкости в зону контакта инструмента и изделия.

При обработке сложнопрофильных поверхностей вращения используют профильные шлифовальные круги, которые обеспечивают обработку всех взаимосвязанных поверхностей фасонного профиля детали. Однако профильное шлифование, как правило, требует применения специального оборудования, а также повышенного качества профильных шлифовальных кругов. Эти круги должны иметь высокую способность сохранять свою первоначальную геометрическую форму. Правка таких кругов является самостоятельной частью производственного процесса. Она ведет к расходу абразивного и правящего инструмента, износу технологического оборудования и снижа-

ет технико-экономические показатели процесса обработки. Шероховатость поверхности, достигаемая профильным шлифованием, обычно соответствует  $Ra\ 0,32 \dots 0,63$  мкм [14].

Таким образом, профильное шлифование не обеспечивает тонкую финишную обработку наружных сложнопрофильных поверхностей вращения. Применение его связано со значительными материальными затратами, требует использования специального оборудования, изготовления фасонных шлифовальных кругов или блоков, частой их правки.

В ряде отраслей промышленности широкое применение в качестве финишной операции нашло тонкое шлифование, которое позволяет достигать высокую чистоту обработанных поверхностей в сочетании с хорошими физико-механическими свойствами. Осуществляется мелкозернистыми кругами, которые дают возможность при невысоких скоростях резания (14...22 м/с) получать малую шероховатость поверхностей деталей. Увеличение скорости резания вызывает обильное выделение тепла и приводит к снижению микротвердости обработанной поверхности, а также увеличению вероятности появления шлифовочных прижогов [15].

Применение алмазных и эльборовых кругов на операциях тонкого шлифования позволяет снижать достигаемую в результате обработки шероховатость поверхности до  $Ra\ 0,04 \dots 0,08$  мкм и получать более высокие физико-механические свойства поверхностного слоя. Тонкое шлифование обеспечивает высокую точность обработки (6, 5 квалитеты точности), однако для этого необходимо использовать станки повышенной жесткости и периодически производить тонкую правку кругов.

Применение тонкого шлифования на операциях финишной обработки деталей является трудоемким и малопродуктивным процессом, так как требует предварительной обработки деталей, точного их базирования на станке, тонкой правки шлифовальных кругов.

Шлифование гибкими (эластичными) кругами применяется, как правило, в качестве промежуточной операции между обычным шлифованием и полированием. Круги изготавливают на резиновой связке с добавлением искусственных смол (рис. 1.12). Главным преимуществом гибких кругов является то, что податливость связки позволяет выравнивать глубины резания отдельными абразив-

ными 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 [16]. 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  $Ra\ 0,32$  мкм при исходной высоте микронеровностей  $Ra\ 0,63 \dots 1,25$  мкм.

Однако обработка требует предварительного шлифования деталей и не дает возможности получать шероховатость ниже  $Ra\ 0,32$  мкм вследствие того, что гибкий круг непрерывно работает в режиме резания.



Рис. 1.12. Фотография гибкого шлифовального круга

Широкое распространение при обработке наружных поверхностей цилиндрических деталей получило суперфиниширование.

Суперфиниширование – процесс отделочной обработки наружных поверхностей деталей мелкозернистыми брусками, упруго прижатыми к обрабатываемой поверхности с небольшим давлением (0,20...0,40 МПа) и совершающими колебательные движения относительно вращающейся детали [17, 18]. Обработка происходит в пределах высоты микронеровностей без существенного изменения размеров (рис. 1.13).





Рис. 1.13. Фотография процесса суперфиниширования

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 операциях, предшествующих финишной.

Суперфиниширование позволяет получать точность в пределах 6...5 квалитетов, а шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  0,08...0,16 мкм, если она предварительно шлифована до  $Ra$  0,32...0,63 мкм. Детали имеют значительно большую, чем при шлифовании, фактическую площадь опорной поверхности (до 95 %). Вследствие сложной траектории движения абразивных брусков, на обработанной поверхности образуется плотная сетка неровностей.

Незначительные тепловыделения, сопровождающие процесс суперфиниширования, включают структурные изменения в поверхностном слое деталей и обеспечивают формирование в нем остаточных напряжений сжатия, что способствует повышению износостойкости деталей.

В качестве СОТС при суперфинишировании чаще всего используют смесь керосина (85...90 %) с веретенным маслом (10...15 %). Обработка деталей из труднообрабатываемых материалов осуществляется алмазными брусками.

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 квалитетов точности обработанных поверхностей необходима предварительная обработка деталей шлифованием и высокая степень очистки СОТС.

Одним из методов высокоточной отделочной обработки поверхностей деталей является доводка [19].

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. В качестве рабочей жидкости обычно используют смесь керосина с машинным маслом.

Притиркой могут обрабатываться плоские, цилиндрические, сферические, конусные и другие фасонные поверхности деталей. В зависимости от формы и размеров обрабатываемой поверхности деталей выбирается конструкция и форма притиров.

В качестве материала для изготовления притиров может применяться чугун, сталь, латунь, медь, стекло и пр. Материал притира должен быть мягче материала обрабатываемой детали, быть износостойким и хорошо шаржироваться абразивными зёрнами.

В зависимости от состояния абразивных зёрен между притиром и деталью притирку можно разделить на два вида: притирка свободным абразивом (пастами и суспензиями) и связанным абразивом (шаржированные притиры, монолитные абразивные притиры) (рис. 1.14).



Рис. 1.14. Фотография притирки эндопротеза

Процесс доводки осуществляют обычно с постепенным переходом от более крупной пасты к более мелкой. Число переходов зависит от припуска на обработку, требуемой чистоты поверхности и точности изделий. Доводка дает возможность снизить шероховатость поверхности до  $Ra$  0,04...0,08 мкм, а при обработке алмазными пастами до  $Ra$  0,05...0,1 мкм и получать детали 6 квалитета точности. Исходная шероховатость при этом должна быть не выше  $Ra$  0,32...1,25 мкм, а точность соответствовать 6-му квалитету.

В процессе доводки, по данным [20], на обрабатываемой поверхности образуется мягкая, тонкая (0,014...0,02 мкм) пленка, которая при движении притира снимается с выступающих участков микропрофиля. Образование этой пленки обусловлено протекающими в зоне обработки химическими реакциями взаимодействия находящихся в абразивно-доводочной смеси веществ (главным образом серы) с обрабатываемой поверхностью. Этим объясняется эффективная обработка твердых закаленных сталей сравнительно мягкими чугунными притирами.

Процесс доводки протекает при низких температурах и сравнительно невысоких удельных давлениях, что дает возможность сохранить исходные физико-механические характеристики поверхностного слоя. Доводка может быть механизирована, но часто выполняется вручную.

Абразивная доводка может обеспечить точную и качественную обработку наружных поверхностей вращения сложного профиля. Однако детали предварительно должны быть обработаны с высокой точностью и иметь малую шероховатость поверхности. Сам процесс доводки является трудоемким, малопроизводительным, содержит, как правило, большой объем ручного труда, требует частой правки притиров для восстановления их исходной формы.

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

Полирование абразивными лентами позволяет получать высокую точность обработки и наиболее оптимальные характеристики шероховатости поверхности [21]. Обработка производится движущейся с высокой скоростью абразивной лентой. Контакт ленты с деталью осуществляется с помощью роликов. На (рис. 1.15) приведены примеры технологических операций ленточного шлифования для обработки различных деталей.

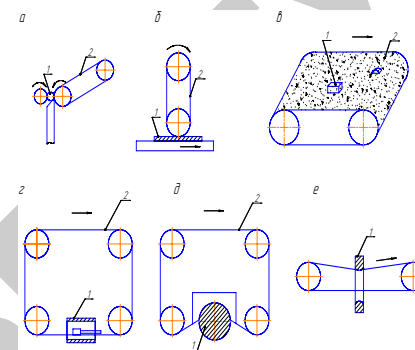


Рис. 1.15. Схема технологических операций ленточного шлифования:  
1 – деталь; 2 – абразивная лента

Для гладких цилиндрических деталей применяется бесцентровое ленточное шлифование (рис. 1.15, а). Широкие и плоские детали обрабатываются с подачей детали под контактными роликами (рис. 1.15, б), а мелкие – вручную на широком ленточном полотне (рис. 1.15, в). Возможна обработка и внутренних поверхностей труб (рис. 1.15, г), а также внутренних поверхностей колец свободной ветвью ленты (рис. 1.15, е). Шлифование различных шеек и цилиндрических участков производится лентой, прижимаемой жестким или упругим контролером (рис. 1.15, д).

Производительность процесса в основном зависит от удельного давления, скорости и ширины ленты, зернистости абразива, СОТС и размеров обрабатываемых деталей. Обычно обработку производят при давлении 0,055...0,075 МПа и скорости движения ленты 10...40 м/с. Наиболее рациональным является обработка в два этапа: на первом производится основной сьем металла крупнозернистыми лентами; на втором осуществляется доводка поверхностей до требуемой шероховатости лентами более мелкой зернистости. При этом шероховатость обрабатываемой поверхности снижается с  $Ra\ 0,63 \dots 1,25$  мкм до  $Ra\ 0,08 \dots 0,16$  мкм. Эффективность ленточного шлифования повышает СОТС, содержащие химически активные добавки. Однако часто обработку производят всухую, так как не все ленточно-шлифовальные станки приспособлены для работы с охлаждающими жидкостями. При обработке абразивными лентами развиваются меньшие силы резания и температура, чем при обработке шлифовальными кругами. Это позволяет получить обработанные поверхности с высокими эксплуатационными характеристиками (рис. 1.16).

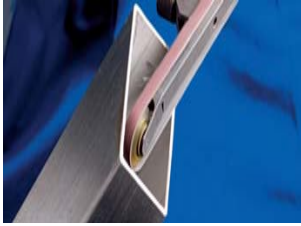


Рис. 1.16. Фотография процесса ленточного шлифования

Одним из основных преимуществ данного метода 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, а также прерывистое и реверсивное ленточное полирование, позволяющее повысить стойкость лент [9].

Однако и обработке абразивными лентами присущи недостатки при отделке наружных сложнопрофильных поверхностей, имеющих малые радиусы закруглений (прядильные и крутильные кольца). Абразивная лента обладает определенной упругостью, поэтому отдельные труднодоступные участки профиля остаются непрошлифованными. Это вызывает необходимость применения ручной дополировки, что снижает технико-экономические показатели процесса обработки.

### 1.3. Формообразование профиля режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке

Одним из перспективных методов обработки является метод магнитно-абразивной обработки [22]. Сущность метода MAO заключается в том, что обрабатываемой поверхности детали или ФАП с магнитными и абразивными свойствами, помещенному в магнитное поле, сообщают принудительное движение относительно друг друга. Съем металла осуществляется в результате силового воздействия порошка на поверхность детали. На результаты процесса MAO оказывают влияние следующие технологические фак-

торы: величина магнитной индукции, материалы ФАП и обрабатываемых деталей, величина рабочего зазора, скорость относительного движения порошка и детали, наличие движения осцилляции, состояние исходной поверхности (физико-механические свойства и микрогеометрические характеристики), наличие и вид смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС), величина зерен наполнителя. В результате анализа литературы и в ходе исследований [23–54] выявлены следующие особенности MAO: универсальность абразивного инструмента, что позволяет обрабатывать детали из различных материалов и конфигураций; возможность управления жесткостью инструмента и за счет этого регулирование съема металла с формообразующей поверхности изделия; возможность обработки одновременно большого числа деталей; резкое уменьшение, по сравнению со шлифованием, общей температуры резания (за счет отсутствия трения связки о поверхность изделия); упрочнение поверхностного слоя детали; возможность резания наиболее острой кромкой частиц магнитно-абразивного порошка (при этом отпадает необходимость периодической перезаточки режущей кромки инструмента); исключение засаливания инструмента, что позволяет полировать мягкие и вязкие материалы (медь, алюминий и др.); возможность отделения наполнителя от обрабатываемых изделий и отходов обработки; возможность механизации и автоматизации при обработке.

При магнитно-абразивной обработке инструментом является ФАП, который находится в рабочем зазоре в подвижно связанном состоянии. Роль связки между абразивными частицами порошка выполняет магнитное поле, обладающее упругими силами воздействия на частицы порошка, (рис. 1.17).

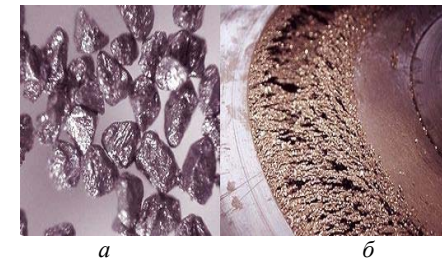


Рис. 1.17. Формообразование режущего инструмента при MAO: а – ферроабразивный порошок; б – ферроабразивная щетка

Данный метод прост в осуществлении, экологически чист, обеспечивает высокое качество обработанных поверхностей деталей и существенное повышение их сопротивляемости износу, коррозии и механическим нагрузкам, обладает высокой производительностью и успешно заменяет процессы химической и электромеханической обработки.

### 1.3.1. Способы и схемы МАО

Анализ исследований [55...61] показывает, что, по причине широкой применяемости магнитно-абразивной обработки в различных областях машиностроения, имеется большой объем конструкций устройств. Для реализации метода они представлены в широком диапазоне, в зависимости от номенклатуры обрабатываемых изделий.

Как и при любой механической обработке, важнейшим фактором, определяющим процесс, является относительное движение режущего инструмента и обрабатываемой поверхности. Структура аналитических моделей процесса магнитно-абразивной обработки сложных фасонных поверхностей, описывающих: *A* – рабочую зону технологической системы, *B* – области контакта компонентов рабочей технологической среды и *B* – поверхностный слой детали (рис. 1.18).

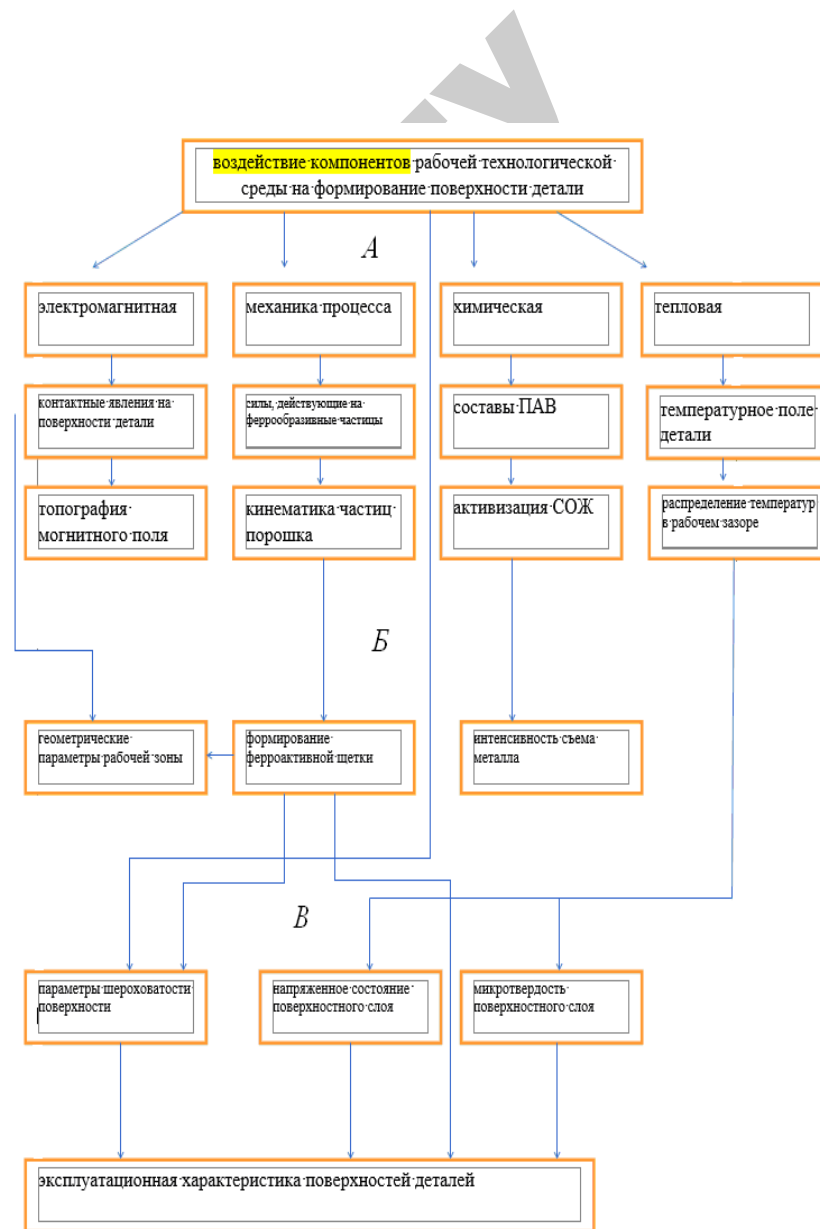


Рис. 1.18. Структура аналитических моделей процесса магнитно-абразивной обработки сложных фасонных поверхностей, описывающих: *A* – рабочую зону технологической системы; *B* – области контакта компонентов рабочей технологической среды; *B* – поверхностный слой детали

Наиболее простым примером осуществления МАО является схема для полирования наружных цилиндрических поверхностей (рис. 1.19).

Обрабатываемая деталь помещена в зазоре между полюсными наконечниками, намагниченными электрокатушкой или постоянными магнитами. В зазоре под действием поля формируется режущий инструмент из порошковой массы и оказывает давление на обрабатываемую поверхность детали, которая вращается относительно неподвижных полюсных наконечников. Для равномерной обработки детали или полюсным наконечникам сообщается осциллирующее движение. По этой схеме создан ряд устройств для обработки внутренних поверхностей [55], фасонных поверхностей.

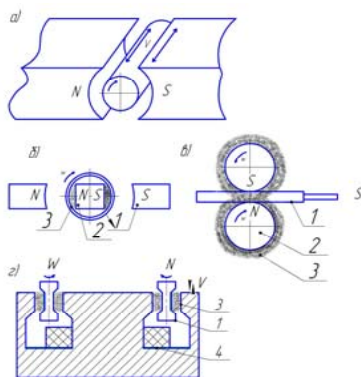


Рис. 1.19. Схемы МАО наружных цилиндрических, фасонных, плоских и внутренних поверхностей

Устройства с такой схемой обработки хорошо зарекомендовали себя для ферромагнитных валов, особенно больших диаметров. Валы из немагнитных материалов имеют ограничения по диаметру, т.к. магнитное сопротивление вала резко ослабляет поле.

Для обработки плоских поверхностей применяется схема с вращающимися полюсными наконечниками в виде барабанов (рис. 1.19, в). С этой схемой разработаны станки типа «Ферромаг» для полировки и зачистки листов и лент [56]. Так как рабочая зона ограничена малой областью между двумя барабанами, то производительность ограничена: скорость подачи обрабатываемой детали  $S_n - 2,0$  м/мин; снимаемый припуск за 1 проход 3...5 мкм.

Несмотря на это, станки получили применение, т.к. ширина обрабатываемой детали (длина полюсов) достигает 500 мм и обеспечивается хорошая равномерность съема по ширине.

В настоящее время широкое распространение получили схемы обработки с вращающимися полюсными наконечниками в форме чашек [56] (рис. 1.20). Основным преимуществом работы по схеме является большая скорость вращения полюсов, которая ограничена лишь центробежными силами. Она может достигать до 1400 об/мин, т.е. скорость резания до 300 м/мин. При этом режущий инструмент практически не зависит от материала и размеров обрабатываемой детали, так как формируется под действием поля между полюсными наконечниками с определенным зазором.

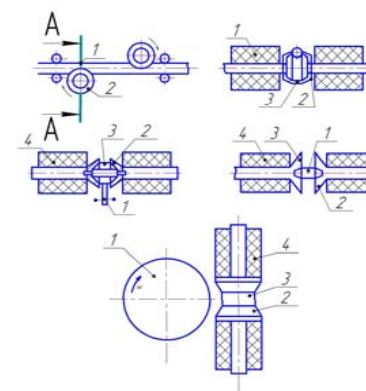


Рис. 1.20. Схемы МАО с вращающимися полюсными наконечниками: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – полюсные наконечники; 3 – ферроабразивный порошок; 4 – электромагнитные катушки

Схемы с вращающимися полюсными наконечниками применяют при МАО длинномерных деталей типа валов, прутков и труб (рис. 1.20, а), кромок и листов (рис. 1.20, б), а также деталей, обладающих малой жесткостью и имеющих неточную форму, например, после штамповки, вытяжки и др. Во многих случаях ее используют для обработки плоских деталей.

Например, в работе [57] использована схема (рис. 1.20, в) для обработки проволоки. Обработка проволоки осуществляется кольцевым инструментом (щетками порошка) при ее перемещении в

зазорах соответствующих полюсных наконечников. Таким образом, для малых диаметров силовое воздействие порошка на изделие является равномерным по обрабатываемой поверхности.

Для обработки больших диаметров используется две пары или больше, вращающихся вокруг своих осей чашечных полюсов. Каждая пара полюсных наконечников формирует из ферромагнитного абразивного порошка кольцевую эластичную щетку, которая охватывает половину окружности изделия и производит обработку, при этом вращение изделия отсутствует. Для крупногабаритных размеров применяется схема (рис. 1.20, з). В работе [58] автор использовал схему MAO (рис. 1.20, б) для обработки листовых материалов и рассматривал различные способы формирования инструмента при обработке боковых поверхностей листов вращающимися полюсами.

Для реализации процесса магнитно-абразивной обработки созданы как специальные станки, так и устройства, устанавливаемые на универсальные металлорежущие станки.

### 1.3.2. Технологические возможности MAO

Широкие возможности в сочетании со специально созданными составами СОТС и ФАП позволили реализовать процессы магнитно-абразивной обработки для решения следующих задач [47].

Полирование трущихся поверхностей деталей машин, подверженных значительным механическим нагрузкам и работающих на износ, обеспечивает требуемую контактную и циклическую прочность. Показателен пример применения MAO для полирования колец подшипников качения. Полирование этих изделий в магнитном поле позволило снизить шероховатость и волнистость поверхностей в 4...10 раз и сформировать качественный поверхностный слой, что позволило повысить износостойкость и контактную прочность на 30...60 % в сравнении со шлифованной поверхностью.

Также эффективно применение MAO для полирования поверхностей трения скольжения, например, штоков-иглопроводителей швейных машин. Износ обработанных MAO поверхностей штоков диаметром 7 мм составил 1...2 мкм за 100 часов стендовых испытаний, а износ шлифованных штоков за это же время составил 7...10 мкм. При этом уровень шума при работе обработанных MAO штоков ниже на 30 %.

Разработана технология MAO винтовых и гладких цилиндрических поверхностей винтов, червяков, валов и других деталей. Полирование в магнитном поле (с одновременным удалением заусенцев и закруглением острых кромок на витках и шлицах) снижает шероховатость и волнистость поверхностей рабочих витков в 3...6 раз, улучшает качество поверхностного слоя, повышает износостойкость и контактную прочность витков на 20...40 %. Зубчатая пара редуктора, содержащая отполированный в магнитном поле червяк, имеет повышенные значения нагрузочной способности и пониженные потери на трение.

Качественную сварку металлических изделий можно выполнить лишь после тщательной зачистки (очистки) свариваемых поверхностей от пленок окислов, дефектов и загрязнений. Иначе они попадают в тело сварного шва и снижают коррозионную стойкость. Особенно затруднительно подготовить к сварке поверхности изделий из химически активных сплавов на основе алюминия, магния и титана. По заказу космического и авиационного аппаратостроения решена сложная задача зачистки перед сваркой кромок элементов конструкции летательных аппаратов – обечаек и пластин из Al-Mg сплавов. Магнитно-абразивной обработкой на оптимальных режимах с поверхностями кромок удаляются окисные пленки и загрязнения. Формируется тонкая стекловидная окисная пленка, которая с течением времени практически не растет и предохраняет основной металл от коррозии.

В процессе сварки эта пленка под воздействием флюса и сварочной дуги полностью разлагается и не вносит дефекты в формируемый сварной шов. Пригодность к сварке кромок после MAO составляет не менее 30 суток, а для альтернативных операций химического травления и механического шабрения этот показатель составляет 8 и 48 часов соответственно.

Испытания сварных на механическую прочность (предел прочности, предел текучести и др.) показали, что зачистка кромок в магнитном поле обеспечивает более высокие значения указанных характеристик, чем у образцов после электрохимического полирования и химического травления. Так как MAO не требует применения токсичных растворов кислот и щелочей, то и в экологическом и экономическом отношении эта технология предпочтительнее.

Поскольку при сварке сплавов часто используют в качестве плавящегося электрода проволоку из этого же сплава, то потребовалось также решить задачу очистки поверхности проволоки. Для этих целей разработаны технология и оборудование, позволяющие на одном станке без переналадки и дополнительных мер зачищать проволоку из различных сплавов.

В атомном машиностроении сложнейшей проблемой является обеспечение необходимой коррозионной стойкости наружных поверхностей оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ), работающих в среде пара при давлении 200 атм. и температуре 300 °С. Оболочки изготавливают из циркониевых сплавов, а финишную обработку осуществляют электрохимическим полированием в чрезвычайно агрессивных растворах плавиковой кислоты. Эта технология в экологическом отношении крайне ущербна и требует огромных затрат для обеспечения безопасных условий труда работающих и утилизации отработанных реактивов.

Разработанная технология и оборудование позволяют полировать наружные поверхности ТВЭЛОВ-труб и формировать поверхностный слой с минимумом дефектов структуры. В результате магнитно-абразивного полирования с использованием пассивирующих добавок к смазочно-охлаждающей жидкости на поверхности труб ТВЭЛОВ получена тонкая стекловидная пленка окислов циркония, которая наращивается дополнительными технологическими приемами и приобретает необходимую коррозионную стойкость в реакторных условиях. Разработан и опробован способ одновременного полирования наружных и внутренних поверхностей труб оболочек ТВЭЛОВ.

Создан оригинальный процесс полирования внутренних поверхностей труб прямоугольного сечения размерами от 3×6 мм до 7×14 мм. Трубы из медных сплавов, применяемые в качестве волноводов устройств СВЧ, полировались в магнитном поле, затем на полированную поверхность наносилось серебряное покрытие толщиной, около 30 мкм и проводилось повторное полирование с уплотнением покрытия и обеспечением параметра шероховатости  $Ra$  0,10...0,05 мкм.

Очистке в магнитном поле подвергаются листы, ленты, прутки проволоки и другие изделия. Заготовки печатных плат имеют вид листов стеклотекстолита, покрытых медной фольгой толщиной 35 мкм. Перед нанесением фоторезиста с поверхности фольги необходимо

удалить пленку окислов меди толщиной 2...4 мкм и сформировать поверхность с  $Ra$  0,2...0,6 мкм. Для осуществления операции создан станок, который зачищает фольгированный лист одновременно с двух сторон с производительностью 0,5...4,0 м/мин. Возможна зачистка на станке листов и лент из немагнитных сплавов толщиной до 2-х мм и шириной до 350 мм.

Создано малогабаритное устройство для магнитно-абразивной очистки концов эмальпровода перед соединением пайкой, сваркой или механическим креплением. Зачистка производится одновременно двумя «щетками» из ферроабразивного порошка, сформированными на периферии магнитных дисков. Конец провода вводится в зону обработки на длину зачистки. При обработке с поверхности провода удаляются лакокрасочное покрытие и загрязнения, а со вскрытой поверхности основного металла окислы и слой металла толщиной 2...10 мкм. Эта вновь сформированная поверхность полностью подготовлена к соединению сваркой или пайкой. Диаметр зачищаемого провода: 0,1...3,0 мм, время зачистки: 3...5 с.

### 1.3.3. Магнитно-абразивная обработка с поверхностно-пластическим деформированием

Оборудованием для MAO с ППД с помощью магнитного поля является универсальный токарно-револьверный станок [59]. Специальные полюсы (N и S) с шириной  $l = 2d$  присоединены к подковообразному электромагниту со следующими характеристиками:

- материал сердечника – низкоуглеродистая сталь С10;
- поперечное сечение сердечника –  $A \cdot v = 50 \times 70$  мм;
- длина сердечника –  $L = 500$  мм;
- диаметр медного намоточного провода – 0,2 мм;
- число витков катушки в намагничивающих катушках  $N \cdot t = 2 \times 800$ .

Подковообразный электромагнит закреплён на каретке суппорта. Источник питания электромагнита имеет электрическое напряжение  $U = 0...40$  В и регулируемый постоянный ток  $I = 0...20$  А.

Во время обработки вал закрепляют между магнитными полюсами, обеспечивая зазор  $\delta$  между заготовкой и полюсами. Этот зазор заполняется ФАП естественного или промышленного происхо-

ждения, или железным, покрытым абразивными зёрнами ( $Al_2O_3 + Fe$  или  $TiC + Fe$ ). Магнитную индукцию ( $B = 0,5...2,0$  Тл), созданную в рабочей зоне, измеряли универсальным прибором MPU-ST с датчиком Холла. Шероховатость поверхности измеряли лабораторным прибором Perthometer S6P.

Эксперименты выполнены на валах из стали С45 с твёрдым хромовым покрытием толщиной 15...20 мкм, и с размерами (20...30) x (70...400), закрепляемых в токарном патроне с поддержкой задним центром. После хромирования шероховатость поверхности составляла  $Ra 0,3...0,9$  мкм.

Зёрна  $Al_2O_3 + Fe$  имели более острые кромки, чем зёрна  $TiC + Fe$ , полученные синтезом. Скорость удаления припуска выше при использовании зёрен А1203.

Шероховатость поверхности снижается, если используются более мелкие зёрна, но производительность снижается. С увеличением подачи шероховатость поверхности возрастает. Увеличение длительности резания снижает шероховатость поверхности до некоторого уровня, после чего дальнейшее увеличение длительности практически не эффективно. В соответствии с дальнейшими целями исследования была проверена возможность тонкого финиширования пластичных ( $HB = 150...290$ ) заготовок.

Для экспериментов по выглаживанию поверхности использовано оборудование, созданное для полирования (рис. 1.21). Шары с хорошей магнитопроводностью и с твёрдостью  $HRC = 60$  располагали над или рядом с полюсами, в радиальных пазах на полюсах. Магнитное поле удерживает шары в пазах и в зависимости от величины магнитной индукции прижимает их к поверхности заготовки с силой 50...100 Н. Шары могут свободно двигаться по нормали к оси заготовки, следуя за неровностями обрабатываемой поверхности. В зазоре  $\delta = 1$  мм магнитная индукция составляла  $B = 1,3...2,0$  Тл, в зависимости от тока в катушках и были рассчитаны магнитное поле и силы с использованием метода конечных элементов.

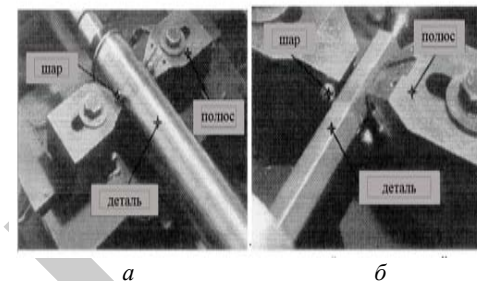


Рис. 1.21. MAO: а – выглаживание; б – цилиндрических и гранёных поверхностей

Исследование магнитного поля в устройствах для MAO производили путём его расчёта в двухмерном сечении. Постоянное магнитное поле рассчитано с использованием векторного магнитного потенциала А. Магнитная нелинейность ферромагнитных материалов (шаров, полюсов, заготовки) учитывалась с использованием их кривых намагничивания В-Н. Серия расчётов выполнена при изменении электрического тока, создающего магнитодвижущую силу катушек от 1 до 20 А, чтобы определить характеристику «сила-ток» на экспериментальной установке. Распределение магнитного поля (линии магнитной индукции В) показано на рис. 1.22, а и 1.22, б. В обоих случаях ток был равен 17 А. Важно заметить, что магнитный полюс и шар высоко насыщены в областях их точек контактирования. От увеличения возбуждающего тока до 20 А и более не следует ожидать увеличения действующих на вал сил из-за магнитного насыщения.

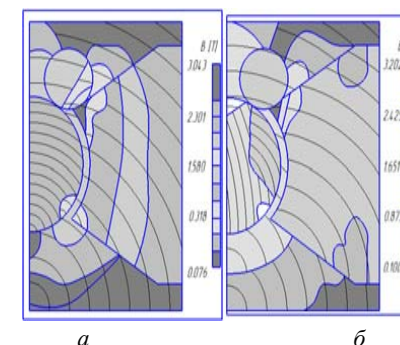


Рис. 1.22. Линии магнитного потока: а – в случае ферромагнитной заготовки; б – в случае немагнитной заготовки



Анализируя распределение поля, данное на рис. 1.22, а и 1.22, б, можно увидеть, что для увеличения силы необходимо увеличивать магнитную индукцию только в области кромки полюса, вблизи шара. Чтобы проверить это утверждение, рассчитано магнитное поле и действующие силы, используя изменённую форму полюса с переменным воздушным зазором, показанную на рис. 1.23.

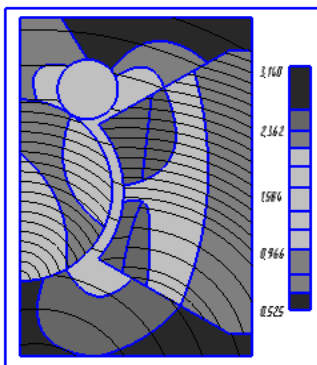


Рис. 1.23. Магнитное поле в случае изменённой формы полюса

В соответствии с вышеуказанной методикой были выполнены эксперименты на валах из термически обработанной стали С45 с твёрдостью НВ = 290. Размеры заготовки: (0,20...0,70) x (200... 600 мм), радиус шаров 3...7 мм. До выглаживания валы были проточены ( $Ra = 1$  мкм). Во время обработки использовали СОТС.

МАП и МАО выглаживание могут проводиться на одном универсальном оборудовании. Инструмент выполнен из ФАП в случае полирования и из твёрдых подшипниковых шаров - при выглаживании. При МАО выглаживанием, с правильно выбранными технологическими условиями за один рабочий ход шероховатость может быть уменьшена на 1/3. И в то же время твёрдость поверхностного слоя может быть повышена в 1,5 раза и более на глубину 20...30 мкм.

Качество поверхности при выглаживании прямо зависит от подачи, диаметра шаров, магнитных сил и магнитопроводности заготовки. При увеличении подачи шероховатость поверхности тоже увеличивается. Сила выглаживания может быть увеличена, если аналогично растёт магнитная индукция и диаметр шара.

Магнитная сила прижимает твёрдый стальной шар к обрабатываемой поверхности непрерывно и почти однородно, даже если на поверхности есть макронеровности места (пазы, выступы, гранёный профиль). Ширина допустимых переходов, выемки или паза должна быть, максимум, 20...30 % от диаметра шара.

#### 1.3.4. Магнитно-абразивная обработка при циркулирующей рабочей технологической среде

Процесс обработки при наличии циркулирующей рабочей среды является одной из модернизаций МАО, который представляет собой объёмную механическую обработку сложнопрофильных деталей и производит финишную обработку труднодоступных зон и участков детали [60]. Для широкой номенклатуры деталей был достигнут высокий уровень отделки поверхности и получение допуска в достаточно узких пределах. Циркулирующая рабочая среда, состоящая из основанного на полимере носителя и абразивов в требуемой пропорции экструдирует под давлением вдоль обрабатываемых поверхностей деталей. Однако требуется специальное приспособление для создания необходимых условий с целью направления циркулирующей рабочей среды на подвергаемые обработке участки детали.

На рис. 1.24 показана схема экспериментальной установки, которая состоит из двух цилиндров, содержащих циркулирующую рабочую среду и ограниченных овальными фланцами. На фланцах закрепляется зажимное устройство, которое позиционирует обрабатываемую деталь и в случае необходимости производит поворот установки на 180°. Установка соединена с гидравлическим прессом, при помощи которого регулируется скорость потока и давление на поршень. Скорость потока циркулирующей рабочей среды изменяется варьированием скорости привода прессы, в то время как давление на эту среду производится вспомогательным гидравлическим цилиндром.

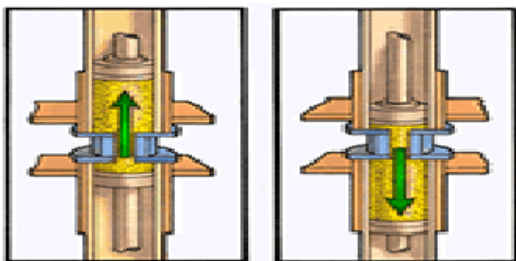


Рис. 1.24. Схема экспериментальной установки магнитно-абразивной обработки при циркулирующей рабочей технологической среде

Положение этих двух цилиндров изменяется поворотом на  $180^\circ$ , после чего производится следующий этап обработки. Два хода составляют один цикл. Имеются температурные индикаторы для циркулирующей рабочей среды и гидравлического масла.

Требуемый объем абразивных частиц переносится циркулирующей рабочей средой вдоль обрабатываемой поверхности. При наложении магнитного поля, движущиеся абразивные частицы (которые обязательно должны быть магнитными) производят дополнительное давление на обрабатываемую поверхность детали. При этом магнитное поле воздействует на распределение абразива на обрабатываемой поверхности детали, и благодаря этому большее количество абразивных частиц контактирует с поверхностью детали.

Установлено, что магнитное поле значительно влияет на качество обработанной поверхности и в сочетании с циркулирующей рабочей средой обеспечивает обработку труднодоступных и потайных участков сложнопрофильных деталей. Однако существенной проблемой этой обработки является терморегуляция рабочей зоны, повышенный нагрев установки и, вследствие этого, необходимость создания сложной системы охлаждения, что резко увеличивает себестоимость процесса съема материала.

### 1.3.5. Процесс магнитно-абразивной галтовки

Магнитная галтовка – вид финишной обработки. Режущим инструментом является ферромагнитный галтовочный наполнитель (иглы) [61]. Обработка происходит в неподвижном рабочем объеме,

окруженном постоянными магнитами, в который загружены наполнитель, представляющий короткие обоюдоострые иглы, обрабатываемые детали и смазочно-охлаждающая технологическая среда. Полирование деталей происходит за счет соударения перемещаемого магнитным полем наполнителя и обрабатываемых деталей. Магнитное поле в качестве средства передачи обрабатывающего усилия позволяет управлять потоком наполнителя, так как он движется в соответствии с конфигурацией магнитного поля, индуцируемого постоянными магнитами. Тем самым поле, индуцируемое основной и вспомогательной группами постоянных магнитов, приходит в движение, воздействуя на находящийся в рабочем контейнере галтовочный магнитный наполнитель. Под воздействием поля наполнитель в контейнере начинает перемещаться по сложной траектории и ударяться о поверхность изделий и тем самым обрабатывать их. При необходимости усиления воздействия наполнителя на изделия необходимо увеличить угол наклона рабочего объема. На рис. 1.25 представлено устройство для магнитной галтовки.



Рис. 1.25. Устройство для магнитной галтовки

Под воздействием подвижного магнитного поля ферромагнитный галтовочный наполнитель в рабочем объеме перемещается и создает обрабатывающее усилие на поверхности обрабатываемой детали. Магнитное поле для создания достаточного обрабатывающего усилия на поверхности изделий должно отвечать следующим требованиям: смена полюсов при переходе от одного магнита к другому, высокая напряженность поля в рабочей области, достаточная неоднородность поля.

При выполнении данных условий наполнитель, взаимодействуя с поверхностью, обрабатывает ее. При недостаточной силе или же неправильной конфигурации поля наполнитель будет беспорядочно

перемещаться по рабочему объему, не создавая обрабатывающего усилия на поверхности изделий. Для проведения экспериментов были разработаны рабочие схемы расположения постоянных магнитов на подвижном диске установки для магнитной галтовки.

Ниже представлены результаты магнитной галтовки деталей при расположении магнитов по схемам № 1–4 (рис. 1.26).

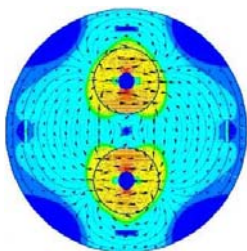


Схема № 1. Состав: магниты типа 0101 ИЖКГ (4 шт.); материал NdFeB; габариты 14,5×5 мм;  $B_r = 0,95$  Тл,  $H_{eb} = 750$  кА/м; магниты типа 0103 ЭМЦ097Н (2 шт.); материал NdFeB; габариты 60×15×3 мм;  $B_r = 1$  Тл,  $H_{eb} = 700$  кА/м.

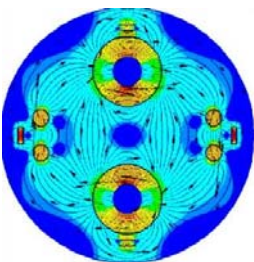


Схема № 2. Состав: магниты типа 0101 ИЖКГ (6 шт.); материал NdFeB; габариты 14,5×5 мм;  $B_r = 0,95$  Тл,  $H_{eb} = 750$  кА/м; магниты типа 0103 ЭМЦ097Н (2 шт.); материал NdFeB; габариты 60×15×3 мм;  $B_r = 1$  Тл,  $H_{eb} = 700$  кА/м.

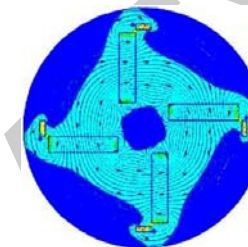


Схема № 3. Состав: магниты типа 0101 ИЖКГ (4 шт.); материал NdFeB; габариты 14,5×5 мм;  $B_r = 0,95$  Тл,  $H_{eb} = 750$  кА/м; магниты типа 0104 ЕАЖИ (4 шт.); материал NdFeB; габариты 64×15×3 мм;  $B_r = 1,1$  Тл,  $H_{eb} = 850$  кА/м.

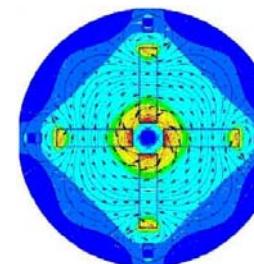


Схема № 4. Состав: магниты типа 0101 ИЖКГ (4 шт.); материал NdFeB; габариты 14,5×5 мм;  $B_r = 0,95$  Тл,  $H_{eb} = 750$  кА/м; магниты типа 0104 ЕАЖИ (4 шт.); материал NdFeB; габариты 64×15×3 мм;  $B_r = 1,1$  Тл,  $H_{eb} = 850$  кА/м.

Рис. 1.26. Схемы расположения магнитов в установке для магнитной галтовки

Схема составлена из восьми постоянных магнитов, состоящих в двух группах: вспомогательной и основной. В основную группу входят два больших редкоземельных кольцевых магнита. Размеры магнита основной группы: внешний радиус 60 мм, внутренний радиус 15 мм и высота 6 мм; физические характеристики:  $B_r = 1$  Тл,  $H_{eb} = 700$  кА/м. Во вспомогательную группу входят шесть малых редкоземельных цилиндрических магнитов. Размеры магнита вспомогательной группы:  $r = 14,5$  мм,  $h = 5$  мм; физические характеристики:  $B_r = 0,95$  Тл,  $H_{eb} = 750$  кА/м. Обработка деталей из латуни

марки Л63 методом магнитного галтования производилась в различных СОТС с составами №1, которые содержат бисалкил, полиоксиэтилен фосфат калия, моноэтаноламиды синтетических жирных кислот, циклогексанон, бакцид и воду, и составами №2, содержащими бисалкил, полиоксиэтилен фосфат калия, моноалкиловые эфиры полиэтиленгликоля на основе первичных жирных кислот, глицерин, уксусную кислоту и воду. Результаты изменения массы деталей из латуни марки Л63 при магнитной галтовке в СОТС №1 и №2 показывают, что основной съём металла при использовании СОТС состава №1 заканчивается через 10 мин, а состава №2 – через 25 мин. Это означает, что СОТС №1 эффективней СОТС №2, так как съём металла происходит за меньшее количество времени.

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее эффективна обработка деталей при использовании СОТС состава №1. Предложенное расположение постоянных магнитов относительно рабочего объема и друг друга повышает эффективность использования рабочего объема и воздействие потока галтовочного наполнителя на обрабатываемые изделия.

## **2. ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ПРОФИЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

### **2.1. Методы расчета топографии магнитного поля**

Поскольку скалярный потенциал магнитного поля подчиняется уравнению Лапласа, а векторный потенциал уравнениям Лапласа и Пуассона, большинство методов и приемов расчета, электростатических полей распространяется и на магнитные поля. Ряд задач решаются посредством закона полного тока и уравнения непрерывности, являющегося аналогией теоремы Гаусса, интегрированием уравнения Лапласа для магнитного поля методом Фурье-Ламе при двух независимых переменных и методом наложения. Частным случаем метода наложения является метод участков, обычно комбинируемый с методом средних потенциалов.

Метод изображений используется для расчета магнитных полей токов, протекающих вблизи границы двух сред. Задачи со сложными граничными условиями решаются посредством конформных преобразований, а чаще всего приближенными методами.

В данной работе вычисление параметров ЭМП осуществлялось на основе применения закона Био-Савара-Лапласа и принципа суперпозиции. Определение положения линий магнитной индукции было проведено на базе решения системы дифференциальных уравнений, правая часть которых есть компоненты результирующего вектора магнитной индукции. Нахождение линий уровня абсолютной величины магнитной индукции достигалось путем программного обеспечения. Данная система была решена методом Рунге-Кутты с помощью программного пакета «Mathematica-4».

Исследование магнитного поля при трапециoidalной форме зубьев и влияние скоса зуба на характер кривой распределения индукции осуществлено при помощи метода конформных отображений [62, 63]. Определение значения  $B$  во впадине зубчатого колеса произведено с использованием интеграла Кристоффеля-Шварца и методом конформного отображения с применением функции комплексного переменного. Изменение величины  $B$  от конфигурации геометрии как обрабатываемого изделия, так и формы рабочего за-

зора производилось методом конформного отображения при использовании интеграла Кристоффеля-Шварца и интерактивного метода Ньютона для наружных конических поверхностей сборных изделий. Расчет топографии магнитного поля матричными формами представления системы уравнения Максвелла, базирующегося на матрицах, удовлетворяющих алгебре Клиффорда, устанавливает связь между  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{H}$  через тензоры магнитной проницаемости для поля внутри разрыва магнитопровода с целью расчета параметров и конфигурации элетромагнитных систем.

## **2.2. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке поверхностей различного профиля**

Одним из перспективных способов финишной обработки является магнитно-абразивная обработка [64]. Поскольку передача магнитного потока в ЭМС осуществляется по магнитопроводу, выполненному из стали, то его магнитная проницаемость резко отличается от магнитной проницаемости воздушного зазора, в котором помещается порция ФАП. Ввиду того, что магнитный поток стремится двигаться по наиболее энергетически выгодному пути, то при обработке конической поверхности, находящейся в вышеуказанном зазоре возникает разница в плотности магнитного потока по ее длине. Данная разница важна при выборе тех или иных конструктивных решений, связанных с пространственной топологией как самой детали, так и формы зазора, что уже при современных условиях обработки не может базироваться на интуитивном подходе, обусловленной высокой квалификацией исполнителя. Инвариантность решения такой задачи заключается в топографии магнитного поля при МАО, т.е. в обеспечении геометрических параметров полюсных наконечников и конфигурации обработанной поверхности. Интуитивно предсказать степень изменения плотности магнитного потока в различных точках зазора невозможно, а определение ее экспериментально, путем изменения геометрических параметров по всей области поля, весьма трудоемко. Поэтому применение математического моделирования обладает преимуществами, которые позволяют произвести оценку с допустимой погрешностью, а также возможность корректирования процесса решения задачи. Тождест-

венность математического описания этого физического процесса выдвигает ряд проблем, связанных с отбором его наиболее важных закономерностей и оценкой погрешности, неизбежной при пренебрежении тех или иных сторон данного процесса.

### **2.2.1. Магнитно-абразивная обработка наружных конических поверхностей деталей**

Детали с коническими поверхностями широко применяются в машинах и механизмах, работающих в различных отраслях народного хозяйства. К ним относятся пальцы шаровых опор и рулевого управления автомобилей, пробки кранов сантехнической арматуры, инструментальные оправки, шпиндели станков, центры для металлорежущего оборудования, дроссельные клапаны гидроаппаратуры и т.п. Обусловлено это тем, что в отличие от цилиндрических, конические поверхности при прочих равных условиях обеспечивают высокую точность фиксации и отсутствие зазоров при работе в паре с сопрягаемой деталью, что снижает динамические нагрузки [19]. Однако изготовление деталей с коническими поверхностями связано с необходимостью достижения степени точности не менее 7-го качества, что требует в технологическом процессе применения дорогостоящего металлорежущего инструмента, специального оборудования и оснастки. Поэтому актуальным является разработка высокоэффективных способов механической обработки конических поверхностей, снижающих себестоимость выпускаемой продукции, что является важным с позиции ее конкурентоспособности.

Технологическая проблема МАО конических поверхностей заключается в обеспечении одинакового значения магнитной индукции  $\mathbf{B}$  на всех участках конуса детали. Формообразование полюсных наконечников связано с созданием такой их формы, которая эквидистантно копирует конфигурацию детали. Поскольку конусность деталей варьируется в широких пределах, то и растет количество полюсных наконечников как технологической оснастки. Поэтому математическое моделирование процесса МАО конических поверхностей приводит к возможности снижения номенклатуры технологической оснастки.

На рис. 2.1 представлена расчетная схема определения электромагнитного поля на конических элементах ступеней деталей машин при следующих допущениях:

- отсутствие учёта радиальной и осевой составляющих тока, поскольку первая имеет слишком маленькое значение в сравнении с тангенциальной, а вторая не создает аксиальной составляющей магнитной индукции в рабочей зоне;

- зависимость магнитной проницаемости от напряженности ЭМП производится при использовании эквивалентных магнитных проницаемостей при наложении полей по оси  $y$  и при пересечении их по оси  $z$ ;

- геометрия детали представляется в виде полосы с равномерно распределенным током, поскольку поверхность полосы является координатной.

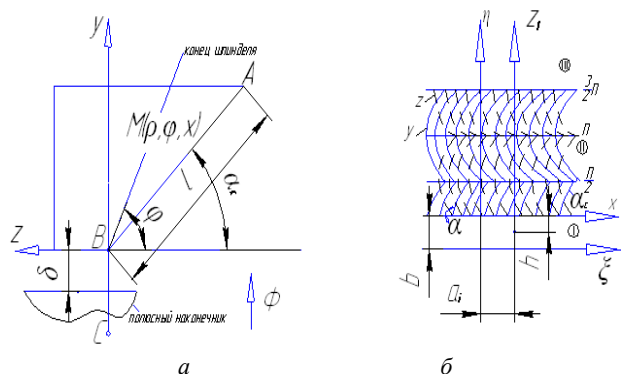


Рис. 2.1. Схема определения в конической части детали: а – графическое изображение; б – после преобразования в полосу

Рассмотрим распределение магнитного потока, проходящего через рабочую зону, в перпендикулярном и осевом направлениях. Вдоль пути аксиального потока магнитная проницаемость имеет значение  $\mu_z$ , а вдоль материала детали — значение  $\mu_y$ . С целью проведения анализа преобразуем угол ABC (рис. 2.1, а) в полосу (рис. 2.1, б) с помощью соотношений  $\rho = R_1 \alpha^{a\xi}$ ;  $\Phi = \alpha\eta$ , где  $R_1$  – радиус детали,  $\rho$ ,  $\Phi$  – полярные координаты;  $\xi$ ,  $\eta$  – соответствующие им прямоугольные координаты. Из рис. 2.1, б следует, что оси  $y$ ,  $z$

не совпадают с геометрическими осями ( $\xi$ ,  $\eta$ ), образуя переменный по глубине материала ФАП угол  $\alpha = f(\xi, \eta)$ , который в данном случае равен  $\alpha = a\eta$ .

Для определения электромагнитного поля в полосе (рис. 2.1, б) необходимо выразить  $\mu_\eta$  и  $\mu_\xi$  в функции известных величин  $\mu_y$ ,  $\mu_z$  и  $\alpha$ . Поскольку осуществляется обработка деталей с анизотропными свойствами, так же как и ФАП – это приводит к несовпадению направления магнитного потока с осями анизотропии, что требует введения взаимной проницаемости  $\mu_{\eta\xi}$  и собственных проницаемостей  $\mu_{\eta\eta}$ ,  $\mu_{\xi\xi}$ :

$$\begin{aligned} \mu_{\eta\eta} &= \mu_y \cos^2 \alpha + \mu_z \sin^2 \alpha \\ \mu_{\xi\xi} &= \mu_y \sin^2 \alpha + \mu_z \cos^2 \alpha \\ \mu_{\eta\xi} &= \mu_{\xi\eta} = (\mu_y - \mu_z) \cos \alpha \sin \alpha. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Таким образом, имея представление об изменениях магнитной проницаемости материала ФАП, находящегося в рабочем зазоре между полюсным наконечником и деталью, можно осуществить процесс прогнозирования и управления методом МАО конических поверхностей, обладающих определенным диапазоном значений угла  $\alpha_c$ .

Взаимная магнитная проницаемость и переменный по глубине материала угол между выбранными геометрическими осями оказывают кооперативное воздействие и влияют на угол конусной части детали, основным условием которого имеет место равенство  $\mu_\eta = \mu_\xi$ . Например, при  $\alpha_c = 45^\circ$  магнитные проницаемости  $\mu_{\eta\eta}$  и  $\mu_{\xi\xi}$  равны между собой, однако взаимная магнитная проницаемость  $\mu_{\eta\xi}$  вносит коррекцию в это равенство и изменяет значение данного угла, при котором имеет место это равенство. Для того чтобы выбрать угол  $\alpha_c$  при котором  $\mu_\eta = \mu_\xi$ , необходимо предварительно определить значение длины конусной части детали, поскольку возникает изменение, во-первых, градиента магнитной индукции по данной конусности ступени детали, во-вторых, магнитной проницаемости по оси  $\xi$ , (рис. 2.2). При увеличении длины конусной ступени  $\mu_\xi$  растет в большей степени, чем  $\mu_\eta$ , поэтому результирующий вектор  $H$  отклоняется от оси  $\eta$  и располагается под определенным уг-

лом к этой конической ступени детали. Согласно рис. 2.2 видно, что рост длины конической ступени детали сопровождается необходимостью использовать меньший угол для удовлетворения равенству  $\mu_\eta = \mu_\xi$ . При падении размера длины конической ступени угол  $\alpha_c$  должен быть в противоположность предшествующему выбору увеличен.

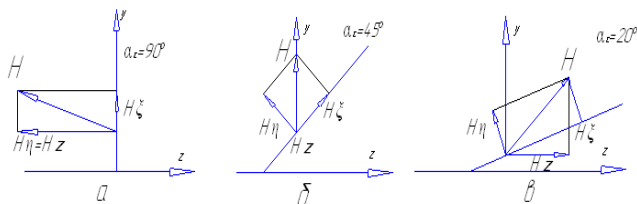


Рис. 2.2. Определение геометрии конической ступени детали при различных углах конуса

Согласно [65], на основании принципа эквивалентности следует перейти к магнитно - динамическому решению уравнения:

$$j = \text{rot} \{ \hat{\mu}^{-1} \text{rot} A \}, \quad (2.2)$$

где  $j$  – плотность тока,  $A/m^2$ ;

$A$  – векторный потенциал,  $A \cdot m$ ;

$$\hat{\mu}^{-1} = \begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{vmatrix} - \text{матрица, обратная матрице типа}$$

$$\begin{vmatrix} \mu_{\rho\rho} & \mu_{\rho\varphi} \\ \mu_{\varphi\rho} & \mu_{\varphi\varphi} \end{vmatrix}, \text{ т.к. при используемом преобразовании координат } \rho$$

переходит в  $\xi$ , а  $\varphi$  в  $\eta$ .

При введении цилиндрических координат  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $x$ , при которых поверхности цилиндрической и конической ступеней детали становятся координатными и в этом случае коэффициенты обратной матрицы равны:

$$\begin{aligned} M_{11} &= \frac{\mu_y \cos^2 \alpha + \mu_z \sin^2 \alpha}{\mu_y \mu_z} \\ M_{22} &= \frac{\mu_y \sin^2 \alpha + \mu_z \cos^2 \alpha}{\mu_y \mu_z} \\ M_{33} &= \frac{(\mu_y - \mu_z) \sin \alpha \cos \alpha}{\mu_y \mu_z}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Выполнив ряд вычислений, можно получить составляющие напряженности магнитного поля:

$$\begin{aligned} H_z &= -H_{z1} \sin \alpha_c + H_{x1} \cos \alpha_c \\ H_y &= H_{z1} \cos \alpha_c + H_{x1} \sin \alpha_c. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Ввиду того, что при заданном значениях тока и соблюдении условий непрерывности магнитного поля на границах раздела сред

$$H_{x1} = -\frac{j}{2\pi} \frac{2\mu_\xi}{\mu_\xi + 1} \frac{1}{\mu_\xi} \frac{z_1 + h}{[x_1^2 + (z_1 + h)^2]}$$

$$H_{z1} = \frac{j}{2\pi} \frac{2\mu_\xi}{\mu_\xi + 1} \frac{1}{\mu_\xi} \frac{z_1 + h}{[x_1^2 + (z_1 + h)^2]};$$

$$x_1 = \frac{1}{a} \ln \frac{\rho}{R_1} - a_i,$$

где

$$z_1 = \frac{\varphi}{a'} - b;$$

$$a' = a \sqrt{\frac{\mu_\eta}{\mu_\xi}}.$$

В результате математического моделирования топографии магнитного поля и численных расчетов на основе проведенных исследований получены зависимости напряженности данного поля от конусности рабочего зазора и величины магнитной индукции магнитного поля. Измерение магнитной индукции производилось на тесламетре Т-3 и представлено в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Рекомендуемые формы полюсных наконечников для МАО конических поверхностей

| Диапазон диаметров обрабатываемых деталей, мм (большой диаметр конуса) | Размер обрабатываемой поверхности, мм | Форма полюсного наконечника           | Отклонения величины магнитной индукции при увеличении длины конусной части детали, % * |                   |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|--|-------------------|
|  |                                       |                                       | теоретическое  | экспериментальное |
| Конус 10-25 (15,87-25,4)   | L=21,8-39,8                           | Цилиндрическая, эквидистантная зазору | 6-9  | 7-10              |
| Конус 30-40 (31,75-44,45)  | L=49,2-65,6                           | Коническая с углом 8°                 | 12-16  | 10-15             |
| Конус 45-55 (57,15-88,9)   | L=84,8-131,6                          | Коническая с углом 8°                 | 18-24  | 15-20             |

\*Примечание: величина зазора  $\delta = 0,8$  мм на большем диаметре конуса.

Были проведены экспериментальные исследования двух способов финишной обработки шпинделей 30 ГОСТ 836-72 с конусностью 7:24 по ГОСТ 15945-82 50...54 HRC<sub>3</sub>, с технологическими требованиями для станков класса точности В, с шероховатостью  $Ra = 0,16$  мкм: 1) шлифование, 2) МАО. Шлифование проводили на круглошлифовальном станке модели 3131. Режимы шлифования: скорость шлифовального круга  $v_k = 25$  м/с; величина подачи шлифовальной бабки  $S_{np} = 0,04$  мм; величина поперечной подачи  $S_n = 0,01$  мм; число оборотов детали  $n_d = 400$  об/мин. Инструмент – круг абразивный  $D \times d \times h = 256 \times 76 \times 20$  мм, электрокорунд ГОСТ 2424-84.

МАО проводилась на станке СФТ 2.150 00 00 000. Параметры и режимы МАО: магнитная индукция  $B = 1$  Тл; скорость резания  $V_p = 2,5$  м/с; скорость осцилляции  $V_0 = 0,2$  м/с; амплитуда осцилляции  $A = 1$  мм; коэффициент заполнения зазора  $K_z = 1$ ; величина рабочего зазора  $\delta = 1$  мм; время обработки  $t = 60$  с. ФАП – Ферабраз-310, зернистость порошка  $\Delta = 100/160$  мкм (рис. 2.3); СОТС Син-МА-1 ТУ 38.5901176-91, 5 % -ный водный раствор.

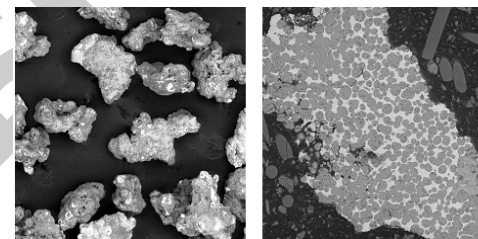


Рис. 2.3. Морфология: а – микроструктура; б – ферроабразивного порошка Ферабраз-310

Исходная шероховатость поверхности  $Ra_1 = 0,8...1,2$  мкм. Шероховатость поверхности до и после МАО измеряли на профилографе-профилометре «252-Калибр». Проверку точности конических базирующих поверхностей шпинделей производили контрольным калибром – втулка 30 АТ 6 ГОСТ 20305-80, степень точности 6 на длине конуса 50 мм. Припасовка конических поверхностей шпинделей и втулки 30 АТ 6 ГОСТ 20305-80 производилась путем нанесения типографской краской №2513-26 при условии разведения ее машинным маслом. Толщина краски контролировалась визуально по образцу интенсивности окраски согласно ГОСТ 2848-75. Прилегание конусных поверхностей калибра и детали по ГОСТ 20305 – 80 составило 95 % при контакте по малому диаметру, а толщина слоя краски – 4 мкм.

В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что разница величин магнитной индукции на малом и большом диаметрах концов шпинделей 30 ГОСТ 836-72 с конусностью 7:24 по ГОСТ 15945-82 составляет не менее 15 %, что позволяет произвести качественную обработку поверхности концов шпинделей (рис. 2.4).





Рис. 2.4. Вид конической поверхности шпинделя

Результаты обработки конической поверхности шпинделей представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Сравнительные показатели обработки поверхностей при шлифовании и MAO

| Вид обработки | Величина размерного сьема, мкм | Шероховатость после обработки, Ra <sub>2</sub> , мкм | Прилегание конусных поверхностей, % |
|---------------|--------------------------------|--|-------------------------------------|
| Шлифование    | 120-180                        | 0,4  | 90                                  |
| MAO           | 20-40                          | 0,12   | 95                                  |

Таким образом, исходя из полученных результатов теоретического и экспериментального исследования процесса MAO, установлена возможность ее эффективного использования для финишной обработки конических поверхностей деталей машин.

### 2.2.2. Повышение эффективности процесса магнитно-абразивной обработки узких пазов

Одной из проблем стоящих перед технологией производства деталей машин является обработка узких и глубоких пазов, назначение которых состоит в создании посадочных мест для различного рода колец, вкладышей и т. п. Также данные пазы служат, как, например, для прядильных колец, в качестве направляющих и регулирующих элементов для реализации передачи пряжи от крутильно-мотального механизма к веретену прядильного комплекса с це-

лью образования початка этой пряжи. Во всех случаях требуется создание такой топографии поверхностного слоя указанных выше деталей, которая обеспечивает высокий уровень надежности изделий и функционирования механизма и машины в целом. В связи с этим возникает необходимость применения технологических процессов, которые являются экономически выгодными и одновременно при их использовании достигаются заданные ТУ, ГОСТ или рабочим чертежом детали требуемые показатели точности и качества. Известно, что финишные операции занимают важный ряд в общем цикле изготовления деталей машин. Одной из таких операций является магнитно-абразивная обработка [66] (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Рабочая зона станка для магнитно-абразивной обработки

Для MAO, как и для других финишных операций, обработка узкого и глубокого паза связана с определенной трудностью. Но если для инструмента с твердой связкой (хон, шлифовальный круг) сложность заключается в доставке агентов СОТС в зону его контакта и обрабатываемого участка поверхности паза, а также снижения прочности, например, самого круга из-за уменьшения его габаритных размеров, то для MAO основным фактором служит особенность распределения МП в данной зоне. Это вызвано его неравномерностью и определяется энергетически выгодным прохождением магнитного потока по всей длине магнитной цепи. Предлагаемый расчет распределения МП в пазу выглядит следующим образом: предполагаем, что магнитная проницаемость материала, в котором требуется обработать паз, является величиной очень большой, теоретически стремящейся к бесконечности. При таком допущении индукция в материале будет конечна, а напряженность поля в нем будет стремиться к нулю. По закону полного тока при  $Z = 0$ ,  $H = j/b$ , при  $Z = h$   $H = 0$ . Для определения постоянных интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  в выражении:

$$\dot{H} = \dot{C}_1 e^{pz} + \dot{C}_2 e^{-p}. \quad (2.5)$$

Составим два уравнения  $\dot{C}_1 + \dot{C}_2 = i/b$  и  $\dot{C}_1 e^{ph} + \dot{C}_2 e^{-pz} = 0$ .

После определения  $\dot{C}_1$  и  $\dot{C}_2$  и подстановки их в уравнение (2.5) получим:

$$\dot{H} = \frac{i}{b} * \frac{shp(h-z)}{shp * ph}. \quad (2.6)$$

График модуля  $H$  по высоте паза представлен на рис. 2.6.

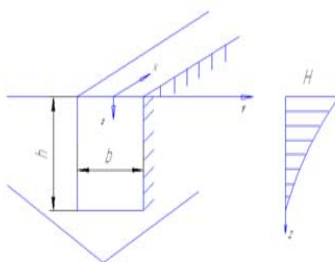


Рис. 2.6. График модуля  $H$  по высоте паза

Исходя из данного графика видно, что наименьшее значение напряженности магнитного поля имеет место на дне этого паза. Следовательно, если использовать вариант традиционной схемы обработки методом MAO, когда деталь помещается в рабочую зону, в эту зону подается порция ФАП, данной детали придается движение вращения и осцилляции, то частицы ФАП под воздействием кинематических факторов процесса не будут направлены до его конечной глубины, ввиду разницы величин напряженности магнитного поля. Следовательно, необходимо осуществлять интенсификацию процесса MAO глубоких и узких пазов деталей машин, таким образом, чтобы достигнуть планируемых результатов.

В качестве оборудования использовался станок СФТ 2.150.00.00.000. Параметры и режимы обработки: скорость резания,  $V_p = 1 \dots 3$  м/с; скорость осцилляции,  $V_o = 0,1$  м/с; амплитуда осцилляции,  $A = 1$  мм; ФАП – АСМ на основе алмазов (рис. 2.7); СОТС СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, размерность зерен ФАП,  $\Delta = 100/160$  мкм. Магнитная индукция  $B = 0,5 \dots 1,1$  Тл.

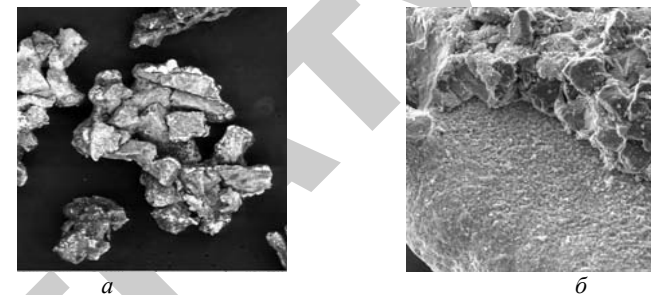


Рис. 2.7. Фотография ферроабразивного порошка АСМ на основе алмазов: а – морфология,  $\times 40$ ; б – топография,  $\times 200$

Первоначальным вариантом предусматривалось, во-первых, регулирование режимами и параметрами обработки; во-вторых, уменьшение величины рабочего зазора с целью роста коэффициента его заполнения ( $K_3 = 1,2$ ). Однако при проведении испытаний установлено, что увеличение скорости осцилляции и резания приводит к снижению удержания зерен ФАП на поверхности полюсных наконечников и повышению показателя перебега этих зерен из одной рабочей зоны в другую (рис. 2.8).

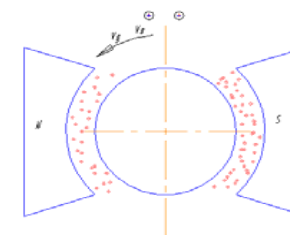


Рис. 2.8. Распределение ФАП в рабочей зоне

Данный перебег зерен уменьшает объем ферроабразивной «щетки» в рабочей зоне и, соответственно, показатель оказываемого ее давления на обрабатываемую поверхность детали. Одним из главных вариантов устранения данного перебега зерен ФАП является увеличение подачи силы тока на соленоиды катушек электромагнитной системы (ЭМС) с целью создания большей величины маг-

нитной индукции, что приводит к росту расходной части производства. Поэтому повышение эффективности процесса резания должно базироваться на более глубоком и принципиальном блоке конкретных условий данного процесса. Таким образом, необходимо осуществить создание инструмента, применяемого для процесса MAO узких и глубоких пазов  $b$ . Первостепенной задачей становится решение вопроса о заполнении паза массой ФАП и таким вариантом является механическое заклинивание зерен в этом зазоре (рис. 2.9).

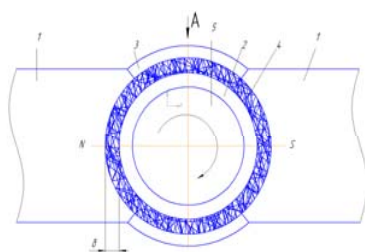


Рис. 2.9. Схема механического заклинивания зерен в зазоре

Полюсные наконечники 1 электромагнитов располагают по обе стороны от обрабатываемой детали 2. Образование замкнутой рабочей зоны обеспечивают размещением на свободных от полюсных наконечников участках немагнитных пластин 3 типа секторов катеноида, которые имеют приливы, идущие от краев к середине рабочего зазора, при этом рабочий зазор между выступами и деталью выбирают в пределах  $(0.3...0.6) \delta$ , где  $\delta$  – зазор между полюсными наконечниками и деталью. При этом обеспечивают эквидистантность поверхности детали и рабочих поверхностей приливов пластин. Перед установкой пластин 3 ферроабразивный порошок 4 подают в рабочие зазоры. Детали 2 сообщают вращательное движение вокруг своей оси и осциллирующее движение вдоль оси вращения [67].

Под действием магнитного поля ФАП 4 прижимается к поверхности детали 2, производя обработку. При этом под действием сил резания и трения со стороны вращающейся детали частицы порошка смещаются к выходу из рабочего зазора. Плотность РТС в зазоре при этом зависит от величины индукции. Поэтому частицы имеют возможность перемещаться как к выходу из зазора, так и в направлении от полюсных наконечников к детали. Частицы порошка на выходе из

рабочего зазора могут отрываться от поверхности детали под действием центробежных сил, либо выноситься из зазора вместе с вращающейся поверхностью заготовки. Немагнитные пластины 3 при этом препятствуют вылету зерен на боковые поверхности полюсных наконечников, способствуют перемещению зерен в противоположный зазор и их переориентации. Тем самым обеспечивается вступление в контакт с заготовкой новых режущих кромок, при этом вся порция порошка принимает участие в обработке детали, при любых значениях скорости движения обрабатываемой поверхности и длительности цикла обработки.

Кроме того, немагнитные пластины создают дополнительный прижим перемещающихся масс порошка, вследствие чего увеличивается общее количество абразивных взаимодействий между порошком и поверхностью детали.

При вращении детали со скоростью более 2 м/с часть порошка отрывается от поверхности детали и, отражаясь от рабочей поверхности пластины, ударяется об обрабатываемую поверхность детали, производя абразивное воздействие. Затем частицы порошка, потеряв кинетическую энергию, попадают под действием сил магнитного поля в рабочий зазор.

Переходя из зазора в зазор, частицы порошка взаимодействуют с выступами немагнитных пластин 3. Приливы пластин обеспечивают перемещение части частиц от краев полюсных наконечников к середине рабочего зазора. Указанное перемещение порошка перераспределяет его в рабочей зоне и повышает плотность порошка в середине рабочей зоны. Таким образом, сформированная ферроабразивная щетка производит на поверхность детали одинаковое силовое воздействие. Это вызывает равномерную обработку всей поверхности детали. На выходе из рабочего зазора под действием сил магнитного поля часть порошка успевает перераспределиться обратно к краям полюсных наконечников и процесс повторяется.

При столкновении зерен порошка с рабочими поверхностями пластин происходит их дополнительное перемешивание и переориентация. Интенсификация перемешивания порошка способствует отводу стружки обрабатываемого материала и частиц, потерявших свои абразивные свойства, из слоев порошка, непосредственно прилегающих к обрабатываемой поверхности, и распределению его во всем объеме зоны обработки.

Таким образом, использование предлагаемого способа способствуют повышению качества и производительности магнитно-абразивной обработки узких пазов.

### 2.2.3. Магнитно-абразивная обработка полых конических поверхностей деталей

В качестве освещения интерьера жилых и служебных помещений используются наборы светильников и люстр различных стилей и конструктивного исполнения. Их форма определяет интенсивность и направленность светового потока, а материалом для изготовления подобных технических изделий выступает хрусталь, фарфор, пластик, стекло, цветные металлы и даже натуральный камень. Например, наиболее органично вписывающимся элементом осветительной аппаратуры в современный интерьер помещений служат такие материалы как бронза и камень рода ониксов, поскольку камень сохраняет природный рисунок, создающий индивидуальность модели. Бронза представляет собой материал, вследствие широты обрабатываемости, обеспечивающий античную зелень и полихром. Однако бронза достаточно дорога и разово применяется в кованом стиле.

Одним из важнейших компонентов светильников и люстр являются плафоны, изготавливаемые также из вышеуказанных материалов. Графическая выразительность конструкции плафонов должна в обязательном порядке сочетаться с выполняемой функциональной задачей, что подразумевает сложность для их механической обработки. В настоящее время данные элементы осветительной аппаратуры в массовом производстве изготавливают из латуни по причине высокой себестоимости бронзы, к тому же часто имеющей дефицитное олово. После правильно выполненной финишной обработки латунь по своему внешнему виду вполне сопоставима с бронзой, а в случае нанесения лака на обработанную поверхность, визуально неотличима от золота. Однако такого рода обработка путем полирования и обычно ручным способом характеризуется субъективностью результатов исполнителя и наличием дефектной структуры, связанной с различной степенью отражения обработанной поверхности. Так же использование в качестве абразивного материала для данных

паст  $Cr_2O_3$  сопряжено с ростом нагрузки на экологическую систему, поскольку данное соединение обладает высоким негативным воздействием на седативность кроветворных биологических организмов.

Одним из перспективных способов финишной обработки, обеспечивающих высокое качество поверхности, является способ магнитно-абразивной обработки. Контур режущего инструмента (ферроабразивная щетка) в зазоре между обрабатываемой поверхностью и полюсным наконечником электромагнита формируется из ферроабразивного порошка силами электромагнитного поля (ЭМП), образуемого соленоидными электромагнитной системы (ЭМС). Рабочую технологическую среду образуют магнитная индукция В, ФАП и смазочно-охлаждающие технологические средства.

Известно [68], что плотность магнитного потока определяется величиной магнитной индукции. Технологическая проблема МАО конической поверхности плафонов заключается в том, что на участках с меньшим диаметром при применении обычной для цилиндрических поверхностей схемы обработки будет меньшая величина градиента плотности магнитного потока, которая является силовой характеристикой процесса МАО. Плотность магнитного потока зависит также и от магнитной проницаемости материала ФАП, находящегося в рабочем зазоре между полюсным наконечником и деталью. Управлять градиентом магнитной индукции можно изменением профиля (профилированием) поверхности полюсных наконечников. Полюсные наконечники являются сменными, что позволяет легко адаптировать ЭМС к конкретным размерам и форме обрабатываемых поверхностей. Однако увеличение их количества как технологической оснастки приводит к повышению себестоимости выпускаемой продукции.

Поэтому для снижения номенклатуры технологической оснастки необходимо стремиться к созданию универсального типа полюсного наконечника для обработки нескольких видов поверхностей. При этом необходимо учитывать давление ФАП в процессе обработки деталей, величина которого варьируется в определенных пределах для обеспечения требуемых выходных показателей по производительности обработки и качеству поверхности. Следовательно, если выявить эти пределы для МАО деталей с коническими поверхностями, то можно сузить номенклатуру необходимой технологической оснастки за счет использования полюсных наконечников с определенной конусностью для обработки методом МАО некоторой группы деталей. Так, напри-

мер, целесообразно было бы при небольшой конусности поверхности использовать полюсные наконечники, предназначенные для магнитно-абразивной обработки цилиндрических поверхностей.

Коническая поверхность детали, помещенная в магнитное поле, окружена согласно закону Ампера кольцевыми токами. На более удаленных от конической поверхности окружностях с кольцевым током величина магнитной индукции уменьшается. Это приводит к снижению давления ФАП на коническую поверхность детали и ухудшению качества обработанной поверхности.

Поскольку давление ФАП, являющееся силовой характеристикой процесса МАО, зависит от величины магнитной индукции, то необходимо ее определить аналитически, а затем произвести расчет профиля полюсного наконечника. При МАО конических поверхностей деталей машин, например, оправок, устанавливаемых в шпиндели станков требуются максимально приближенная эквидистантность профиля полюсного наконечника к конфигурации детали и соответственно более точные методы расчета (типа коллокаций или преобразований Фурье). Для осветительной аппаратуры главным требованием к коническим поверхностям являются показатели декоративного вида изделий. Поэтому при МАО плафонов расчет топографии ЭМП и определение границ профиля полюсного наконечника возможно производить с использованием методов, допускающих большую степень погрешности. Например, применить степенные ряды с неопределенными коэффициентами, используя функции Бесселя, в которых коэффициенты затабулированы, что значительно снижает трудоемкость расчета.

Решение предполагает наличие двумерной задачи при учете влияния осевого и радиального полей. Приближенный расчет распределения плотности тока приводится в работе [69] при том, что соленоид представлен бесконечной длины, токовый контур не является как в реальном масштабе разделенным, а характеризуется сплошностью. Подобное трактование приводит к тому, что нелинейность распределения тока учитывается только в радиальном аспекте. Для приводов малого сечения и зоны небольших геометрических размеров данное представление дает в результате погрешность, которая является допустимой. Следовательно, обязательным является расчет плотности тока в отдельных витках, что в более полной мере учитывает фактор осевого направления напряженности магнитного поля. Исходя из основного уравнения Максвелла:

$$H/r = \delta,$$

где  $H$  – напряженность МП,  $\frac{A}{m}$ ;

$\delta$  – плотность тока,  $\frac{A}{m^2}$ .

Можно получить дифференциальное уравнение для плотности тока в отдельном витке при использовании в решении цилиндрической системы координат:

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial \varepsilon^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial r} - \left( jk^2 + \frac{1}{r^2} \right) \delta = -\frac{\partial^2 \delta}{\partial z^2}, \quad (2.7)$$

где  $j$  и  $K$  - единичные векторы декартовой системы координат.

Поскольку  $H = iH_x + jH_y + kH_z$  и обусловлено это необходимостью уменьшения объема работ по причине поиска выбора знака при рассмотрении приращения или уменьшения функции на элементарных площадках. Также решение в пользу цилиндрической системы координат обусловлено тем, что из-за наличия такого рода симметрии плотность тока имеет только тангенциальную составляющую, а напряженность МП – осевую и радиальную:

$$H_r = \frac{1}{jk^2} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial z}; \quad (2.8)$$

$$-H_z = \frac{1}{jk^2} \left[ \frac{\partial \delta}{\partial z} + \frac{1}{\gamma} \delta \right], \quad (2.9)$$

где  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость, и при учете  $\text{div} \vec{H} = 0$  можно получить дифференциальные уравнения для обеих составляющих напряженности МП. Исходя из предположения, что плотность тока распределена в осевом направлении симметрично относительно оси витка с током, можно получить решение в форме произведения:

$$\delta = f(r) \cos mz. \quad (2.10)$$

Если подставим уравнение (2.10) в дифференциальное уравнение (2.7) и обозначим:

$$a^2 = jk^2 + m^2, \quad (2.11)$$

получим дифференциальное уравнение Бесселя:

$$\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{df}{dz} - \left( a^2 + \frac{1}{r^2} \right) f = 0, \quad (2.12)$$

которое имеет в рассматриваемой области конечное решение:

$$f = A' \cdot I_1(jar) + B' Y_1(jar). \quad (2.13)$$

Разделительная постоянная  $\bar{m}$  может иметь любое значение и, следовательно, общим решением будет ряд. Отдельные значения этой постоянной будут определены из решения краевой задачи.

Уравнение для плотности тока имеет вид:

$$\delta = \sum_n \left[ A_n' I_1(jar) + B_n' Y_1(jar) \right] \cos mz, \quad (2.14)$$

где  $I_1(jar)$  и  $Y_1(jar)$  - функции Бесселя мнимого аргумента.

Из уравнений (2.9) и (2.14) для напряженности магнитного поля в осевом направлении получаем выражение:

$$H_z = -\frac{a}{k^2} \sum_n \left[ A_n' I_0(jar) + B_n' Y_0(jar) \right] \cos mz. \quad (2.15)$$

Аналогично для радиальной составляющей:

$$H_r = -\frac{m}{jk^2} \sum_n \left[ A_n' I_1(jar) + B_n' Y_1(jar) \right] \sin mz. \quad (2.16)$$

Для определения постоянных интегрирования  $A_n'$  и  $B_n'$  необходимо решить краевую задачу, в которой предполагаем, что осевая составляющая магнитного поля  $H_z$ , соответствующая участкам  $r_p$  и  $r_{p+1}$  рассматриваемого  $p$ -го уровня, постоянна по высоте витка. Согласно (рис. 2.10) осевая составляющая напряженности МП линейно уменьшается к поверхности, где её с достаточной степенью точности можно принять равной 0.

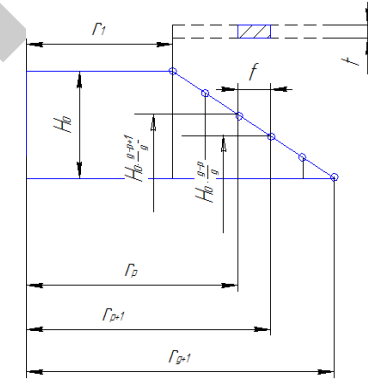


Рис. 2.10. Распределение напряженности МП в зоне обработки

Для  $p$ -го значения напряженности МП в осевом направлении, например, на участке  $r_p$  будет иметь следующее выражение:

$$H_z(r = r_p) = H_0 \frac{g - p + 1}{g},$$

а на участке  $r_{p+1}$ :

$$H_z(r = r_{p+1}) = H_0 \frac{g - p}{g},$$

где  $g$  – число слоев.

Тогда для обрабатываемой детали в этом слое из уравнения (2.16) следует:

$$H_0 \frac{g-p+1}{g} = \frac{4}{\pi k^2} \sum_n [A_n I_0(jar_p) + B_n Y_0(jar_p)] \cdot a \cos mz. \quad (2.17)$$

$$H_0 \frac{g-p}{g} = \frac{4}{\pi k^2} \sum_n [A_n I_0(jar_{p+1}) + B_n Y_0(jar_{p+1})] \cdot a \cos mz. \quad (2.18)$$

при условии, что  $A' = \frac{4}{\pi} A_n$ ,

$$B'_n = \frac{4}{\pi} B_n.$$

Для постоянной по высоте витка  $-\frac{t}{2} < z < +\frac{t}{2}$  основной составляющей напряженности МП выразим ее.

Вне части уравнений (2.17) и (2.18):

$$H_0 \frac{g-p_1+1}{g} = \frac{4}{\pi} H_0 \frac{g-p+1}{g} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{j^{n-1}}{n} \cos \frac{n\pi}{t} z. \quad (2.19)$$

$$H_0 \frac{g-p}{g} = \frac{4}{\pi} H_0 \frac{g-p}{p} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{j^{n-1}}{n} \cos \frac{n\pi}{t} z. \quad (2.20)$$

Путем сопоставления правой и левой части уравнений 2.19 и 2.20, получаем значение для  $m$ :

$$m = \frac{n\pi}{t},$$

а для постоянных будем иметь:

$$A_n = \frac{k^2 H_0}{ga_n} \cdot \frac{(g-p+1)}{I_0(ja_n r_p)} \cdot \frac{(g-p+1)Y_0(ja_n r_{p+1}) - (g-p)Y_0(ja_n r_p)}{Y_0(ja_n r_{p+1}) - I_0(ja_n r_{p+1})Y_0(ja_n r_p)}. \quad (2.21)$$

$$B_n = \frac{k^2 n H_0}{ga_n} \cdot \frac{(g-p)I_0(ja_n r_p) - (g-p+1)I_0(ja_n r_{p+1})}{I_0(jar_p)Y_0(ja_n r_{p+1}) - I_0(ja_n r_{p+1})Y_0(ja_n r_p)}. \quad (2.22)$$

Комплексная постоянная для отдельных решений равна:

$$a_n^2 = jk^2 + \left(\frac{n\pi}{t}\right)^2.$$

В случае больших значений аргумента Бесселя используем приближенные значения:

$$I_0(jx) \approx \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}}; \quad Y_0(jx) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2x}} \cdot e^{-x};$$

$$I_1(jx) \approx j \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}}; \quad Y_1(jx) \approx -j \sqrt{\frac{\pi}{2x}} \cdot e^{-x}.$$

Используя эти соотношения в уравнениях 2.19, 2.20 и 2.14 получим уравнение плотности тока в виде:

$$\delta = \frac{4k^2 H_0}{\pi g} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{j^n}{na_n} \left[ \frac{(g-p+1)cha_n(r_{p+1}-r)}{sha_n v} \cdot \sqrt{\frac{r_p}{r}} - \frac{(g-p)cha_n(r_p-r)}{sha_n v} \cdot \sqrt{\frac{r_{p+1}}{r}} \right] \cos \frac{n\pi}{t} z. \quad (2.23)$$

Таким же образом получаем уравнения для осевой и радиальной составляющих напряженности МП:

$$H_z = \frac{4H_0}{gt} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{jn}{n} \left[ \frac{(g-p+1)sha_n(r_{p+1}-r)}{sha_n v} \cdot \sqrt{\frac{r_p}{r}} - \frac{(g-p)sha_n(r_p-r)}{sha_n v} \cdot \sqrt{\frac{r_{p+1}}{r}} \right] \cos \frac{n\pi}{t} z; \quad (2.24)$$

$$H_r = \frac{4H_0}{gt} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left[ \frac{(g-p+1)cha_n(r_{p+1}-r)}{sha_n r} \cdot \sqrt{\frac{r_p}{r}} - \frac{(g-p)cha_n(r_p-r)}{sha_n v} \cdot \sqrt{\frac{r_{p+1}}{r}} \right] \sin \frac{n\pi}{t} z. \quad (2.25)$$

В результате проведенных численных расчетов получены зависимости напряженности МП от конусности рабочего зазора.

Для экспериментального подтверждения полученных результатов расчета были проведены экспериментальные исследования МАО поверхности плафонов (материал Л63 ГОСТ 15527-2004),

размеры детали  $D \times d \times l = 110 \times 55 \times 75$  мм, толщина стенки составляет 0,5 мм (рис. 2.11). Конусность плафонов составляет 1:0,5 (что соответствует углу конуса  $\alpha = 45^\circ$ ). Диапазоны режимов MAO были приняты следующие: величина магнитной индукции  $B = 0,25 \dots 1$  Тл; скорость резания  $V_{рез} = 0,75 \dots 3$  м/с; скорость осцилляции,  $V_o = 0,1$  м/с; амплитуда осцилляции  $A = 1 \dots 5$  мм; величина рабочего зазора  $\delta = 1$  мм при эквидистантном профиле по отношению к детали; коэффициент заполнения рабочего зазора  $K_z = 1$ ; размерность частиц ФАП  $\Delta = 63/100$  мкм; ФАП – Полимам-Т ТУ 06459-81 и МАП АСМ; СОТС – СинМА-1 ТУ 38.59.01176-91, 3 % -ный водный раствор; скорость подачи СОТС  $w = 0,55$  м/с; время обработки  $t = 120$  с (черновая обработка плафонов производилась ФАП Полимам-Т в течение 60 с, чистовая - МАП АСМ также в течение 60 с).

Величину светоотражательной способности определяли блескомером БФ5-20/20 по ГОСТ 896-69. Углы конусов плафонов и профилированных полюсных наконечников определяли путем использования синусной линейки ГОСТ 4046 - II типа и расстоянием между осями роликов 300 мм. Изменение величины магнитной индукции производилась тесламетром Т – 3.

Конфигурация плафона (полый усеченный конус) позволяет использовать три варианта схемы рабочей зоны для ее обработки. Все варианты связаны с профилированием полюсных наконечников, только в первом случае угол данного профиля составляет  $\alpha = 15^\circ$ , во втором –  $\alpha = 30^\circ$ , в третьем –  $\alpha = 45^\circ$ .



Рис. 2.11. Плафон после обработки методом MAO

Результаты исследований представлены на рис. 2.12.

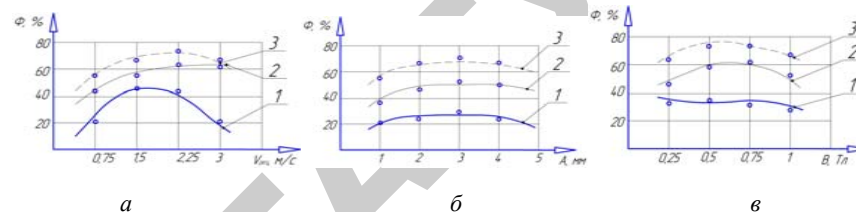


Рис. 2.12. Зависимость показателя светоотражательной способности ( $\Phi$ , %) плафонов от скорости резания: а – скорость резания  $V_{рез}$  м/с; б – амплитуды  $A$  мм; в – величины магнитной индукции  $B$  Тл

В результате анализа результатов проведенных экспериментальных исследований установлено, что при использовании профилированного полюсного наконечника с углом  $\alpha = 15^\circ$  обработка происходит не по всей площади поверхности конуса плафона, т.к. часть ФАП концентрируется в зоне с меньшей величиной рабочего зазора и уплотняется там. Увеличение скорости резания и амплитуды осцилляции способствует этому явлению. Измерения магнитной индукции показывают, что уменьшение ее величины приводит к снижению качества обработки при применении данного варианта схемы.

При использовании второго варианта схемы ( $\alpha = 30^\circ$ ) разница величины рабочего зазора по краям полюсного наконечника составляет от 3 до 5 мм. В результате достигается равномерность обработки по всей зоне поверхности плафона и светоотражательная способность достигает 65...70 %. Однако увеличение скорости резания и магнитной индукции приводит к увеличению давления ферроабразивной щетки в области с меньшим показателем значения рабочего зазора из-за падения подвижности частиц ФАП и в конечном итоге к разнице светоотражательной способности на данных участках в среднем на 20 % и даже образованию рисок на поверхности в зоне с меньшей величиной рабочего зазора.

Процесс обработки методом MAO плафонов при профилировании полюсных наконечников по третьему варианту ( $\alpha = 45^\circ$ ) производится на требуемом качественном уровне, но при обязательном условии использования мягких режимов.

При проведении экспериментальных исследований были определены режимы MAO плафонов ( $V_{рез} = 2,25$  м/с,  $B = 0,75$  Тл,  $A = 3$  мм), при которых светоотражательная способность достигается 75...80 %.



#### 2.2.4. Магнитно-абразивная обработка криволинейных поверхностей пуансонов при повышенной жесткости инструмента

Растущие требования к повышению производительности, точности и качеству обработки сложнопрофильных поверхностей приводят к созданию новых высокоэффективных способов механической, в том числе и финишной обработки. В условиях высокой конкуренции необходима своевременная и быстрая подготовка производства к выпуску нового изделия. Применение систем с изменяющимися элементами режущего инструмента для сложнопрофильных деталей позволяет сократить сроки настройки оборудования на выпуск новой номенклатуры сложнопрофильных деталей. Традиционно используемые формы инструмента с неизменяемой рабочей геометрией связаны с необходимостью создания многокоординатных моделей станочного оборудования, что резко усложняет кинематику процесса, требует использования трудоемких методов анализа и синтеза оценки станочных систем. На данную систему воздействуют внутренние и внешние факторы, которые приводят к отклонению хода технологического процесса и заключаются в возникновении упругих деформаций элементов ТС, их износе, вибрациях и т.п. Использование САД/САМ моделирования для адекватного управления ТС требует оснащения станочного оборудования со специализированно изменяемыми элементами в виде глобусных столов или поворотных инструментальных головок, что повышает стоимость обработки и самого станочного комплекса. Кроме того, автоматизация программирования связана с необходимостью описания геометрической информации, на основе новых методов типа сплайн-функций, которые, однако, обязательно должны быть экспериментально проверены. Также процесс обработки сложнопрофильных деталей характеризуется повышенным динамическим воздействием со стороны сил инерции, представляющих собой противодействие материальной точки изменению ее скорости из-за необходимости варьирования скоростями подач по координатным осям ввиду изменения припуска вдоль обрабатываемой кривизны контура детали [70].

Одним из путей решения данной проблемы является применение другого рода инструмента, а именно подвижно координированного, характерного для магнитно-абразивной обработки [71].

Однако проблемой для реализации процесса МАО сложнопрофильных поверхностей является необходимость создания равных величин давления рабочей технологической среды (РТС) на различных участках обрабатываемой поверхности, отличающихся формой и геометрическими размерами. Силовой характеристикой для МАО в условиях ЭМП служит напряженность  $H$ , и поэтому возникает необходимость установления ее величин в каждой точке топологического пространства зоны обработки, что обеспечивает управление обрабатываемостью многими видами сложнопрофильных поверхностей.

Предложен ряд методов определения напряженности ЭМП для различного рода деталей, например, сплошных цилиндрических, полых и т.д., в результате использования которых выявляется величина напряженности на поверхности детали, но всякий раз эта величина зависит от напряженности внешнего по отношению к зоне обработки поля [72, 73].

В связи с вышеизложенным возникает необходимость в установлении значений напряженности внешнего поля, знание величины которой обеспечивает ее определение в зоне обработки в каждой точке поля. Известно, что в пределах областей с распределением тока магнитное поле описывается через векторный потенциал при учете его равномерной плотности по поперечному сечению магнитопровода [74]. Вид решения должен зависеть от конфигурации и магнитной проницаемости магнитопровода, что позволяет найти решение уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu\mu_0 J, \quad (2.26)$$

где  $A$  – векторный потенциал, Тл/м;

$\mu$  – относительная магнитная индукция;

$\mu_0$  – относительная магнитная проницаемость, Г/м;

$J$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>.

Конфигурация границ, которая наиболее полно исследуется, аналитически представляет собой прямоугольник при наличии того, что противолежащие стороны в первом случае являются эквипотенциалами, во втором имеют конечную магнитную проницае-

мость. Поскольку сечение магнитопровода для ЭМС есть прямоугольник и только подобная форма поддается анализу, то именно присутствие этой формы обеспечивает решение задачи, в которой границы дают конечное число отображений и которое заключается в интегрировании векторной потенциальной функции линейного тока в пределах областей, занятых этим током.

В общем случае решение уравнения Пуассона достигается с большей трудоемкостью, чем уравнение Лапласа, и поэтому имеется возможность замены действительной пуассоновой области нитью (нитями) тока. Тогда все поле сводится к лапласовому. Например, влияние распределенного тока во внешней по отношению к нему области можно представить введением одной или нескольких нитей тока с бесконечно малым поперечным сечением.

В качестве метода решения избирается аналитический, поскольку итогом является алгебраическое уравнение, в которое подставляют значения параметров, определяющих поле. Основное достоинство аналитического метода заключается в возможности получения общего решения, которое позволяет составить полное представление о влиянии различных параметров. Одним из условий служит равномерность распределения плотности тока  $J$  по поперечному сечению проводников различной конфигурации. Также поле распределенного тока определяется наличием полей бесконечно большого числа элементарных линейных токов согласно условию лапласовой области, в совокупности составляющих распределенный ток. Таким образом, распределение  $A$  находится путем интегрирования векторной потенциальной функции линейного тока по сечению проводника.

Рассмотрим полюсный наконечник прямоугольного сечения с размерами  $2a$  и  $2b$  (рис. 2.13).

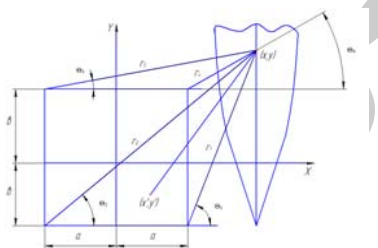


Рис. 2.13. Схема для определения напряженности внешнего магнитного поля

Ток проходящий через данный наконечник, равен  $I$ , его плотность  $J = I/4ab$ , а ток протекающий по волокну с сечением  $dx'dy'$  ( $x'$  и  $y'$  - координаты произвольного волокна полюсного наконечника), равен  $i = \frac{I}{4ab} dx'dy'$ . Принимая во внимание, что начало отсчета  $A$  выбирается произвольно, ее зависимость можно представить следующим образом:

$$A = \frac{\mu_0}{2\pi} i \ln r. \quad (2.27)$$

На основании формулы (2.27) определяется поле, создаваемое всеми элементами полюсного наконечника путем подстановки значения  $i$  и интегрирования по сечению прямоугольника. Главным результатом служит установление значения векторного потенциала в произвольной точке  $(x, y)$  на расстоянии  $r$  от поверхности полюсного наконечника с координатами  $(x', y')$ , которое описывается соотношением:

$$A = \frac{\mu_0 I}{8\pi ab} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \ln r dx'dy'. \quad (2.28)$$

Практическим результатом данного соотношения служит то, что через это значение устанавливается значение  $H$  внешнего поля в уравнении (2.27), позволяющее выявить величину  $H$  в зависимости от формы детали и ее положения в зоне обработки, а следовательно, и давление РТС в каждой точке сложнопрофильной поверхности детали. В свою очередь получение представления о наличии разницы давления РТС на различных участках поверхности детали указывает на необходимость нивелирования этой разницы и последующей коррекции с целью обеспечения равномерности съема материала, что достигается варьированием профиля контура полюсного наконечника.

Выразив  $r$  через координаты точки, получим:

$$A = \frac{\mu_0 I}{16\pi ab} \int_{-a-b}^a \int_{-a-b}^b \ln \left[ (x' - x)^2 + (y' - y)^2 \right] dx' dy'. \quad (2.29)$$

Данный интеграл определяется через элементарные функции и конечный результат имеет вид:

$$A = \frac{\mu_0 I}{16\pi ab} \left\{ \begin{aligned} &(a-x)(b-y) \ln[(a-x)^2 + (b-y)^2] + \\ &+ (a+x)(b-y) \ln[(a+x)^2 + (b-y)^2] + (a-x)(b-y) \ln[(a-x)^2 + \\ &+ (b+y)^2] + (a+x)(b+y) \ln[(a+x)^2 + (b+y)^2] + (a+x) \ln[(a+x)^2 + \\ &+ (b+y)^2] + (a-x)^2 \left[ \operatorname{arctg} \frac{b-y}{a-x} + \operatorname{arctg} \frac{b+y}{a-x} \right] + (a+x)^2 \left[ \operatorname{arctg} \frac{b-y}{a+x} + \right. \\ &+ \left. \operatorname{arctg} \frac{b+y}{a+x} \right] + (b-y)^2 \left[ \operatorname{arctg} \frac{a-x}{b-y} + \operatorname{arctg} \frac{a+x}{b-y} \right] + (b+y)^2 \times \\ &\times \left[ \operatorname{arctg} \frac{a-x}{b+y} + \operatorname{arctg} \frac{a+x}{b+y} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

Составляющие напряженности поля  $H_x$  и  $H_y$  определяются следующим образом:

$$H_x = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial A}{\partial y}, \quad H_y = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial A}{\partial x}.$$

Согласно рис. 2.13 путем введения расстояния  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  и  $r_4$  от рассматриваемой точки поля до вершин углов прямоугольного полюсного наконечника  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  и  $\theta_4$ , получены при пересечении линий, проведенных в вершины углов.

$$H_x = \frac{I}{8\pi ab} \left[ (y+b)(\theta_1 - \theta_2) - (y-b)(\theta_3 - \theta_4) + (x+a) \ln \frac{r_2}{r_3} - (x-a) \ln \frac{r_1}{r_4} \right]. \quad (2.31)$$

$$H_y = \frac{I}{8\pi ab} \left[ (x+a)(\theta_2 - \theta_3) - (x-a)(\theta_1 - \theta_4) + (y+b) \ln \frac{r_2}{r_1} - (y-b) \ln \frac{r_3}{r_4} \right]. \quad (2.32)$$

При рассмотрении процесса обработки методом МАО пуансона, имеющего криволинейный контур его рабочей части, можно определить величины в зависимости от диаметральных и линейных размеров этой его части. В случае резкого отличия величины  $H$  в верхней и нижней точках криволинейного контура по всей длине или

диаметру пуансона следует производить профилирование полюсного наконечника, но в данном случае при имеющихся размерах этого пуансона (рис. 2.14), в результате проведенных экспериментальных исследованиях установлено, что профилирование полюсного наконечника не требуется. Это связано с тем, что разница величин напряженности, следовательно, и отклонение давления в вышеуказанных точках составляет не более 15 %, и оно является вполне допустимым для использования данной схемы обработки.



Рис. 2.14. Фотография пуансона в зоне обработки

Параметры и режимы МАО: величина магнитной индукции  $B = 0,8 \dots 1,2$  Тл; скорость резания,  $v_p = 1,5 \dots 2,5$  м/с; частота подачи ротора,  $n = 0,5$  об/мин; амплитуда осцилляции  $A = 1,5 \dots 2,5$  мм; величина рабочего зазора  $\delta = 2,5$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора  $K_3 = 1$ , время обработки  $t = 30 \dots 90$  с.

В качестве ФАП использовался Fe-TiC ТУ 88-147.002-75, смазочно-охлаждающие технологические средства СинМА – 1 ТУ 38.5901176 – 91,5 % водный раствор, шероховатость пуансонов до обработки составляла  $Ra 1,2 \dots 1,6$  мкм. Материал – X12 ГОСТ 5950-2000 твердость 55...58 HRCэ. Массовый съем материала определяется взвешиванием пуансонов на весах аналитических ВЛА – 1 с точностью до 0,001 г. Изменение шероховатости поверхности пуансонов до и после обработки производилось на профилографе – профилометре мод. «252-Калибр».

На рис. 2.15 представлены исследования величины съема материала пуансонов от времени обработки, а на рис. 2.16 и рис. 2.17 соответственно величины шероховатости поверхности также от времени отработки и шероховатости поверхности от скорости пуансона.

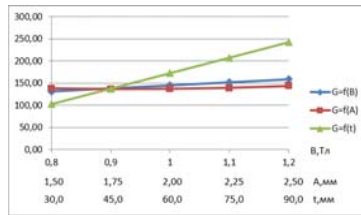


Рис. 2.15. Зависимость величины съема материала пуансонов ( $G$ ) от времени обработки ( $t$ )

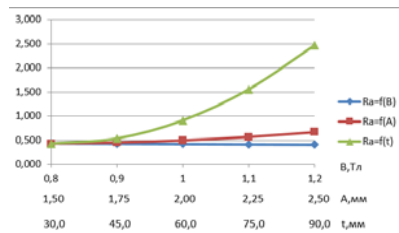


Рис. 2.16. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности ( $Ra$ ) от времени отработки ( $t$ )

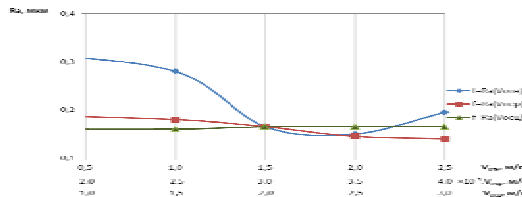


Рис. 2.17. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности ( $Ra$ ) от относительной ( $V_{отн}$ ), переносной ( $V_{пер}$ ) и осциллирующей ( $V_{осц}$ ) скоростей пуансона

Анализ данных таблицы графиков, изображенных на рис. 2.15-2.17, показывает, что применение следующего параметра и режима МАО:  $B = 1,0$  Тл; скорость резания  $v_p = 2,0$  м/с; частота подачи ротора  $n = 0,5$  об/мин; амплитуда осцилляции,  $A = 2$  мм, величина рабочего зазора  $\delta = 2,5$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора  $K_3 = 1$ , время обработки  $t = 60$  с, обеспечивает получение наилучших показателей шероховатости и съема материала пуансона.

## 2.2.5. Магнитно-абразивная обработка полых цилиндрических поверхностей деталей

Первые перьевые автоматические ручки стали производить в XIX веке из определенных видов каучука, имеющего отличные от других его видов высокие механические свойства, а на стенки корпусов наносили различный орнамент или накатывали пластины золота и серебра. Однако, несмотря на то, что некоторые смолы образуют устойчивость к механическим повреждениям, условия временно-климатического характера серьезным образом сказываются на товарном виде продукции, а различные динамические воздействия быстро приводят эти детали к выходу из строя и разрушению.

В настоящее время для изготовления ручек подобного рода применяются в основном стали, латуни и другие сплавы, в том числе благородные металлы (серебро, золото, палладий, платина и т.п.). Эти ручки имеют прочные, устойчивые к механическим повреждениям корпус и крышку (рис. 2.18).



Рис. 2.18. Крышки автоматических перьевых ручек

В массовом производстве автоматических перьевых ручек способность нержавеющей стали, как материала, активно сопротивляться атмосферной коррозии и воздействию различных сортов чернил, возможности нанесения покрытий и низкой стоимости обуславливают ее широкое использование в отличие, например, от латуни, требующей обязательного лакового или хромового покрытия из-за потемнения.

Для получения товарного вида корпуса и крышки перьевых автоматических ручек их полируют для получения светоотражательной способности от зеркального блеска до матового с соответст-

вующей гравировкой. Однако обработка широко используемой нержавеющей стали по причине высокого содержания в ней хрома и никеля имеет сложности при таких финишных операциях, как шлифование и полирование. В первом случае из-за высокой пластичности и вязкости этой стали шлифовальный круг засаливается и быстро теряет свои режущие свойства, во втором – процесс является низкопроизводительным из-за химических реакций окислительно-восстановительного характера, сопровождающих процесс полирования.

В настоящее время имеет место тенденция создания и использования электрофизических и электрохимических методов обработки, среди которых особое место занимает финишная магнитно-абразивная обработка [75] (рис. 2.19). Однако проблема обработки методом MAO заключается в необходимости определения топографии электромагнитного поля в зоне обработки по причине установления знака и места приложения сил резания, обусловленных напряженностью  $H$  этого поля, с целью повышения эффективности процесса размерного и массового съема материала.



Рис. 2.19. Фотография рабочей зоны при MAO

ЭМП в каждой точке пространства и в каждый момент времени характеризуется вектором его напряженности, поскольку оно рассматривается как самостоятельный материальный объект [76]. Однако применение графических методов определения топографии ЭМП, и соответственно напряженности, не позволило провести строгий анализ динамического воздействия, ввиду чего не удалось получить положительного результата при MAO беговых дорожек обойм шариковых подшипников [47]. В этих условиях грамотное конструктивное решение не должно полностью связываться с ин-

туитивным подходом, а необходимо произвести строгий учет геометрии исследуемой области и достоверный синтез и точное знание картины сил резания, определяемых вектором напряженности  $\vec{H}$ . Системный подход является базой для решения комплексной задачи проблемы интенсификации MAO крышек автоматических перьевых ручек в области формообразования и средств его реализации. Повышение эффективности операции MAO обеспечивается геометрическими и кинематическими методами оценки и реализации процесса съема материала при условии равномерности силового воздействия рабочей технологической среды на обрабатываемую поверхность. Расчет и создание необходимой напряженности ЭМП, основанной на геометрическом и силовом изменении параметров MAO, необходимы для конструирования технологической оснастки и оборудования, обеспечивающих стабильность давления РТС по всей площади обрабатываемой поверхности.

Тождественность математического описания процесса MAO и его природы обеспечивает управление обрабатываемостью деталей из различных материалов и позволяет назначать режимы резания при учете структуры и марки материала изделия, его конфигурации и топологического пространства зоны обработки.

Расчет производился в системе цилиндрических координат. Значение векторного потенциала магнитного поля (МП), связанного с током  $I$  в определенной точке  $M$ , находящейся на расстоянии  $r_1$  и  $r_2$  от осей проводников с током, определяется по формуле [77]:

$$A_z = -\frac{M_0 I}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_2} + C$$

и осуществляется использованием метода наложения через выражение ротора  $\text{rot } \vec{A}$  в цилиндрических координатах. Вектор  $\vec{A}$  направлен на оси проводника и потому имеет только осевую составляющую  $\vec{A}_z$ . Считая, что в точке  $O$   $A_z = 0$ , имеем:

$$A_z = \frac{M_0 I}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (2.33)$$

Ротор ( $\text{rot } \vec{A}$ ) равен магнитной индукции  $\vec{B}$ , а сам векторный потенциал является векторной величиной, плавно изменяющейся от точки к точке при учете того, что его дивергенция  $\text{div} \vec{A} = 0$ . По причине возможности нахождения  $\vec{A}$  как функции координат, индукция  $\vec{B}$  в любой точке магнитного поля определяется путем нахождения ротора от  $\vec{A}$ . Преимуществом использования векторного потенциала служит то обстоятельство, что его применяют как для областей занятых, так и незанятых током. Поскольку  $\vec{A}$  является расчетной функцией, имеющей пространственные производные и подчиняется условию того, что его линии есть замкнутые на себя ( $\text{div} \vec{A} = 0$ ), то формула (2.33), как частный случай, имеет вид:

$$\vec{A} = \frac{M_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{\delta} dV}{R}, \quad (2.34)$$

где  $\vec{\delta}$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;

$V$  – объем, м<sup>3</sup>;

$R$  – расстояние от точки приложения, м, которое позволяет определить векторный потенциал в любой точке МП.

Оценка ЭМП для МАО указывает, что данная система носит вихревой характер по причине соленоидального типа его конструкции.

$$\text{div}(\text{rot} \vec{A}) = \nabla(\nabla \vec{A}),$$

где  $\nabla$  – дифференциальный оператор. Его скалярное произведение равно нулю, но ротор вектора  $\vec{B}$  в целом ряде точек поля нулю не равен.

При помещении в рабочую зону  $I$  (рис. 2.20) крышек автоматических перьевых ручек, представляющих собой полую цилиндрическую деталь, обладающую переносным и вращательным движениями, происходит деформирование линий магнитной индукции (рис. 2.21).

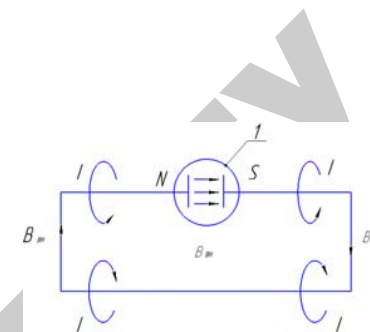


Рис. 2.20. Схема электромагнитной системы для наружной МАО

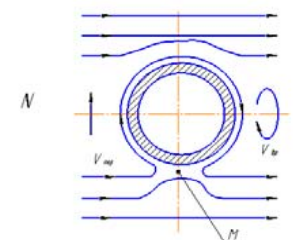


Рис. 2.21. Схема электромагнитного поля при магнитно-абразивной обработке крышек автоматических перьевых ручек

Линии магнитной индукции непосредственно у поверхности детали имеют вид, близкий к окружностям с центром внутри этой детали. По мере удаления от нее эти линии искажаются, и для обработки методом МАО необходимо знать величины и направления  $\vec{B}$  на наружной поверхности детали, поскольку  $\vec{B}$  определяет силу резания и давления ФАП для реализации размерного и массового съема материала.

Таким образом, в зоне обработки методом МАО существует ось ветвления, проходящая через точку  $M$  с координатами  $r = \frac{\mu_0 I}{2\pi B_{\text{вн}}}$  и

$\theta = 180^\circ$ , где  $B$  во всех точках равно нулю, но в других точках на поверхности детали она нулю не равна, поскольку поле, как ранее отмечалось, имеет вихревой характер. Следовательно, используя принцип того, что кривые  $A_z = \text{const}$ , линии магнитной индукции будут окружностями с центрами, лежащими на оси  $x$  и, согласно [77], в любом месте пространства, где существует ток, имеется

вихревое магнитное поле. Поэтому, согласно положению метода насыщения, внутри этих окружностей помещается линия из двух проводников и расчет производится, как указывалось ранее, вышеуказанным методом для определения  $B$  в точке  $M$ , лежащей на наружной поверхности детали (рис. 2.22).

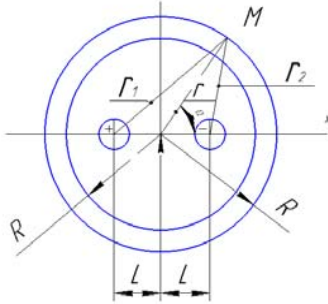


Рис. 2.22. Схема расчета магнитного поля

Двухпроводная линия при учете нахождения проводников на расстоянии  $2L$  расположена во внутреннем пространстве детали, имеющей наружный радиус  $R_1$  и внутренний радиус  $R_2$ .

$$r_2^2 = r^2 + L^2 - 2Lr \cos \theta. \quad (2.36)$$

Поскольку  $2 \cos \theta = e^{j\theta} + e^{-j\theta}$ , то:

$$r_2^2 = r^2 \left( 1 - \frac{L}{r} e^{j\theta} \right) \left( 1 - \frac{L}{r} e^{-j\theta} \right). \quad (2.37)$$

Аналогично:

$$r_1^2 = r^2 + L^2 + 2Lr \cos \theta = r^2 \left( 1 + \frac{L}{r} e^{j\theta} \right) \left( 1 + \frac{L}{r} e^{-j\theta} \right). \quad (2.38)$$

Следовательно, логарифм в формуле (2.39) имеет четыре слагаемых, и каждый из них разлагается в ряд:

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 = \frac{1}{2} \left[ \ln \left( 1 - \frac{L}{r} e^{j\theta} \right) + \ln \left( 1 - \frac{L}{r} e^{-j\theta} \right) - \ln \left( 1 + \frac{L}{r} e^{j\theta} \right) - \ln \left( 1 + \frac{L}{r} e^{-j\theta} \right) \right]. \quad (2.39)$$

Члены рядов с четными степенями сокращаются и после  $e^{jk\theta} + e^{-jk\theta} = 2 \cos k\theta$  следует:

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = - \left[ \frac{L}{r} \cos \theta + \frac{1}{3} \left( \frac{L}{r} \right)^3 \cos(3\theta) + \frac{1}{5} \left( \frac{L}{r} \right)^5 \cos(5\theta) + \dots \right], \quad (r > L). \quad (2.40)$$

Этот ряд сходится при  $r > L$ , что соответствует размерной цепи детали и во внешней области по отношению к крышкам автоматических перьевых ручек в выражении векторного потенциала присутствуют члены, содержащие  $1/r^n$ , поскольку при  $r \rightarrow \infty$  значение  $A_z$  для внешней области обращается в ноль, что вытекает из формулы (2.33).

Тогда:

$$A_z = - \frac{M_0 I}{\pi} \sum \frac{P_n}{r^n} \cos n\theta \quad \text{при } (r \geq R_2; \quad n = 1, 3, 5, \dots). \quad (2.41)$$

В соответствии с выражением ротора в цилиндрических координатах магнитная индукция имеет радиальную  $B_r$  и  $B_\theta$  составляющие.

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{dA_z}{d\theta} \quad \text{и} \quad B_\theta = - \frac{dA_z}{dr}. \quad (2.42)$$

Для определения постоянной  $P_n$  используются граничные условия в виде непрерывности радиальных составляющих магнитной индукции, которые сохраняют силу для любых значений координатного угла  $\theta$ , что возможно при подчинении этим углом по отдельности каждой пары членов рядов, получаемых путем дифференцирования выражений векторного потенциала по формуле (2.41), согласно закономерности (2.42). После подстановки постоянных в формулы магнитной индукции получаются сходящиеся ряды и во внешней области при  $r > 5L$  второй член оказывается меньше 1% от первого члена, и остальные члены отбрасываются.

На рис. 2.23 представлена схема установки обрабатываемых изделий в рабочей зоне области станка МАРС-15 для МАО поверхностей деталей из немагнитных материалов. Рабочую зону между полюсами N и S ЭМС I заполняют РТС, состоящей из ФАП и СОТС, и помещают в эту зону обрабатываемые крышки автоматических перьевых ручек. Крышкам сообщают поступательное, вращательное и осциллирующее движения по кольцевому зазору. Внедряясь в порошкообразную массу РТС, крышки обрабатываются при условии отсутствия затухания процесса массового и размерного съема материала.

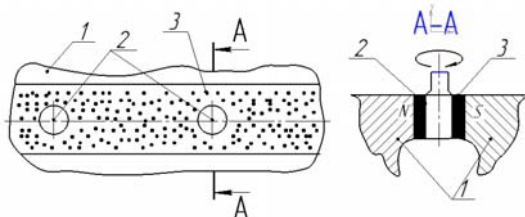


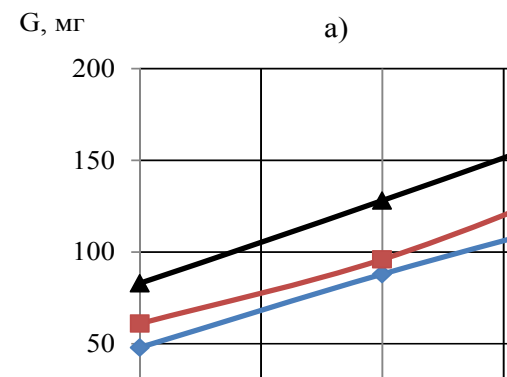
Рис. 2.23. Схема установки для МАО поверхностей крышек автоматических перьевых ручек: 1 – полюса электромагнита; 2 – обрабатываемое изделие; 3 – РТС

Поскольку, согласно приведенному расчету напряженности  $H$  на поверхности крышек, ее наибольшее значение будет при  $\theta = 0$  или  $\theta = \pi$  будет равно  $H = -2H_0$ , то основными условиями эффективности МАО этих крышек служат кинематические и динамические показатели процесса. Режимы и параметры МАО крышек автоматических перьевых ручек являются: магнитная индукция  $B = 0,9$  Тл; частота осцилляции полюсных наконечников  $n = 280$  дв.ход/мин; амплитуда осцилляции полюсных наконечников  $A = 0,8$  мм; скорость резания  $V_p = 2 \dots 3$  м/с; величина силы тока, подаваемого на катушки ЭМС  $I = 5$  А; величина рабочего зазора  $\delta = 1$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора  $K_z = 1$ ; время обработки  $t = 60$  с; ФАП использовались: 1) Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81; 2) Р6М5 ТУ 27-104-02-86; 3) 100Ф5 ТУ 232-130-004-90, размерность  $\Delta = 0,1 \dots 0,16$  мм; СОТС: 1) СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5 % -ный водный раствор; 2) Аквапол-1 ТУ 38.1011061-86, 3 % -ный водный раствор; 3) Пенол-2 ТУ 38.591218-90, 1 % -ный водный раствор; расход СОТС – 200 мл/мин.

Величину размерного съема ( $\Delta D$ , мкм) определяли на микроскопе МИМ-201; массового съема ( $\Delta G$ , мг) – на весах лабораторных ВЛТ-1; шероховатость поверхности до ( $Ra_1$ , мкм) и после МАО ( $Ra_2$ , мкм) – на профилографе-профилометре мод. «252-Калибр», светоотражательную способность – на блескомере ФБ-1.

Размеры крышек автоматических перьевых ручек (в верхнем сечении)  $D \times d = 10 \times 0,25$  мм,  $L = 50$  мм. Исходная шероховатость составляла  $Ra_1 = 0,6 \dots 0,8$  мкм. Величину магнитной индукции в рабочем зазоре ( $B$ , Тл) определяли тесламетром Т-3.

Результаты исследований представлены на рис. 2.24. Особенностью обработки методом МАО явилось то, что для РТС №1 (ФАП – Ж15КТ и СОТС – СинМА-1 в сравнении с РТС №2 (ФАП – Р6М5 и СОТС – Аквапол-1 показатели светоотражающей способности после МАО оказались ниже, в то время, как для параметров шероховатости картина совершенно противоположная. Однако достаточным и полным объяснением этого факта служит высокая степень насыщения поверхностного слоя крышек автоматических перьевых ручек мелкодисперсным остаточным углеродом, что существенно повышает степень поглощения света поверхностью черного цвета, образованной внедрением этого углерода.





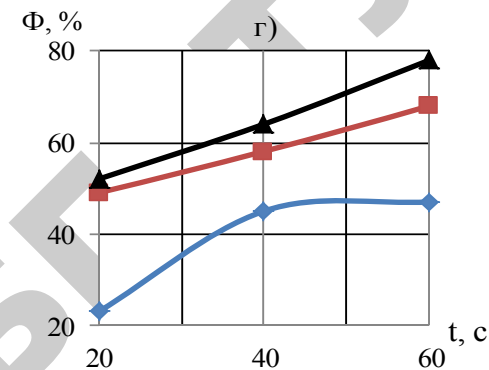
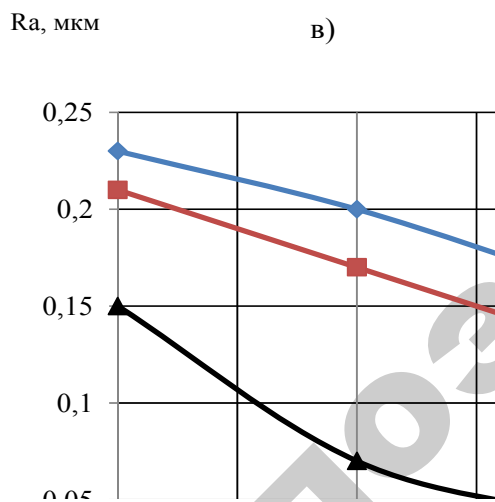
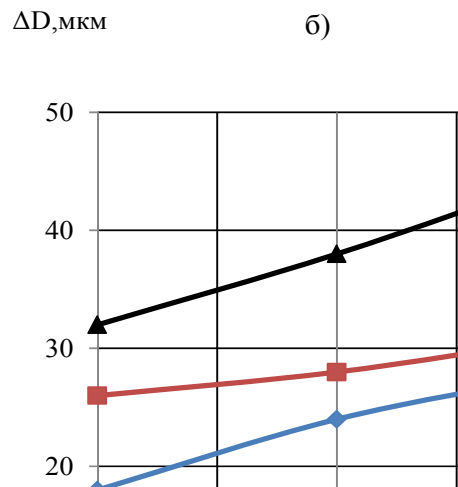


Рис. 2.24. Зависимость массового ( $G$ , мг) и размерного ( $\Delta D$ , мкм) съема материала (а и б); шероховатости поверхности ( $Ra$ , мкм) и светоотражательной способности ( $\Phi$ , %) после МАО от времени при применении различных РТС: I – Ж15КТ и СинМА-1; II – Р6М5 и Аквапол-1; III – 100Ф5 и Пенол-2

В результате проведенных исследований установлены аналитические зависимости для определения величины напряженности ЭМП, что обеспечивает определение динамики процесса и степень силового воздействия на обрабатываемые детали. Экспериментально определены качественные показатели поверхностного слоя (шероховатость поверхности и светоотражательная способность) при применении разных РТС, что позволило разработать технологию МАО крышек автоматических перьевых ручек.

#### 2.2.6. Магнитно-абразивная обработка цилиндрических поверхностей пуансонов

В машиностроении широко применяют высокопроизводительные процессы изготовления деталей холодным деформированием. В качестве инструментов для осуществления этих процессов используется стержневой инструмент, как правило, сложного профиля (пуансоны), отличающегося от цилиндрического. Установлено [78], что основными причинами выхода из строя пуансонов являются: адгезия контактной части материала пуансона к материалу обрабатываемой поверхности

(30 %), деформация (35 %) и скалывание рабочей части пуансона (35 %). При этом практика показывает, что на долговечность пуансонов существенное влияние оказывает качество их рабочих поверхностей.

Показатели качества поверхности стержневого инструмента формируются в процессе изготовления, в основном, на заключительных операциях и поэтому этим операциям в технологических процессах должно уделяться особое внимание. Форма сложнопрофильного пуансона предопределила в качестве отделочной операции полирование. Наибольшее применение получило полирование на настольношлифовальных бабках НШ-01 с ручной подачей наждачной шлифовальной бумаги (ГОСТ 5009-82 М40) к обрабатываемой поверхности. Качество поверхности при такой обработке зависит от квалификации рабочего. Поэтому недостатком полирования является низкая производительность и высокий процент брака (до 10 %) [78].

Для обработки инструментов со сложным профилем рабочей части наиболее эффективными являются способы, основанные на использовании эластичной связки абразивных частиц. Производя анализ отечественных и зарубежных источников, установлено, что одним из таких способов является технология магнитно-абразивной обработки [79], обеспечивающая высокое качество рабочей поверхности. Согласно [80], при использовании МАО была решена задача финишной обработки внутренних поверхностей колец прецизионных подшипников и удаление заусенцев после механической обработки ступенчатых длинномерных валов. При МАО режущим инструментом является ферроабразивный порошок, который находится в рабочем зазоре в подвижно-скоординированном состоянии. Роль связки между абразивными частицами порошка выполняет магнитное поле, обладающее упругими силами воздействия на частицы порошка.

Однако технологические закономерности распределения магнитных потоков при обработке стержневого инструмента сложного профиля недостаточно изучены, что не позволяет обеспечить равномерную обработку поверхности и сдерживает применение этого способа при обработке пуансонов. Интенсивность МАО зависит от того, как сформируется рабочая среда в виде ФАП и смазочно-охлаждающих технологических средств и как силы магнитного поля воздействуют на нее [81]. В связи с этим для интенсификации МАО поверхностей сложного профиля необходимо знать топографию магнитного поля в рабочем зазоре, произвести ее формирование и осуществить процесс управления пара-

метрами магнитного поля. В соответствии с этим поставлены и решены следующие задачи: исследовать топографию магнитного поля в рабочем зазоре для различных составов ФАП; исследовать изменение топографии магнитного поля при различной степени заполнения рабочей зоны ФАП; исследовать зависимость производительности МАО и шероховатости обработанной поверхности от времени обработки.

В этих условиях конструктивное решение связывается с системным подходом при необходимости учета топологии исследуемой области и достоверного синтеза картины сил резания, определяемых вектором напряженности  $\vec{H}$ . Системный подход является базой для решения комплексной задачи проблемы интенсификации МАО пуансонов в области формообразования и условий его реализации. Повышение эффективности операции МАО обеспечивается геометрическими и кинематическими методами оценки и реализации процесса съема материала при выявлении равномерности силового воздействия рабочей технологической среды на обрабатываемую поверхность. Создание необходимой напряженности ЭМП, основанной на геометрическом и силовом изменении параметров МАО, обеспечивает правильную конструкцию технологической оснастки и оборудования, приводя к достижению и стабилизации давления РТС по всей площади обрабатываемого изделия.

Тожественность математического описания процесса МАО и его природы обеспечивает управление обрабатываемостью деталей из различных материалов и позволяет назначать режимы резания при учете структуры и марки материала изделия, его конфигурации и топологического пространства зоны обработки.

Пуансоны представляют собой детали типа сплошного цилиндра, наружная поверхность которого должна быть обработана до  $Ra\ 0,1 \dots 0,2$  мкм. Согласно рис. 2.25, в зоне обработки внутренней области 1 и 3 магнитная проницаемость РТС составляет  $\mu_1$ , в области 2 –  $\mu_2$ . Так как во всех трех областях нет тока, поскольку ЭМП создается катушками соленоида электромагнитной системы на достаточном большом расстоянии от вышеуказанных областей, то поле в них описывается при помощи скалярного магнитного потенциала и уравнения Лапласа  $\nabla^2 \varphi_m = 0$ . Основное допущение заключается в том, что длина детали принимается достаточно протяженной по оси  $z$ , которая перпендикулярна чертежу.

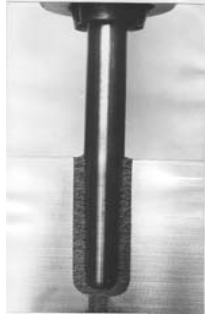


Рис. 2.25. Фотография зоны МАО пуансона

Скалярный магнитный потенциал  $\varphi_M$  зависит от координат  $r$  и  $\theta$  цилиндрической системы. Раскроем уравнение  $\nabla^2 \varphi_M = 0$  в цилиндрической системе:

$$\nabla^2 \varphi_M = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \varphi_M}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi_M}{r^2 \partial \theta^2} = 0. \quad (2.43)$$

Для решения этой задачи необходимо проинтегрировать уравнение Лапласа  $\nabla^2 \varphi_M = 0$ . Для любой конкретной задачи необходим правильный вектор системы координат и выяснение вопроса о том, не обладает ли изучаемое поле тем или иным видом симметрии, поскольку эти условия значительно облегчают решение задачи.

Выражение (2.43) представляет собой уравнение в частных производных, для интегрирования которого применяется метод Фурье: искомую функцию  $\varphi$  полагают в виде произведения двух пока неизвестных функций, одна из которых зависит от  $r$ , а другая от  $\theta$ :

$$\varphi = f_1(r) f_2(\theta). \quad (2.44)$$

Вид функций  $f_1(r)$  и  $f_2(\theta)$  в виде произведения подлежит определению, которое позволяет разбить уравнение в частных производных на два обыкновенных дифференциальных уравнения, из которых одно будет составлено относительно  $f(r)$ , другое – относительно  $f(\theta)$ .

Общее решение для  $\varphi$  согласно (2.44) равно произведению решений уравнений:

$$\frac{1}{f(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial f(r)}{\partial r} \right) = 0 \quad \text{и} \quad \frac{1}{f(\theta) \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial f(\theta)}{\partial \theta} \right) = 0, \quad (2.45)$$

плюс произведение решений уравнений:

$$\frac{1}{f(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial f(r)}{\partial r} \right) = p^2 \quad \text{и} \quad \frac{1}{f(\theta) \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial f(\theta)}{\partial \theta} \right) = -p^2. \quad (2.46)$$

Находится решение путем выбора его из их большого числа, удовлетворяющих граничным условиям и, поскольку  $f(r)$  зависит только от  $r$ , а  $f(\theta)$  – от  $\theta$ , то от частных производных осуществляется переход к обыкновенным.

Продифференцировав уравнение (2.46) и подставив результаты в (2.45), получим уравнение с обыкновенными производными:

$$\frac{r}{\varphi_1} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} \right) = -\frac{1}{\varphi_2} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial \theta^2}. \quad (2.47)$$

Это равенство справедливо при любых конечных значениях координат  $r$  и  $\theta$ , что возможно, если каждая его часть равна постоянной, например,  $p$ .

$$\frac{1}{\varphi_2} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial \theta^2} = -p^2. \quad (2.48)$$

$$\frac{r}{\varphi_1} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} \right) = p^2. \quad (2.49)$$

Интервал уравнения состоит из тригонометрических функций:

$$\varphi_2 = A_1 \cos p\theta + A_2 \sin p\theta. \quad (2.50)$$

Из симметрии поля относительно оси  $x-x$  следует:

$$\varphi_2(\theta) = \varphi_2(-\theta),$$

и поэтому условию удовлетворяет четная функция  $\cos p\theta$ , а член  $\sin p\theta$  должен отсутствовать. Следовательно, отсутствует постоянная  $A = 0$ . Из симметрии поля относительно плоскости  $Y-Y$  вытекает, что эта плоскость является эквипотенциальной. Принимаем по-

тенциал равен нулю. Зависимость значения потенциала от угла  $\theta$  не может содержать функций кратных углов  $p\theta$ , что требует условия  $p = 1$ .

Таким образом:

$$\varphi_2 = A_1 \cos \theta, \quad (2.51)$$

где  $A_1$  – постоянная.

Для интегрирования уравнения при  $p = 1$  введем новую переменную  $\eta = \ln r$ , тогда

$$\frac{\partial \eta}{\partial r} = \frac{1}{r}; \quad \frac{\partial \varphi_1}{\partial \eta} = \frac{\partial \varphi_1}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_1}{\partial \eta} \quad \text{и т.д.} \quad (2.52)$$

Уравнение (2.49) приводим к виду:

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \eta^2} = \varphi_1. \quad (2.53)$$

Интеграл этого уравнения определяется:

$$\varphi_1 = C_1 e^\eta + C_2 e^{-\eta} = C_1 r + \frac{C_2}{r}. \quad (2.54)$$

Подставив выражения (2.51) и (2.54) в (2.46) и заменив постоянные  $A_1 C_1 = K_1$  и  $A_1 C_2 = K_2$ , получим искомым интеграл уравнения Лапласа:

$$\varphi = \left( K_1 r + \frac{K_2}{r} \right) \cos \theta. \quad (2.55)$$

Напряженность ЭМП находим как градиент потенциала, взятый с обратным знаком:

$$H = -\nabla \varphi = -\frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{\partial \varphi}{r \partial \theta} = -\left( K_1 - \frac{K_2}{r^2} \right) \cos \theta + \left( K_1 + \frac{K_2}{r^2} \right) \sin \theta. \quad (2.56)$$

Определяем постоянные  $K_1$  и  $K_2$ .

Влияние детали на внешнее поле недостаточно сказывается на очень большом расстоянии от детали. Следовательно, при  $r \rightarrow 0$  и  $\theta = 0$ .

$$H = H_0 = -H_0 l_r = -K_1 l_r, \quad (2.57)$$

отсюда:

$$H_0 = K_1.$$

Поверхность детали  $r = r_0$  эквипотенциальна, причем ее потенциал совпадает с потенциалом точек плоскости  $YY$ , принятым равным 0.

Из уравнения (2.55) видно, что условие  $\varphi = 0$  при  $r = r_0$  при любом  $\theta$  требует равенства:

$$K_2 = -K_1 r_0^2 = -H_0 r_0^2. \quad (2.58)$$

После подстановки найденных постоянных  $K_1$  и  $K_2$  в (2.55) и (2.56), получаем окончательное выражение напряженности ЭМП:

$$H = H_0 \left\{ -\left( 1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \cos \theta + \left( 1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \sin \theta \right\}. \quad (2.59)$$

Напряженность на поверхности детали ( $r = r_0$ ) равна:

$$H = -2H_0 \cos \theta.$$

На рис. 2.19 представлена рабочая зона области станка МАРС для МАО поверхностей деталей из различных материалов. Рабочую зону между полюсами N и S ЭМС заполняют РТС, состоящей из ферроабразивного порошка и смазочно-охлаждающего технологического средства, и помещают в эту зону обрабатываемые пуансоны. Данным пуансонам, согласно конструкции станка, сообщают поступательное, вращательное и осциллирующее движения по кольцевому зазору. При этом пуансоны, внедряясь в порошкообразную массу РТС, обрабатываются при условии отсутствия затухания процесса массового и размерного съема материала.

Топография поверхности пуансонов после МАО представлена на рис. 2.26.



Рис. 2.26. Топография поверхности пуансонов после MAO

Поскольку, согласно приведенному расчету напряженности  $H$  на поверхности крышек, ее наибольшее значение при  $\theta = 0$  или  $\theta = \pi$  будет равно  $H = -2H_0$ , то основными условиями эффективности MAO этих крышек служат кинематические и динамические показатели процесса.

### 2.2.7. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей поршней

Поршень совершает возвратно-поступательное движение внутри цилиндра и служит для превращения изменения давления газа, пара или жидкости в механическую работу, и наоборот (рис. 2.27). Поршень работает в условиях высоких температур и динамических нагрузок, а поверхности его подвержены трению о стенки цилиндра. Поэтому к обрабатываемым (восстанавливаемым) поршням предъявляются высокие требования в отношении точности (выдерживания размеров взаимного расположения между элементами) и качества. Шероховатость поверхности поршня не должна превышать  $Ra\ 0,40 \dots 0,16$  мкм. Окончательной технологической операцией восстановления поршней, определяющей качество поверхности поршня, является финишная абразивная обработка.



Рис. 2.27. Фотография поршня

В настоящее время финишная обработка наружной поверхности поршня, имеющей сложный профиль, производится методом полирования эластичными абразивными инструментами (ЭАИ) на специальных установках. Одним из перспективных методов финишной обработки поверхностей деталей машин является магнитно-абразивная обработка. Использование MAO позволяет повысить производительность обработки и качество поверхностей деталей. При MAO функцию режущего инструмента выполняет гибкая ферроабразивная щетка, которая представляет собой множество взаимосвязанных цепочек из частиц ферроабразивного порошка. Данная щетка, прижимаясь к обрабатываемой поверхности и удерживаясь в рабочем пространстве силами электромагнитного поля, осуществляет сьем материала (рис. 2.28).



Рис. 2.28. Движение ФАП при обработке сложнопрофильной поверхности

Известно [82], что финишная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей машин требует больших производственных и материальных затрат, чем обработка цилиндрических, конических и т.п. поверхностей деталей. Это обусловлено тем, что для жестко-связанного инструмента типа шлифовального круга, суперфинишного бруска, хона и т.д. обязательным условием является профили-

рование их режущего контура адекватно конфигурации обрабатываемой поверхности детали, что резко повышает себестоимость их изготовления. При МАО магнитный поток можно распределить именно на тех участках детали, которые труднодоступны для жестко-связанного инструмента, что позволяет обрабатывать детали со сложнопрофильными поверхностями

При исследовании процесса МАО необходимо учитывать большое количество технологических факторов в их взаимосвязи. Наиболее значимым из них для формирования магнитного поля являются геометрические параметры рабочего пространства. Методы расчета геометрии полюсных наконечников, основанные на экспериментальных данных, часто оказываются неэффективными, в то время как применение методов математического моделирования обеспечивает требуемую точность.

Известно, что все ЭМП описываются уравнением Пуассона, которое отвечает условиям стационарных полей [83], находящихся между профилями обрабатываемой поверхности и полюсного наконечника. Определение топографии ЭМП обеспечивает эффективность МАО сложнопрофильных поверхностей деталей машин. В общем случае магнитное поле имеет трехмерное изображение, однако при МАО ввиду малой величины рабочей технологической зоны эту задачу можно рассматривать как двухмерную. Подобный анализ, связанный с вращением детали вокруг полюсных наконечников, позволяет получить распределение магнитной индукции с учетом ее изменения по длине детали и установлением границы областей применения. Сложность алгоритма и реализации аналитического расчета ЭМП по отношению к реальному отображению топографии является основной проблемой на пути получения точного решения. Поэтому подходы к расчету ЭМП основаны на достоверности интегральных уравнений.

Многие технические задачи, в том числе и для МАО, не имеют точных решений, пригодных для применения в интегральной практике. Один из выходов в данной ситуации заключается в получении эмпирических формул и упрощенных одно- или двухмерных расчетных схем. Такие решения требуют обязательной проверки и коррекции путем проведения соответствующих экспериментов, служащих как для первичного, так и последующего исследования ЭМП. Критерием приемлемости является степень соответствия

совпадения результатов с результатами измерений и наблюдений. Таким образом, для решения научно-технической задачи МАО сложнопрофильных поверхностей следует осуществить предварительное, качественное изучение процесса и провести логический анализ, на основе правильно представленной расчетной схемы.

При МАО используются методы определения топографии ЭМП на базе гипотезы Ампера о круговом токе или закона Био-Савара-Лапласа при учете условия их макроскопического уровня. Следует учитывать, что оригинальность математического анализа должна иметь непосредственную связь с критериями точности и производительности процесса МАО и простоты ее реализации. Главное достоинство математического моделирования как метода заключается в возможности получения общего решения, которое обеспечивает полное представление о взаимовлиянии вышеуказанных критериев. Использование численных методов связано всякий раз с расчетом каждой совокупности полученных значений, и достижение полноты общего решения заключается, во-первых, в произведении большого количества вычислительных операций, во-вторых, в необходимости постоянной оценки его эффективности путем сравнения друг с другом.

Среди комплекса стоящих задач, связанных с интенсификацией МАО сложнопрофильных поверхностей, особое место занимает достижение заданных параметров давления ферроабразивной щетки на обрабатываемый слой материала детали и ее разноудаленные участки.

Рассмотрим пространство рабочего зазора между эквидистантно расположенными профилями полюсного наконечника и поверхностью детали, которое традиционно применяется при МАО цилиндрических деталей простой формы. Наличие канавок у поршня, поверхности которых требуется обработать, приводит к разности давления ферроабразивной щетки на больший и меньший диаметры, по причине разности градиента магнитного поля. Для достижения одинаковой величины съема материала на этих диаметрах требуется добиться равенства величины давления или свести его к минимуму. Это возможно путем изменения геометрии рабочего контура полюсного наконечника для придания ему серповидной формы при обработке поверхности большего диаметра. Для обработки меньшего диаметра кольца форма рабочего зазора должна быть эквидистантна, что обеспечивается условным передвижением этого диаметра на величину  $O_1$  и  $O_2$  равную величине эксцентриситета  $e$

(рис. 2.29). Поскольку величина рабочего зазора равна  $\delta = R_2 - R_1$ , то принимаем  $R_1 + h = R_2 - e \cdot \cos\theta$ , откуда  $h = \delta - e \cdot \cos\theta$ . Обозначим  $\alpha = \delta/e$ , где  $\alpha$  – величина переменного зазора,  $1 \leq \alpha \leq \infty$ , и представим зависимость  $h(\theta)$  в виде:

$$h = e(\alpha - \cos\theta).$$

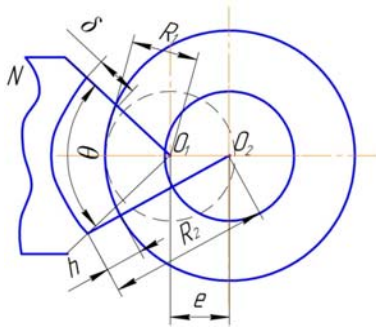


Рис. 2.29. Расчетная схема для определения геометрических параметров рабочей зоны при серповидном зазоре

Учитывая, что  $x = R_1\theta$  и  $\frac{dp}{dx} = \frac{1}{R_1} \frac{dp}{d\theta}$ ,

$$\frac{dp}{dx} = \frac{k\mu V}{h^3} (h^* - h), \quad (2.60)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий магнитную вязкость среды;  
 $\mu$  – кинематическая вязкость, сСт.

Показатель  $h^*$  имеет тот смысл, что представляет собой величину рабочего зазора в том сечении, где  $\frac{dp}{dx} = 0$ .

Вместо этого выражения (2.60) при установлении  $x$  получаем:

$$\frac{dp}{d\theta} = k\mu VR_1 \left( \frac{h^*}{h^3(\theta)} - \frac{1}{h^2(\theta)} \right) = k\mu VR_1 \left[ \frac{h^*}{e^3(\alpha - \cos\theta)^3} - \frac{1}{e^2(\alpha - \cos\theta)^2} \right]. \quad (2.61)$$

где  $V$  – скорость вращения детали, м/с.

Интегрируя это уравнение в пределах от  $\theta = 0$  до произвольного  $\theta$ , находим:

$$p(\theta) - p(0) = k\mu VR_1 \int_0^\theta \left[ \frac{h^*}{h^3(\theta)} - \frac{1}{h^2(\theta)} \right] d\theta. \quad (2.62)$$

Введем обозначение  $p(0) = p_0$  и при учете однозначности функции  $p(\theta)$   $p(2\pi) = p(0) = p_0$ . Тогда из равенства (2.62) следует:

$$\int_0^{2\pi} \left[ \frac{h^*}{h^3(\theta)} - \frac{1}{h^2(\theta)} \right] d\theta = 0, \quad (2.63)$$

откуда:

$$h^* = \frac{\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{h^2}}{\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{h^3}} = e \frac{\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{(\alpha - \cos\theta)^2}}{\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{(\alpha - \cos\theta)^3}} = e \frac{2\alpha(\alpha^2 - 1)}{2\alpha^2 + 1}. \quad (2.64)$$

Теперь уравнение (2.61) можно представить:

$$\frac{dp}{d\theta} = \frac{k\mu VR_1}{e^2} \left[ \frac{2\alpha(\alpha^2 - 1)}{2\alpha^2 + 1} \frac{1}{(\alpha - \cos\theta)^3} - \frac{1}{(\alpha - \cos\theta)^2} \right], \quad (2.65)$$

проведа интегрирование:

$$p(\theta) - p_0 = \frac{k\mu VR_1}{\delta^2} \frac{\alpha^2}{2\alpha^2 + 1} \frac{\sin\theta}{\alpha - \cos\theta} \left( 1 + \frac{\alpha}{\alpha - \cos\theta} \right). \quad (2.66)$$

Исходя из (2.66) следует, что знак разности  $p(\theta) - p_0$  определяется значением угла  $\theta$  и величиной переменного зазора  $\alpha$ . Следовательно, определение давления, необходимого для повышения эффективности процесса, зависит от соотношения геометрических параметров полюсного наконечника и детали. Для каждого размера поршня требуется только ему присущий размер полюсного наконечника с эквидистантным профилем, что резко увеличивает количество и номенклатуру технологической оснастки для реализации процесса MAO. С целью снижения данной номенклатуры возникает необходимость в создании универсального типа полюсного наконечника. Однако по причине устранения эквидистантного профиля и изменения геометрических параметров зоны обработки изменяется и показатель давления ФАП на обрабатываемую поверхность детали. Наиболее эффективная обработка происходит при давлении ФАП, равной 0,5...2 МПа, определение этого диапазона производится путем математического моделирования процесса MAO.

Кроме этого, важную роль играют кинематические факторы (скорость вращения детали), величина первоначального установленного зазора, вязкость ферроабразивной щетки. Основным детерминантом формулы (2.66) при однозначности параметра является варьируемый показатель, равный:

$$\left[ \frac{\alpha^2}{2\alpha^2 + 1} \frac{\sin \theta}{\alpha - \cos \theta} \left( 1 + \frac{\alpha}{\alpha - \cos \theta} \right) \right].$$

Поскольку, будучи скоростью поворота, касательной определяющей силу резания к длине этого зазора, она устанавливает импульс этой силы и, вследствие этого, массовый и размерный съем материала по разноудаленным от этой кривизны участкам профиля детали. Таким образом, определены факторы, влияющие на протекание процесса MAO поршня, обеспечивающие высокое качество поверхности и производительность обработки.

Для возможности реализации MAO были проведены экспериментальные исследования по определению технологических режимов обработки поверхности поршня.

Материал поршня АЛ1 ГОСТ 2685-75, НВ 90...120. В качестве оборудования применяется станок СФТ 2.150.00.00.000. Обрабатываемый поршень крепится в предварительно расточенных секторных кулачках за поверхность маслосъемной канавки. Кулачки установлены в трехкулачковом патроне станка. ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81 (рис. 2.30), зернистость ФАП,  $\Delta = 100/160$  мкм, СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5 % -ный водный раствор. Величина рабочего зазора варьировалась от  $\delta = 1...3,5$  мм, коэффициент заполнения рабочего зазора,  $K_3 = 1$ , время обработки составляло  $t = 120$  с. Исходная шероховатость поверхности поршня  $Ra_1 = 0,8...1$  мкм. Выходными показателями служит величина удельного массового съема материала,  $Q$  мг и достигаемая шероховатость поверхности,  $Ra_2$ , мкм. Изменение массового съема производили на весах аналитических ВЛА 200 г с точностью до  $10^{-6}$  кг, шероховатость – на профилографе-профилометре «252-Калибр».

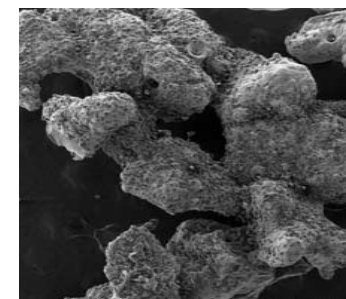


Рис. 2.30. Морфология ферроабразивного порошка Ж15КТ

На рис. 2.31 представлены профилограммы поверхностного слоя обработки эластичным абразивным инструментом и MAO.

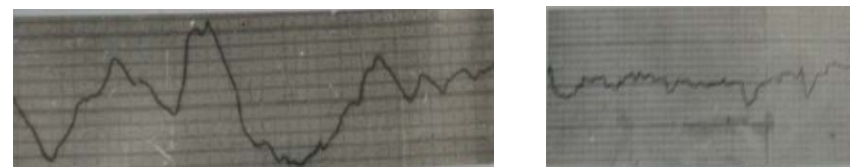


Рис. 2.31. Профилограммы поверхностного слоя после: а – ЭАИ; б – MAO

Результаты исследований представлены на рис. 2.32–2.34.



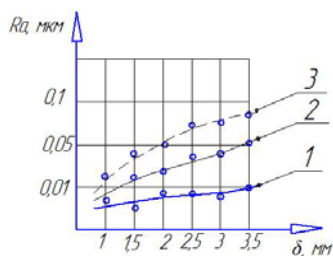


Рис. 2.32. Зависимость шероховатости поверхности  $Ra$  поверхности поршня от величины рабочего зазора  $\delta$  при величине магнитной индукции В: 1 – 1,1 Тл; 2 – 1,0 Тл; 3 – 0,9 Тл

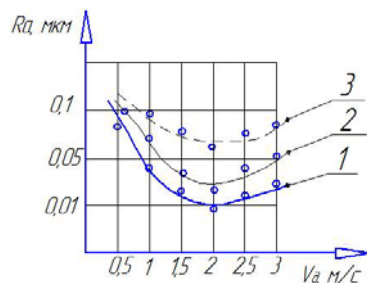


Рис. 2.33. Зависимость шероховатости поверхности  $Ra$  поверхности поршня от скорости вращения  $V_\omega$  при величине магнитной индукции В: 1 – 1,1 Тл; 2 – 1,0 Тл; 3 – 0,9 Тл

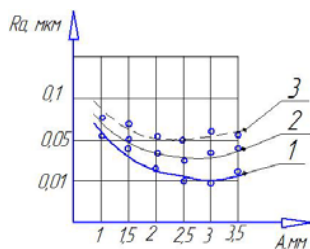


Рис. 2.34. Зависимость шероховатости поверхности  $Ra$  поверхности поршня от амплитуды осцилляции А при величине магнитной индукции В: 1 – 1,1 Тл; 2 – 1,0 Тл; 3 – 0,9 Тл

В табл. 2.3 приведены результаты показатели шероховатости поверхности поршня способом ЭАИ и МАО.

Таблица 2.3

Сравнительные показатели шероховатости поверхности поршня способом ЭАИ и МАО

| Способ финишной обработки | Шероховатость поверхности, $Ra_2$ , мкм |
|---------------------------|---|
| ЭАИ                       | 0,1-0,4                                 |
| МАО                       | 0,01-0,02                               |

В результате проведенных исследований установлено, что использование способа МАО в качестве финишной обработки сложнопровильных поверхностей поршня обеспечивает шероховатость поверхности по параметру  $Ra$  0,01...0,02 мкм, при величине удельного массового съема – 7,5 мг/см<sup>2</sup>мин. Определены режимы обработки МАО: магнитная индукция  $B = 1,1$  Тл, скорость вращения,  $V_d = 2$  м/с, амплитуда осцилляции  $A = 3$  мм.

## 2.3. Расчет геометрических параметров электромагнитных систем

### 2.3.1. Профилирование криволинейных поверхностей пуансонов при пониженной жесткости инструмента

Пуансон (фр. poinçon) – основная деталь инструмента для пластического деформирования, используемого при маркировке, штамповке изделий в металлообработке. В зависимости от их типа и назначения они являются просечными, вырубными, прошивными и т.д. В процессе работы они подвергаются воздействию высоких напряжений и давлений и поэтому изготавливаются из высокопрочных сталей повышенной прокаливаемости или износостойчивых с повышенной прочностью.

В процессе пробивки отверстий на фаски пуансона действуют сила реакции материала и сила трения, что при скоростном многоцикловом нагружении изменяет геометрию фасок, осуществляет затупление режущей кромки, приводит к снижению точности размеров отверстий. Варианты повышения стойкости пуансонов за-

ключаются в создании сложной системы геометрии их рабочей части, а именно формы фасок и углов между ними или введении в комплекс оборудования штанцевых форм, биговальных линеек и другой технологической оснастки для обеспечения упругого прогиба с целью образования будущего отверстия. Однако подобная схема является недостаточно эффективной по причине большого количества в нее входящих компонентов и часто приводит к нарушению и сбоям технологического процесса.

Повышение стойкости пуансонов в основном зависит от качества их рабочих поверхностей и, например, установлено, что направление штрихов на этих поверхностях оставленных режущим инструментом при финишной обработке, должно быть параллельно течению или движению материала штампуемой детали [84]. Поперечные риски задерживают течение металла, увеличивается трение и появляется необходимость в дополнительном усилии для их преодоления. Также подобные риски приводят к образованию на вертикальных стенках вытягиваемой детали рисок, ухудшающих внешний вид детали. Следовательно, правильное и стабильное сопряжение трущихся поверхностей во многом зависит от шероховатости рабочих поверхностей пуансонов и согласно ГОСТ 16675-80 их режущие кромки должны быть острыми, завал кромок и выкрашивание не допускаются, а шероховатость рабочих поверхностей составляет  $Ra < 0,4$  мкм при твердости 55...59 HRCэ.

Для финишной обработки пуансонов чаще всего используется полирование, однако этот способ характеризуется высокой долей ручного труда и вследствие этого резко отличными друг от друга результатами. Одним из видов такой обработки является магнитно-абразивная обработка [85]. Основное достоинство МАО заключается в возможности нивелирования режущего контура инструмента относительно профиля обрабатываемой детали, однако эффективность абразивной способности ферроабразивной «щетки» проявляется на уровне длины цепочек частиц ферроабразивного порошка от 3 до 10 мм. Это требует в ряде случаев для интенсивной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей машин создания такого контура полюсных наконечников электромагнитной системы, который имеет эквидистантное по отношению к детали или приближенное к нему положение. Проблема распределения электромагнитного поля в рабочем зазоре часто решается использованием метода

сеток или интуитивным способом, требующим высокой квалификации специалистов. Однако грамотное конструктивное решение, полученное аналитическим или графическим способом, обеспечивает однородность ферроабразивной «щетки» и градиента магнитной индукции в зоне обработки, что гарантирует отсутствие разницы давления ФАП на различных участках обрабатываемой детали. Поэтому с целью повышения производительности и качества обработки пуансонов для глубокой вытяжки металла следует обеспечить наибольшую конформность, т.е. полноту прилегания поверхности инструмента к поверхности детали в области их контакта и произвести переход от интуитивного понимания топографии ЭМП к ее объемному и однозначному восприятию, имеющему алгебраическое выражение. Основная задача заключается в задании вида обрабатываемой поверхности пуансонов, которые представляются как неявные функции  $F(x,y) = 0$ , явные функции  $y = f(x)$  или  $p = f(\varphi)$ , в параметрическом виде  $x = x(t)$ ,  $y = y(t)$  или  $p = p(t)$ ,  $\varphi = \varphi(t)$  и таблицами значений. Для многих поверхностей получение непрерывных аналитических описаний по целому ряду причин в условиях производства является не всегда возможным решением и поэтому геометрическая информация сопряжена не с функциональным, а с дискретным характером распределения совокупности точек, принадлежащих этой поверхности. Поэтому для правильного формообразования профиля полюсного наконечника и получения вследствие того необходимой производительности и качества обработки требуется обеспечить условие максимально полного контакта материальных носителей формы как пуансона, так и ферроабразивной «щетки», ориентированной соответствующим контуром полюсного наконечника.

Поскольку наиболее точным заданием и отображением поверхности пуансонов в виде как явных, так и неявных функций является эквидистанта, то метод расчета профиля полюсных наконечников для мягких режимов обработки ( $B = 0,7...0,8$  Тл,  $V_p = 1...2$  м/с,  $V = 0,05$  м/с) предлагается реализовать следующим образом: профиль полюсного наконечника представлен как огибающая окружности для полюсного наконечника, центр которой  $O_p$  колеблется по дуге окружности радиуса  $\alpha$  относительно  $O_b$ .

Расчет профиля полюсного наконечника осуществляется адекватно способу задания профиля обрабатываемой поверхности детали и, используя одну из систем уравнений (2.67), находится траек-

тория центров инструмента  $O_u (x_u, y_u)$  и далее рассчитываются координаты относительного расположения центра вращения  $O_e (x_b, y_b)$  при заданном положении  $O_u$ . Положение  $O_e$  определяется как точка пересечения окружности радиуса  $R_k$  с центром в  $O_0 (x_0, y_0)$  с окружностью радиуса  $b$  с центром в  $O_u (x_u, y_u)$ .

Находится траектория центров окружности для детали:

$$X_u = x_\partial \pm \frac{R_u \cdot y'_\partial}{\sqrt{1 + (y'_\partial)^2}}; \quad (2.67)$$

$$Y_u = y_\partial \pm \frac{R_u \cdot x'_\partial}{\sqrt{1 + (y'_\partial)^2}}.$$

Рассчитываются аналогично координаты линии центров окружности для полюсного наконечника  $O_n (x_n, y_n)$ :

$$x_n = x_u \pm V \cos \gamma = x_u \left(1 \pm \frac{V}{\sqrt{x_u^2 + y_u^2}}\right); \quad (2.68)$$

$$y_n = y_u \pm V \sin \gamma = y_u \left(1 \pm \frac{V}{\sqrt{x_u^2 + y_u^2}}\right).$$

Вычисляются координаты профиля полюсного наконечника:

$$X_k = x_n \pm \frac{R_n \cdot y'_n}{\sqrt{(x'_n)^2 + (y'_n)^2}}; \quad (2.69)$$

$$Y_k = y_n \pm \frac{R_n \cdot x'_n}{\sqrt{(x'_n)^2 + (y'_n)^2}},$$

$$\text{где } x'_n = x'_u \left(1 \pm \frac{V}{\sqrt{x_u^2 + y_u^2}} \pm \frac{x_u (x_u \cdot x'_u + y_u \cdot y'_u) V}{(x_u^2 + y_u^2)^{3/2}}\right); \quad (2.70)$$

$$y'_n = y'_u \left(1 \pm \frac{V}{\sqrt{x_u^2 + y_u^2}} \pm \frac{y_u (x_u \cdot x'_u + y_u \cdot y'_u) V}{(x_u^2 + y_u^2)^{3/2}}\right),$$

и где, в свою очередь,

$$x'_u = 1 \pm \frac{R_u y''_u}{[1 + (y'_\partial)^2]^{2/2}}, \quad (2.71)$$

$$y'_u = y'_\partial \pm \frac{R_u \cdot y'_\partial \cdot y''_\partial}{[1 + (y'_\partial)^2]^{3/2}}.$$

В зависимостях (2.71):

$$y''_\partial = \left[ \frac{\partial^2 F}{\partial X^2} \left( \frac{\partial F}{\partial Y} \right) - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial X \partial Y} \cdot \frac{\partial F}{\partial X} \cdot \frac{\partial F}{\partial Y} + \frac{\partial^2 F}{\partial Y^2} \left( \frac{\partial F}{\partial X} \right)^2 \right] / \left( \frac{\partial F}{\partial Y} \right)^3.$$

При задании профиля детали в виде  $F(x_\partial, y_\partial) = 0$

$y'_\partial = f'(x_\partial)$  - при задании профиля детали в виде  $y_\partial = f(x_\partial)$ .

Решая совместно уравнения:

$$x_b^2 + y_b^2 = R_k^2;$$

$$(x_b - x_u)^2 + (y_b - y_u)^2 = b^2. \quad (2.72)$$

Получаем:

$$x_b = \frac{B_1 - y_u y_b}{x_u}$$

$$y_b = \frac{B_1 y_u \pm \sqrt{B_1^2 y_u^2 + B_2 B_2}}{B_2}, \quad (2.73)$$

где

$$B_1 = \frac{R_k^2 - b^2 + x_u^2 + y_u^2}{2}$$

$$B_2 = R_k^2 x_u^2 - B_1^1$$

$$B_3 = x_x^2 + y_u^2$$

$$y_u' = y_\delta' \pm \frac{R_u \left[ x_\delta'' (y_\delta')^2 - x_\delta' y_\delta'' y_\delta' \right]}{\left[ (x_\delta')^2 + (y_\delta')^2 \right]^{3/2}}$$

В зависимостях  $x_\delta'' = x_\delta''(t); y_\delta'' = y_\delta''(t)$ .

В приведенных зависимостях значения  $x_u'$  и  $y_u'$  вычисляются согласно (2.71), а для вычисления  $x_\delta'$  и  $y_\delta'$  используются зависимости, приведенные ниже.

$$x_\delta' = \left( \frac{B_1 - y_u y_\delta}{x_u} \right)' = \frac{(B_1' - y_u' y_\delta - y_u y_\delta') x_u - B_1 x_u' + y_u y_\delta x_u'}{x_u^2}$$

$$y_\delta' = \left( \frac{B_1 y_u \pm \sqrt{B_1^2 y_u^2 + B_3 B_2}}{B_3} \right)' =$$

$$= \frac{1}{B_3^2} \left[ \left( B_1' y_u + B_1 y_u' + \frac{2B_1 B_1' y_u^2 + 2B_1^2 y_u y_u' + B_3 B_2 + B_3 B_3'}{2\sqrt{B_1^2 y_u^2 + B_2 B_3}} \right) B_3 - B_1 B_3 y_u' \mp B_3 \sqrt{B_1^2 y_u^2 + B_2 B_3} \right], \quad (2.71)$$

где

$$B_1' = x_u x_u' + y_u y_u'$$

$$B_2' = 2R_k^2 x_u x_u' - 2B_1 B_1'$$

$$B_3' = 2B_1'$$

Эквидистатный профиль полюсных наконечников определяется в конечном итоге как огибающая окружности радиуса  $R_3 = R_u - R_n$ , центр которой  $(x_d, y_d)$  движется по профилю детали. Графическое построение профиля полюсного наконечника представлено на рис. 2.35, в результате чего достигаемая шероховатость составила диапазон  $Ra 0,1 \dots 0,2$  мкм (рис. 2.36).

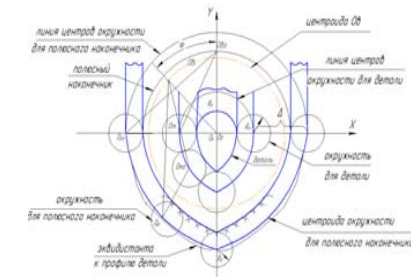


Рис. 2.35. Схема для определения профиля полюсного наконечника

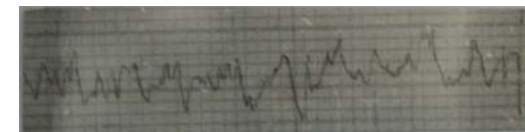


Рис. 2.36. Профилеграмма шероховатости пуансонов глубокой вытяжки после МАО

В результате произведенного расчета на основе задания обрабатываемой поверхности явных и неявных функций разработаны и созданы полюсные наконечники для ЭМС станка МАРС-15 для MAO пуансонов глубокой вытяжки, при использовании которых произведена обработка вышеуказанных пуансонов, (рис. 2.37).



Рис. 2.37. Фотография пуансона в зоне обработки

Параметры и режимы MAO: величина магнитной индукции  $B = 0,65 \dots 0,85$  Тл; скорость резания  $v_p = 1,5 \dots 2,5$  м/с; частота подачи ротора  $n = 0,5$  об/мин; амплитуда осцилляции  $A = 1,5 \dots 2,5$  мм, величина рабочего зазора  $\delta = 2,5$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора  $K_z = 1$ , время обработки  $t = 30 \dots 90$  с.

В качестве ФАП использовался Fe-TiC ТУ 88-147.002-75, смазочно-охлаждающие технологические средства СинМА – 1 ТУ 38.5901176 – 91,5 % водный раствор, шероховатость пуансонов до обработки составляла  $Ra$  1,2...1,6 мкм. Материал – X12 ГОСТ 5950-2000, твердость 55...58 HRCэ. Массовый съем материала определяется взвешиванием пуансонов на весах аналитических ВЛА – 1 с точностью до 0,001 г. Изменение шероховатости поверхности пуансонов до и после обработки производилось на профилографе – профилометре мод. «252-Калибр».

На рис. 2.38 представлены исследования величины съема материала пуансонов от времени обработки, а на рис. 2.39 и рис. 2.40 соответственно величины шероховатости поверхности также от времени отработки и шероховатости поверхности от скорости пуансона.

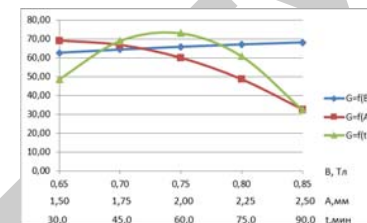


Рис. 2.38. Зависимость величины съема материала (G) пуансонов от времени обработки (t)

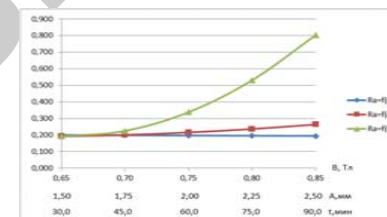


Рис. 2.39. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности (Ra) от времени отработки

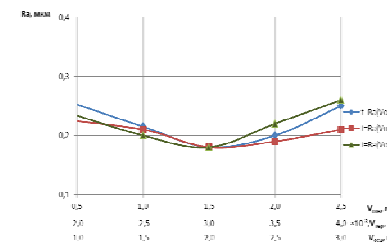


Рис. 2.40. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности (Ra) от относительной ( $V_{отн}$ ), переносной ( $V_{пер}$ ) и осциллирующей ( $V_{осц}$ ) скоростей пуансона

Анализ данных таблицы графиков, изображенных на рис. 2.38...2.40, показывает, что применение следующего параметра и режима MAO:  $B = 0,7$  Тл; скорость резания  $v_p = 1,5$  м/с; частота подачи ротора  $n = 0,5$  об/мин; амплитуда осцилляции  $A = 2$  мм, величина рабочего зазора  $\delta = 2,5$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора  $K_z = 1$ , время обработки  $t = 60$  с, обеспечивает получение наилучших показателей шероховатости и съема материала пуансона.

### 3. ФОРМИРОВАНИЕ ФЕРРОАБРАЗИВНОЙ ЩЕТКИ В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Для эффективной MAO сложнопрофильных изделий, состоящих из материалов с различными физико-механическими и магнитными свойствами, требуется ферроабразивный порошок, способный обработать все элементы поверхностей сложного профиля за один переход. В связи с этим необходимо при выборе ФАП обеспечить наличие компонентов, гарантирующих качественную обработку каждого элемента сложнопрофильной поверхности детали.

#### 3.1. Виды ферроабразивных порошков и способы их изготовления

В качестве ферроабразивных порошков применяют достаточно большое количество материалов, которые имеют разные физические и технологические свойства. Наиболее приемлемыми являются классификации по структуре частиц порошка [86] и по способу их получения [87]. В соответствии с этими подходами отдельно можно выделить ФАП, который состоит из механических смесей магнитных и абразивных составляющих. В качестве магнитной составляющей 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, бора) [88]. В результате возможно создание ФАП практически любой конфигурации с управляемой интегральной твердостью.

В работе [89] 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) [88].

Приведенные выше типы ФАП были первыми, которые применялись для MAO, 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 [90] (рис. 3.1) или на два класса по способу получения [91].

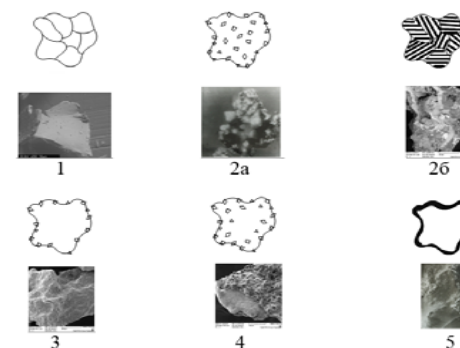


Рис. 3.1. Типы ферроабразивных порошковых материалов

Если пользоваться классификацией по структуре ферроабразивных порошков, предложенной в работе [90], можно выделить первый тип – порошки, изготовленные из более твердых, чем обрабатываемый материал – 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 2 а, 2 б), которые отличаются способом изготовления. Порошки типа 2 а 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 таким порошкам относится МАМ40, технологический процесс изготовления которого представлен в табл. 3.1.

Исходные материалы: порошок железный марки ПЖ2М ГОСТ 9849-86, порошок электрокорунда нормального, электрокорунда белого или монокорунда зернистостью 40/28.

Таблица 3.1

Технологический процесс изготовления МАМ-40

| № операции | Содержание операции   | Оборудование и оснастка             | Примечание  |
|------------|---|-------------------------------------|---|
| 1          | 2   | 3                                   | 4   |
|            | Просеивание порошка железа ПЖ2М с насыпным весом 2,2-2,6·10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> через сито №250 (размер ячейки 25 мкм) | Набор сит с механическим приводом   | Операция производится с целью удаления различных загрязнений и комков, имеющих в порошке в состоянии поставки   |
|            | Смешивание порошка ПЖ2М и шлифпорошка в весовом соотношении 4:1 с добавкой 2% по весу машинного масла                             | Смеситель                           | Для смесителя типа “пьяная бочка” длительность операции – три часа<br>Машинное масло добавляется с целью сегрегации смеси, улучшения ее однородности и условий последующей операции прессования   |
|            | Прессование брикетов из полученной порошковой шихты в пресс-формах при давлении 290-390 МПа                                       | Гидравлический пресс<br>Пресс-формы | Размеры брикетов устанавливаются и исходя из технологических возможностей прессования и спекания.<br>В процессе прессования происходит заполнение пустот между частицами смеси, их более плотная укладка, упругое и пластическое формирование мягких частиц и дробление крупных |

Окончание табл. 3.1

| № операции | Содержание операции   | Оборудование и оснастка                                 | Примечание   |
|------------|---|---|--|
| 1          | 2   | 3   | 4  |
|            | Спекание брикетов в защитной среде водорода или аммиака при температуре 1300 °С в течение 30 мин.   | Печь с восстановительной средой (водород, аммиак)       | Скорость охлаждения брикетов должна быть невысокой (лучший вариант – охлаждение с печью). Спекание брикетов кермета производится с целью значительного увеличения прочности соединения гранул железа и абразива по сравнению с механическими соединениями, полученными в процессе прессования за счет протекания при высоких температурах самодиффузионных процессов |
|            | Дробление брикетов и размельчение в порошок   | Дробилка. Молотковая, шаровая или вибрационная мельница | Объем отдельных кусков брикета после дробления должен быть не более 1 см <sup>3</sup>  |
|            | Рассев полученного магнитно-абразивного порошка на фракции:<br>200/160 160/125<br>125/100 100/80 мм | Набор сит с механическим приводом                       | Пригодными для применения при магнитно-абразивной обработке являются только указанные четыре фракции магнитно-абразивного порошка  |
|            | Упаковка магнитно-абразивного материала   | Весы  | Упаковка магнитно-абразивного материала должна производиться в сухом помещении во влагонепроницаемую тару с герметичной крышкой  |

К подтипу 2 б относятся порошки, в которых абразивный компонент образует каркас, - псевдосплавленные и полученные распылением из расплава [91]. 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 2-го типа 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.

Порошки 3-го и 4-го типов получают прокаткой смеси железного порошка и абразива в валках [92], обкатыванием железного порошка в смеси железа и абразива [93] 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 [94]. 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 [95]. 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 [96] 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 абразивной частицы порошка, 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, достигаемый удельный массовый съем, изменение шероховатости поверхности во время МАО и абразивная способность [96]. В предложенной схеме рассмотрены наиболее распространенные ферроабразивные порошки. Рекомендации по выбору пары обрабатываемый материал - порошок приведены в [97], 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 [97], а позже в [98] 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 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.



### 3.2. Магнитная проницаемость ферроабразивных порошков

Таблица 3.2

Основными свойствами ФАП являются: магнитные и абразивные свойства, микротвердость, гранулометрический состав, размер и морфология частиц, химическая инертность, склонность к агломерации, технологичность изготовления и себестоимость.

Наиболее существенной характеристикой магнитных свойств является магнитная проницаемость [98].

Магнитная проницаемость, физическая величина, характеризующая изменение магнитной индукции  $B$  среды под воздействием магнитного поля напряженностью  $H$ .

В случае однородной изотропной среды магнитная проницаемость  $\mu$ :  $\mu = B/(\mu_0 H)$ , где  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

В анизотропных кристаллах магнитная проницаемость — тензор.

Магнитная проницаемость ферромагнетиков сложным образом зависит от  $H$ . Эти параметры определяются баллистическим способом на установке модели БУ-3А.

Одним из вариантов увеличения магнитной проницаемости порошков для МАО является применение железо-кремниевых сплавов, поскольку сплавам Fe-Si с содержанием Si в пределах 6,5...6,8 мас. % свойственна повышенная микротвердость — 3600...5800 МПа. Однако поскольку налажено производство железокремниевых сплавов с содержанием кремния 15...20 %, то существует возможность в проведении исследований по созданию порошка (Fe-Si)-TiC — двумя способами. Сущность первого заключается (Fe-Si (6,5 %), размер частиц 250/63 мкм) в смешивании его с порошком TiC, прессовании при давлении 250 МПа, спекании при температуре 1100 °С в течение 0,5 часа и измельчении спеков. По второму способу смешивались порошки железа, чистого кремния и карбида титана, прессовались и спекались при температуре 1100 °С в течение часа, затем измельчались. Для этого процесса необходимо длительное спекание для протекания процесса диффузионного насыщения железа кремнием из «точечных источников». Результаты испытаний абразивных и магнитных свойств материалов, полученных обоими методами, представлены в табл. 3.2.

Абразивные и магнитные свойства различных материалов для МАО

| Материал                     | Съем металла в результате МАО, 10 <sup>-3</sup> г | Шероховатость поверхности после МАО, мкм | Магнитная проницаемость при 60000 А/м, 10 <sup>-3</sup> Г/м |
|------------------------------|---|--|---|
| (10%)                        | 71  | 0,40                                     | 4,4   |
| (15%)                        | 54  | 0,35                                     | 5,4   |
| (первый способ изготовления) | 328   | 0,071                                    | 9,21  |
| (второй способ изготовления) | 117   | 0,095                                    | 5,5   |

Проведенные испытания ФАП, изготовленного первым способом, показали лучшие результаты по сравнению со вторым. Низкая магнитная проницаемость второго порошка указывает на то, что температура 1100 °С и выдержка в течение часа недостаточны, чтобы произошло равномерное распределение кремния в железе в результате его диффузии из «точечных источников». Увеличение температуры и длительности спекания в данном случае влечет за собой дополнительные затраты энергии и увеличение трудоемкости операции.

Кермет МАМ40 представляет собой частицы композиционного материала на основе железа (80 масс, %) и электрокорунда ЭБМ40 (20 масс, %). Материал получают смешиванием порошков железа и электрокорунда в соответствующем массовом соотношении прессованием смеси в брикеты, спеканием брикетов с последующим их измельчением. Кермет МАМ40 обладает существенным недостатком — невысокой прочностью соединения ферромагнитной и абразивной составляющей в частицах порошка кермета. Это объясняется тем, что железо и окись алюминия практически не растворимы друг в друге и имеет место низкая смачиваемость частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> железом. Поэтому наблюдается разделение частиц электрокорунда и частиц железа при измельчении спеков в процессе эксплуатации порошка.

Результаты испытаний абразивных и магнитных свойств материалов представлены в табл. 3.3.

Недостаточная прочность соединения ферромагнитной и абразивной составляющей зерен кермета, относительно невысокая микротвердость создают затруднения в улучшении его магнитных свойств. Этим продиктовано стремление получить магнитно-абразивные материалы, свободные от перечисленных недостатков и обладающие повышенной абразивной способностью.

Таблица 3.3

Абразивные и магнитные свойства различных материалов для МАО

|   |  |  |                                       |
|---|--|--|---------------------------------------|
| Обозначение магнитно-абразивного материала. Структурная формула.          |  | МММ40<br>Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Ж-15КТ<br>Fe-TiC                      |
| Исходный материал ферромагнитной составляющей                             |  | ПЖВ2<br>ГОСТ 9849-86                       |                                       |
| Абразивная составляющая материала   |  | Шлифпорошок<br>ЭБМ40 ГОСТ<br>9618-84       | Порошок карбида титана ТУ<br>06173-74 |
| Количество абразивной составляющей, весов, %                              |  | 20   | 15                                    |
| Гранулометрический состав материалов, мкм                                 |  | 250/63                                     | 250/63                                |
| Абразивная способность (при МАП образцов из ШХ15, НС 58-62)               | Съем металла в результате МАП - Δ Г мг       | 173  | 257                                   |
|   | Шероховатость поверхности после МАП, Ra, мкм | 0,098                                      | 0,064                                 |
| Магнитная проницаемость (при H = 86200 А/м) мкГ/м                         |  | 6,6  | 7,3                                   |
| Основные технологические параметры технологического процесса изготовления | Удельное давление прессования, МПа           | 150-250                                    | 150-250                               |
|   | Температура спекания, °С                     | 1200                                       | 1300                                  |
|   | Длительность операции спекания, час          | 0,5  | 0,5                                   |

Перспективными материалами для МАП являются порошки, которые в качестве абразивной составляющей содержат частицы карбидов и боридов переходных металлов IV-VI групп. Были приготовлены порошки на основе железа и тугоплавких соединений TiC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>, Zr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, WC, полученные смешиванием исходных компонентов в соответствующем весовом соотношении, прессованием брикетов под давлением 400-600 МПа, спеканием полученных брикетов при температурах 1100...1300 °С в течение 0,5...1 часа в среде водорода с последующим измельчением спеков в щековой и шаровой мельницах.

Из всех материалов, представленных в табл. 3.4, лучшие абразивные и магнитные свойства имеет порошок Fe-TiC .

Таблица 3.4

Абразивные и магнитные свойства порошков композиционных материалов

| Материал                          | Количество абразивной составляющей масс. % | Шероховатость поверхности образцов после МАО | Съем металла в результате МАП, мг | Магнитная проницаемость (H = 70000 А/м), мкГ/м |      |
|-----------------------------------|--|--|-----------------------------------|--|------|
|                                   |  | Ra <sub>2</sub> , мкм                        |                                   |  |      |
| Fe+TiC                            | 10   | 0,09   | 149                               | 6,31   |      |
|                                   | 20   | 0,079  | 189                               | 6,11   |      |
|                                   | 30   | 0,087  | 160                               | 5,79   |      |
| Fe+WC                             | 20   | 0,118  | 62                                | 6,3  |      |
|                                   | Fe+Zr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>          | 10   | 0,078                             | 96   | 6,43 |
|                                   |  | 20   | 0,331                             | 83   | 6,38 |
| Fe+Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> | 30   | 0,238  | 87                                | 6,23   |      |
|                                   | 20   | 0,247  | 77                                | 5,29   |      |
| Fe+W <sub>2</sub> B <sub>5</sub>  | 30   | 0,141  | 92                                | 5,23   |      |
|                                   | 10   | 0,412  | 33                                | 6,19   |      |
|                                   | 20   | 0,377  | 42                                | 6,11   |      |
|                                   | 30   | 0,461  | 68                                | 6,04   |      |

### 3.3. Режущие свойства структурированного инструмента

Проведенный анализ показывает, что в настоящее время отсутствует универсальный метод обработки сложнопровильных поверхностей, позволяющий резко повысить производительность и качество процесса.

Одним из способов решения данной технологической задачи является МАО. Этот процесс включает ряд компонентов: станок, режущий инструмент, СОТС, магнитное поле (рис. 3.2). В частности, о режущем инструменте сложилось представление только как о порошкообразной ферроабразивной «щетке», создаваемой энергией магнитного поля, однако определение закономерностей формирования физико-механических свойств поверхности обрабатываемых деталей из ферро-, пара- и диамагнитных материалов и их геометрических характеристик при воздействии различных режущих сред позволило создать новые классы инструментов. В работе [99] представлена схема взаимодействия обрабатываемого изделия с механической щеткой в магнитном поле, где указывается, что волокна этой щетки контактируют только в точке или дуге небольшой протяженности. Это существенно повышает давление в рабочей зоне и приводит к росту съема материала. Кроме того, реализуется возможность обработки сложнопрофильных деталей путем применения одной технологической операции.

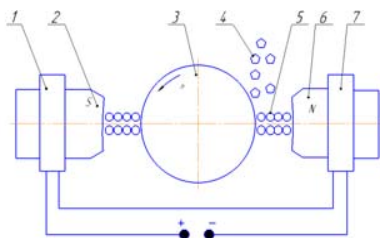


Рис. 3.2. Схема магнитно-абразивной обработки наружных поверхностей: где 1 и 7 – магнитопроводы электромагнитной системы; 2 и 6 – полюса; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – подаваемый ферроабразивный порошок; 5 – цепочки ферроабразивного порошка

### 3.3.1. Магнитно-абразивная обработка с использованием механических щеток

Финишная обработка деталей, имеющая сложнопрофильную форму, представляет собой актуальную проблему в машиностроении. Существующие методы отделочной обработки данных поверхностей с приме-

нением жесткого абразивного инструмента требуют наличия шлифовальных кругов с профилем, обладающим негативным отображением обрабатываемой поверхности. Восстановление режущего контура изношенных кругов сопряжено с ростом трудоемкости и запыленностью помещений, приводящей к необходимости выполнения повышенных мероприятий по производственной санитарии и охране труда. Способы, основанные на применении свободного абразива типа доводки, отличаются неравномерностью съема материала. Использование ручного труда не отвечает условиям современного производства из-за своей высокой себестоимости, зависимости производительности процесса от субъективных качеств исполнителя и отсутствия стабильности результатов.

Основным недостатком эластичных кругов из войлока, фетра, текстильных материалов является невозможность использования СОТС. Это приводит к повышенному нагреву деталей и необходимости создания мер защиты по исключению образования профвредностей в данном производстве, а также у них слишком низкая стойкость. Абразивные ленты характеризуются наличием швов, которые нарушают их однородность и понижают прочность инструмента. Электрополированию присущ большой расход и необходимость оптимального по составу электролита. С вибрационной обработкой связана определенная необработанность в труднодоступных местах детали и существенная разница значений физико-механических показателей поверхности.

Известен полюсный наконечник для электромагнитных систем, выполненный в виде собранных в пакеты ферромагнитных проволок, фиксируемых относительно друг друга для формирования рабочей зоны в соответствии с профилем обрабатываемой поверхности детали [100]. Однако концентрация ферроабразивного порошка осуществляется только на торце этого наконечника, что не позволяет производить обработку боковых стенок деталей и переходных радиусов за один цикл. Другой попыткой решения данной проблемы обработки сложнопрофильных изделий является образование на рабочей поверхности полюсного наконечника различного рода рифлений. Однако по мере удаления рифлений от торца наконечника величина магнитной индукции падает. По этой причине в ходе протекания процесса МАО через некоторое время (10...15 с) концентрация ФАП на боковой поверхности резко уменьшается, а размерный и массовый съем материала – прекращается.

Реализация данного процесса осуществляется разработкой и созданием инструмента на основе механических щеток с использованием ФАП [101].

Испытания были проведены на установке ЭУ – 5. На рис. 3.3 представлена схема обработки и общий вид полюсного наконечника, подготовленного для проведения рабочего процесса. Полюсный наконечник ЭМС состоит из шпинделя установки 1, соединенного с сердечником 2, на котором находится механическая щетка 3 с волокнами 4. В рабочий зазор между обрабатываемым изделием 5 и волокнами подается рабочая среда в виде ФАП 6 и СОТС.

Данные волокна были выполнены из проволоки диаметром 0,16; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 мм ГОСТ 3282-74 (временное сопротивление разрыву –  $\sigma_B = 300 \dots 350$  МПа). В качестве образцов использовались детали фасонного профиля (сталь 45 ГОСТ 1050-88) длиной 300 мм, исходная шероховатость поверхности  $Ra_1 = 1,2 \dots 1,4$  мкм. Режимы и параметры обработки: угловая скорость шпинделя  $V_{ш} = 50$  рад/с; магнитная индукция  $B = 1$  Тл; скорость движения детали  $V_d = 0,6$  м/мин.; величина рабочего зазора  $\delta = 1$  мм; время обработки  $t = 60$  с. В качестве ФАП использовался Ж15КТ, СОТС – СинМА-1,3 % -ный водный раствор.

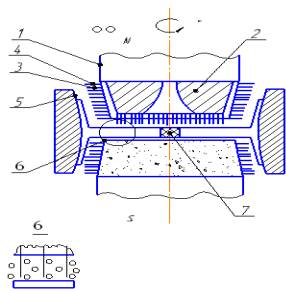


Рис. 3.3. Схема магнитно-абразивной обработки с применением механической щетки: 1 – шпиндель установки; 2 – сердечник электромагнитной системы; 3 – механическая щетка; 4 – волокна механической щетки; 5 – обрабатываемая деталь; 6 – частицы ферроабразивного порошка; 7 – демпфер

Изменение шероховатости осуществлялось в следующей последовательности: в результате подачи в рабочий зазор между обрабатываемым изделием и механической щеткой порции рабочей среды она под воздействием магнитного поля концентрировалась на вер-

шинах волокон 4 и между ними. Таким образом, происходит образование эластичного режущего инструмента. Шпиндель 1 установки ЭУ-5 вместе с полюсным наконечником, механической щеткой и рабочей средой приводится во вращение и осуществляется подача изделия 5. В результате этого наложения движений происходит одновременная обработка фасонной поверхности данного изделия соответствующими элементами полюсного наконечника.

Анализ полученных результатов, представленных в таблице 3.5, показывает, что существует разница в значениях достигаемых показателей шероховатости; при обработке горизонтальной и вертикальной поверхности процесс обусловлен продольным движением детали и вращением механической щетки. Данный комплекс движений приводит к созданию микрорельефа в виде сетки, представляющей собой след от резания ферроабразивными частицами порошка. В вертикальной плоскости контакт инструмента и детали происходит за счет продольного движения указанной выше детали и поступательного – механической щетки. В этом случае образование поверхностного слоя осуществляется по принципу работы попутного или встречного шлифования. Таким образом, время обработки каждой точки горизонтальной поверхности является более продолжительным, чем при обработке вертикальной, что обеспечивает более интенсивный съем материала.

Установлено, что оптимальным диаметром волокон механической щетки является диаметр, равный 0,3 мм. Увеличение диаметра волокон (0,4 и 0,5 мм) приводит соответственно к увеличению жесткости щетки. Уменьшение диаметра волокон (0,16 и 0,2 мм) увеличивает их податливость и понижает рабочее давление, что, в свою очередь, уменьшает съем материала (табл. 3.5). Расстояние между волокнами, обеспечивающее лучшие показатели, составляет 0,5...2 мм.

Следует отметить большую экологичность обработки с использованием механической щетки в сравнении с прототипом ввиду меньшего выброса элементов рабочей среды – ФАП и СОТС. Другой позитивной стороной данного процесса служит реализация декоративной обработки широкой номенклатуры изделий сложной формы при наличии пазов и впадин глубиной до 3...4 мм, а также различных выступов такой же высоты. Зависимость шероховатости поверхности от диаметра волокон механической щетки представлена на рис. 3.4.

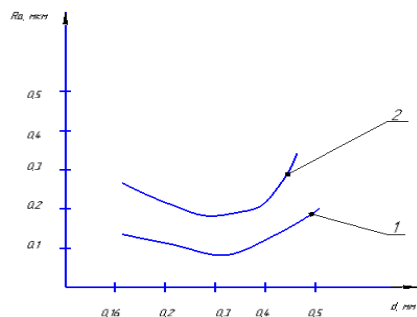


Рис. 3.4. Зависимость шероховатости поверхности от диаметра волокон механической щетки при расстоянии между волокнами 1,5 мкм: 1 – для горизонтальной плоскости детали; 2 – для вертикальной плоскости детали

Таблица 3.5

Эффективность применения различных магнитно-абразивных устройств

| Вид устройства.                        | Диаметр волокна, мм | Расстояние между волокнами, мм | Показатель шероховатости на горизонтальной поверхности детали, Ra <sub>1</sub> , мкм | Показатель шероховатости на вертикальной поверхности детали, Ra <sub>2</sub> , мкм |
|--|---------------------|--------------------------------|--|--|
| Предлагаемый полюсный наконечник [101] | 0,16                | 0,3                            | 0,16   | 0,29   |
|  |                     | 0,5                            | 0,18   | 0,21   |
|  |                     | 1,5                            | 0,12   | 0,28   |
|  |                     | 2                              | 0,13   | 0,24   |
|  |                     | 2,5                            | 0,16   | 0,33   |
|  | 0,2                 | 0,3                            | 0,14   | 0,26   |
|  |                     | 0,5                            | 0,16   | 0,2  |
|  |                     | 1,5                            | 0,11   | 0,21   |
|  |                     | 2                              | 0,11   | 0,24   |
|  |                     | 2,5                            | 0,15   | 0,32   |

| Вид устройства.  | Диаметр волокна, мм | Расстояние между волокнами, мм | Показатель шероховатости на горизонтальной поверхности детали, Ra <sub>1</sub> , мкм | Показатель шероховатости на вертикальной поверхности детали, Ra <sub>2</sub> , мкм |
|--|---------------------|--------------------------------|--|--|
|  | 0,3                 | 0,3                            | 0,12   | 0,25   |
|  |                     | 0,5                            | 0,1  | 0,22   |
|  |                     | 1,5                            | 0,1  | 0,2  |
|  |                     | 2                              | 0,1  | 0,2  |
|  |                     | 2,5                            | 0,1  | 0,3  |
|  | 0,4                 | 0,3                            | 0,17   | 0,37   |
|  |                     | 0,5                            | 0,15   | 0,27   |
|  |                     | 1,5                            | 0,14   | 0,27   |
|  |                     | 2                              | 0,16   | 0,27   |
|  |                     | 2,5                            | 0,12   | 0,34   |
|  | 0,5                 | 0,3                            | 0,17   | 0,4  |
|  |                     | 0,5                            | 0,19   | 0,41   |
|  |                     | 1,5                            | 0,2  | 0,37   |
|  |                     | 2                              | 0,2  | 0,42   |
|  |                     | 2,5                            | 0,22   | 0,4  |
| Полюсный наконечник по схеме, представленной в работе [100]. |                     |                                | 0,37   | 0,59   |

### 3.3.2. Магнитно-абразивная обработка длинномерных отверстий

Известно, что обработка внутренних поверхностей по сравнению с наружными связана с более высокой степенью трудозатрат. Одним из доказательств этого служит тот факт, что качества точности для охватываемых поверхностей (отверстий) достаточно часто рекомендуются на один ниже по сравнению с охватываемыми (валами). Это нашло свое отражение как в Международной системе

стандартизации ISO, так и в соответствующих ГОСТ и других нормативных документах. К длинномерным отверстиям относятся такие, у которых отношение  $L/D > 5$ , где  $L$  – длина обрабатываемого отверстия, мм;  $D$  – диаметр, мм. Сложность обработки определяется: трудностью доставки смазочно-охлаждающих технологических средств в рабочую зону; невозможностью контроля процесса резания; более низкой жесткостью абразивного инструмента; высоким тепловыделением, обусловленным замкнутостью зоны обработки и вследствие этого уменьшением скорости пространственного изменения градиента температуры.

Наиболее широко применяемыми в настоящее время методами финишной обработки такого рода отверстий являются доводка и хонингование. Однако, обладая рядом несомненных достоинств, эти методы имеют и определенные недостатки, что не позволяет говорить об их универсальности. Например, при доводке отверстий на вертикально-доводочных станках типа ОФ-26 отсутствуют автоматический разжим притира, а также компенсация его износа. Кроме того, и при нанесении пасты, и в самом процессе доводки не обеспечивается ее равномерное распределение в верхней и нижней частях как обрабатываемого отверстия, так и инструмента. Особенно часто это отмечается при жидкой консистенции абразивной пасты, что влечет за собой разницу в съеме металла и снижение точности отверстия. Такие вопросы, как подача абразивной пасты в рабочую зону, активный контроль размера отверстия, также требуют дальнейшей доработки. Использование суспензий вместо паст приводит к снижению производительности процесса и необходимости создания сложных устройств, предотвращающих попадание суспензии в движущие части станка. Применение алмазных паст не освобождает метод от следующих недостатков: большой расход притирочных материалов (притир и паста); шаржирование обрабатываемых материалов абразивом; значительное загрязнение рабочего места.

Другой распространенной операции (хонингованию) присущи хаотичное расположение абразивных зерен в связке инструмента, сложность изготовления комплекта брусков и необходимость их приработки в течение определенного времени. Использование брусков на эластичных связках и хонинговальных инструментов с упругим закреплением абразивных элементов на пластмассовых под-

весках производства фирмы Brush Research Mfg Co приводит к снижению стойкости и появлению вибраций во время процесса резания. Традиционный подвод СОТС в рабочую зону требует их увеличенного расхода, а многие попытки решить эту проблему связаны с большими трудностями. Например, использование внутренних проточек в самом инструменте ведет к снижению подачи СОТС или полному ее прекращению ввиду их засорения различными инородными телами, уменьшению диаметра каналов по причине твердых отложений на внутренней стенке. Алмазное хонингование всех известных видов не обеспечивает регулярности микрорельефа и характеризуется небольшой (10...20 %) опорной поверхностью. Основной схемой обработки при этом методе является схема с жестко фиксированной деталью и свободным закреплением инструмента с плавающей хонинговальной головкой, что не может исключить влияния отклонения от соосности инструмента и отверстия на геометрические параметры хонингуемого отверстия.

Производя анализ метода магнито-абразивной обработки с целью его использования в качестве альтернативного, следует, в первую очередь, исключить схему с электромагнитными индукторами (ЭМИ). Несмотря на их высокую эффективность, ограничивающими факторами являются сложность конструкции и габариты ЭМИ. Применение устройств, основанных на принципе бегущего магнитного поля, отличается сравнительно небольшим размерным съемом и его низкой интенсивностью.

В настоящее время освоено производство постоянных магнитов КС-25 ТУ 48-0521-270-83; остаточная индукция намагничивания  $B = 1,1 \dots 1,2$  Тл, КСД-25 ТУ 48-0531-299-84,  $B = 0,9$  Тл; еще более высокими магнитными свойствами обладают магниты на основе сплава Fe, Nd, В ТУ 48-0548-305-85,  $B = 1,3$  Тл, кроме того, у них хорошая ударная стойкость.

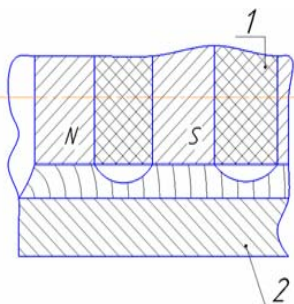


Рис. 3.5. Схема перпендикулярного расположения магнитов в индукторе на постоянных магнитах: 1 – индуктор на постоянных магнитах; 2 – обрабатываемая ферромагнитная деталь

Ввиду того, что известные конструкции индукторов на постоянных магнитах (ИПМ) пригодны для МАО отверстий небольшой длины ( $L/D < 5$ ) (рис. 3.5) и расположение магнитов по длине является перпендикулярным относительно оси обрабатываемой детали, для обработки длинномерных отверстий они не обладают экономичностью, простотой и конструктивностью решения для всего блока режущего инструмента, а также достаточной производительностью.

Например, наиболее целесообразной для магнита КС-25 ( $\text{SmCo}_5$ ) признана длина 5 мм. Тогда для обработки отверстия  $d = 18$  мм требуется ИПМ, объем постоянных магнитов в котором примерно в 2 раза выше, чем для предлагаемой схемы с параллельным их расположением. Увеличение длины ИПМ с перпендикулярным расположением магнитов свыше 30 мм также приводит к резкому росту потоков рассеяния и падению магнитодвижущей силы индуктора и в результате происходит снижение интенсивности съема материала.

Таким образом, проведенный анализ схем и устройств для МАО длинномерных отверстий позволил наметить следующий механизм реализации:

- создание компактной магнитной системы с возможностью ее ввода в обрабатываемое отверстие;
- использование в качестве источника магнитного поля постоянных магнитов;
- наличие гибкого вала для сообщения вращения магнитному индуктору [102].

Исследования при использовании ИПМ с параллельным расположением магнитов на стали Х10Н19Т ГОСТ 5632-72 показали снижение шероховатости с исходной  $Ra_1 = 0,9 \dots 1,2$  до  $Ra_2 = 0,1 \dots 0,2$  мкм. В качестве СОТС применялись СинМА-1 ТУ 38.5901176-91; ферроабразивный порошок ФАП на основе высокохромистого чугуна (рис. 3.6); зернистость  $\Delta = 100 \dots 160$  мкм; скорость вращения ИПМ  $V_{вр} = 0,5$  м/с; число двойных ходов  $n = 700 \dots 800$  дв. х/мин.

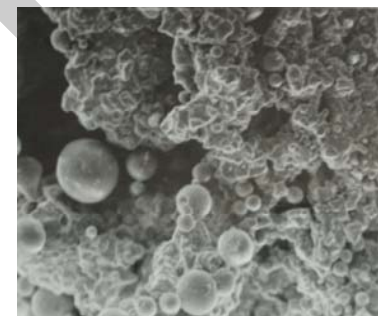


Рис. 3.6. Форма частиц ФАП на основе высокохромистого чугуна, увеличение  $\times 80$

Необходимо отметить, что при использовании этого метода макрогеометрические характеристики (в частности, значения овальности) остаются на уровне предшествующей технологической операции.

На основании приведенных данных и полученных результатов разработана установка СФТ 2.143.00.00.000 для МАО каналов длинномерных отверстий, ее краткая техническая характеристика представлена в табл. 3.6. Следует отметить эффективность такой обработки сборных изделий, изготовленных из различных материалов. Результаты по шероховатости обработанной поверхности представлены для Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81. Конструкция индуктора на постоянных магнитах с их параллельным расположением представлена на рис. 3.7.

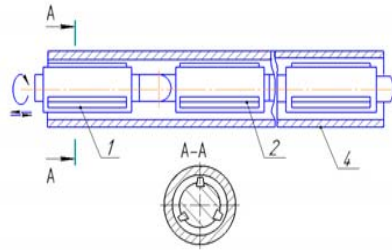


Рис. 3.7. Конструкция индуктора на постоянных магнитах с их параллельным расположением: 1 – каркас из немагнитного материала; 2 – постоянные магниты; 3 – ферроабразивный порошок; 4 – обрабатываемая деталь

Таблица 3.6

Основные технические данные моделей станков для обработки длинномерных отверстий различными финишными методами

| Параметр                                       | Доводка   |           |           | Хонингование |           |           | МАО                    |
|--|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|------------------------|
|  | ОФ-16А    | ОФ-10     | ОФ-30     | 3815         | 3820Д     | 3821Д     | СФТ<br>2.143.00.00.000 |
| Диаметр обрабатываемых отверстий, мм           | 8,5-15    | До 12     | До 30     | До 20        | 50-200    | 125-500   | 15-18                  |
| Наибольшая длина обрабатываемых отверстий, мм  | 220       | 80        | 100       | 295          | 1050      | 1600      | 3030                   |
| Шероховатость обработанной поверхности Ra, мкм | 0,16-0,04 | 0,04-0,02 | 0,04-0,02 | 0,32-0,16    | 0,32-0,16 | 0,32-0,16 | 0,32-0,16              |
| Габариты станка, мм:                           |           |           |           |              |           |           |                        |
| длина  | 1845      | 1100      | 1310      | 1120         | 2290      | 3325      | 8350                   |
| ширина   | 1220      | 630       | 770       | 1350         | 1820      | 1465      | 710                    |
| высота   | 2228      | 2020      | 2400      | 2225         | 4935      | 7050      | 1250                   |

### 3.3.3. Магнитно-абразивная обработка на основе ферроабразивных композиционных волокон

Одним из основных факторов, определяющих технико-экономические показатели процесса магнитно-абразивной обработки, является выбор режущего материала. Существующие технологии производства ферроабразивных порошков, широко применяемых в настоящее время, отличаются сложностью изготовления и требуют создания специализированного оборудования. Также имеется ряд недостатков самих ФАП, что не позволяет говорить об универсальности какого-либо их вида. Это ограниченность выбора абразивного компонента, понижение магнитных свойств ФАП из-за абразивных включений в ферромагнитной матрице, непрочность соединения абразива и указанной выше матрицы. Кроме того, ФАП на основе тугоплавких соединений типа карбидов, которые отличаются наиболее высокими режущими свойствами, дают и повышенное загрязнение обработанной поверхности цветных металлов и сплавов, что связано с присутствием остаточного углерода. Насыщение массы ФАП продуктами диспергирования различных материалов практически исключает многократность его использования.

В работе [103] представлен полюсный наконечник для МАО, изготовленный в виде собранного пакета ферромагнитных проволок, отдельно фиксируемых для негативного отображения поверхности изделий, подвергаемых обработке данным методом. Однако для производительного протекания процесса требуется осуществлять постоянную подачу отдельных порций ФАП в рабочую зону. Это приводит к его повышенному расходу в сравнении с традиционными схемами обработки. Расширение технологических возможностей метода МАО было достигнуто созданием волокон из магнитного материала с нанесением на них слоя абразивного порошка.

Материал – проволока 45Н диаметром 0,12 мм ТУ 14.1.277-72 (предел прочности при растяжении  $\sigma_b = 610$  МПа, предел выносливости при изгибе  $\sigma_{-1} = 275$  МПа, при кручении  $\tau_{-1} = 165$  МПа). Для снижения собственной жесткости, волокнам, после нанесения методом гальваностегии абразивного порошка, требуется проходить термообработку с целью удаления наводороженности поверхностного слоя, который придает им повышенную хрупкость. Однако эта жесткость остается все-таки достаточно большой, и часто наблюда-



ется резание обрабатываемой поверхности изделий самой нитью волокна после потери им абразивонесущего рабочего компонента, если микротвердость изделия меньше микротвердости нити.

Поэтому на следующем этапе исследований применялись волокна на базе высокопрочных полимеров. Первоначально были изготовлены образцы, в объеме которых равномерно распределялись ферроабразивные частицы. Для этой цели использовался ФАП Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81 зернистостью 50 мкм (рис. 3.8). Проведенные испытания показали, что такое размещение частиц не обеспечивает требуемых магнитных характеристик.

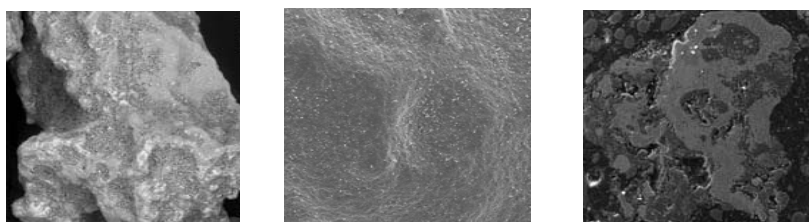


Рис. 3.8. ФАП Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81: а – морфология; б – топография; в – структура

В связи с этим был осуществлен переход на композиционные ферроабразивные волокна, что позволило получить достаточную прочность при достижении необходимых магнитных и абразивных свойств. Предварительно проведенные исследования показали, что при такой технологии изготовления волокон реализуются наиболее оптимальные условия размещения компонентов. Поскольку высокопрочная полимерная сердцевина обеспечивает требуемые механические показатели (разрушающее напряжение при растяжении и кратковременной статической нагрузке составляет  $\sigma_p = 90$  МПа), то на периферии волокна размещается гораздо большее количество режущих частиц, чем при их объемном расположении на указанных выше образцах. На рис. 3.9 показана схема строения такого композиционного волокна на полимерной основе. В качестве магнитной составляющей используется карбонильное железо (размер частиц 3-10 мкм), абразивной – порошки карбидов титана зернистостью 20-40 мкм. Однако есть более перспективное направление, которое связано с тем, что режущим компонентом служит алмазный поро-

шок, расположенный на поверхности волокна. Ферромагнитный слой находится под порошком, что значительно повышает качество обработки и позволяет применять метод МАО, например, для полирования кремниевых пластин, когда прямой контакт железа и обрабатываемого материала недопустим. Поэтому требуется определить оптимальное соотношение магнитного и абразивного компонентов и обрабатываемость материалов данным видом инструмента [104].

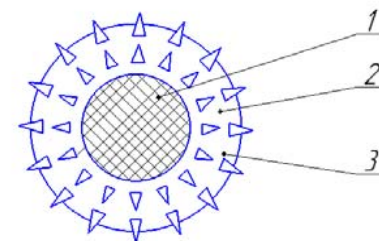


Рис. 3.9. Схема строения ферроабразивного композиционного волокна: 1 – высокопрочная нить; 2 – полимерная оболочка; 3 – ферроабразивные частицы

В качестве образцов для испытаний использовались кольца игольчатых подшипников  $D \times d \times L = 36 \times 29 \times 32$  мм. Материал – ШХ15 ГОСТ 801-78, 58-61 HRC<sub>3</sub> шероховатость поверхности изделий до обработки составляла  $Ra_1 = 1,2 \dots 1,4$  мкм. Смазочно-охлаждающие технологические средства – СинМА-1 ТУ 38-5901176-91. Выходные показатели процесса – достигаемая шероховатость поверхности изделий,  $Ra_2$ , мкм и величина удельного массового съема материала,  $\Delta G$ , мг/см<sup>2</sup>·мин. Измерение шероховатости поверхности до и после обработки осуществлялось на профилографе-профилометре модели «252-Калибр», взвешивание образцов производилось на весах аналитических ВЛА-200 г с точностью до 0,001 г. В качестве оборудования применялась установка СФТ 2.150.00.00.000. Режимы и параметры процесса обработки были следующими: скорость резания  $V_p = 2,0$  м/с; скорость осцилляции  $V_o = 0,14$  м/с; амплитуда осцилляции  $A = 1,5$  мм; величина магнитной индукции  $B = 1$  Тл; время обработки  $t = 60$  с.

На ферроабразивные композиционные волокна (рис. 3.10), был нанесен алмазонесущий режущий слой (порошок алмазный АМ 40/28). В качестве магнитной составляющей было использовано

карбонильное железо (максимальная магнитная проницаемость,  $\mu = 20000 \dots 21500$  Г/м, индукция насыщения  $B_s = 2,17$  Тл, коэрцитивная сила  $H_c = 0,08$  А/м). Принято три варианта соотношения магнитного и абразивного компонентов. Ранее было установлено, что процесс обработки, происходящий за пределами 45...70 % содержания карбонильного железа от общего количества алмазонасевающего режущего слоя нецелесообразен. Это объясняется тем, что объем магнитной составляющей менее 45 % не обеспечивает достаточной намагниченности, создающей силу, необходимую для прижима волокон к обрабатываемой детали, а содержание более 70 % не позволяет получить требуемых качеств и производительности операции из-за снижения режущей способности. Таким образом, при первом варианте изготовления ферроабразивных волокон использовалось 45 %, во втором – 60 %, и в третьем – 70 % магнитного компонента.

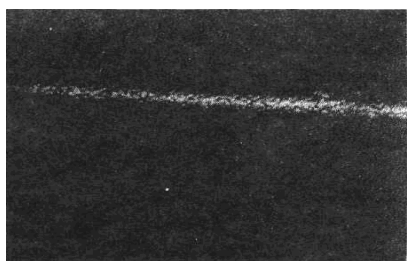


Рис. 3.10. Внешний вид ферроабразивного композиционного волокна, увеличение  $\times 90$

Для проведения сравнительных исследований применялось устройство, выполненное по схеме, представленной в работе [105].

Были проведены испытания ферроабразивных композиционных волокон, направленные на определение оптимального соотношения между указанными компонентами (табл. 3.7). На рис. 3.11 показана схема устройства для реализации данного способа обработки методом МАО. Пакеты гибких ферроабразивных композиционных волокон 1 намагничиваются магнитным полем, создаваемым электромагнитными катушками 2. Изделие 3, помещенное между пакетами, фиксируемым в полюсных наконечниках 4, приводится во вращение. Данные волокна образуют эластичную щетку, жесткость которой регулируется изменением величины магнитного поля при

помощи магнитопровода 5. Для более равномерной обработки предусмотрен механизм привода осцилляции полюсных наконечников, который на данном рисунке не показан.

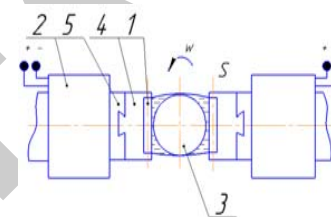


Рис. 3.11. Схема обработки методом МАО с использованием ферроабразивного композиционного волокна: 1 – пакеты ферроабразивных композиционных волокон; 2 – электромагнитные катушки; 3 – обрабатываемое изделие; 4 – полюсные наконечники; 5 – магнитопровод

Таблица 3.7

Качество и производительность обработки после использования различных видов ферроабразивных волокон

| Вид обработки   | Удельный массовый съём материала, $\Delta G$ , мг/см <sup>2</sup> ·мин | Достижимая шероховатость, $Ra_2$ , мкм |
|---|--|--|
| Ферроабразивные волокна на основе проволоки 45Н диаметром 0,12 мм ТУ 14.1.277-72  | 8,96   | 0,055                                  |
| Ферроабразивные волокна на основе высокопрочной полимерной нити и алмазного порошка с содержанием магнитного компонента |  |  |
| 45%   | 11,91  | 0,038                                  |
| 60%   | 13,77  | 0,024                                  |
| 70%   | 12,32  | 0,032                                  |

Также следует отметить, что отсутствует загрязнение рабочей зоны, характерное для процесса МАО с использованием ФАП на основе тугоплавких соединений типа карбидов, как указывалось ранее.

Осуществлена интенсификация режущего инструмента на основе ферроабразивных волокон путем применения в качестве абразива алмазного порошка, при этом оптимальное содержание карбонильного железа как магнитного компонента составляет 60 % от их общей массы. Наличие алмазного порошка позволило повысить культуру производства процесса и произвести более полное использование режущей способности данного вида инструмента.

### 3.3.4. Магнитно-абразивная обработка отверстий на основе гибких абразивных щеток

В настоящее время широко известен и находит свою область применения метод магнитно-абразивной обработки. Среди его основных достоинств можно выделить возможность управления жесткостью режущего инструмента во время протекания процесса. Однако во многом его потенциальные возможности остаются нереализуемыми по ряду объективных причин. В таких странах, как Япония, Индия, Франция, Германия, Китай, США, ведутся интенсивные исследования, направленные на дальнейшее изучение и обобщение процесса MAO.

Внутренние поверхности среди всех классов занимают особое место, а отделочные операции по их обработке – одна из труднорешаемых проблем в машиностроении. Существует комплекс технических предложений, направленных на усовершенствование действующих методов и создание новых видов. Однако во многом их практическая реализация характеризуется либо ростом себестоимости процесса обработки, либо низкой эффективностью и узким диапазоном приложения.

Одним из первых технических решений, предложенных для обработки труб методом MAO, была обработка их внутренних поверхностей с использованием ферроабразивного порошка, помещенного во вращающееся магнитное поле [106]. Для полирования отверстий немагнитных тонкостенных изделий разработаны устройства, в которых магнитное поле, образованное электромагнитами, удерживает порцию ФАП у поверхности обрабатываемой детали. Однако эти способы обладают слабой интенсивностью и, следовательно, низкой производительностью. Дальнейшие исследования позволили интенсифицировать MAO отверстий путем применения электромагнитных систем (ЭМС) и индукторов на постоянных магнитах (ИПМ).

Как известно, MAO относится к типу отделочных операций, поскольку величины магнитной индукции при помощи ЭМС составляют 1...1,2 Тл. Применение ИПМ на основе оксидно-барьерных магнитов 2БА характеризуется высоким разбросом значений магнитной индукции даже при изготовлении одной партии, а использование редкоземельных элементов Sm, Co, Nd – высокой себестоимостью. Кроме того, у всех постоянных магнитов невысокие значения ударной прочности и коррозионной стойкости.

Производство и реализация метода MAO осуществляются использованием режущего инструмента в виде ФАП. Обработка ферромагнитных сталей с твердостью 55...65 HRC<sub>3</sub> для производимых в настоящее время ФАП не представляет особых сложностей. Однако при MAO хрупких, а также диа- и парамагнитных материалов приблизительно такой же твердости возникают определенные трудности. Ввиду этого оценка фактора магнитного поля при MAO требует проведения комплекса дополнительных исследований.

Практически метод MAO таких материалов, как титановые сплавы, керамика и т.п., можно осуществить алмазосодержащим ФАП. Исследования [107], основанные на традиционной схеме приготовления, показали, что этот вид ФАП отличается низкой стойкостью из-за слабой закрепленности алмазного порошка в магнитной матрице, но характеризуется высокой производительностью в процессе своего воздействия на обрабатываемую поверхность детали по сравнению с такими ФАП, как Ж15КТ и ПолиМAM-Т.

Предлагаемый инструмент для MAO отверстий на основе гибких алмазных щеток состоит из пакета гибких волокон из магнитного материала с нанесенным на них слоем абразивного порошка из синтетических алмазов (рис. 3.12).

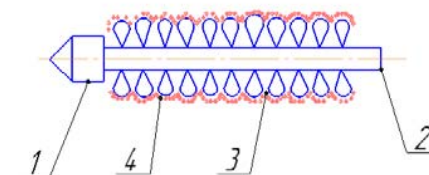


Рис. 3.12. Общий вид инструмента для магнитно-абразивных щеток:  
1 – направляющий конус; 2 – ферромагнитная ось; 3 – ферромагнитные петли;  
4 – абразивные частицы порошка

Данный пакет состоит из жестко закрепленных с одной стороны гибких волокон диаметром 0,1...0,2 мм и зазором между ними 0,01...0,1 мм [108]. Выполнение гибких волокон из магнитного материала обеспечивает намагничивание их полем ЭМС и расположение вдоль магнитных силовых линий с натяжением под воздействием магнитной силы:

$$\vec{F} = -M\vec{v} \times \vec{B}, \quad (3.1)$$

где  $M$  – намагниченность материала волокна;

$v$  – скорость перемещения пакета волокон в магнитном поле;

$B$  – магнитная индукция, создаваемая ЭМС

Сборка пакета посредством жесткого закрепления пластинами с одной стороны и зазором 0,01...0,1 мм позволяет сформировать щетку, между волокнами которой просыпается снимаемая с обрабатываемой поверхности стружка. Ее размеры колеблются от 0,001 до 0,008 мм, что предотвращает пакет гибких волокон от засаливания. Изготовление волокон диаметром 0,1...0,2 мм обеспечивает эластичность щетки. Это подтверждается экспериментально, поскольку волокна диаметром менее 0,1 мм не обеспечивают прочности щетки, а диаметр более 0,2 мм приводит к отсутствию гибкости.

При изготовлении инструмента в качестве перфорированного основания используется гибкая ферромагнитная сетка, через которую прошивают ферромагнитные нити. Они с одной стороны образуют U-образные петли, а на сетку со стороны, противоположной петлям, наносят клеевую композицию, содержащую ферромагнитную составляющую, после чего вырезают рабочий элемент нужной формы и размера.

Пучки нитей образуются путем разрезки в местах перегиба петли. Закрепление абразивных частиц на поверхности нитей производится методом гальваностегии с последующей термообработкой. Клеевая композиция с ферромагнитным наполнением увеличивает прочность инструмента и снижает потери магнитного потока. Она содержит 30 % клея Б-2 и 70 % порошка пермаллоя карбонильного железа.

Использование метода гальваностегии с последующей термообработкой позволяет закрепить до 75 % от всего количества алмазного порошка в подложке на поверхности нитей. Размер закрепляемых зерен зависит от диаметра нитей. Применение ферромагнитного наполнителя

приводит к росту магнитной проницаемости рабочего элемента. Термообработка обеспечивает нитям, несущим абразивным частицам порошка, необходимую гибкость.

Технология изготовления инструмента следующая: с помощью машины, нитеводители которой упрочнены алмазным покрытием, прошивают сетку ГОСТ 2715-75 (диаметр проволоки от 0,03 до 1 мм, размер ячейки в свету 0,04...3 мм) непрерывной гибкой нитью диаметром 0,12 мм так, чтобы с одной стороны были образованы U-образные петли высотой 10...30 мм. Если предполагается использовать пучки, то прошивка производится несколько раз или одновременно несколькими нитями. На сторону, противоположную петлям, наносят указанную выше композицию. Затем для получения пучков осуществляется сушка на воздухе ( $T = 298...308$  К) и при необходимости разрезка петли в местах перегиба. Полученное таким образом гибкое волокно с «металлическим ворсом» раскраивается на рабочие элементы, которые подвергаются гальваностегии.

Состав электролита:  $\text{NiSO}_4 + 7\text{H}_2\text{O} - 200...300$  г в литре,  $\text{NiCl}_2 + 6\text{H}_2\text{O} - 40...45$  г в литре,  $\text{H}_3\text{BO}_3 - 30$  г в литре, pH электролита 4,2...4,7, температура  $T = 313...318$  К. Размер частиц алмазного порошка составляет 15...20 мкм, а его концентрация в электролите – 20 % от всего объема. В качестве катода применяется рабочий элемент, при этом площадь анода должна быть в 3...4 раза больше площади катода. Осаждение и адгезия порошка к нитям на рабочем элементе происходят при плотности тока 1...1,5 А/дц<sup>2</sup>. Скорость протекания процесса 15 мкм/ч, продолжительность – 10...14 ч.

Инструмент работает следующим образом: на катушки ЭМС подается выпрямленный ток той величины, которая создает магнитное поле 0,4...0,8 Тл у обрабатываемой поверхности, а инструмент приводят во вращение с одновременным продольно-возвратно-поступательным перемещением вдоль оси отверстий. При этом волокна располагаются по магнитным силовым линиям, образуя эластичную щетку, жесткость которой регулируется изменением величины магнитной индукции. Частицы абразивного порошка, нанесенного на волокна, прижимаются к обрабатываемой поверхности под воздействием магнитной силы, рассчитываемой по формуле (3.1), и осуществляется сьем материала. В зону резания подаются смазочно-охлаждающие технологические средства.

Были проведены сравнительные испытания предлагаемого устройства, в качестве образцов использовали втулки  $D \times d \times l = 45 \times 39 \times 80$  мм в количестве 10 шт. Материал образцов – карбид кремния SiC. Исходная шероховатость  $Ra_1 = 30 \dots 40$  мкм. Величина магнитной индукции составила 0,6...0,8 Тл, число оборотов инструмента  $n = 630$  об/мин, число двойных ходов возвратно-поступательного движения  $n_{дв} = 600$  дв.ход/мин, амплитуда осцилляции  $A = 1$  мм; время обработки  $t = 4$  мин; СОТС-СинМА-1 ТУ 38.5901176-91. В качестве базового ФАП применяется Ж15КТ ТУ 8.06.493-81, зернистость  $\Delta = 200 \dots 315$  мкм.

При обработке образцов на известных устройствах для МАО базовым ФАП Ж15КТ съем материала был минимальным и улучшения качества поверхности осуществить не удалось. Использование гибких щеток позволило получить равномерную по всей поверхности шероховатость  $Ra_2 = 15 \dots 10$  мкм, причем микродефектов не наблюдалось.

Таким образом, разработка и создание такого инструмента для МАО отверстий позволяют расширить технологические возможности метода. Диапазон отверстий, предлагаемых к обработке данным методом, составляет 10...40 мм. Некоторые технические характеристики представлены на рис. 3.13 и в табл. 3.8.

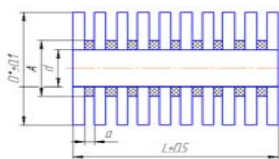


Рис. 3.13. Размерные характеристики инструмента для магнитно-абразивной обработки отверстия на основе гибких абразивных щеток

Таблица 3.8

Характеристика геометрических размеров инструмента на основе гибких абразивных щеток в зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия (мм)

| Диаметр обрабатываемого отверстия, D | Диаметр инструмента, D* | d | A  | a       | L  |
|--------------------------------------|-------------------------|---|----|---------|----|
| 17,5                                 | 17,6                    | 8 | 11 | 0,3-0,7 | 15 |
| 20                                   | 20,1                    | 8 | 12 | 0,3-0,7 | 20 |
| 23                                   | 23,1                    | 8 | 14 | 0,3-0,7 | 25 |

## 4. САМООРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ПРОЦЕССОВ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

### 4.1. Факторы нестабильности магнитно-абразивной обработки

Магнитно-абразивная обработка является сложным процессом взаимодействия ферроабразивной частицы с обрабатываемым материалом, в основе которого лежат различные физические и химические явления. Условия и характер такого взаимодействия зависят от многих факторов, через которые проявляются свойства технологической системы. Эти факторы подвержены систематическим и случайным изменениям, которые в итоге определяют нестационарность процесса резания и, как следствие, нестабильность его выходных характеристик: производительности, шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя обработанных поверхностей и др. К числу систематических факторов, возмущающих процесс резания, можно отнести закономерное изменение профиля режущего контура, геометрии ферроабразивной частицы, скорости резания, амплитуды колебаний, которые вызваны конструктивными особенностями электромагнитной системы и обрабатываемой заготовки. Среди случайных (вероятностных) факторов, влияющих на нестабильность механической обработки, следует выделить: изменение геометрии ферроабразивной частицы в процессе обработки [109], нестабильность структуры и физико-механических свойств заготовок [110], нестабильность исходной шероховатости, изнашивание ферроабразивной частицы и изменение ее магнитных свойств.

### 4.2. Нестабильность структуры и физико-механических свойств заготовок

Рассеяние физико-механических свойств металла имеет место как у заготовок одной партии, а также в разных местах одной и той же заготовки. Это связано с тем, что на структуру и физико-механические свойства металла, из которого получена заготовка, существенное влияние оказывают технологии, используемые на этапах выплавки, обработки давлением и термической обработки.

Способ и условия выплавки оказывают влияние на фактическое содержание вводимых легирующих элементов и количество неметаллических включений. Условия кристаллизации влияют на величину дендритов и направление их роста, а также на степень дендритной ликвации, что проявляется в неоднородности физико-механических свойств заготовки по длине. Одной из причин колебаний физико-механических свойств материала являются также колебания химического состава и морфологический характер дисперсных включений.

При горячей обработке давлением в заготовках происходит неравномерная деформация по объему, вызывающая разнородность и повышенную плотность дислокаций в отдельных местах. Это приводит к флуктуации свойств металла (сплава) по прочности и по пластичности в различных местах одной и той же заготовки. Неравномерность нагрева и охлаждения заготовки по объему при термической обработке проявляется на стабильности микроструктуры металла, что в конечном итоге определяет ее технологические свойства.

#### 4.3. Неоднородность пластической деформации при резании

Для конструкционных сталей и сплавов условия структурной однородности и стабильности дефектов, как правило, не выполняются. Это обстоятельство оказывает существенное влияние на процесс размножения и движения дислокаций и, как следствие, проявляется в неоднородном характере пластической деформации, а также в наличии взаимосвязи процессов деформирования на различных уровнях [111].

Процесс резания всегда сопровождается пластической деформацией, приводящей к возникновению внутренних напряжений и температур. Нестабильность этих параметров связывают с неоднородным характером пластического течения металлов и сплавов, который проявляется на атомном уровне и является следствием размножения и направленного движения дислокаций в полосах скольжения, а также размножения и развития полос скольжения в зоне пластической деформации [112]. Пластически деформируемую зону можно представить как систему полос скольжения. Плотность,

длина, ширина и ориентация полос скольжения свидетельствуют о кристаллографической ориентации плоскостей скольжения в обрабатываемом материале, а также о характере протекания и степени пластической деформации. Неоднородность протекания пластической деформации при резании связана в первую очередь с размножением и развитием полос скольжения. Полоса скольжения представляет собой локальную область материала с повышенной плотностью дислокаций, которая граничит с областями, испытывающими только упругую деформацию. Чередование пластически деформированных и упруго деформированных областей приводит к неоднородному напряженному состоянию обрабатываемого материала [111]. Размножение полос скольжения, как правило, начинается от источников дислокаций, расположенных в поверхностном слое на поверхностях раздела. При движении в полосах скольжения дислокации встречают препятствия (барьеры), преодолевая которые, обеспечивают дальнейшее развитие пластической деформации.

#### 4.4. Изнашивание и разрушение ферромагнитных частиц

В процессе магнитно-абразивной обработки режущие кромки ферромагнитной частицы взаимодействуют с материалом обрабатываемой заготовки. Взаимодействие происходит при высоких давлениях и скоростях скольжения, что вызывает неоднородность распределения температурных полей. Материал режущей части инструмента при этом находится в сложном напряженном состоянии (на него действуют напряжения изгиба, сжатия и растяжения). Разрушение абразивной составляющей ферромагнитных частиц может привести к непосредственному контакту их ферромагнитной составляющей с обрабатываемой поверхностью, что вызывает интенсификацию структурно-фазовых превращений и создает предпосылки для адгезийного взаимодействия материалов трущихся поверхностей заготовки и ферромагнитных зерен. Взаимодействие режущих кромок ферромагнитных частиц с материалом обрабатываемой заготовки может быть случайным из-за рассеяния физико-механических свойств контактируемых участков и неоднородного распределения микронеровностей на них. Кроме того, процесс резания сопровождается рядом физических явлений (адгезия, диффузия

и др.), которые также имеют вероятностную природу. Это приводит к случайным вариациям изнашивания и сложным статистическим закономерностям их изменения во времени от входных параметров процесса магнитно-абразивной обработки.

#### 4.5. Формирование абразивной щетки из массы ферроабразивных частиц в результате их самоорганизации

Процесс магнитно-абразивной обработки представляет собой ориентированное и избирательное абразивное микрорезание и микровыглаживание. Частицы ферроабразивного порошка контактируют преимущественно с вершинами гребешков, являющихся концентраторами магнитных силовых линий. Каждая частица, находясь в магнитном поле, располагается наибольшей осью по направлению к обрабатываемой поверхности. Движение ферроабразивных частиц в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке и интенсивность съема микронеровностей с обрабатываемой поверхности определяется характером действия на контактирующие частицы сил на различных стадиях процесса абразивного воздействия.

По мере износа режущей кромки ферроабразивной частицы путем выкрашивания абразивной составляющей изменяется геометрическая форма частицы, смещается центр ее тяжести и увеличивается коэффициент трения из-за того, что в контакт с обрабатываемой поверхностью вступает «ферромагнитная матрица» частицы. Это, в свою очередь, приводит к увеличению силы  $f_m$ , что вызывает смещение свободно ориентированных частиц и переориентацию их наибольшей оси в направлении магнитных силовых линий, то есть происходит явление регенерации «абразивной щетки» путем самоорганизации массы ферроабразивных частиц, вынужденных совершать периодическое вращение в рабочей зоне зазора и располагаться к обрабатываемой поверхности наиболее острой режущей кромкой [109]. В результате явлений самоорганизации массы частиц свободного незакрепленного абразива обработка поверхности детали производится постоянно обновляющимися острыми кромками, т.е. на протяжении всего цикла обработки имеет место процесс ориентированного абразивного резания. Процесс регенерации «аб-

разивной щетки» происходит более интенсивно при больших значениях градиента магнитной индукции.

Магнитно-абразивная обработка относится к процессам, в основе которых лежат быстропротекающие физические и химические явления, носящие случайный характер, и предсказать их можно только с некоторой вероятностью.

Для экспериментального и теоретического исследования таких процессов целесообразно использовать статистический подход [113, 114].

Для определения доминирующего параметра при отсутствии симметричности и транзитивности целесообразно применить синергетическую концепцию, использующую понятие моды случайной непрерывной величины, т.е. такое значение параметра, при котором плотность его распределения имеет максимум [113]. При этом распределение случайных величин, на фоне которых проявляются моды, описываются законами:

- 1) равномерным  $f(x) = 1 / (\mu_1 - \mu_0)$ , при  $\mu_0 \leq x \leq \mu_1$ ;
- 2) экспоненциальным  $f(x) = (1 / \mu) \exp(-x / \mu)$ , при  $\mu > 0, x > 0$ ;
- 3) нормальным  $f(x) = (1 / (\sigma\sqrt{2\pi})) \exp(-(x - \mu)^2 / (2\sigma^2))$ , при  $\sigma > 0,$

$-\infty < \mu < \infty, -\infty < x < \infty$  и др.,

где  $\mu$  – математическое ожидание;

$\mu_0$  и  $\mu_1$  – ограничения;

$\sigma^2$  – дисперсия случайных величин  $x$ .

Судить о степени соответствия статистических данных выбранному закону распределения, т.е. о характере проявления моды, позволяет отношение Романовского:

$$R = (\lambda_p^2 - k) / \sqrt{2k}, \quad (4.1)$$

где  $\lambda_p^2$  – критерий Пирсона;

$k$  – число степеней свободы, т.е. количество групп в изучаемом ряду, рассчитанных ( $\mu, \sigma$  и др.) и используемых при вычислении теоретического распределения статистических характеристик.

Статистический анализ доминирующего параметра производственной системы в рамках широкой номенклатуры применяемых технологий позволяет минимизировать число экспериментов при изучении процессов и отдельных явлений.

В самоорганизующихся системах можно управлять гибкостью и надежностью, изменяя число подсистем [114]. Каждая подсистема  $i$  имеет выходы:  $q_1$  – детерминированный строго определенный и  $q_2$  – флуктуирующий с рассеянными характеристиками.

Полный выход подсистемы в первом приближении с учетом аддитивности материальных и информационных потоков:

$$q^{(i)} = q_1^{(i)} + q_2^{(i)}. \quad (4.2)$$

Считая, что в условиях производства  $q^{(i)}$  – независимая случайная величина, полная величина выхода следующая:

$$Q = \sum_{i=1}^n q^{(i)}. \quad (4.3)$$

Полный выход, согласно предельной центральной теореме, растет пропорционально числу подсистем  $n$ , в то время как величина рассеяния растет пропорционально квадратному корню  $\sqrt{n}$ . Эти оценки основаны на анализе линейной зависимости, на самом же деле обратная связь, присущая производственным системам, приводит к еще более значительному подавлению рассеяния характеристик.

#### 4.6. Критерии процессов формирования поверхностей при магнитно-абразивной обработке

При синтезе интенсивных методов обработки необходимо учитывать стабильность формирования параметров качества обработки и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического процесса путем применения обратных связей [113]. Поскольку условия, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений и стабилизацию формирования параметров качества

интенсивной обработки, являются следствием избыточности рассматриваемой технологической системы по структурному составу, то целесообразно в качестве целевой функции вместо конкретных значений совокупности критериев выбора использовать критерии самоорганизации процессов.

В общем виде системная модель технологии [113, 114] представляется сочетанием трех входных потоков: вещества, энергии, информации. Способ обработки целесообразно рассматривать в виде подсистем: энергетической и информационной. Первая доставляет и преобразует энергию, необходимую для воздействия на заготовку с целью изменения ее физико-механических свойств, снятия или нанесения материала. Она определяется видом обработки. Вторая управляет потоками энергии и вещества, обеспечивая их доставку в необходимом количестве в заданное место рабочего пространства с целью обеспечения требуемых формы, размеров и свойств поверхности детали.

Воздействие на заготовку осуществляется с целью перехода ее из одного состояния в другое, соответствующее новому качеству. Это воздействие осуществляется в несколько этапов. На первом этапе подводимая энергия преобразуется в рабочую  $\mathcal{E}_{\text{раб}}$  с помощью технологического оборудования. На втором этапе рабочая энергия превращается в энергию воздействия  $\mathcal{E}_{\text{возд}}$  на обрабатываемый объект. На третьем этапе подводимая энергия приводит к образованию физико-химических механизмов  $M_{\text{ф.х}}$  воздействия на заготовку, являющихся главным элементом формирования параметров процесса обработки (производительность, энергозатраты, качество поверхности и т. п.).

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

$$\text{ПО} = \{\mathcal{E}_{\text{раб}} \Rightarrow \mathcal{E}_{\text{возд}} \Rightarrow M_{\text{ф.х}}\}. \quad (4.4)$$

При формировании поверхности финишными методами обработки рассматривают геометрические и физико-механические свойства, включающие шероховатость, волнистость, твердость, износостойкость, прочность.

При изучении физических и термомеханических явлений, происходящих в нестационарных технологических процессах интенсивной обработки, целесообразно использовать критерии Пекле  $Pe$



и Рейнольдса  $Re$  [114]. Для описания процессов тепломассопереноса при использовании концентрированных потоков энергии применяются критерии, характеризующие поверхностные и пространственные движения потоков вещества и энергии.

Процессы формирования поверхности при магнитно-абразивной обработке можно характеризовать последовательностью преобразований  $Pe^* \Rightarrow Re^*$ , в которой критерий Пекле  $Pe^*$  характеризует отношение количества теплоты, отводимого конвекцией и путем теплопроводности, и определяет, является ли данный источник теплоты быстродвижущимся, а критерий Рейнольдса ( $Re^*$ ) характеризует переход ламинарного движения порошковой среды в турбулентное и представляется произведением  $Pe Pr$ , в котором критерий Прандтля  $Pr$  характеризует способность теплоты распространяться в данной среде.

Таким образом, процессы формирования поверхностного слоя в технологической системе магнитно-абразивной обработки можно описать модифицированными критериями Рейнольдса  $Re^*$ , Пекле  $Pe^*$  и Прандтля  $Pr^*$ :

$$Re^* = \frac{Pe^*}{Pr^*} = \frac{v_S t}{\omega^* Pr^*} = \frac{v_S t}{v^*} = \frac{v_S t}{(\sigma_P / \sigma_M)(v/S)} = \left( \frac{\sigma_M}{\sigma_P} \right) \cdot \left( \frac{v_S S t}{v} \right), \quad (4.5)$$

в которых  $\vec{v}_S = \vec{v} + \vec{S}$  - результирующая скорость движений формирования поверхности, главного  $\vec{v}$  и подачи  $\vec{S}$ ;  $t$  - толщина наносимого и деформируемого слоя с учетом изменения его плотности  $\rho$ ;  $\omega^*$  и  $v^*$  - обобщенная проводимость и вязкость технологической среды,  $\sigma_P$  - трансляционная составляющая напряженного состояния технологической среды и сформированного покрытия в направлении силы деформирования  $P$ ;  $\sigma_M$  - ротационная составляющая напряженного состояния в направлении вращения на плоскости, образованной  $P$  и  $v$ .

Соотношение составляющих напряженного состояния среды  $(\sigma_M / \sigma_P)$  на микроуровне и скоростей дополнительного и главного движения элементов технологической системы  $(S/v)$  на макроуровне описывает вязкость технологической среды  $(1/v^*)$ , называемую ротационной.

$$\mu^* = \frac{1}{v^*} = \left( \frac{\sigma_M}{\sigma_P} \right) \left( \frac{S}{v} \right). \quad (4.6)$$

При интенсификации технологических воздействий ротационная вязкость  $\mu^* = -\tau^* / \text{rot } \vec{v}^*$  характеризует переход объемной вязкости среды  $\zeta^* = -\sigma^* / \text{div } \vec{v}$  в динамическую  $\eta = -\tau_g / \text{grad } \vec{v}$ , используя добавочные касательные  $\tau^*$  и нормальные  $\sigma^*$  напряжения при сжатии и растяжении среды наряду с нормальным напряжением давления  $\sigma_g$  и динамическим касательным напряжением  $\tau_g = -\eta \sigma_g$ , а  $v^*$  описывает турбулентные составляющие вращения в потоке среды, движущемся со скоростью  $v$ .

При образовании термодинамически неустойчивых структур целесообразно с использованием критерия Рейнольдса  $Re^*$  определять волнистость и шероховатость формирующегося рельефа поверхности  $Ra$ . Поэтому толщина формируемого слоя  $t$ , пропорциональная увеличению или снижению его массы  $Q$ , с учетом сплошности или пористости покрытия, в результате которых изменяется относительная твердость  $H_\varepsilon = \Delta H / H$ , описывается выражением  $Q / (1 - H_\varepsilon)$ .

Соотношение параметров напряженного состояния  $\sigma_P / \sigma_M$  в (4.5) и (4.6), пропорциональных факторам, определяющим перемещение и вращение частиц порошка, можно представить отношением  $B/\tau$  для магнитодинамических воздействий.

В случае, когда необходимо не только сформировать поверхность, но и упрочнить ее в технологической системе создается положительная обратная связь. Избыточные степени свободы инструмента и технологической среды, подавляя рассеяние потоков энергии и вещества в формоизменяемом припуске, создают упрочняющие структуры в поверхностном слое и повышают производительность обработки.

В том случае, когда сначала требуется упрочнить, а в завершение сформировать рельеф поверхности, в технологической системе при электрофизических воздействиях организуется отрицательная обратная связь. Дополнительные воздействия источниками энергии

и веществами, формируя упрочняющие структуры в поверхностном слое, не допускают развития неустойчивости процесса при образовании рельефа поверхности и при стабилизации не позволяют поднимать производительность обработки.

Организация обратных связей в технологическом комплексе электрофизической обработки через избыточные степени свободы инструментов, частиц материала порошка и удаляемого слоя, а также посредством дополнительных воздействий потоками поля и источниками энергии, позволяет управлять устойчивостью процессов формирования поверхностного слоя путем их самоорганизации.

Статистический анализ параметров качества методов электрофизической обработки позволяет выделить наиболее значимые технологические факторы и выявить их взаимосвязи. Формирование технологических регламентов изучаемых методов обработки только из узких диапазонов режимов, ограниченных условиями самоорганизации совместных электрофизических воздействий, создает условия для стабилизации параметров качества поверхностного слоя.

Обеспечение условий самоорганизации процессов формирования поверхностного слоя согласно критериям Пекле  $Pe$  и Рейнольдса  $Re$  и организация обратных связей в открытых технологических системах при совместных воздействиях позволяют посредством стабилизации электрофизических и термомеханических процессов управлять эффективностью и качеством обработки.

Моделирование термомеханических и электрофизических процессов на основе синергетического подхода позволяет учитывать стабильность формирования параметров качества и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологических процессов. Поскольку условия, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений и стабилизацию формирования параметров качества интенсивной обработки, являются следствием избыточности рассматриваемой технологической системы по структурному составу, то целесообразно в качестве целевой функции вместо конкретных значений совокупности критериев выбора использовать критерии самоорганизации процессов.

#### 4.7. Самоорганизация процессов образования и регенерации абразивной щетки

В частице ферроабразивного порошка, находящейся в магнитном поле зазора, происходит ориентация молекулярных токов, направление которых таково, что созданные ими магнитные поля совпадают с направлением внешнего магнитного поля и усиливают его. В толще частицы молекулярные токи направлены в противоположные стороны и создаваемые ими магнитные поля взаимно компенсируются. Поэтому учитывать будем только магнитные поля, возникающие от молекулярных токов, текущих по поверхности частицы.

Рассмотрим действие в направлении нормали к обрабатываемой поверхности сил магнитного поля на ферроабразивную частицу, находящуюся в рабочем зазоре при обработке наружных цилиндрических поверхностей. Магнитное поле в рабочем зазоре неоднородно [109], вектор его индукции  $\vec{B}$  можно разложить на две составляющие  $\vec{B}'$  и  $\vec{B}''$  (рис. 4.1, а). Мысленно рассечем частицу плоскостями, перпендикулярными наибольшей оси, на множество элементарных участков и рассмотрим один из них. Поскольку по его периферии течет молекулярный ток, то поведение элементарного участка в магнитном поле зазора можно уподобить поведению контура проводника с током в неоднородном магнитном поле.

Под действием индукции  $\vec{B}''$  возникают радиальные силы, действующие по периферии участка в плоскости, перпендикулярной направлению магнитных силовых линий. Эти силы взаимно уравновешиваются. Составляющая индукции  $\vec{B}'$  вызывает возникновение силы, направленной вдоль вектора  $\vec{B}''$ . На элементарную длину  $d\ell$  периметра рассматриваемого участка действует сила

$$df = J_m B' d\ell, \quad (4.7)$$

где  $J_m$  - молекулярный ток по периметру участка, возникший вследствие намагничивания частицы.

Учитывая, что  $B' = B \sin \alpha$  (рис. 4.1 а), и интегрируя (4.7), определим силу  $f$ , действующую на весь периметр участка  $L$

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

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

$$f_p = \sum f = P_M \frac{\Delta B}{\Delta x}, \quad (4.8)$$

где  $P_M$  – магнитный момент частицы ферромагнитного порошка.

Определим величину градиента напряженности магнитного поля, приняв за  $\Delta x$  наибольший размер частицы порошка -  $\Delta$  (рис. 4.1 б).

Тогда  $\Delta B = \frac{\Phi}{S_1} - \frac{\Phi}{S_2}$ , где  $\Phi$  – магнитный поток;  $S_1$  и  $S_2$  – площади сечений.

Так как  $S_1 = R_d \beta b$  и  $S_2 = (R_d + \Delta) \beta b$ , то  $\Delta B = \frac{\Phi \Delta}{\beta b R_d (R_d + \Delta)}$ , где

$R_d$  – радиус обрабатываемой поверхности;  $b$  – размер частицы в направлении оси детали (малая ось эллипсоида);  $\beta$  – угол между радиусами деталей, касательными к наибольшему сечению частицы в плоскости, перпендикулярной оси детали.

Тогда:

$$\frac{\Delta B}{\Delta x} = \frac{\Phi}{\beta b R_d (R_d + \Delta)}. \quad (4.9)$$

Магнитный момент частицы порошка в форме эллипсоида вращения:

$$P_m = \frac{4}{3} K H_1 \Delta^2 b, \quad (4.10)$$

где  $K$  – магнитная восприимчивость материала ферропорошка;

$H_1$  – напряженность магнитного поля на нижней границе частицы;

$\Delta^2$  – размер большой оси эллипсоида, направленной вдоль магнитного поля.

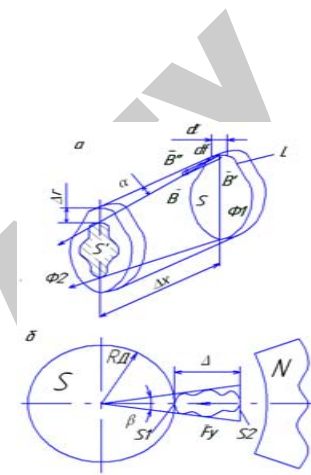


Рис. 4.1. Схема расчета сил, действующих на частицу ферромагнитного порошка нормально к поверхности детали: а – для элементарного участка; б – и на частицу в целом

Подставив (4.9) и (4.10) в выражение (4.8) и учитывая, что  $\Phi = B_1 S_1 = \mu H_1 R_d b \beta$ , для единичной частицы получим:

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

где  $\mu$  – магнитная проницаемость материала порошка.

Так как образовавшаяся вдоль магнитных силовых линий поля цепочка состоит из нескольких частиц, то на граничащую с обрабатываемой поверхностью частицу будет действовать суммарная сила со стороны всех более удаленных от оси детали частиц:

$$f_{ц} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\mu \Delta_i^2 b_i K H_i^2}{R_i + \Delta_i}, \quad (4.11)$$

где  $n$  – число частиц в цепочке;

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

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

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

Таким образом, ферроабразивные частицы под действием силы  $f_{ц}$  прижимаются к обрабатываемой поверхности, создавая нормальную составляющую усилия резания.

При относительном перемещении ферроабразивных частиц и обрабатываемой поверхности возникает тангенциальная или главная составляющая усилия резания:

$$f_r = f_{N_{нц}} k_{mp}, \quad (4.12)$$

где  $k_{mp}$  – коэффициент трения.

Процесс магнитно-абразивной обработки представляет собой ориентированное и избирательное абразивное микрорезание и микровыглаживание. Частицы ферроабразивного порошка контактируют преимущественно с вершинами гребешков, являющихся концентраторами магнитных силовых линий. Каждая частица, находясь в магнитном поле, располагается наибольшей осью по направлению к обрабатываемой поверхности. По мере износа режущей кромки ферроабразивной частицы путем выкрашивания абразивной составляющей изменяется геометрическая форма частицы, смещается центр ее тяжести и увеличивается коэффициент трения из-за того, что в контакт с обрабатываемой поверхностью вступает «ферромагнитная матрица» частицы. Это, в свою очередь, приводит к увеличению силы  $f_m$ , что вызывает смещение свободно ориентированных частиц и переориентацию их наибольшей оси в направлении магнитных силовых линий, то есть происходит явление самоорганизации «абразивной щетки» из массы ферроабразивных частиц, вынужденных совершать периодическое верчение в рабочей зоне зазора и располагаться к обрабатываемой поверхности наиболее острой режущей кромкой.

В результате явлений самоорганизации массы частиц свободно незакрепленного абразива обработка поверхности детали производится постоянно обновляющимися острыми кромками, т.е. на протяжении всего цикла обработки имеет место процесс ориентированного абразивного резания.

#### 4.8. Моделирование и оптимизация параметров магнитно-абразивной обработки с учетом самоорганизации процесса

Из теории резания известно, что при абразивной обработке поверхностей жестко закрепленными абразивными частицами только 8...10 % частиц участвуют в процессе резания, 10...12 % царапают и пропахивают обрабатываемый материал, а остальные 78...82 % упругопластически деформируют поверхность. Поэтому оправданно стремление обеспечить восстановление режущих свойств абразивных инструментов выкрашиванием и выпадением из связки абразивных частиц, что позволит давящим и царапающим частицам постепенно подключаться к процессу стружкообразования. Использование явлений самозатачивания абразивных инструментов позволяет резко сократить число их правок.

В процессах абразивной обработки в зоне резания возникает температура, значительно превышающая наблюдаемую при резании лезвийными инструментами, когда основной поток тепла уносится со стружкой. В зависимости от режимов абразивной обработки поверхностный слой заготовки поглощает от 50 до 80 % общего количества выделяемого тепла. Поскольку температура повышается в области контакта абразивной частицы с обрабатываемым материалом, то необходимо либо отводить тепло из зоны резания, либо снижать температурные градиенты в точках их возникновения, используя смазочно-охлаждающие технологические средства.

Изучение самоорганизующихся поверхностных явлений происходило в ситуации, когда аналитическая модель не разработана, а известны только критерии самоорганизации, и необходимо использовать подходящие ортогональные ротатабельные планы для многофакторного анализа процессов и явлений.

Магнитно-абразивная обработка поверхности образцов диаметром 40 мм из стали 45 проводилась на станке модели СФТ 2.150.00.00.000. Перед магнитно-абразивной обработкой образцы шлифовались до  $Ra$  0,63...1,25 мкм. Обработка производилась ферроабразивным порошком Ж15КТ зернистостью 100/160. В качестве СОТС применялся 5 % -ный раствор эмульсола Э2 в воде.

Физико-механические параметры поверхностного слоя оценивались знаком и величиной напряжений I ( $\sigma_I$ ) и II ( $\sigma_{II}$ ) рода; дис-

Условия экспериментов по матрице ЦКРУП второго порядка для k = 5

| Уровни факторов<br>$X_i$ | Значения факторов |            |       |       |               |
|--------------------------|-------------------|------------|-------|-------|---------------|
|                          | V, м/с            | $\tau$ , с | A, мм | B, Тл | $\delta$ , мм |
|                          | $X_1$             | $X_2$      | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$         |
| $-\alpha_0$              | 1,5               | 30         | 0,5   | 0,7   | 0,4           |
| -1                       | 2,0               | 45         | 1,0   | 0,8   | 0,8           |
| 0                        | 2,5               | 60         | 1,5   | 0,9   | 1,2           |
| +1                       | 3,0               | 75         | 2,0   | 1,0   | 1,6           |
| $+\alpha_0$              | 3,5               | 90         | 2,5   | 1,1   | 2,0           |

Результаты экспериментов. Модель, определяющая характер зависимости производительности ( $Q$ , г/дм<sup>2</sup>) и шероховатости ( $Ra$ , мкм) поверхности от технологических факторов, получена при статистической обработке результатов опытов:

$$Q = Y_1 = 0,745 + 0,052X_1 + 0,130X_2 - 0,001X_3 + 0,125X_4 - 0,101X_5 - 0,002X_1X_2 + 0,008X_1X_3 + 0,014X_1X_4 + 0,038X_1X_5 + 0,016X_2X_3 + 0,005X_2X_4 - 0,013X_2X_5 + 0,001X_3X_4 + 0,030X_3X_5 + 0,046X_4X_5 - 0,026X_1^2 - 0,060X_2^2 - 0,012X_3^2 - 0,002X_4^2 + 0,008X_5^2. \quad (4.13)$$

$$Ra = Y_2 = 0,080 - 0,011X_1 - 0,031X_2 + 0,006X_3 - 0,006X_4 + 0,022X_5 - 0,001X_1X_2 - 0,003X_1X_3 + 0,006X_1X_4 - 0,004X_1X_5 - 0,007X_2X_3 - 0,017X_2X_4 - 0,005X_2X_5 + 0,002X_3X_5 + 0,009X_4X_5 + 0,005X_1^2 + 0,020X_2^2 + 0,003X_3^2 + 0,001X_4^2 + 0,009X_5^2. \quad (4.14)$$

Выявлено, что коэффициенты регрессий, кроме отмеченных (\*), значимы с 90 % -ной доверительной вероятностью, параметр  $Q$  адекватен при 5 %, а  $Ra$  - при 10 % -ном уровне значимости.

Графические отображения моделей (4.13) и (4.14) представлены на рис. 4.2 и 4.3 одномерными сечениями функций отклика  $Y_1$  и  $Y_2$ . Анализ полученной модели позволил выявить степень влияния технологических факторов на параметры оптимизации (табл. 4.2).

перностью блоков когерентного рассеяния ( $D$ ). Напряжения  $\sigma_1$  определялись по методике Н.Н. Давиденкова, основанной на измерении деформации детали по мере удаления напряженных слоев металла и вычислении величин напряжений, которые понадобились бы для устранения этих деформаций. Удаление слоев металла производилось электрохимическим методом со скоростью 0,05 мкм/с. При вычислении величин напряжений учитывались уточнения, внесенные в методику М.А. Бабичевым и Л.А. Гликманом. Остаточные напряжения исследовались на глубине 5 мкм. Величины микронапряжений и блоков мозаики определялись методами рентгеноструктурного анализа по известным методикам, основанным на аппроксимации линий эталонного и исследуемого образца. В качестве эталонов использовались исходный образец и армко-железо. Рентгеноструктурные исследования осуществлялись на дифрактометре ДРОН-3.0 путем регистрации рентгеновских интерференционных максимумов ионизационным методом. Съемка велась в монохроматизированных  $CuK_\alpha$  и  $CoK_\alpha$  излучениях. Напряжения оценивались по задней линии  $\alpha$  - фазы, аппроксимируя ее по функции  $y = (1 + 8x^2)^{-2}$ , а блочность структуры - по передней линии с аппроксимацией по функции  $y = (1 + 6x^2)^{-1}$ .

Производительность обработки  $Q$ , равная уменьшению массы образца, приходящейся на единицу площади в течение периода времени  $\tau$ , измерялась на аналитических весах АДВ-200М. Постоянными факторами в экспериментах при магнитно-абразивной обработке были приняты скорость осцилляции образца  $V_0 = 0,2$  м/с, расходы порошка  $q_{п} = 0,3$  г/(с·мм<sup>2</sup>) и СОТС  $q_{ж} = 0,04$  дм<sup>3</sup>/с.

Статистическую модель магнитно-абразивной обработки получали центральным композиционным ротатабельным равномерным планированием (ЦКРУП) экспериментов при  $k = 5$ . Параметрами оптимизации были приняты:  $Y_1 - Q$ ;  $Y_2 - Ra$ , а независимыми переменными - факторы  $X_1 - V$ ,  $X_2 - \tau$ ,  $X_3 - A$  (амплитуда осцилляции),  $X_4 - B$  и  $X_5 - \delta$ , выбранные по критериям  $Re^*$ ,  $Pe^*$  и  $Pr^*$ . Затем для наиболее значимых технологических факторов рассматривались физико-механические параметры поверхностного слоя. Условия экспериментов приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.2

Влияние технологических факторов на параметры производительности и качества магнитно-абразивной обработки

| Факторы  |       | Степень влияния факторов на параметры, % |       |
|----------|-------|--|-------|
|          |       | Q  | Ra    |
| $X_i$    |       | $Y_1$                                    | $Y_2$ |
| V        | $X_1$ | 12,71                                    | 14,47 |
| $\tau$   | $X_2$ | 31,79                                    | 40,79 |
| A        | $X_3$ | 0,25                                     | 7,89  |
| B        | $X_4$ | 30,56                                    | 7,90  |
| $\delta$ | $X_5$ | 24,69                                    | 28,95 |

Из анализа данных (рис. 4.2, 4.3 и табл. 4.2) видно, что по степени влияния как на отдельные параметры, так и на их совокупность в порядке убывания значимости технологические факторы магнитно-абразивной обработки можно расположить в ряды:

$$\begin{aligned}
 Q: & \quad \tau = B \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow A; \\
 Ra: & \quad \tau \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow B = A; \\
 & \quad \tau \rightarrow \delta \rightarrow B \rightarrow V \rightarrow A
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

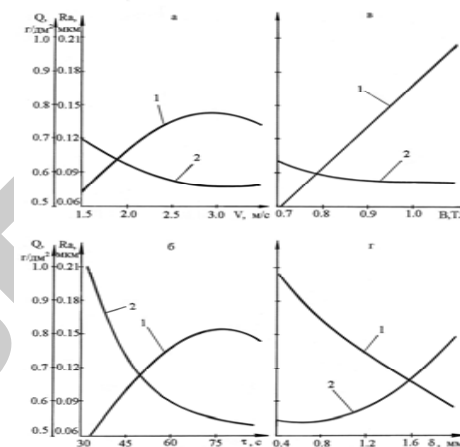


Рис. 4.2. Зависимости от скорости главного движения  $V$  (а), длительности полирования  $\tau$  (б), магнитной индукции  $B$  (в), рабочего зазора  $\delta$  (г) показателей производительности (Q) и шероховатости поверхности ( $R_a$ ) после магнитно-абразивной обработки: 1 – Q; 2 –  $R_a$

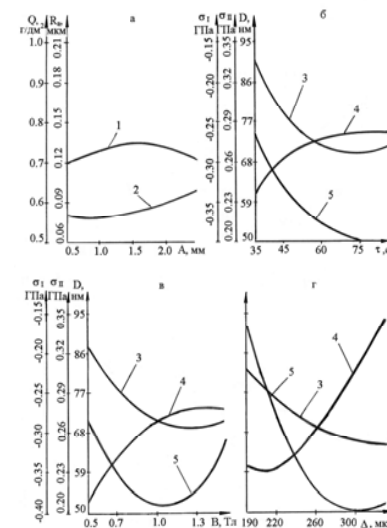


Рис. 4.3. Зависимости от амплитуды осцилляции  $A$  (а), длительности обработки  $\tau$  (б), магнитной индукции  $B$  (в), размера зерен  $\Delta$  (г) показателей производительности и качества магнитно-абразивной обработки: 1 – Q; 2 –  $R_a$ ; 3 –  $\sigma_I$ ; 4 –  $\sigma_{II}$ ; 5 –  $D$

Ряды (4.15) показывают, что влияние технологических факторов на производительность (Q) аналогично влиянию на шероховатость (Ra), за исключением магнитной индукции (B), которая снижает свое влияние на качество обработки. Это объясняется тем, что с ростом B увеличивается устойчивость цепочек ферропорошка, возрастают силы резания и сьем металла.

Наиболее значимыми технологическими факторами, влияющими на производительность и геометрические параметры качества магнитно-абразивной обработки, согласно (4.15), являются  $\tau$ , B и  $\delta$ . Так как из комплексного показателя  $\delta/\Delta$  параметры качества больше определяет размер частицы  $\Delta$ , чем величина рабочего зазора  $\delta$ , то для построения статистической модели физико-механических характеристик поверхности изделия в качестве технологического фактора выбирали  $\Delta$ . Постоянными принимали средние значения  $V = 2,5$  м/с и  $A = 1,5$  мм.

Для получения модели использовали ЦКРУП для  $k = 3$ . В качестве исследуемых параметров были приняты:  $Y_1 - \sigma_I$ ;  $Y_2 - \sigma_{II}$ ,  $Y_3 - D$ , а независимыми переменными  $X_1 - \tau$ ,  $X_2 - B$ ,  $X_3 - \Delta$ . Условия экспериментов приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Условия экспериментов по матрице ЦКРУП второго порядка для  $k = 3$

| Уровни факторов $X_i$ | Значения факторов |       |                |
|-----------------------|-------------------|-------|----------------|
|                       | $\tau, c$         | B, Тл | $\Delta$ , мкм |
|                       | $X_1$             | $X_2$ | $X_3$          |
| $-\alpha_0$           | 35                | 0,5   | 190            |
| -1                    | 45                | 0,7   | 220            |
| 0                     | 60                | 1,0   | 260            |
| +1                    | 75                | 1,3   | 300            |
| $+\alpha_0$           | 85                | 1,5   | 330            |

Модель, характеризующая величины напряжений I и II рода  $\sigma_I$  и  $\sigma_{II}$ , а также дисперсии блоков когерентного рассеяния  $D$ , определена при статистической обработке экспериментальных данных:

$$\sigma_I = Y_1 = -0,282 - 0,029X_1 - 0,023X_2 - 0,028X_3 + 0,003 * X_1X_2 + 0,002 * X_1X_3 + 0,007X_2X_3 + 0,024X_1^2 + 0,018X_2^2 + 0,004X_3^2; \quad (4.16)$$

$$\sigma_{II} = Y_2 = 0,273 + 0,013X_1 + 0,021X_2 + 0,032X_3 - 0,003X_1X_2 - 0,002 * X_1X_3 - 0,003X_2X_3 - 0,007X_1^2 - 0,009X_2^2 + 0,007X_3^2; \quad (4.17)$$

$$D = Y_3 = 52,16 - 7,25X_1 - 1,01X_2 - 12,25X_3 - 0,25 * X_1X_2 + 5,01X_1X_3 + 5,01X_2X_3 + 3,38X_1^2 + 6,50X_2^2 + 7,13X_3^2. \quad (4.18)$$

Коэффициенты полученных регрессий, кроме отмеченных (\*), значимы с 90 %-ной доверительной вероятностью, а параметры  $\sigma_I$ ,  $\sigma_{II}$  и  $D$  модели адекватны при 10 %-ном уровне значимости.

Графические отображения модели (4.16)...(4.18) представлены (рис. 4.3, б-г) одномерными сечениями функций отклика  $Y_1$ ,  $Y_2$  и  $Y_3$ . Степень влияния факторов на физико-механические параметры качества поверхности выявлена статистическим анализом полученной модели (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Влияние технологических факторов на физико-механические свойства поверхности после магнитно-абразивной обработки

| Факторы $X_i$  | Степень влияния факторов на параметры, % |               |       |
|----------------|--|---------------|-------|
|                | $\sigma_I$                               | $\sigma_{II}$ | D     |
|                | $Y_1$                                    | $Y_2$         | $Y_3$ |
| $\tau$ $X_1$   | 36,25                                    | 19,70         | 35,35 |
| B $X_2$        | 28,75                                    | 31,82         | 4,92  |
| $\Delta$ $X_3$ | 35,00                                    | 48,48         | 59,73 |

Анализ данных (рис. 4.3, б-г и табл. 4.4) показывает, что по степени влияния на отдельные параметры и их совокупность в порядке убывания значимости основные технологические факторы можно расставить в ряды:

$$\begin{aligned}
 \sigma_1: \tau \rightarrow \Delta \rightarrow B; \\
 \sigma_{II}: \Delta \rightarrow B \rightarrow \tau, \\
 D: \Delta \rightarrow \tau \rightarrow B; \\
 \Delta \rightarrow \tau \rightarrow B
 \end{aligned}
 \quad (4.19)$$

Порядок значимости основных технологических факторов (4.19) показывает, что на характеристики тонкой кристаллической структуры ( $\sigma_{II}$  и  $D$ ), в значительной мере обеспечивающие прочность покрытия, наибольшее влияние оказывает зернистость порошка ( $\Delta$ ), характеризующая контактные процессы магнитно-абразивной обработки. Макронапряжения первого рода ( $\sigma_1$ ), обеспечивающие предел выносливости и зависящие от соотношения силовых и температурных воздействий, определяются, в первую очередь, длительностью процесса ( $\tau$ ) и имеют тот же порядок значимости факторов, что и геометрические характеристики ( $Ra$ ) и производительность обработки ( $Q$ ).

Оптимизация параметров технологического процесса магнитно-абразивной обработки проводилась для геометрических параметров качества и производительности процесса, так как на заключительной операции требовалось, прежде всего, обеспечить эти показатели. Физико-механические параметры оценивались отдельно, а оптимальные режимы для производительности и геометрических показателей сравнивались и уточнялись по режимам, рациональным для формирования физико-механических характеристик обрабатываемой поверхности.

Время  $\tau$  оказывает наибольшее влияние на результат магнитно-абразивной обработки (рис. 4.2, б). Такое влияние связано с изменением числа контактирующих зерен, зависящего от количества, поданного в рабочий зазор порошка. С увеличением времени обработки остаточные напряжения сжатия возрастают, увеличиваются искажения кристаллической решетки и измельчаются блоки когерентного рассеяния (рис. 4.3, б). При  $\tau = 60$  с они достигают оптимальных значений. Дальнейшее увеличение длительности обработки повышает температуру обрабатываемой поверхности за счет сил трения, возникающих в рабочем зазоре и поэтому целесообразной является длительность обработки  $60 \text{ с} < \tau < 70 \text{ с}$ .

Магнитная индукция ( $B$ ), являясь силовой характеристикой поля, определяет электромагнитные явления в рабочей зоне и силы

абразивного резания. С повышением  $B$  увеличивается устойчивость цепочек порошка в зазоре и возрастают силы резания, поэтому интенсифицируется сьем материала покрытия, а шероховатость поверхности снижается не существенно (рис. 4.2, в). Обусловлено это тем, что зерна, прижимаемые к обрабатываемой поверхности, имеют возможность проскальзывать и вращаться под действием моментов резания и сил трения. Поэтому предпочтительной является  $B > 0,9$  Тл, а при ее значении 1,1 Тл увеличиваются макронапряжения до максимальных значений (рис. 4.3, в). Последствие того, что из цепочек зерен создается более жесткая и менее проницаемая для СОТС масса, резко повышается давление на обрабатываемую поверхность и происходит переход от преобладающего микрорезания к выглаживанию. Это приводит к увеличению сил трения, росту теплоты, выделяющейся в рабочей зоне, развитию в поверхностном слое растягивающих напряжений. Аналогично макронапряжениям растут микронапряжения и измельчается блочная структура (рис. 4.3, в), так как при наличии в исходном материале разнообразных дефектов кристаллической решетки требуется приложение относительно небольших усилий, чтобы в этих микрообъемах металла была достигнута величина критического сдвигающего напряжения. Следовательно, для формирования геометрических и физико-механических параметров качества наиболее благоприятной является магнитная индукция  $0,9 \text{ Тл} < B < 1,1 \text{ Тл}$ .

Величина рабочего зазора ( $\delta$ ) определяет длину цепочки, а зернистость порошка ( $\Delta$ ) – количество ферромагнитных зерен в ней, влияя тем самым на плотность порошковой массы. При увеличении  $\Delta$  и уменьшении  $\delta$  возрастает жесткость цепочек и увеличивается сила резания. Рост рабочего зазора приводит к увеличению расхода порошка и снижению производительности процесса (рис. 4.2, г). Экспериментально установлено, что наиболее эффективен рабочий зазор  $0,6 \text{ мм} < \delta < 1,0 \text{ мм}$ . С повышением зернистости  $\Delta$  порошка сжимающие напряжения возрастают, увеличиваются микронапряжения и уменьшается дисперсность блоков мозаики (рис. 4.3, г). Так как при росте зернистости увеличиваются радиусы закругления вершин зерен и уменьшается глубина их внедрения в поверхность металла, на смену микрорезанию приходит процесс частичного выглаживания поверхности. Установлено, что минимальный зазор



Таблица 4.6

Физико-механические параметры качества и обеспечивающие их факторы процесса магнитно-абразивной обработки

| Параметры           |       | Значения параметров | Значения факторов |       |                |
|---------------------|-------|---------------------|-------------------|-------|----------------|
| $Y_i$               |       |                     | $\tau$ , с        | В, Тл | $\Delta$ , мкм |
| $\sigma_I$ , ГПа    | $Y_1$ | -0,30               | 56                | 0,9   | 300            |
| $\sigma_{II}$ , ГПа | $Y_2$ | 0,35                | 62                | 1,2   | 330            |
| D, нм               | $Y_3$ | 45,0                | 60                | 1,2   | 300            |

#### 4.9. Управление процессами обработки в электромагнитном поле с использованием явлений их самоорганизации

Магнитно-абразивная обработка основана на использовании концентрированных потоков энергии магнитного поля и сопряжена с локальным нагревом обрабатываемых поверхностей, что создает в поверхностном слое детали очаги неоднородности структурного и деформированного состояния и вызывает протекание диссипативных процессов. Неоднородность структурного и деформированного состояния на макроуровне предопределяет особенности структурного строения материалов на микроуровне и, как следствие, их свойства [113]. Теоретические основы позволяют создавать методологию управления эксплуатационными характеристиками деталей. Они включают в себя совокупность взаимосвязанных аналитических моделей и критериев оптимизации технологических воздействий, построенных на основе методов аналитической механики, термодинамики различных тел и сред с применением теории упругости и пластичности.

Энергетическое воздействие на поверхностный слой осуществляет переход его из одного состояния в другое, соответствующее новому качеству [114]. Управляя преобразованием подводимой энергии в рабочую  $\mathcal{E}_{раб}$  с помощью технологического оборудования, мы адекватно воздействуем на формирование параметров производительности и качества обрабатываемых поверхностей.

должен превышать удвоенный размер зерна, т.е. наиболее целесообразна зернистость порошка 260/320.

Скорость главного движения ( $V$ ) определяет путь, пройденный зерном за единицу времени, и оказывает влияние на кинематику и динамику процесса, а осцилляции предназначена роль придания зернам порошка осевых перемещений. В результате совокупности таких движений зерна порошка активно используют свою поверхность, что приводит к снижению шероховатости ( $Ra$ ) и повышению производительности ( $Q$ ) обработки (рис. 4.2, а и 4.3, а). Наиболее целесообразны для такого процесса скорости  $2,5 \text{ м/с} < V < 3,0 \text{ м/с}$  и амплитуды  $1 \text{ мм} < A < 2 \text{ мм}$ .

Оптимизация режимов магнитно-абразивной обработки проводилась по шкале (табл. 4.5) обобщенной функции желательности.

Полученные результаты показывают, что при максимальном значении функции желательности  $D_0 = 0,98$ , производительность и качество обработки обеспечивают параметры  $Q = 1,1 \text{ г/дм}^2$  и  $Ra = 0,1 \text{ мкм}$  на технологических режимах  $V = 3 \text{ м/с}$ ;  $\tau = 65 \text{ с}$ ;  $A = 1,5 \text{ мм}$ ;  $B = 1,1 \text{ Тл}$ ;  $\delta = 0,8 \text{ мм}$ .

Оптимальные значения физико-механических характеристик (табл. 4.6) позволяют рекомендовать полученные режимы для обеспечения не только геометрических, но и физико-механических параметров при максимальной производительности процесса.

Значения параметров качества образцов, обработанных на рекомендуемых режимах, отличаются от расчетных не более чем на 8 %.

Таблица 4.5

Шкала желательности значений параметров производительности и шероховатости поверхности процесса магнитно-абразивной обработки

| Параметры |       | Желательность значений параметров |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $Y_i$     |       | $A_i$                             | $B_i$ | $C_i$ | $D_i$ | $E_i$ | $F_i$ |
| Q         | $Y_1$ | 0,10                              | 0,50  | 0,60  | 0,75  | 0,85  | 1,10  |
| Ra        | $Y_2$ | 0,16                              | 0,13  | 0,12  | 0,11  | 0,10  | 0,08  |

Управление процессом магнитно-абразивной обработки ставит целью обеспечить стабильность геометрических и физико-механических параметров качества обрабатываемой поверхности за счет устойчивости параметров формирования поверхностного слоя и предполагает автоматизацию технологии, оборудования и средств оснащения.

Изучение устойчивости процесса магнитно-абразивной обработки проводилось по критериям  $Re^*$ ,  $Pe^*$  и  $Pr^*$ . Рассматривался рельеф  $R^*$  формируемой поверхности с шероховатостью  $Ra$  в зависимости от комплекса параметров:

$$V_s t_p \left( \frac{S}{V} \right) \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_f} \right).$$

Результирующая скорость движений ( $V_s$ ) складывалась из скоростей главного движения ( $V$ ), подачи ( $S$ ) и осцилляции с амплитудой ( $A$ ). Толщина изучаемого слоя ( $t_p$ ) определялась величиной ( $\delta$ ) рабочего зазора или относительной величиной  $\delta/\Delta$ , учитывалось и упрочнение  $Q/(1-\Delta H^*/H^*)$ . Показатель упрочнения  $H^*$  может описываться твердостью  $HRC$ , микронапряжениями  $\sigma_{II}$  или другими характеристиками. Соотношение параметров напряжений  $\sigma_m/\sigma_f$  определялось магнитодинамическими  $B/\tau$  воздействиями и кинематическими характеристиками  $V/S$ .

Устойчивость процессов магнитно-абразивной обработки рассмотрим через устойчивость технологической системы при магнитно-абразивной обработке.

Исследуем процесс магнитно-абразивной обработки в зависимости от основных технологических факторов:  $V$ ,  $\tau$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $\delta$ , представляя амплитуду осцилляции ( $A$ ) движением продольной подачи ( $S$ ), так как эти факторы входят в критерии самоорганизации и влияют на производительность обработки и параметры качества поверхности.

Полученные экспериментальные результаты (рис. 4.2, а...г и 4.3, а) показывают, что скорость ( $V$ ) и время ( $\tau$ ) обработки влияют на производительность ( $Q$ ) и шероховатость поверхности ( $Ra$ ) аналогично подаче ( $S$ ) и индукции ( $B$ ). При этом как  $Q$ , так и  $Ra$  характеризуются, главным образом, временем обработки ( $\tau$ ), которое вместе с магнитной индукцией ( $B$ ) определяет количество абразивных

зерен, участвующих в формировании поверхности. Следовательно, соотношение, описывающее вязкость технологической среды магнитодинамическими и кинематическими характеристиками  $(B/\tau)(V/S)$ , стремится к постоянству и повышает устойчивость магнитно-абразивной обработки. В результате, образующиеся цепочки абразивных частиц длиной  $\delta$  обеспечивают наилучшую шероховатость поверхности, которая определяется параметрами:

$$R^* \sim \frac{Q}{(B/\tau)(V/S)}. \quad (4.20)$$

Анализ результатов экспериментов (рис. 4.2, а...г и 4.3, а) и проведенной расстановки по степени влияния технологических факторов:  $V$ ,  $\tau$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $\delta$  на оптимизируемые параметры позволяют представить для анализа обобщенную схему процесса формирования поверхности при магнитно-абразивной обработке в виде (амплитуда  $A$  осцилляции уподобляется подаче  $S$ ):

$$\begin{aligned} Q: \tau &\rightarrow B \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow S; \\ R^*: \tau &\rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow S \rightarrow B. \end{aligned} \quad (4.21)$$

Неустойчивости типа опережающих трещин или наростов при формировании рельефа поверхности ( $R^*$ ) устраняются в процессе магнитно-абразивной обработки путем управления производительностью обработки [114]. Самоорганизация процессов микрорезания и трения в магнитном поле обеспечивает максимальную производительность, при которой шероховатость поверхности минимальна.

Так, при образовании  $R^*$  (4.20) влияние магнитной индукции  $B$  мало по сравнению с другими факторами. Производительность обработки ( $Q$ ) (4.21) определяется как  $B$ , так и  $\tau$  путем длительной фиксации незакрепленных зерен порошка. Фиксация осуществляет обратную связь  $R^*$  с  $Q$  и посредством регулирования  $B$  в течение всего периода  $\tau$  повышает устойчивость формирования поверхности при магнитно-абразивной обработке.

Исследуем упрочнение поверхностного слоя при магнитно-абразивной обработке в зависимости от основных технологических факторов:  $\tau$ ,  $B$ ,  $\Delta$  и с учетом факторов, обеспечивающих рацио-

нальный рельеф поверхности -  $V, S$ , заменив  $\Delta$  на  $\delta$ . Такой выбор обосновывается тем, что факторы эти входят в критерии самоорганизации, и основные из них определяют физико-механические параметры качества: макро- и микронапряжения  $\sigma_I$  и  $\sigma_{II}$ , дисперсность блоков мозаики  $D$ .

Результаты экспериментов (рис. 4.2, б...г) показывают, что магнитная индукция ( $B$ ) и длительность полирования ( $\tau$ ) аналогично влияют на напряжения  $\sigma_I$  и  $\sigma_{II}$ . Следовательно, с учетом кинематических факторов  $V$  и  $S$  соотношение, описывающее вязкость порошковой среды  $(B/\tau)(V/S)$ , стремится к постоянной величине и повышает устойчивость процесса упрочнения при формировании поверхности. Производительность возрастает не только в результате увеличения съема материала, но и благодаря упрочнению поверхности, с учетом которого  $Q/(1-\Delta\sigma_{II}/\sigma_{II})$ . Следовательно, рельеф формирующейся поверхности можно представить параметрами:

$$R^* \sim \frac{Q/(1-\Delta H^*/H^*)}{(B/\tau)(V/S)} \quad (4.22)$$

Исследования экспериментальных данных (рис. 4.3, б...г) и проведенной расстановки по степени влияния основных факторов  $\tau, B, \Delta$  на физико-механические параметры качества обработки позволяют анализировать обобщенную схему процесса упрочнения поверхности при магнитно-абразивной обработке.

$$\begin{aligned} Q: \tau &\rightarrow B \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow S; \\ R^*: \tau &\rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow S \rightarrow B; \\ H^*: \delta &\rightarrow \tau \rightarrow B \rightarrow V \rightarrow S. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Формирующиеся при магнитно-абразивной обработке термодинамические неустойчивости, изменяющие структуру поверхностного слоя и снижающие его прочность ( $H^*$ ), можно устранить посредством регулирования производительности обработки ( $Q$ ) [114]. Самоорганизация процессов микрорезания и трения в электромагнитном поле обеспечивает увеличение производительности ( $Q$ ) и упрочнения ( $H^*$ ) поверхностного слоя.

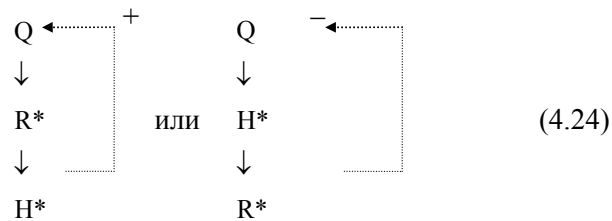
Так, при формировании рельефа  $R^*$  (4.23) влияние магнитной индукции  $B$  мало по сравнению с кинематическими факторами  $V, S$ , вследствие образования деформационных диссипативных структур в поверхностном слое, о чем свидетельствует его упрочнение  $H^*$ . Производительность процесса  $Q$  (4.23) описывается главным образом  $\tau, B$ , а также  $V, S$ , обеспечивающими движения ферроабразивных частиц порошка и самой заготовки, которые осуществляют обратную связь  $H^*$  с  $R^*$  через  $Q$  (4.23). Это позволяет посредством регулирования  $B, V, S$  в течение периода  $\tau$  повышать устойчивость процесса упрочнения при магнитно-абразивной обработке.

Таким образом, как дополнительная подвижность инструментов и частиц технологической среды, так и магнитные воздействия позволяют управлять кооперативными термомеханическими процессами формирования свойств поверхности.

При удалении поверхностного слоя с использованием магнитно-абразивной обработки образование термодинамически неустойчивых структур определяется параметрами магнитного поля в рабочей зоне. Напряженное состояние  $\sigma_f$  и  $\sigma_m$  порошковой среды зависит главным образом от магнитной индукции  $B$ . Это является одним из путей повышения устойчивости технологической системы в процессах, использующих энергию электромагнитного поля, и стабилизации параметров качества поверхностей.

При формировании поверхности свободным абразивом с увеличением  $f_{ii}$  увеличивается твердость обрабатываемой поверхности, вследствие этого возрастают скорости дополнительных перемещений абразивных частиц. Нагрев обеспечивает повышение степени деформации, но снижает скорости дополнительных перемещений, что приводит к увеличению отклонений микрорельефа поверхности ( $Ra$ ). Совместные согласованные воздействия на материал нагрева и дополнительных перемещений повышают через обратную связь устойчивость технологической системы. В результате формируется поверхностный слой максимальной твердости и минимальной шероховатости при скоростях дополнительных перемещений, обеспечивающих оптимальную производительность процессам MAO.

В результате проведенных исследований установлены обратные связи в технологической системе: положительная при формировании поверхности или отрицательная при упрочнении поверхностного слоя:



При использовании положительной обратной связи (4.24) дополнительные перемещения частиц ферроабразивного порошка или инструмента, подавляя рассеяние потоков энергии, создают упрочняющие структуры в поверхностном слое и повышают производительность обработки.

При использовании отрицательной обратной связи (4.24) дополнительные воздействия потоками энергии, формируя упрочняющие структуры, не допускают развития неустойчивостей процесса образования рельефа поверхности и повышают качество обработки при снижении ее производительности.

Анализ процессов магнитно-абразивной обработки по предложенным критериям позволил определить пути управления технологической системой, обеспечивающие повышение производительности и качества формирования поверхности.

Формирование поверхностного слоя при МАО, во-первых, описывается ориентацией ферроабразивных частиц порошка в рабочей зоне и образованием из них электродов-цепочек, во-вторых, характеризуется перемещением электродов-цепочек относительно поверхности детали.

Организация обратной связи в технологической системе через дополнительные перемещения частиц порошка и формообразующих инструментов, а также посредством регулирования степени воздействия потоками энергии на обрабатываемую поверхность позволяет управлять устойчивостью процессов магнитно-абразивной обработки.

Управлять устойчивостью нестационарных технологических процессов обработки, каким является магнитно-абразивная обработка, можно путем реализации схемы управления, основанной на поддержании заданного уровня устойчивости протекающих диссипативных процессов и на использовании явлений их самоорганизации [114].

Управлять процессами упрочнения поверхностных слоев при магнитно-абразивной обработке позволяют тепловое воздействие и дополнительные степени свободы ферроабразивных частиц порошка путем изменения потоков магнитной энергии, когда съем металла осуществляется незакрепленными частицами абразивного порошка.

Вследствие трения частиц ферроабразивного порошка с обрабатываемой поверхностью «абразивная щетка» несколько смещается в направлении движения поверхности детали и пересекает магнитные силовые линии, в результате чего возникает электродвижущая сила (ЭДС). Возникающие микротоки интенсифицируют съем металла и улучшают физико-механические свойства обработанной поверхности. Таким образом, методология управления процессами магнитно-абразивной обработки основана на стабилизации заданных значений магнитной индукции, температуры в рабочей зоне и связанных с ними коэффициентов распределения энергии  $k_n$  и трения скольжения  $k_t$  путем организации обратных связей для управления производительностью и качеством обработки.

Метод управления устойчивостью нестационарных технологических систем, базирующийся на поддержании диапазона режимов обработки, обеспечивающих диссипацию потоков энергии в процессах самоорганизации поверхностных явлений, является одним из эффективных путей стабилизации параметров качества обрабатываемой поверхности (рис. 4.4).

Следовательно, в соответствии с последовательностью протекающих в рабочей зоне при магнитно-абразивной обработке процессов движения и обмена материальными потоками, согласно критериям Пекле - Рейнольдса - Прандтля, термодинамические неустойчивости, возникающие при микрорезании и микровыглаживании поверхности, снижаются посредством управления величиной магнитной индукции ( $B$ ), определяющей величину микротоков, температуру в зоне обработки и напряжения в поверхностном слое.

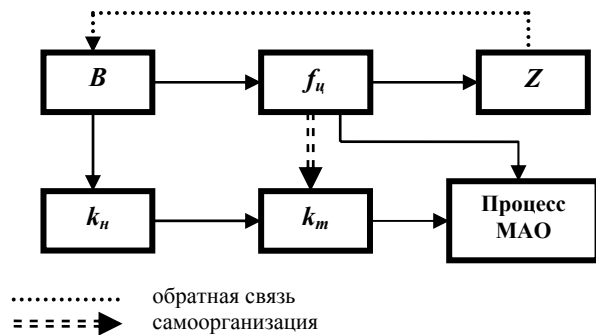


Рис. 4.4. Функциональная схема управления устойчивостью процессов MAO:  
 $f_u$  – усилие прижима ферроабразивного порошка к поверхности заготовки;  
 $k_n$  – коэффициент распределения энергии;  $k_m$  – коэффициент трения скольжения;  
 $Z$  – высота микронеровности;  $B$  – магнитная индукция

## 5. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ MAO

На формирование шероховатости поверхностей и физико-механических свойств деталей машин большое влияние оказывают процессы финишной обработки. К числу таких процессов относится магнитно-абразивная обработка, основанная на использовании энергии электромагнитного поля в рабочем зазоре между поверхностью полюсного наконечника электромагнита и обрабатываемой поверхностью. Предшествующие исследования процесса MAO касались, в основном, обработки непрерывных гладких цилиндрических и плоских поверхностей, поэтому результаты данных исследований отражают специфику явлений при MAO прерывистых поверхностей.

### 5.1. Синергетизм свойств металлических поверхностей в процессе их изготовления

Теоретические основы MAO не могут не учитывать парадигмы явлений самоорганизации нестационарных процессов. Неоднородность структурного и деформированного состояния на макроуровне предопределяет особенности структурного строения материалов на микроуровне и, как следствие, их свойства. Теоретические основы позволяют создавать методологию управления качественными характеристиками деталей. Они включают в себя совокупность взаимосвязанных аналитических моделей и критериев оптимизации технологических воздействий, построенных на основе методов аналитической механики, термодинамики различных тел и сред с применением теории упругости и пластичности при выполнении условий кооперативности и согласованности процессов, что и характеризуется как синергетизм.

### 5.1.1. Использование рабочей технологической среды на основе кремнистого сплава и СОТС на основе глицерина для MAO алюминиевых сплавов

Известно, что механическая обработка алюминиевых сплавов имеет ряд определенных трудностей, связанных с понижением в сравнении, например, со сталью, значениями физико-механических характеристик. Однако необходимость получения требуемых качественных и эксплуатационных показателей деталей машин из этих сплавов приводит к созданию новых высокоэффективных методов и интенсификации существующих. Одним из таких методов является магнитно-абразивная обработка [115], особенностью которой служит наличие электромагнитного поля в зоне обработки, выполняющее роль связующего элемента для рабочей технологической среды. РТС представляет собой ферроабразивную «щетку», состоящую из частиц ФАП и контитуума СОТС, осуществляющего также фильтрацию пористого скелета данной «щетки». Ранее проведенные исследования показывают, что, производя оценку каждого из вышеупомянутых компонентов РТС, сложно обеспечить прогнозирование выходных показателей типа массового съема или шероховатости поверхностного слоя без учета действия ФАП и СОТС. Установлено, что поведение отдельных компонентов, составляющих, например, бинарную систему, резко отличается от поведения самой системы [111].

Эффективность обоих компонентов РТС (ФАП и СОТС) следует оценивать на основе их кооперативности как общего свойства РТС. Следовательно, вопрос исследования такого рода систем, в частности, для процесса MAO, имеющего РТС, вносит важный характер. Причинами являются, во-первых, проблема обеспечения стойкости данной РТС как инструмента, во-вторых, необходимость достижения качественных и других показателей, определяющих производительность труда и себестоимость выпуска продукции. Это связано с тем, что обрабатываемость каждого металла существенно изменяется при замене режущего инструментального материала, конструкции, геометрических параметров, вида СОТС и т.д. Кроме того, важным фактором является характер поставленной задачи – требуется ли в данном случае получение максимального съема материала, либо возникает необходимость в высокой степени чистоты по-

верхностного слоя детали. Поэтому одним из вариантов решения такой задачи для MAO служит создание специальных РТС для обработки конкретного материала, имеющих возможность обеспечить максимальные выходные показатели при реализации их стойкости и стабильности результатов. В таком случае решается вопрос уменьшения номенклатуры ФАП и СОТС, исчезает необходимость подготовки производства, возникает возможность автоматизации и регулирования режимов резания.

Для эффективности процесса MAO алюминиевых сплавов использовались следующие РТС: а) ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81 (рис. 5.1 а, б), СОТС – СинМА-2 ТУ 38.5901176-91, 5 % -ный водный раствор; б) ФАП – сплав кремнистый (рис. 5.1 в, г), СОТС – триатаноламиновое мыло олеиновой кислоты, глицерин, 5 % -ный водный раствор. Зернистость частиц ФАП – 160/200 мкм. Образцы – втулки  $D \times d \times l = 30 \times 25 \times 30$  мм, исходная шероховатость поверхности –  $Ra_1 = 0,8...1,2$  мкм. Параметры и режимы обработки: величина магнитной индукции  $B = 0,7...1,1$  Тл; скорость резания  $V_p = 0,5...2$  м/с; скорость осцилляции  $V_o = 0,15$  м/с; коэффициент заполнения рабочего зазора  $K_3 = 1$ ; амплитуда осцилляции  $A = 1$  мм; время обработки  $t = 60$  с; величина рабочего зазора  $\delta = 1,5$  мм.

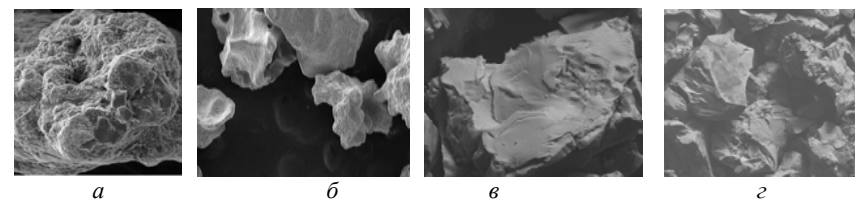


Рис. 5.1. Морфология частиц ФАП

Способ получения ФАП включает синтез материала, его измельчение и рассев на фракции. Перед рассевом на фракции вводят дополнительную операцию нагрева материала, не содержащего карбиды бора и бориды железа, в контакте с порошкообразной борсодержащей смесью до  $1010...1030$  °С, после выдержки 25...30 мин смесь охлаждают в жидкой среде с целью создания на поверхности частиц ФАП неоднородной кристаллохимической структуры из карбидных и боридных фаз и повышении твердости подслоя [116].

Предложенный ФАП, содержащий железо, кремний, титан, алюминий, углерод и фосфор, дополнительно включает карбиды бора и бориды железа при следующем соотношении компонентов: мас. % кремний 7,5...12,0; 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.

Согласно предложенному способу получения ФАП, включающему операции синтеза материала, его измельчения и рассева на фракции порошков, перед рассевом материал нагревают в контакте с порошкообразной борсодержащей смесью до 1010...1030 °С, выдерживают при этой температуре 25...30 мин и охлаждают в жидкой среде. Непрерывный контакт зерен сплава с порошковой смесью, содержащей бор или его соединения и активатор, в процессе их совместного нагрева в печи обуславливает развитие процессов диффузии бора к поверхностям частиц и его взаимодействие с компонентами, образующими эти поверхности. В результате взаимодействия бора с матрицей зерен, которая представляет собой  $\alpha$ -феррит с растворенным в нем кремнием, образуются бориды железа микротвердостью 16...18 ГПа.

Борированные слои на поверхности зерен сплава состоят из двух зон наружной, представленной химическими соединениями бора и железа ( $Fe_xB$ ), и внутренней, состоящей из твердых растворов бора и кремния в железе. При указанных температурных условиях диффундирующий в сплав бор вступает в химическую реакцию со свободным углеродом, пластинчатые или чешуйчатые включения которого выходят на поверхность зерен. Продуктами реакции являются карбиды бора ( $B_4C$ ). Различное соотношение бора и углерода в полученных карбидах обуславливает колебания их микротвердости в пределах 41...50 ГПа. Новообразования карбидов бора препятствуют дальнейшему проникновению бора в материал и способствуют созданию на поверхности зерен участков, состоящих из кристаллических карбидных фаз.

Чередование карбидных и боридных участков на поверхности зерен сплава позволяет получить неоднородные, с точки зрения кристаллохимии, структуры. Возникновение и рост неоднородных кристаллохимических структур из карбидов бора и боридов железа приводят к увеличению линейных размеров зерен насыщенного сплава. На рабочих поверхностях карбоборированных зерен образуется сплошное покрытие, характерной особенностью которого

является наличие большого количества микровыступов с размерами 3...7 мкм. Такая структура способствует повышению работоспособности и износостойкости предложенного ФАП.

Экспериментально установлено, что с возрастанием температуры нагрева засыпки и длительности выдержки ее в печи при этой температуре толщина карбоборированного слоя на поверхности зерен увеличивается. Оптимальным диапазоном температуры карбоборирования является температура 1010...1030 °С. Нагрев засыпки до более низкой температуры, например, до 1000 °С, не обеспечивает требуемое качество феррообразива - уменьшается магнитная проницаемость материала, увеличивается шероховатость обработанных поверхностей деталей, в особенности изготовленных из латуни. Увеличение температуры нагрева засыпки, например, до 1050 °С, создает условия для начала развития процессов спекания зерен и брака продукции.

При выдержке засыпки в печи менее 25 мин необходимая толщина карбоборидных слоев на поверхности зерен не гарантируется, а при увеличении выдержки более 30 мин толщина синтезированных слоев увеличивается, что также нежелательно. Уменьшение толщины карбоборидных слоев понижает их механическую прочность и приводит в конечном итоге к разрушению последних, а увеличение толщины покрытия отрицательно сказывается на уровне магнитных характеристик материала.

В качестве исходного материала для получения порошков ФАП используют железокремниевый сплав, полученный в процессе обработки технологии электроплавки нормального электрокорунда марки 18А.

Подача СОТС производилась капельным способом, удельный расход 150 мл/мин. Конфигурацию полюсных наконечников приняли эквидистантной по отношению к форме образцов. Угол охвата детали составляет 75°. Оборудование – станок для МАО СФТ 2.150.00.00.000. В качестве выходных показателей использовались: а) достигаемая шероховатость поверхности,  $Ra_2$ , мкм; 2) величина удельного массового съема,  $q$ , мг/см<sup>2</sup>×мин. Измерения результатов проводилось на профилографе-профилометре мод. «252-Калибр» и весах аналитических ВЛА-200 г, блескомер БФ5-45/45.

Сравнительные исследования эффективности вышеуказанных РТС для МАО алюминиевых сплавов показали, что применение первого вида (Ж15КТ + СинМА-2) приводит к потемнению обработанной поверхности или появлению матового оттенка, в отдельных

случаях образованию вторичных структур, а также увеличению в 1,5...2 раза удельного расхода порции СОТС. Установлено, что показатели шероховатости поверхностного слоя имели большую величину в отличие от использования второго вида РТС (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Результаты исследования применения различных РТС

| № РТС | Состав РТС   | *Концентрация, % | Удельный массовый съём, $q$ , мг/см <sup>2</sup> ×мин | Шероховатость поверхности после обработки, $Ra_2$ , мкм | Состояние поверхности |
|-------|--|------------------|---|---|-----------------------|
| 1     | Кремнистый сплав + триэтаноламиноное мыло олеиновой кислоты + глицерин | 1                | 9,03  | 0,1-0,3   | блеск                 |
|       |  | 3                | 8,29  | 0,05-0,2  | блеск                 |
|       |  | 5                | 6,34  | 0,2-0,3   | матовость             |
| 2     | Ж15КТ + СинМА-2  | 1                | 7,83  | 0,5-0,6   | потемнение            |
|       |  | 3                | 6,91  | 0,3-0,5   | матовость             |
|       |  | 5                | 5,47  | 0,4-0,6   | матовость             |

\* Процентное содержание в водном растворе СОТС.

Обработка вторым видом РТС (кремнистый сплав + триэтаноламиноное мыло олеиновой кислоты + глицерин) алюминиевых сплавов обеспечивает интенсификацию процесса MAO: увеличивается светоотражательная способность поверхностного слоя материала, его шероховатость в 4...5 раз ниже, чем при использовании первого вида РТС. Применение такого способа MAO, связанного с тем, что первоначально деталь обрабатывается первым видом РТС, затем вторым, и, наоборот, выявило увеличение эффективности второго варианта. В случае использования в качестве РТС кремнистого сплава, глицерина и триэтаноламиноного мыла олеиновой кислоты после обработки Ж15КТ и СинМА-2 поверхностный слой приобретает больший уровень блеска, исчезает потемнение и уменьшается шероховатость поверхности. Ротация очередности обработки первоначально (SiC + глицерин), затем (Ж15КТ + СинМА-2), приводит к снижению эффективности процесса MAO.

Если производить оценку данной обработки с точки зрения положений нелинейной термодинамики, то ее следует отнести к неравновесному процессу перехода механической и электромагнитной энергии в тепловую и другие виды. Этот переход также связан с накоплением энергии деформирования в кристаллической решетке металла, которое определяет его дальнейшее разрушение и соответственно изменение энтропии  $dS$ . Это изменение  $dS$  характеризуется вкладом  $dS_e$  за счет обмена энергией и веществом с внешней средой и изменением  $dS_i$  в результате процессов внутри самой системы ( $dS = dS_e + dS_i$ ). В случае представления зоны обработки (деталь – инструмент) как открытой системы, внешней средой по отношению к ней служит электромагнитная система, обеспечивающая обмен энергией и веществом. Образование вторичных структур алюминиевых сплавов связано с тем, что возникает стационарное состояние диссипативных структур, характеризующихся граничными интервалами, или, иначе говоря, производство энтропии внутри системы  $dS_i/dt = 0$ . Известно, что энтропия уменьшается, если ее отдача в единицу времени превышает ее производство внутри системы:

$$\frac{dS}{dt} < 0, \text{ если } \left| \frac{dS_e}{dt} \right| > \frac{dS_i}{dt} \geq 0.$$

Таким образом, для создания порядка и структуры организации системы возникает необходимость в росте вклада  $dS_e$ , и если уменьшается обмен веществ, необходимо увеличивать обмен энергией, что с экономической точки зрения носит затратный характер. Это связано с тем, что если производство энтропии  $dS_i/dt = 0$  (стабилизация системы), то для возобновления обмена следует преодолеть термодинамический порог стационарного состояния диссипативной структуры алюминиевого сплава, и решение заключается, как указывалось выше, в необходимости роста потока энергии, который имеет граничные значения по ряду технологических и физических факторов.

Таким образом, правильная организация структуры РТС позволяет осуществить интенсификацию процесса MAO путем минимальных затрат.



Одним из компонентов, входящих в структуры РТС, является глицерин, представляющий собой трехатомный спирт  $[\text{HOCH}_2\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2\text{OH}]$ . Это вязкая прозрачная жидкость, растворимая в воде, которая широко применяется в косметической и медицинской промышленности, производстве кожи и бумаги. Кислотные свойства глицерина выражены в большей степени, чем у одноатомных спиртов, что позволяет осуществлять образование трех рядов металлических производных – глицератов. Следует отметить, что данные изомеры получают при взаимодействии не только с тяжелыми металлами, но и с их оксидами. Температура вспышки глицерина в открытом тигле составляет  $193\text{ }^\circ\text{C}$ , и только при достижении температуры выше  $90\text{ }^\circ\text{C}$  он начинает частично разлагаться, что указывает на требуемый уровень термостойкости. Эффективность СОТС, включающих также триэтаноламиновокислоты и диспергирующие, смазывающие, моющие и охлаждающие свойства РТС, во многом зависит от массового содержания глицерина. Необходимо отметить, что наличие глицерина способствует накоплению и удержанию воды в составе РТС, что положительно сказывается на производительности процесса.

Известно, что на поверхности алюминиевых сплавов происходит образование оксидной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , которая характеризуется низким уровнем энергии связи в случае отхода от матрицы металла, что указывает на слабое закрепление частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в связке РТС. Однако они обладают высокой микротвердостью (до  $12\text{ ГПа}$ ), поэтому, наравне с химически инертными по отношению к алюминиевым сплавам частицами  $\text{SiC}$ , диспергируют его поверхность, обнажая ювенильные участки. Определенное количество продуктов оксидной пленки реагирует с глицерином, образуя глицераты, которые в соответствии с прохождением и фильтрацией пористого скелета РТС потоками жидкости, вымываются из зоны обработки.

Использование ФАП Ж15КТ, содержащего углерод в виде графита, приводит к снижению краевого угла смачивания СОТС по отношению к обрабатываемой детали. В случае его стабилизации при определенном количестве графита как катализатора осуществляется процесс схватывания частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , их фиксация и рост массового содержания в РТС. Остаточное техническое железо, используемое при производстве Ж15КТ, в совокупности с графитом и частицами  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , создает абразивную среду, которая ухудшает качество обрабатываемой по-

верхности. Несмотря на рост конгломератов и их кинетическую устойчивость, преимущественно меньшие частицы выносятся из зоны резания по причине снижения сил адгезии. Более крупные остаются в зоне обработки детали за счет роста этих сил, оказывая режущее действие на эти поверхности. Обработанные поверхности алюминиевых деталей в этом случае имеют большее количество царапин, глубоких рисок, а также изменение цвета с блестящего на матовый. Причиной является насыщение ювенильных участков поверхностного слоя пылевидным графитом. Также в результате оценки состояния поверхности частиц ФАП Ж15КТ отчетливо видны следы сизого или беловатого налета, образованного диффузией алюминиевого сплава. Следовательно, положительный эффект использования различных РТС для МАО алюминиевых сплавов достигается, во-первых, в случае оптимального сочетания их вязкостной и кислотной активности, во-вторых, химической инертностью частиц ФАП.

#### **5.1.2. Особенности термодинамического процесса магнитно-абразивной обработки поверхности плафонов**

Плафон – основная часть светильника, выполняющая функции распределения, отражения и направления света. Материалы для изготовления подобных технических изделий – хрусталь, фарфор, пластик, стекло, цветные металлы и реже натуральный камень. Из цветных металлов часто используют бронзу и латунь. Бронза хорошо поддается обработке, но стоимость ее выше, чем у латуни. Поэтому в настоящее время элементы осветительной аппаратуры в массовом производстве изготавливают из латуни. После качественной финишной обработки латунь по своему внешнему виду вполне сопоставима с бронзой, а в случае нанесения лака на обработанную поверхность визуально неотличима от золота.

Плафоны функционально должны обеспечивать высокий коэффициент отражения падающего светового потока, что накладывает повышенные требования к шероховатости поверхности при ее финишной обработке.

Одним из перспективных способов, обеспечивающих получение поверхности с высоким классом шероховатости, является магнитно-абразивная обработка (рис. 5.2). Диапазон температур на

поверхности детали в процессе обработки составляет 50...70 °С, что обусловлено сингулярностью потоков теплоты, образующейся при сьеме материала пористым ФАП. Проблема реализации процесса MAO поверхности плафонов, изготовленных из латуни (например, Л63 ГОСТ 15527–2004), вызвана тонкостенностью обрабатываемых поверхностей (толщина стенки 0,25...1,0 мм). Несмотря на относительно невысокую температуру на обрабатываемой поверхности, градиент температуры в зоне резания имеет максимальное значение, что отрицательно влияет на отражательную способность поверхности плафона. Следовательно, для осуществления MAO поверхности плафонов, изготовленных из латуни, необходимо, во-первых, исследовать термодинамический процесс, связанный с распределением температуры в зоне обработки, во-вторых, управлять температурным режимом обработки, что возможно на основе создания теплофизической модели.

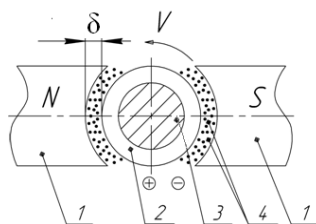


Рис. 5.2. Схема MAO: 1 – полюсные наконечники; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – ферромагнитная оправка; 4 – ферроабразивный порошок;  $\delta$  – рабочий зазор;  $V$  – скорость вращения заготовки

Известно [117], что тепловой поток от точечного источника образования тепла распространяется как на обрабатываемый материал детали, так и на ФАП.

Температура  $T$  на обрабатываемой поверхности определяется по формуле [118]:

$$T - T_0 = \frac{q}{0,5\lambda \left(\frac{\pi}{\alpha t}\right)^{0,5} + \frac{F}{Pt} \rho_d C_d}. \quad (5.1)$$

где  $T_0$  – начальная температура на поверхности детали, К;  
 $q$  – поток теплоты, возникающий при обработке, Дж;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности абразивной среды, Вт/(м·К);  
 $\alpha$  – коэффициент температуропроводности абразивной среды,  $\frac{m^2}{c}$ ;  
 $P$  – периметр сечения детали, м;  
 $F$  – площадь поперечного сечения детали,  $m^2$ ;  
 $t$  – время обработки, с;  
 $\rho_d$  – плотность материала детали,  $kg/m^3$ ;  
 $C_d$  – массовая теплоемкость материала детали, Дж/(кг·К).

Латунь является идеальным проводником теплового потока ( $\lambda = 85,5...111$  Вт/(м·К)) [118], а теплопроводность ФАП составляет  $\lambda = 0,25...0,35$  Вт/(м·К). Так как температура на поверхности детали имеет различные значения в точках всего теплового поля и является функцией координат и времени  $T = f(x, y, z, t)$ , то необходимо учитывать степень нагрева и охлаждения поверхности детали и ФАП.

Уравнение теплового баланса в данном случае имеет вид [119]

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4. \quad (5.2)$$

где  $Q$  – количество теплоты, выделяемое при обработке детали в единицу времени, Дж/с;

$Q_1$  – количество теплоты, поглощенное деталью;

$Q_2$  – количество теплоты, поглощенное ФАП за счет теплопроводности;

$Q_3$  – количество теплоты, отведенное путем теплообмена между поверхностью детали и СОТС;

$Q_4$  – количество теплоты, отведенное путем теплообмена между поверхностью ФАП и СОТС.

В уравнении (5.2)

$$Q_1 = V_d C_d \rho_d dT; \quad (5.3)$$

$$Q_2 = \rho_a C_a S d t \int_0^{\infty} \frac{\partial T_a(x, t)}{\partial t} dt; \quad (5.4)$$

$$Q_3 = SHdt(T - T_{CO TC}), \quad (5.5)$$

где  $V_0$  – объем детали,  $\text{м}^3$ ;  
 $S$  – площадь боковой поверхности детали,  $\text{м}^2$ ;  
 $\rho_a$  – плотность ФАП,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $C_a$  – массовая теплоемкость ФАП,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  
 $T_a$  – температура ФАП,  $\text{К}$ ;  
 $H$  – коэффициент теплообмена при обтекании потоком СОТС поверхности детали,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  
 $T_{\text{СОТС}}$  – температура СОТС,  $\text{К}$ .

Для определения теплоты  $Q_4$ , отводимой потоком СОТС от ФАП, выделим в объеме рабочей технологической среды элементарный участок частицы ФАП размером  $dy \times dx$  (рис. 5.3).

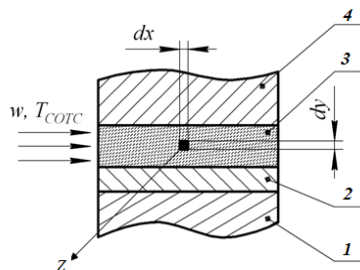


Рис. 5.3. Схема теплообмена рабочей технологической среды: 1 – оправка; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – рабочая технологическая среда; 4 – полюсный наконечник;  $dx \times dy$  – элементарный участок ФАП

С одной стороны, в выделенном участке  $dy \times dx$  СОТС получает приращение количества теплоты, равное:

$$\Delta_{xy} = w\rho_{\text{СОТС}}C_{\text{СОТС}}l dy dT_{\text{СОТС}}, \quad (5.6)$$

где  $w$  – скорость прохождения СОТС через ФАП,  $\text{м}/\text{с}$ ;  
 $\rho_{\text{СОТС}}$  – плотность СОТС,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $C_{\text{СОТС}}$  – теплоемкость,  $\text{Дж}/\text{К}$ ;  
 $l$  – длина поверхности детали, контактирующая с ФАП,  $\text{м}$ .

С другой стороны, это приращение равно:

$$\Delta_{xy} = H_1 S_0 l (T_a - T_{\text{СОТС}}), \quad (5.7)$$

где  $H_1$  – коэффициент теплообмена между СОТС и ФАП,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  
 $S_0$  – площадь тепловоспринимающей поверхности,  $\text{м}^2$ .

Учитывая, что  $dy \times dx = 1$ , после преобразования получаем:

$$w\rho_{\text{СОТС}}C_{\text{СОТС}}dT_{\text{СОТС}} = H_1 S_0 (T_a - T_{\text{СОТС}}) dx. \quad (5.8)$$

При начальном условии  $T_{\text{СОТС}}$  находим:

$$T_a - T_{\text{СОТС}} = (T_a - T_{\text{СОТС}}) \exp\left(-H_1 S_0 \frac{x}{w\rho_{\text{СОТС}}C_{\text{СОТС}}}\right). \quad (5.9)$$

Подставляя данное выражение в уравнение (5.7) и интегрируя по  $x$ , определяем количество теплоты, поглощаемое слоем ФАП толщиной  $dy$  в единицу времени:

$$\Delta_y = w\rho_{\text{СОТС}}C_{\text{СОТС}}l \left[1 - \exp\left(-H_1 S_0 \frac{P}{2w\rho_{\text{СОТС}}C_{\text{СОТС}}}\right)\right] (T_a - T_{\text{СОТС}}) dy. \quad (5.10)$$

Интегрируя данное выражение по  $y$  в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$  и умножая его на  $dt$ , получаем

$$Q_4 = 2w\rho_{\text{СОТС}}C_{\text{СОТС}}l \left[1 - \exp\left(-H_1 S_0 \frac{P}{2w\rho_{\text{СОТС}}C_{\text{СОТС}}}\right)\right] \int_0^{\infty} (T_a - T_{\text{СОТС}}) dy. \quad (5.11)$$

Для решения задачи используем выражение для расчета температуры бесконечного полуограниченного тела, температура которого измеряется по закону  $T = T(t)$ :

$$T_a - T_{\text{СОТС}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{y}{2\sqrt{at}}}^{\infty} T\left(t - \frac{y^2}{4az^2}\right) e^{-z^2} dz. \quad (5.12)$$

Подставляя выражения (5.3)...(5.5), (5.11), (5.12) в уравнение (5.2) и учитывая соотношение  $Q = qS$ , получаем:

$$q = H(T - T_{\text{СОТС}}) + C_{\text{д}} \rho_{\text{д}} \frac{F d \Gamma}{P dt} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} dy \int_{\frac{y}{2\sqrt{\alpha}}}^{\infty} e^{-z^2} \left\{ \rho_a C_a \left( t - \frac{y^2}{4\alpha z^2} \right) \frac{\partial T}{\partial \alpha} + \frac{2 \rho_a C_a}{P} \left[ 1 - \exp \left( -H_1 S_0 \frac{P}{2 \rho_{\text{СОТС}} C_{\text{СОТС}}} \right) \right] T \left( t - \frac{y^2}{4\alpha z^2} \right) \right\} dz. \quad (5.13)$$

Решение интегрально-дифференциального уравнения производится методом Эйлера в случае обыкновенных дифференциальных уравнений. Графически зависимость  $T = T(t)$  представим в виде линии, состоящей из отрезков прямых:

$$T = \frac{T_{i+1} - T_i}{h} (t - t_i) + T_i \text{ при } t \in [t_i; t_i + h],$$

где  $T_i = T(t_i)$ ,  $T_{i+1} = T(t_i + h)$ . После подстановки приведенного выражения в (5.9) при  $t = t_i + h/2$  получим рекуррентное выражение:

$$T_{i+1} = T_i + \frac{q + HT_{\text{СОТС}} - \left( H + D \sqrt{t_i + \frac{h}{2}} \right) T_i}{B + H \frac{h}{2} + \sqrt{t_i + \frac{h}{2}} \left( C + D \frac{(h - t_i)}{3} \right)} h, \quad (5.14)$$

где

$$D = 4 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \frac{\rho_{\text{СОТС}} C_{\text{СОТС}}}{P} \left[ 1 - \exp \left( -H_1 S_0 \frac{P}{2 \rho_{\text{СОТС}} C_{\text{СОТС}}} \right) \right],$$

$$B = C_{\text{д}} \rho_{\text{д}} \frac{F}{P}; \quad C = 2 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \rho_a C_a.$$

Используя уравнение (5.14), можно определить температуру на поверхности детали в последующей точке на основе предыдущего значения.

Таким образом, предполагаемый математический подход позволяет теоретически определять величины температур при МАО поверхности плафонов без проведения дополнительных экспериментов.

Проведены экспериментальные исследования МАО поверхности плафонов (материал Л63 ГОСТ 15527–2004) для достижения высокой светоотражательной способности  $\Phi$  (75...80 %). Параметры и режимы МАО: величина магнитной индукции  $B = 0,5...1,0$  Тл; скорость вращения детали  $V = 1...3$  м/с; скорость осцилляции  $V_o = 0,10...0,25$  м/с; величина рабочего зазора  $\delta = 1...4$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора  $K_z = 1$ ; размерность частиц ФАП  $\Delta = 63/100$  мкм; ФАП – Полимам-Т ТУ 06459–81 и магнитно-абразивный порошок АСМ (ГОСТ 9206–70) – керметная технология, абразив алмаз; СОТС – СинМА-1 ТУ 38.59.01176–91, 3 % -ный водный раствор; расход СОТС 50, 100, 150, 200, 250 мл/мин; скорость подачи СОТС  $w = 0,55$  м/с; время обработки  $t = 120$  с. Черновая обработка плафонов производилась путем использования ФАП Полимам-Т ТУ 06459–81 в течение 60 с, а окончательная обработка проводилась с применением магнитно-абразивного порошка АСМ также в течение 60 с.

Размеры обрабатываемого плафона  $D \times d \times l = 55 \times 100 \times 90$  мм, толщина стенки составляет 0,25...1,0 мм. Волнообразность образующей профиль плафона не превышает 3 мм, при проведении численных расчетов и экспериментальных исследований она принята путем корреляции как прямая по максимальному размеру диаметра плафона. Величину светоотражательной способности  $\Phi$  определяли блескомером БФ5-20/20 по ГОСТ 896–69. Изменение величины магнитной индукции производилось варьированием силы тока, подаваемого на электромагнитные катушки соленоидов электромагнитной системы.

Результаты исследований представлены на рис. 5.4–5.7.

При малых значениях величины магнитной индукции ( $B = 0,5$  Тл) (рис. 5.4) осуществляется меньший съем вершин микронеровностей на поверхности детали. При  $B = 0,75$  Тл достигается максимальная отражающая способность. При дальнейшем увеличении магнитной индукции жесткость ферроабразивной щетки повышается, снижаются проникаемость ФАП и уровень теплоотода СОТС, что приводит к уменьшению светоотражательной способности плафонов.

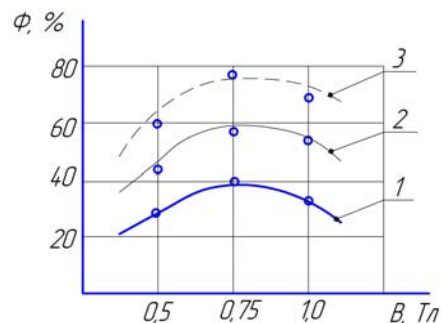


Рис. 5.4. Зависимость светоотражательной способности  $\Phi$  плафонов от величины магнитной индукции  $B$  при различном расходе СОТС: 1, 2, 3 – 50; 100; 150 мл/мин соответственно

Повышение скорости резания  $V_{рез}$  (рис. 5.5) не приводит к существенному изменению светоотражательной способности. Увеличение скорости осцилляции  $V_o$  (рис. 5.6) не оказывает значительного влияния на светоотражательную способность, однако требуется интенсивная подача СОТС, в противном случае на поверхности плафонов появляются цвета побежалости, что снижает светоотражательную способность плафонов.

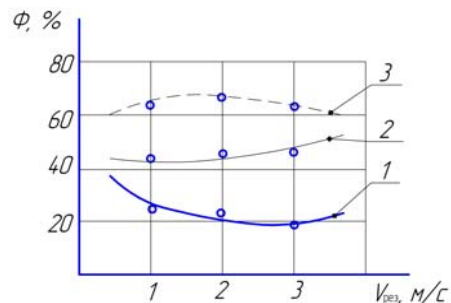


Рис. 5.5. Зависимость светоотражательной способности  $\Phi$  плафонов от скорости резания  $V_{рез}$  при различном расходе СОТС: 1, 2, 3 – 50; 100; 150 мл/мин соответственно

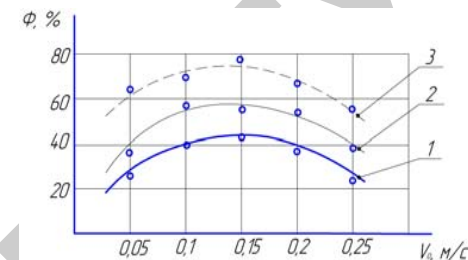


Рис. 5.6. Зависимость светоотражательной способности  $\Phi$  плафонов от скорости осцилляции  $V_o$  при различном расходе СОТС: 1, 2, 3 – 50; 100; 150 мл/мин соответственно

При увеличении величины рабочего зазора  $\delta$  (рис. 5.7) образуется пространство за зоной резания по направлению вращения детали, куда устремляется поток СОТС, что требует повышенного его расхода для более эффективного охлаждения.

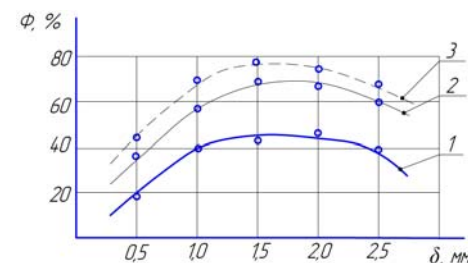


Рис. 5.7. Зависимость светоотражательной способности  $\Phi$  плафонов от величины рабочего зазора  $\delta$  при различном расходе СОТС: 1, 2, 3 – 50; 100; 150 мл/мин соответственно

При чрезмерной подаче СОТС (более 150 мл/мин) в рабочем зазоре величиной  $\delta = 4$  мм и магнитной индукции  $B = 1,2$  Тл образуется противоток жидкости, т.е. поток СОТС устремляется в направлении, противоположном вращению плафона, и в сторону меньшего по размеру конуса. Это указывает на то, что увеличение подачи СОТС не обеспечивает его полное проникновение в зону резания, а при увеличении скорости резания наблюдается рост пенного столба и моющей способности. При этом светоотражательная способность плафона ухудшается. При высоких значениях скоро-

стей резания, осцилляции и магнитной индукции, несмотря на обильное охлаждение рабочей зоны, образуются «штриховые» прижоги поверхностного слоя плафонов. Это объясняется созданием фильтрационного эффекта или закупоривания рабочей технологической среды паровоздушными пузырьками, препятствующими прохождению СОТС через каналы щетки и реализации процесса «полусухого» резания.

В результате проведенных экспериментальных исследований определены оптимальные режимы MAO:  $B = 0,75$  Тл;  $V_o = 0,15$  м/с;  $\delta = 1,5$  мм, которые обеспечивают высокую светоотражательную способность плафонов (75...80 %).

### 5.1.3. Повышение эффективности схемы для магнитно-абразивной обработки цветных сплавов

Механическая обработка цветных металлов, в частности финишная, в отличие от обработки черных металлов имеет ряд особенностей, во многом связанных с показателями физико-механических характеристик. Для достижения заданных и эксплуатационных показателей изделий машиностроения, в частности, их надежности и долговечности требуется применение всего сегмента материального и аппаратного обеспечения.

Согласно [120], контактирование инструмента и обрабатываемого материала рассматривается как открытая неравновесная термодинамическая система. Явление структурной приспособляемости, характерное при финишной обработке цветных металлов, сопровождается деформационно-адгезионными процессами и рассеиванием энергии при ее переходе от зоны трения в объект контактирующих тел. Вместе с тем, на рабочих поверхностях цветных материалов образуются тонкопленочные объекты в виде вторичных структур (ВС), выполняющие защитные функции. Это является следствием направленности ВС на ограничение интенсивности взаимодействия контактирующих материалов и определяется реализацией принципа Ле Шателье – Брауна [121].

Ранее проведенные исследования показали, что при MAO цветных металлов (бронза, латунь и т.д.) происходит быстрое затухание размерного и массового съема материала. В результате микроско-

пического и визуального анализа отмечено, что на поверхности данных материалов происходит создание пленок матового цвета, как возможный результат вторичной диссипативной гетерогенности. Согласно [121], при эволюции термодинамической системы часть изменения производства энтропии, связанная с фактором динамического воздействия этой системы, может быть отрицательной. Однако трудно определить, какой знак будет у той части изменения производства энтропии, которая связана с изменением термодинамических потоков и физико-химических превращений. Если производство энтропии системы уменьшается, то оно неизбежно достигает определенного минимума, стабилизируется при определенном состоянии и в дальнейшем остается постоянным [122]. Такую устойчивость система приобретает также и при образования диссипативных структур.

Создание новой гетерогенной структуры, соответствующей упорядочению ее состояния, обеспечивается необходимостью наличия более чем одного независимого источника диссипации энергии. При протекании процесса MAO черных металлов термодинамическая система в большей степени вероятности не теряет устойчивости и в ней, следовательно, может и не проходить самоорганизация в отличие от MAO цветных сплавов. Для этих сплавов ВС, представляются продуктами несамопроизвольных и инициированных трением химических реакций сплава с активными компонентами среды, которые и являются новыми источниками диссипации энергии.

Согласно [123], поток энтропии за счет физико-химических превращений в ВС равен:

$$\frac{dS}{dt} = J_x X_x, \quad (5.15)$$

где  $J_x$  – скорость химических реакций;

$X_x$  – термодинамическая сила, вызывающая химические реакции.

$$X_x = \frac{A}{T},$$

где  $A$  – химическое сродство;

$T$  – температура.

Известно, что определенная часть  $Z$ -механической энергии трения расходуется на физико-химические превращения в ВС

$$J_x = fp_r vZ, \quad (5.16)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  
 $p_r$  – нормальная удельная нагрузка;  
 $v$  – скорость резания (скольжения).

Скорость химической реакции и химическое сродство связаны между собой следующей зависимостью

$$v_x = LRT \left( \exp \frac{A}{RT} - 1 \right), \quad (5.17)$$

где  $L$  – коэффициент скольжения;  
 $R$  – газовая постоянная.

После разложения  $\exp \frac{A}{RT}$  в ряд и отбрасывание членов второй и далее ступеней по причине их малости (5.17) можно представить:

$$v_x = LA. \quad (5.18)$$

Тогда выражение (5.15) принимает вид:

$$\frac{dS}{dt} = \pm fp_r vZ \frac{v_x}{LT}. \quad (5.19)$$

Вероятность отрицательного характера производства энтропии для процесса MAO цветных металлов больше, чем для MAO черных металлов. Появление отрицательного знака связано с различием эндо- и экзотермических, химических реакций, направленных на выявление или поглощение теплоты. С целью снижения риска отрицательного изменения производства энтропии физико-химических превращений и создание неравновесных ВС следует осуществить производство и ввод дополнительных воздействий.

$$\frac{dS}{dt} = \pm fp_r vZ \frac{v_x}{LT} + J_b X_b, \quad (5.20)$$

где  $J_b$  – скорость дополнительных воздействий;

$X_b$  – термодинамическая сила, вызывающая поток дополнительных воздействий.

Следовательно, для исключения прогнозируемой адаптации поверхностей ферроабразивного порошка, обрабатываемого материала и увеличения интенсивности съема материала система СПИД для реализации процесса MAO должна обладать такими составами смазочно-охлаждающих технологических средств, которые не зависят от характеристик фрикционного контакта. Необходимо отметить, что в данной работе приводится одно из первых приближений термодинамического подхода к оценке процесса MAO цветных сплавов без рассмотрения условий потери устойчивости и других возможных взаимодействий. Другим моментом, направленным на достижение поставленного результата, служит нестационарность элементов режимов данного процесса, заключающегося в том, что в качестве одного из компонентов термодинамической силы выступает магнитная индукция  $B$ . Поскольку плотность электромагнитного поля составляет  $10^{-7} \dots 10^{-12}$  кг/м<sup>3</sup>, то скорость распространения в пространстве достаточно велика и крайне низки инерционные эффекты [124].

Ввиду того, что управление плотностью рабочей технологической средой, включающей в себя ФАП и СОТС, зависит от величины этой индукции, нестационарность процесса MAO обеспечивается изменением подачи силы тока на катушке соленоидов электромагнитной системы.

Примером использования такого свойства системы служит MAO головки делителя теста ШЗ-ХДУ, выполненной из бронзы БрАЖНМц ГОСТ 18175-78, внешний диаметр которой составляет 210 мм (рис. 5.8).



Рис. 5.8. Головка делителя теста ШЗ-ХДУ

Применение метода МАО для финишной обработки данной головки в отличие от шлифования увеличивает срок службы на 20...25 % в условиях хлебопекарного производства за счет создания благоприятного микрорельефа поверхностного слоя [125].

Как показали исследования, использование схемы МАО с концентрическим зазором и углом захвата  $\alpha = 90^\circ$  приводит к образованию матовой поверхности головки делителя теста с отдельным выглаженным локальным участком. Причинами такого рода отклонений служит активация поверхностного слоя бронзы и перехода из термодинамически устойчивого состояния в пассивное, ввиду химического соединения компонентов РТС и окружающей среды с металлами. Необходимость исключения такого явления связана с анализом данной термодинамической системы, возможность управления которой позволяют исключить негативный характер вышеуказанных отклонений, касающихся РТС. Решение этой проблемы было осуществлено следующим путем, а именно созданием серповидного зазора с уменьшением угла охвата  $\alpha = 45^\circ$  (рис. 5.9).

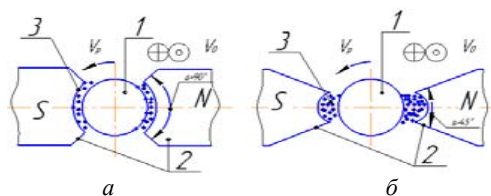


Рис. 5.9. Схема МАО: а – с концентрическим; б – с серповидным зазорами: 1 – деталь; 2 – полусферические наконечники; 3 – рабочая технологическая среда

Переменность величины зазора от 1 до 3 мм обуславливает изменение удельной нагрузки и обмена тепла между деталью и РТС по причине изменения плотности материала и уменьшения коэффициента трения ввиду роста объема порошковой массы, помещенной в рабочий зазор и удерживаемой силами ЭМП.

В качестве оборудования использовался станок СФТ 2.150.00.00.000 (рис. 5.10). Параметры и режимы обработки: скорость резания  $V_p = 1,2$  м/с; скорость осцилляции  $V_o = 0,1$  м/с; амплитуда осцилляции  $A = 1$  мм; ФАП – ФАПД; СОТС СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, размерность зерен ФАП  $\Delta = 100/160$  мкм. Варьирование величины магнитной индукции  $B$  от 0,5 до 1,1 Т позволяет

обеспечить нестабильность данного режима и приводит к изменению плотности ферроабразивной «щетки», интенсифицируя прохождение потоков СОТС. Данная причина также является источником колебаний контура РТС и формирует сужения поровых каналов вблизи граничных объектов области фильтрации, производя в локализованных этапах их закупоривание. Показатели проницаемости внутри объема серповидного зазора и на его границах отличаются по значению друг от друга, что образует барьеры для вытеснения жидкости из данного объема. Это также может привести к сорбции по тому или иному механизму реализации сгустков поверхностно-активных веществ (ПАВ) всем скелетом пористого тела, что резко снизит проницаемость среды. Задачей в таком случае становится предотвращение перехода указанного процесса в необратимый и для этого следует осуществить производство попеременного сжатия и расширения пористой среды с целью воздействия на элемент жидкости путем изменения величины параметров магнитного поля. Такого рода нестационарность режимов обеспечивает флуктуацию подачи жидкости в зону фрикционного контакта и давления зерен ФАП на обрабатываемую поверхность, что создает термодинамическую неустойчивость системы, препятствует ее переходу в пассивное состояние и образованию ВС.

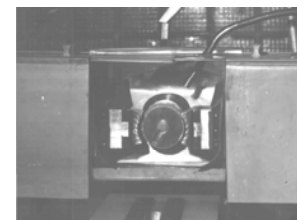


Рис. 5.10. Рабочая зона станка СФТ 2.150.00.00.000

Проведенные испытания с использованием схемы МАО с серповидным зазором, являющегося резервуаром для компонентов РТС, позволили в течение 60 с снизить показатели шероховатости поверхности головки делителя теста с  $Ra_1 = 1,6...2,2$  мкм до  $Ra_2 = 0,2...0,4$  мкм при отсутствии матового оттенка. Срок службы данных головок в производственных условиях составил 12 месяцев, при снижении себестоимости изготовления на 40 %.



## 5.2. Активация технологических сред и оптимизация их составов

Происходящие процессы в зоне обработки при МАО непосредственно обусловлены свойством рабочей технологической среды. Понятие “рабочая технологическая среда”, включающая в себя компоненты: СОТС + ФАП + внешнее магнитное поле, СОТС + гибкие ферроабразивные волокна + внешнее магнитное поле, СОТС + механические «щетки» в магнитном поле в присутствии ФАП, магнитно-реологические суспензии и жидкости. Комплексное определение РТС позволяет подобрать материалы ФАП, СОТС и топографию магнитного поля таким образом, которое удовлетворяет высокому уровню как эксплуатационных характеристик, так и обеспечению минимальной себестоимости МАО.

### 5.2.1. Повышение эффективности СОТС для МАО

Совершенствование составов и технологии приготовления СОТС является одним из основных направлений современной технологии машиностроительного производства. На изготовление СОТС затрачивают значительное количество дефицитного сырья и материалов. Без изменения технологии приготовления и составов СОТС нельзя обеспечить переход машиностроения на безотходное и малоотходное производство. Рациональный подбор и создание высокоэффективных СОТС возможны только при глубоком изучении природы и механизма их действия. Решение этих вопросов поможет превратить поиск новых СОТС из чисто эмпирической в теоретически и практически обоснованную отрасль техники.

Опыт передовых машиностроительных предприятий показывает, что рациональное применение СОТС позволяет в 1,2...4 раза повысить стойкость инструмента, на 20...60 % форсировать режимы резания, на 10...50 % повысить производительность труда, уменьшить энергозатраты при механической обработке [126]. Применение новых эффективных СОТС позволяет резко улучшить качество обработки и санитарно-гигиенические условия труда рабочих, а также в полной мере использовать широкие возможности современного автоматизированного производства, особенно при обработке жаропрочных, жаростойких, коррозионностойких и других труднообрабатываемых сталей и сплавов.

Среди технологических факторов, влияющих на формирование шероховатости и физико-механических свойств металлических поверхностей при финишной абразивной обработке, особое место отводится использованию соответствующего вида СОТС. Однако, несмотря на большое количество разработанных составов СОТС, задача прогнозирования их использования для финишной абразивной обработки во многом еще не решена. В основном такого рода рекомендации носят эмпирический характер, базирующийся на конкретных условиях механической обработки [127].

Применяют следующие основные способы подачи СОТС в зону резания:

- свободно падающей струей;
- высоконапорной струей;
- струей воздушно-жидкостной смеси (в распыленном состоянии);
- через каналы в теле режущего инструмента.

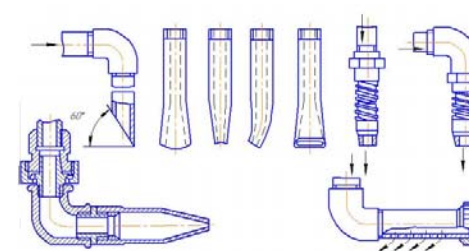


Рис. 5.11. Сопла насадки для подачи СОТС поливом и напорной струей

Подача СОТС чаще всего осуществляется свободнопадающей струей (поливом). Свободно падающая струя истекает из сопел различных конструкций (рис. 5.11) под давлением 0,03...0,1 МПа, т.е. под действием силы тяжести, и обильно поливает зону резания.

Широко практикуется подача СОТС напорной струей под давлением 0,1...2,5 МПа. Напорную струю можно подавать как в зону обработки, так и по каналам в теле инструмента. При подаче в зону обработки скорость напорной струи достигает 40...60 м/с. В целях уменьшения разбрызгивания рекомендуется разветвлять поток СОТС – часть потока направлять в виде тонкой напорной струи, а часть – свободным поливом.

Недостатки подачи СОТС высоконапорной струей следующие:

- трудность обеспечения в производственных условиях нужного направления струи СОТС на режущую кромку инструмента;
- необходимость тщательной очистки или диспергирования СОТС, чтобы исключить засорение сопла;
- необходимость оснащения станка специальной насосной станцией;
- сильное разбрызгивание жидкости.

Подача СОТС в распыленном состоянии осуществляется путем смешивания СОТС и воздуха и в виде аэрозоли направляют в зону резания. Эффективность действия СОТС при такой подаче можно объяснить повышением физической и химической активности СОТС, по сравнению с охлаждением нераспыленной струей. К преимуществам этой подачи СОТС следует отнести чрезвычайно малые расходы жидкости: 400...500 г/ч – водной СОТС, 0,5...3 г/ч – распыленные СОТС.

### 5.2.2. Методика исследования структурных характеристик СОТС на основе использования компьютерной микроскопии

Компьютерная микроскопия представляет собой новое направление в информационно-измерительной технике, интенсивно развивающееся с конца 90-х годов XX века. Ее появление связано с широким распространением информационных технологий, в результате чего потребовалась разработка усовершенствованных подходов к организации микроскопических исследований, что в первую очередь обусловлено необходимостью осуществления компьютерной обработки информации, получаемой с помощью микроскопа.

Компьютерные микроскопы обладают широким спектром функциональных возможностей. Они позволяют получать, обрабатывать и хранить информацию о разнообразных видах изучаемых объектов, а также обеспечивают наглядное представление этой информации. С их помощью можно получать (снимать) изображения как статичных, так динамичных объектов (соответственно не изменяющих или изменяющих во времени свое положение и/или состояние).

Устойчивость электролитов-суспензий исследовалась с помощью компьютерного микроскопа, изготовленного ЧНПУП «Спектравтоматкомплекс» на базе микроскопа «Микмед-6», предназна-

ченного для исследования объектов в проходящем свете (рис. 5.12). Микроскоп был дооснащен цифровой видеокамерой типа DCM 320, работающей совместно с персональным компьютером. Кроме того, он был дооснащен спектральным осветителем высокого контраста типа ОС-16 ЦОМ с устройством управления режимами осветителя. Осветитель позволяет подсвечивать объекты в видимом спектре, обеспечивая высокую равномерность (6 %) поля подсветки. Конструкция осветителя (освещение микрообъекта) исключает посторонние засветки (блики), что значительно улучшает качество воспроизводимого изображения. Компьютерный микроскоп имеет высокую разрешающую способность и контрастную чувствительность, а именно: позволяет наблюдать слабоконтрастные микрообъекты на дисплее с увеличением до 3000 раз (разрешение не хуже 300 нм) и с контрастом воспроизводимого изображения не менее 80:1.

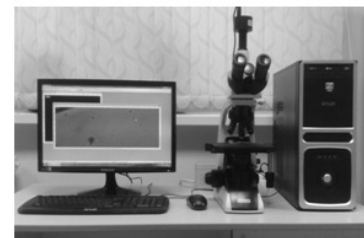


Рис. 5.12. Компьютерный микроскоп на базе микроскопа «Микмед-6»

Компьютерный микроскоп применялся для количественного анализа дисперсной фазы эмульсий. Измерения структурных параметров эмульсий осуществлялись на копиях микроизображений, предварительно сохраненных в базе данных компьютерного микроскопа. Для определения размеров отдельных структурных элементов (частиц) или расстояний между ними на микроизображения наносились измерительные линии, которые, соответственно, пересекают эти элементы в выбранных направлениях или соединяют их между собой. При этом автоматически фиксируются значения измеряемых размеров или расстояний. Для измерения площади отдельных структурных элементов (частиц) на микроизображения наносились измерительные контуры этих элементов. При этом также автоматически

фиксируются значения измеряемых площадей. На рис. 5.13 в качестве примера показано микроизображение (дисперсная фаза эмульсии) с нанесенными измерительными линиями и контуром.

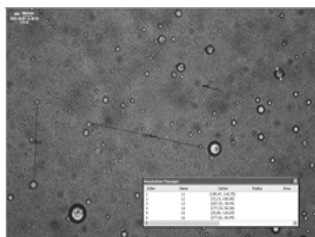


Рис. 5.13. Микроизображение дисперсной фазы эмульсии с нанесенными измерительными линиями и измерительным контуром

Для определения объемного содержания структурных элементов (частиц) следует обеспечить их высококонтрастное выделение на микроизображении, для чего микроизображение делается бинарным (черно-белым). Затем автоматически вычисляется относительная площадь структурных элементов (частиц) в выбранном поле наблюдения. Таким способом можно определять содержание дисперсной фазы в эмульсиях.

При проведении экспериментов по диспергированию СОТС использовали следующие типы УЗ-установок:

- ультразвуковой диспергатор низкочастотный УДНЧ (производство БГУИР, Беларусь);
- ультразвуковой диспергатор высокочастотный УДВЧ (производство БГУИР, Беларусь);
- аппарат для ультразвуковой обработки жидких сред под избыточным давлением УЗД-0,4-20 (производство ЧУП «КОНТЕХ-05», Беларусь).

### 5.2.3. Исследование процессов ультразвукового диспергирования СОТС

УЗ обработке подвергались СОТС. В разных опытах использовались три разновидности СОТС, объемами 50 (УДНЧ), 100 (УДВЧ) и 300 мл (УЗД) [128].

УЗ обработку вели с помощью установки УДНЧ и УДВЧ, работающими в непрерывном режиме излучения. Удельная мощность излучателя, отнесенная к единице площади излучающей поверхности, составляла 22,5 Вт/см<sup>2</sup> и 40 Вт/см<sup>2</sup>. Длительность УЗ обработки  $t$  в разных опытах варьировали. В случае с диспергированием на УДНЧ длительность составляла 2, 5, 10, 15 мин. Для УДВЧ длительность варьировалась 5, 10 и 15 мин. В первоначальном состоянии эмульсия перемешивалась на орбитальном шейкере ИКА KS 260 (диаметр орбиты вращения 10 мм, частота вращения 300 об/мин, длительность перемешивания 1 мин).

Также УЗ обработка проводилась с помощью установки УЗДН-0,4–20. Избыточное давление в жидкости в процессе УЗ обработки составляло 5 бар. Объем обрабатываемой эмульсии СОТС составлял 300 мл. Обработку осуществляли последовательно в несколько этапов с разными периодами 5 и 10 мин соответственно.

После каждого этапа обработки брали пробы эмульсии (0,01 мл) и исследовали их с помощью компьютерного микроскопа. Наблюдение вели в рамках трех наиболее характерных полей зрения микроскопа. Эксперимент проводили с определенными заданными параметрами: частота 20000 Гц, напряжение 400...600 В, сила тока – 150...550 мА, мощность – 90 % от заданной.

Главной целью экспериментов было выявить принципиальные возможности повышения степени дисперсности эмульсий за счет диспергирования в условиях ультразвукового воздействия.

В ходе опытов исследовали влияние  $t$  на изменение  $T$  и среднего размера  $R_{cp}$  масляных «шариков» (глобул). Поведение масляных «шариков» наблюдали в капле эмульсии объемом 0,01 мл с помощью КМ в трёх характерных полях зрения микроскопа, в целом отражавших основное состояние эмульсий в капле.

На рис. 5.14–5.16 показаны графики зависимости  $T(t)$  для различных видов эмульсий.

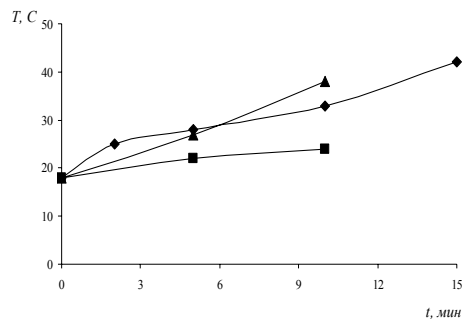


Рис. 5.14. Зависимости  $T(t)$  для СОТС №1 УЗ обработка: ▲ – УЗ обработка УДНЧ; ◆ – УЗ обработка УДВЧ; ■ – УЗ обработка УЗД

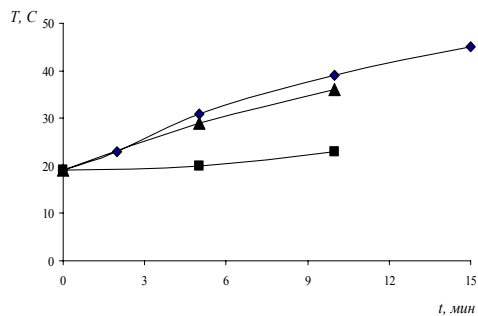


Рис. 5.15. Зависимости  $T(t)$  для СОТС №2 УЗ обработка: ▲ – УЗ обработка УДНЧ; ◆ – УЗ обработка УДВЧ; ■ – УЗ обработка УЗД

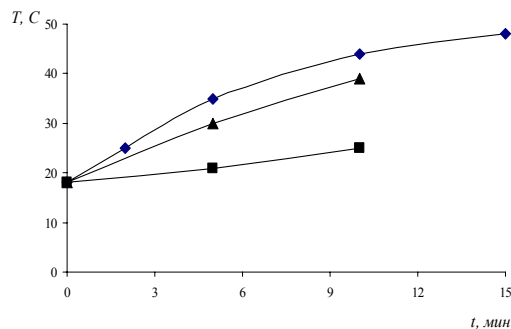


Рис. 5.16. Зависимости  $T(t)$  для СОТС №3 УЗ обработка: ▲ – УЗ обработка УДНЧ; ◆ – УЗ обработка УДВЧ; ■ – УЗ обработка УЗД

На рис. 5.17 показан график зависимостей  $R_{cp}(t)$  для СОТС №1.

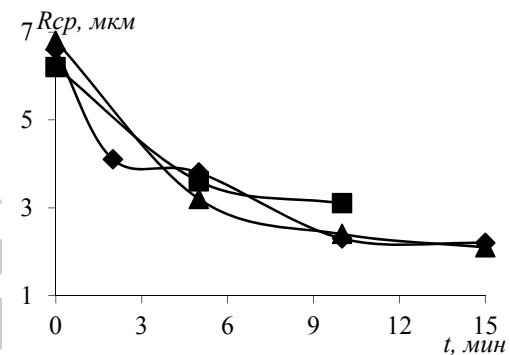


Рис. 5.17. Зависимости  $R_{cp}(t)$  для СОТС №1 при УЗ обработки: ▲ – УЗ обработка УДНЧ; ◆ – УЗ обработка УДВЧ; ■ – УЗ обработка УЗД

На рис. 5.18 показаны графики зависимостей  $R_{cp}(t)$  для СОТС №2.

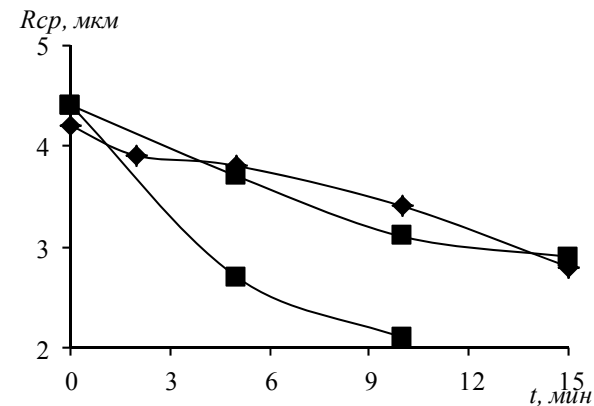


Рис. 5.18. Зависимости  $R_{cp}(t)$  для СОТС №2 при УЗ обработки: ▲ – УЗ обработка УДНЧ; ◆ – УЗ обработка УДВЧ; ■ – УЗ обработка УЗД

На рис. 5.19 показаны графики зависимостей  $R_{cp}(t)$  для СОТС №3.

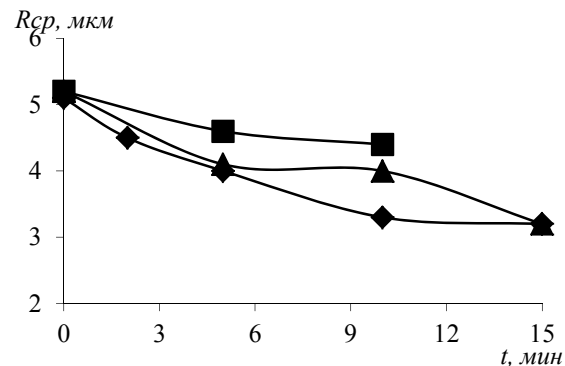


Рис. 5.19. Зависимости  $R_{cp}(t)$  для СОТС №3 при УЗ обработке: ▲ – УЗ обработка УДНЧ; ◆ – УЗ обработка УДВЧ; ■ – УЗ обработка УЗД

На рис. 5.20 показаны графики зависимостей  $R_{cp}(t)$  при УЗ обработки УЗНЧ.

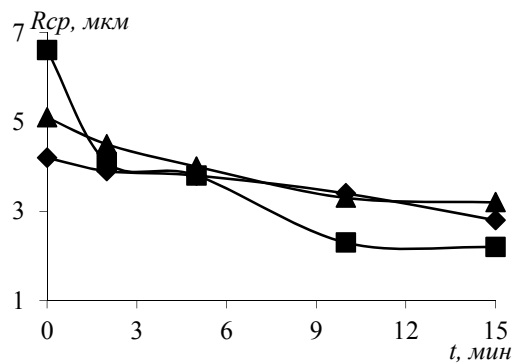


Рис. 5.20. Зависимости  $R_{cp}(t)$  при УЗ обработки УЗНЧ: ▲ – СОТС №1; ◆ – СОТС №2; ■ – СОТС №3

На рис. 5.21 показаны графики зависимостей  $R_{cp}(t)$  при УЗ обработки УЗВЧ.

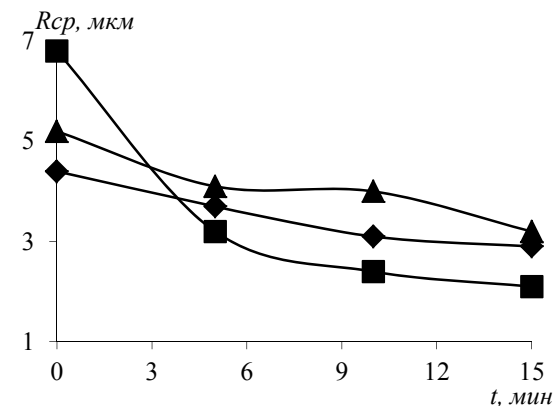


Рис. 5.21. Зависимости  $R_{cp}(t)$  при УЗ обработки УЗВЧ: ▲ – СОТС №1; ◆ – СОТС №2; ■ – СОТС №3

На рис. 5.22 показаны графики зависимостей  $R_{cp}(t)$  при УЗ обработки УЗД.

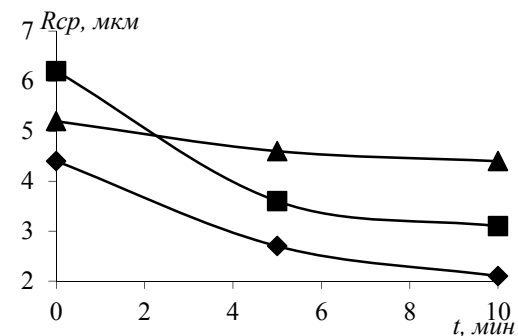


Рис. 5.22. Зависимости  $R_{cp}(t)$  при УЗ обработки УЗД: ▲ – СОТС №1; ◆ – СОТС №2; ■ – СОТС №3

Наиболее эффективное воздействие УЗ при применении УЗНЧ на «измельчение» глобул характерно для СОТС №1, при применении УЗВЧ – СОТС №1, при применении УЗД – СОТС №2. Результаты экспериментов  $R_{cp}(t)$  приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Результаты экспериментов  $R_{cp}(t)$  по УЗ обработке

| Размеры<br>глобул в<br>эмуль-<br>сии, мкм | Время УЗ обработки, мин |     |     |     |     |                   |     |     |     |     |                     |     |
|---|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-----|---------------------|-----|
|   | УЗ обработка УЗНЧ       |     |     |     |     | УЗ обработка УЗВЧ |     |     |     |     | УЗ обработка<br>УЗД |     |
|   | 0                       | 2   | 5   | 10  | 15  | 0                 | 5   | 10  | 15  | 0   | 5                   | 10  |
| СОТС<br>№1                                | 6,6                     | 4,1 | 3,8 | 2,3 | 2,2 | 6,8               | 3,2 | 2,4 | 2,1 | 6,2 | 3,6                 | 3,1 |
| СОТС<br>№2                                | 4,2                     | 3,9 | 3,8 | 3,4 | 2,8 | 4,4               | 3,7 | 3,1 | 2,9 | 4,4 | 2,7                 | 2,1 |
| СОТС<br>№3                                | 5,1                     | 4,5 | 4,0 | 3,3 | 3,2 | 5,2               | 4,1 | 4,0 | 3,2 | 5,2 | 4,6                 | 4,4 |

При обработке УЗНЧ размеры глобул уменьшились:

- для СОТС №1 – в 3 раза;
- для СОТС №2 – 1,5 раза;
- для СОТС №3 – 1,6 раза.

При обработке УЗВЧ размеры глобул уменьшились:

- для СОТС №1 – в 3,2 раза;
- для СОТС №2 – 1,5 раза;
- для СОТС №3 – 1,6 раза.

При обработке УЗД размеры глобул уменьшились:

- для СОТС №1 – в 2 раза;
- для СОТС №2 – 2,2 раза;
- для СОТС №3 – 1,2 раза.

Анализ результатов исследований показывает, что, как правило, с увеличением длительности УЗ обработки средний размер  $R_{cp}$  масляных «шариков» (глобул) уменьшается, причем также сначала сравнительно быстро, а затем все более медленно. Это свидетельствует о неравномерном развитии процесса УЗ диспергирования частиц, интенсивность которого со временем падает, что объясняется повышением стойкости частиц к кавитационному разрушению по мере уменьшения их размеров.

На рис. 5.23–5.25 приведены фотографии изменения состояния эмульсии в зависимости от длительности УЗ обработки.

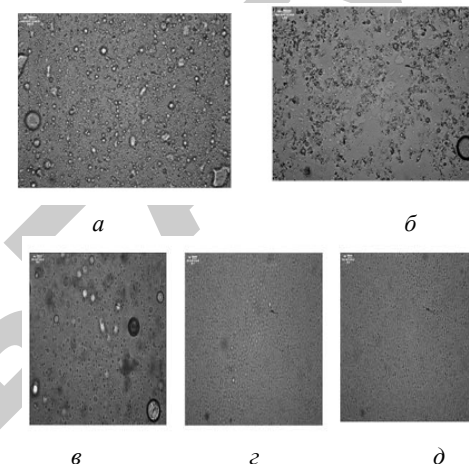


Рис. 5.23. Изменение состояния эмульсии в зависимости от длительности УЗ обработки: 0 – (без обработки) – (а); 2 – (б); 6 – (в) и 10 – (г); 15 мин – (д) (на примере СОТС №1 при обработке УЗНЧ)

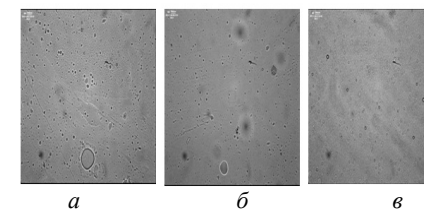


Рис. 5.24. Изменение состояния эмульсии в зависимости от длительности УЗ обработки: 0 (без обработки) – (а); 5 – (б); 10 мин – (в) (на примере СОТС №2 при обработке УЗВЧ)

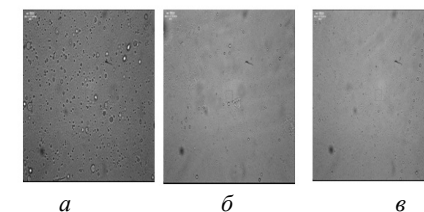


Рис. 5.25. Изменение состояния эмульсии в зависимости от длительности УЗ обработки: 0 (без обработки) – (а); 5 – (б); 10 мин – (в) (на примере СОТС №3 при обработке УЗД)

### 5.2.4. Методика исследования смазочно-охлаждающих технологических средств, оборудование и аппаратура

Получение показателей физико-химической оценки качества данных СОТС произведен согласно ОСТ 380-1327-83, взятие проб осуществлялось в соответствии с ГОСТ 2517-85. Используемые методы оценки и нормативно-техническая документация представлены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Методы оценки СОТС и нормативно-техническая документация

| Показатель качества  | ГОСТ, ТУ      |
|--|---------------|
| 1  | 2             |
| Внешний вид  | 6243-75       |
| Запах  | ТУ на продукт |
| Вязкость кинематическая при 50 °С, сСт                         | 33-82         |
| Стабильность при хранении                                      | 6243-75       |
| Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>                         | 3900-85       |
| Стабильность при низких температурах                           | 6243-75       |
| Стабильность раствора (2 % на воде жесткостью 4,6 мг экв/литр) | 6243-75       |
| Корродирующее действие на металлы, г/л                         | 6243-75       |
| Сталь ГОСТ 1050-78   |               |
| Чугун ГОСТ 1412-85   |               |
| Число кислотное мг КОН на 1 г                                  | 11352-76      |
| Общая щелочность мг КОН на 1 г                                 | 11362-76      |
| Склонность к пенообразованию при 24 °С, см <sup>3</sup>        | ТУ на продукт |
| Устойчивость пены, см <sup>3</sup>                             | ТУ на продукт |
| Значение рН  | 6243-75       |

Требования безопасности и характеристика токсикогигиенических и пожароопасных свойств СОТС определялись соответственно ГОСТ 12.1.005-88 и 12.1.044-84.

### 5.2.5. Влияние состава смазочно-охлаждающих технологических средств на производительность магнитно-абразивной обработки и шероховатость поверхности

Одним из важных проявлений свойств СОТС является их моющее действие, оценка которого производилась по отдельным физико-химическим характеристикам: поверхностной активности, пептизирующей способности, смачиваемости. Моющее действие СОТС заключается в интенсивности удаления из зоны обработки продуктов диспергирования металла и изношенных частиц абразивного инструмента [129]. Проявлением СОТС также является охлаждающее действие, которое заключается в отводе тепла от обрабатываемой детали и режущего инструмента. Известно, что любая технологическая система может функционировать только при подводе к ней энергии, которая полностью или частично преобразуется в тепло. Процесс теплообмена и направление тепловых потоков обусловлены перераспределением температуры [130].

Эффективность теплоотвода обусловлена подачей СОТС в зону резания. Проникновение СОТС в данную зону при МАО определяется пористостью ферроабразивной среды в рабочем зазоре. Пористость можно рассчитать по формуле Козени — Кармана для зернистых сред:

$$k = C \frac{m^2 d^2}{(1-m)^2} \quad (5.21)$$

Здесь  $C$  – постоянная ( $C \approx 0,5 \cdot 10^{-2}$ ),  $m$  – пористость среды,  $d$  – внутренний масштаб (размер частицы ферроабразивного порошка), мкм.

Наличие поровых каналов, сечения которых резко и хаотично изменяются в пространстве вследствие неправильной формы и разнообразных размеров частиц, находящихся в рабочем зазоре, делает практически невозможным точное решение уравнения движения вязкой жидкости в таких условиях. В связи с этим при гидродинамическом изучении фильтрации пользуются упрощенными моделями пористой среды [131]. В нашем случае упрощенной моделью будут ФАП (поровые каналы представляют собой пучок цилиндрических трубок с параллельными осями) и ФАП, имеющий частицы преимущественно шарообразной формы (рис. 5.26).

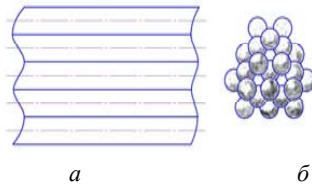


Рис. 5.26. Модель ФАП: *a* – пучок цилиндрических трубок с параллельными осями; *b* – ФАП, имеющий частицы преимущественно шарообразной формы

Пределы изменения просветности последнего ФАП:  $0,0931 \leq m \leq 0,2146$ .

Движение вязкой жидкости определяется уравнением Навье-Стокса:

$$\rho \left( \frac{\partial w_m}{\partial t} + w_j \frac{\partial w_m}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_m} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \eta \left( \frac{\partial w_m}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_m} - \frac{2}{3} \delta_{mj} \frac{\partial w_n}{\partial x_n} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \xi \frac{\partial w_n}{\partial x_n} \right). \quad (5.22)$$

Не учитывать влияние вязкости на скорость течения жидкости правомерно лишь на значительном расстоянии от ограничивающих поток твердых стенок ФАП. Поскольку на поверхности твердой стенки скорость жидкости равна нулю, то вблизи твердой стенки будет наблюдаться резкое изменение скорости жидкости. Областью таких изменений скорости является зона вблизи твердой стенки, в которой недопустимо пренебрегать вязкостью даже при больших значениях  $Re$ . Таким образом, поток жидкости можно условно разделить на основную часть потока (ядро потока), где можно не учитывать влияние вязкости и рассматривать ее как поток идеальной жидкости, и слой, вблизи твердой стенки, где обязательно необходимо учитывать действие вязкости.

Рассмотрим течение СОТС в каналах ФАП как течение вязкой жидкости по трубе постоянного сечения. Значения скорости, соответствующие данным условиям, устанавливается только на некотором расстоянии от входного сечения трубы. По мере удаления от входного сечения трубы слои жидкости, расположенные ближе к стенкам канала, будут тормозиться сильнее по сравнению со слоями ядра потока. В результате скорость по поперечному сечению канала будет изменяться, переходя из плоского в выпуклый, пока не достигнет степени выпуклости, вполне отвечающей условиям рассматриваемого течения. В дальнейшем значения скорости оста-

ются неизменными, и в любом сечении по длине канала она изменится от нуля у стенки до одного и того же наибольшего значения  $w_0$  на оси канала.

Скорость жидкости при движении в канале равна:

$$w_x = - \frac{R}{2\eta} \cdot \frac{dp}{dx} z, \quad (5.23)$$

где  $R$  – радиус канала, м;

$\eta$  – динамическая вязкость жидкости, (Н·с)/м<sup>2</sup>;

$p$  – давление, Н/м<sup>2</sup>.

Скорость на оси канала следующая:

$$w_0 = - \frac{R^2}{4\eta} \cdot \frac{dp}{dx}. \quad (5.24)$$

Средняя скорость течения жидкости по каналу определяется таким образом:

$$\bar{w} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R w_x 2\pi r dr = - \frac{R^2}{8\eta} \cdot \frac{dp}{dx} = \frac{w_0}{2}. \quad (5.25)$$

Вычислим коэффициент объемной вязкости  $\xi$ . По определению

$$\xi = - \frac{2D}{\rho \bar{w}^2} \cdot \frac{dp}{dx}; \quad \frac{dp}{dx} = - \frac{32\eta}{D^2} \bar{w}, \text{ следовательно,}$$

$$\xi = \frac{64\eta}{\rho \bar{w} D} = \frac{64}{Re}. \quad (5.26)$$

Здесь  $D$  – диаметр канала, м,  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Однако в зоне вблизи твердой стенки, при наличии магнитного поля, падение скорости при приближении к стенке связано с действием сил трения в ЭМП, т.е. обусловлено как обычной вязкостью, так и «магнитной» вязкостью жидкости, пренебрегать которыми в данном случае не предоставляется возможным даже при больших значениях  $Re$  [132].

Таким образом, главным фактором при создании нового вида СОТС на основе ПАВ является подбор компонентов и их физико-



химических свойств, влияющих на производительность и шероховатость обработки деталей машин посредством механизма поверхностных явлений на границе раздела фаз.

Известные СОТС для МАО характеризуются такими недостатками, как слабое моющее действие, засаливание поверхности инструмента или абразивной частицы порошка из-за большого содержания минеральных масел. По этой причине они не обеспечивают стабильность режущих и смазочных свойств. В [133] представлены результаты исследований различных ПАВ, применяемых для очистки деталей из черных и цветных металлов, и одним из наиболее эффективных признано неионогенное ПАВ ОП-10 ГОСТ 8433–81. Его состав представляет собой полиэтиленовый эфир диалкилфенола (алкильный остаток, содержащий 8...10 атомов углерода) с 10...12 молями оксиэтилена. Коэффициент поверхностного натяжения ПАВ ОП-10 составляет 10...34,47 МДж/м<sup>2</sup>, поверхностная активность – 109, 44 дин×л/(см×г), критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) – 0,3 г/л, по сравнению с другими ПАВ набор данных характеристик обеспечивают лучшие моющие свойства. Эти характеристики важны экономически и позволяют определить оптимальный расход ПАВ, необходимый для создания наиболее эффективного моющего действия. Расширение технологических возможностей процесса МАО достигается созданием нового вида СОТС для черных металлов, включающего в себя триэтаноламин ТУ 2423-168-00203335–2007, олеиновую кислоту ГОСТ 7580–91, нитрит натрия ГОСТ 19906–74, мылонафт ГОСТ 13302–77, тринатрийфосфат ГОСТ 201–76, эмульгатор ОП-10 ГОСТ 8433–81. Соотношение компонентов СОТС указано в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Химические составы образцов СОТС

| Компонент, мас. %                        | Составы СОТС |     |     |
|--|--------------|-----|-----|
|  | I            | II  | III |
| Триэтаноламиновое мыло олеиновой кислоты | 0,4          | 0,5 | 0,6 |
| Мылонафт                                 | 0,5          | 0,6 | 0,7 |
| Эмульгатор ОП-10                         | 0,5          | 0,6 | 0,7 |
| Тринатрийфосфат                          | 0,2          | 0,3 | 0,4 |
| Нитрит натрия                            | 0,2          | 0,3 | 0,4 |
| Вода                                     | Остальное    |     |     |

Введение мылонафта, являющегося разновидностью асидола, направлено на повышение режущих и смачивающих свойств и устойчивости при хранении СОТС. Он представляет собой техническую смесь натриевых мыл нафтеновых кислот, минерального масла и воды, изготавливается путем щелочной очистки керосиновых, газойлевых и соляровых дистиллятов нефти при содержании 45 % нафтенатов, 9...15 % неомыляемых веществ, 4...5 % минеральных солей, выпускается в виде вязкой массы желто-коричневого цвета. Триэтаноламин и олеиновая кислота образуют триэтаноламиновое мыло, которое является высокоэффективным смачивателем и приводит к обезжириванию металлических поверхностей. Нитрит натрия изолирует соли жидкостей и предотвращает их реакцию с мылами. Тринатрийфосфат применяется как средство для растворения всех видов минеральных загрязнений и, кроме того, его использование уменьшает величину поверхностного натяжения раствора.

Моющее действие данного вида СОТС и его эффективность определяются эмульгатором ОП-10 и концентрацией в растворе ПАВ. Эмульгатор ОП-10 относится к полиэтиленовому эфиру диалкилфенола, техническое соединение общей формулы которого  $RC_6H_4O(CH_2CH_2O)_nH$ , где  $R$  – алкил  $C_7$  и выше,  $n > 1$ . Его растворимость в воде зависит от соотношения мольной массы гидрофобного радикала  $R$  и гидрофильных оксиэтильных групп, которые обычно уменьшаются с повышением температуры. Эффективность моющего действия, согласно проведенным испытаниям, достигается при концентрации до 2 г/л. Увеличение концентрации эмульгатора ОП-10 в водном растворе более 2 г/л вызывает засаливание ферроабразивной «щетки», играющей роль инструмента при МАО. Такая ситуация находит свое объяснение в том, что показатель ККМ эмульгатора ОП-10 обычно не превышает 0,2 г/л и поэтому наличие достаточного количества мицелл сферической формы хорошо удерживает масляные загрязнения. Увеличение концентраций ОП-10 в растворе СОТС связано с перестройкой мицелл, что приводит к образованию типов: слоистого или мицелл Мак-Бена, а также смешанного. Эти мицеллы в отличие от сферических сольбизируют смазку и по данной причине только до определенной концентрации ОП-10 в растворе СОТС степень очистки (моющее действие) возрастает, а затем падает.

Предложенное соотношение компонентов позволяет получить обрабатываемый материал с более высокими эксплуатационными качествами и наименьшими затратами по сравнению с прототипом СинМА-1. Приготовление концентрата осуществляли простым механическим смешиванием компонентов при температуре 50...70 °С. Для MAO металлов используют 3 %-ный раствор концентрата в воде.

Для сравнения действия различных составов СОТС были проведены сравнительные испытания. Химические составы и физико-механические свойства испытуемых СОТС представлены в табл. 5.5 и 5.6.

Таблица 5.5

Физико-механические свойства предлагаемых составов СОТС

| Показатель  | Состав СОТС |     |      |
|---|-------------|-----|------|
|   | I           | II  | III  |
| Вязкость кинематическая при 50 °С, мм <sup>2</sup> /с | 92          | 98  | 106  |
| pH 3 %-ого раствора                                   | 8,7         | 8,5 | 9,0  |
| Склонность к пенообразованию, см <sup>3</sup>         | 570         | 530 | 528  |
| Устойчивость, см <sup>2</sup>                         | 136         | 150 | 142  |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                          | 950         | 982 | 1070 |

Таблица 5.6

Параметры и режимы магнитно-абразивной обработки

|   |  |
|---|--|
| Магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл | 0,9  |
| Скорость вращения детали, м/с           | 2,5  |
| Скорость осцилляции детали, м/с         | 0,15   |
| Амплитуда осцилляции, мм                | 3  |
| Рабочий зазор, мм                       | 1,5  |
| Режущий инструмент                      | Ферроабразивный порошок Ж15КТ, зернистость порошка 200...315 мкм |
| Время обработки, с                      | 60   |

Испытания составов СОТС производились на экспериментальной установке для MAO модели ЭУ-1. Параметры MAO приведены в табл. 5.7

Таблица 5.7

Результаты обработки образцов

| Состав СОТС | Массовый съём $\Delta G$ , мг | Шероховатость поверхности по параметру $Ra$ , мкм |
|-------------|-------------------------------|---|
| СинМА-1     | 4,33                          | 0,16  |
| I           | 7,90                          | 0,075   |
| II          | 8,69                          | 0,060   |
| III         | 8,24                          | 0,070   |

В качестве обрабатываемых образцов использовали кольца подшипника  $D \times d \times l = 35 \times 30 \times 30$  мм из стали ШХ15 ГОСТ 801–78. Исходные значения шероховатости параметра  $Ra$  поверхности образцов находились в пределах 1,2...1,8 мкм. В процессе испытаний оценивали массовый съём металла и шероховатость поверхности.

Массовый съём металла определяли как разность масс образцов до и после MAO. Определение массы исходных и обработанных образцов из стали ШХ15 производилось взвешиванием на лабораторных весах модели ВЛА-200-2М с точностью до  $\pm 0,001$  г. Исследование шероховатости поверхности образцов выполнялось на профилографе-профилометре мод. «252-Калибр». Значения показателей определялись как среднее арифметическое результатов замеров на пяти образцах.

Установили, что при увеличении количества воды (состав I) концентрат СОТС теряет некоторые свойства: снижается режущая способность. При уменьшении количества воды (состав III) происходят неполное растворение нитрита натрия, образование гидрофобных пленок на частицах ферроабразивного порошка и обрабатываемой поверхности из-за большого содержания мылонафта в растворе, в результате снижаются режущие и смазочные свойства СОТС.

Оптимальным является состав II, который обладает наименьшей кислотностью, наибольшей устойчивостью и хорошими технологическими свойствами, повышающими производительность MAO и снижающими шероховатость обрабатываемых поверхностей.

Анализ полученных результатов показал, что состав II по сравнению с составами I, III и прототипом СинМА-1 повышает производительность МАО в 1,5...2 раза, а также снижает шероховатость обрабатываемой поверхности в 2,5...3 раза. Кроме того, установлено, что при МАО с использованием состава II процесс обработки происходит более равномерно.

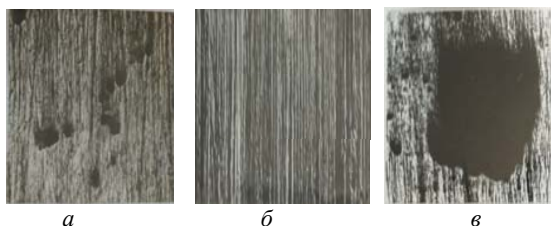


Рис. 5.27. Топография поверхности: *a* – после МАО 60 с; *б* – после МАО 120 с; *в* – после шлифования

В результате проведенных исследований по разработке нового вида СОТС для финишной обработки стали ШХ15 определена рецептура его приготовления (триэтаноламиновое мыло олеиновой кислоты 0,5, мылонафт 0,6, эмульгатор ОП-10 0,6, тринатрийфосфат 0,3, нитрит натрия 0,3, вода) и установлено, повышение производительности процесса резания, обусловленное повышением режущей способности ФАП в присутствии СОТС.

### 5.3. Качество обработанных поверхностей после МАО

Качество поверхности во многом определяется состоянием поверхностного слоя. Для деталей, к которым предъявляются требования повышенного сопротивления пластической деформации, прочности, износостойкости, являются важными такие характеристики поверхности, как шероховатость, отсутствие микротрещин, микротвердость, коррозионная стойкость. Основные свойства поверхности формируются в процессе изготовления и, особенно, на отделочных операциях, поэтому им в технологических процессах уделяется внимание. Возрастающие требования к надежности изготавливаемых деталей вызывает необходимость совершенствования технологического процесса его изготовления.

### 5.3.1. Методика исследования качественных и эксплуатационных показателей сложнопрофильных поверхностей, оборудование и аппаратура

Физико-механические параметры поверхностного слоя оценивались по величине твердости  $HRC_{\text{с}}$  по Роквеллу и микротвердости ( $H_{\mu}$ ) по Виккерсу; знаком и величиной напряжений I ( $\sigma_I$ ) и II ( $\sigma_{II}$ ) рода; дисперсностью блоков когерентного рассеяния (D).

Алмазная пирамида имеет большой угол при вершине ( $136^\circ$ ) и диагональ ее отпечатка примерно в 7 раз больше его глубины, что повышает точность измерения отпечатка даже при проникновении пирамиды на небольшую глубину и делает этот способ особенно целесообразным для определения твердости тонких слоев.

Для всестороннего изучения необходимо знать не только «усредненную» твердость, представляющую ее в результате суммарного влияния структурных составляющих, но и микротвердость отдельных структурных составляющих. Твердость поверхности и структур измерялась на твердомере ТК2-М, микротвердомере ПМТ-3 и «Бюллер». Испытания проводились при нагрузке на индентор 0,98 Н. Порядок подготовки образцов, тарировки прибора, приемы измерения и оценка полученных величин проводилась согласно [134].

Глубина упрочненного слоя характеризует величину распространения пластической деформации.

Глубина наклепа определялась методом измерения микротвердости при помощи косых и прямых срезов. Уколы делались в однородные по структуре зоны, последовательно, от края вглубь образца через 0,05 мм в шахматном порядке до получения исходной твердости. Первый укол, как и при определении поверхностной микротвердости, наносился на расстоянии 0,03...0,05 мм от края по торцу образца, а на косом срезе – на расстоянии 0,01...0,02 мм по глубине. Косые срезы использовались для исследования глубины наклепа закаленного наплавленного покрытия.

Измерение микротвердости осуществляли методом восстановленного отпечатка по формуле:

$$H = \frac{2P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2}, \quad (5.27)$$

где  $P$  – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, Н;

$d$  – диагональ отпечатка, мм;

$\alpha$  – пространственный угол в вершине.

При исследовании микротвердости поверхности, не подвергаемой травлению, неизбежен разброс показаний прибора ПМТ-3, вследствие того, что индентор попадает на различные участки частиц порошка и межзеренной структуры. Для устранения данного недостатка было принято число точек измерения, равное 50, на трассе измерения 4 мм для каждого наклонного среза.

Исследование шероховатости поверхности образцов проводилось на профилографе-профилометре «Калибр-252», «Калибр-201», «Калибр-296».

Шероховатость поверхности фиксировалась на профилограмме. Запись профилограмм проводилась на следующих режимах: скорость датчика 231– 0,2 мм/мин, скорость бумаги – 40 мм/мин, длина трассы интегрирования – 1,6 мм, базовая длина – 0,25 мм, горизонтальное увеличение – 200, вертикальное увеличение – 4000, 10000. Для снятия профилограмм использовались образцы  $\phi$  50 мм и длиной 55 мм.

Шероховатость поверхности оценивалась по параметру  $R_a$ .

Исследование микроструктуры проводилось на микрошлифах. Исследования проводились в светлом поле на большом горизонтальном металлографическом микроскопе МИМ-8 при увеличениях от  $\times 100$  до  $\times 800$ . Для выявления микроструктуры применялось травление в 2...3 % -ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте и травителе Марбле. Время травления зависело от химического состава металла и степени деформирования. Методика подготовки микрошлифов и выполнения микроструктурного анализа соответствовала имеющимся рекомендациям [134].

Рентгеноструктурные исследования осуществлялись на дифрактометре ДРОН-3.0 путем регистрации рентгеновских интерференционных максимумов ионизационным методом. Съемка велась в моно-

хроматизированных  $CuK_{\alpha}$  и  $CoK_{\alpha}$  излучениях. Определяли физическое уширение интерференционных линий от кристаллографических плоскостей (110), (220) и (211). Условия съемки: ширина щели 1...1...0,1 мм, напряжение на рентгеновской трубке 30 кВ; сила тока 12 мА; скорость движения диаграммной бумаги 4800 мм/час.

Определение дисперсности блоков когерентного рассеяния и микронапряжений 2-го рода производилось по ширине интерференционных линий на рентгенограмме. Ширина линий на рентгенограмме обусловлена геометрическими условиями съемки, немонотонностью рентгеновского излучения и физическими факторами (микроискажениями и дисперсностью блоков когерентного рассеяния). Для определения физического уширения линий производится следующий расчет. Определяли общую ширину линий (В), как отношение площади (S), заключенной между кривой интенсивности линии на рентгенограмме и прямой, соединяющей уровень фона по обе стороны этой кривой, к высоте ординаты (J) максимума интенсивности.

$$B' = \frac{S}{J} \text{ мм.} \quad (5.28)$$

Площадь (S) находилась планиметрированием. Каждая рентгенограмма измерялась не менее трех раз. Ширина линии (В) с учетом масштаба записи определялась по формуле:

$$B = \frac{R \cdot B'}{80 \cdot 57,3}, \quad (5.29)$$

где  $R$  – расстояние от образца до щели счетчика ( $R = 160$  мм);

57,3 – коэффициент перевода градусов в радианы;

80 – угловой масштаб записи ( $1^\circ$  поворота счетчика соответствует 80 мм на диаграмме при скорости 4800 мм/час).

Затем определяли междулетное расстояние (расстояние между максимумами линий  $K\alpha_1$  и  $K\alpha_2$ ) для расчетных линий:

$$\delta = 2 \cdot R \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda \cdot \alpha_1} \cdot \text{tg}\theta \text{ мм,}$$

где  $\Delta\lambda = \lambda_{\alpha 2} - \lambda_{\alpha 1}$ .

Для кобальтового излучения  $\lambda_{\alpha 1} = 1,78892 \text{ \AA}$ ,  $\lambda_{\alpha 2} = 1,79278 \text{ \AA}$ ,  $\delta = 0,691 \cdot \text{tg} \theta$ , мм.

Угол  $\theta$  определяли по уравнению Вульфа-Брегга для кубической решетки:

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda_{\alpha 1}^2}{4a} (h^2 + k^2 + l^2). \quad (5.30)$$

где  $a$  – параметр решетки железа, равный  $2,8610 \text{ \AA}$ ;  $h, k, l$  – индексы кристаллографических плоскостей.

Значения углов  $\theta_{(110)}$ ,  $\theta_{(220)}$ ,  $\theta_{(211)}$  соответственно будут равны  $26^\circ 18'$ ,  $62^\circ 18'$  и  $50^\circ 06'$ .

Междублетные расстояния для расчетных линий соответственно следующие:

$$\theta_{(110)} = 0,341 \text{ мм}; \theta_{(220)} = 1,313 \text{ мм}; \theta_{(211)} = 0,825 \text{ мм}.$$

Для внесения поправки на некогерентность излучения, а также для определения физического уширения интерференционных линий аппроксимируем кривую распределения интенсивности записанных интерференционных линий исследуемых образцов определенной аналитической функцией. Достаточно хорошее совпадение с экспериментальными кривыми дала функция вида  $J = J_0 \cdot l^{-\alpha x^2}$ . Она и использовалась при расчетах.

Таким образом, зная функцию распределения интенсивности и междублетное расстояние для каждой линии, по графической зависимости  $\frac{B_0}{B}$  от  $\frac{\delta}{B}$  находили ширину линии ( $B$ ) с поправкой на некогерентность излучения.

Для определения физического уширения использовался метод съемки с эталоном. На ширине линий эталонных образцов тонкая структура не сказывается, так как микроискажения отсутствуют, а области когерентного рассеяния достаточно крупны. Согласно указанной функции между шириной линии эталонного образца ( $b_0$ ).

шириной линии исследуемого образца ( $B_0$ ) и физическим уширением линии исследуемого образца ( $\beta$ ) существует следующая зависимость:

$$\frac{\beta}{B_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{b_0}{B}\right)^2}. \quad (5.31)$$

По графику уравнения (5.31), выполненного в координатах  $\frac{\beta}{B_0}$ ,

$\frac{b_0}{B}$  находили физическое уширение  $\beta$ , зная рабочее  $\frac{b_0}{B_0}$  отношение

для каждого исследуемого образца.

Физическое уширение интерференционных линий может быть вызвано либо действием микроискажений решетки, либо дисперсностью блоков когерентного рассеяния, либо двумя факторами одновременно. Известно, что изменение дисперсности блоков больше сказывается на уширении линий кристаллографических плоскостей с малой суммой квадратов индексов, а наличие микроискажений 2-го рода на линиях с большой суммой квадратов индексов.

В исследованиях об изменениях величины микроискажений судили по физическому уширению  $\beta_2$  линий (220) и (211), а о дисперсности блоков когерентного рассеяния – по физическому уширению  $\beta_1$  линии (110).

В качестве эталонов использовались исходный образец и армко-железо. Напряжения оценивались по задней линии  $\alpha$ - фазы, аппроксимируя ее по функции  $y = (1 + 8x^2)^{-2}$ , а блочность структуры – по передней линии с аппроксимацией по функции  $y = (1 + 6x^2)^{-1}$ .

Исследование остаточных напряжений 1-го рода осуществлялась методом Н.Н. Давиденкова, основанного на измерении деформации детали по мере удаления напряженных слоев металла и вычисления величин напряжений, которые понадобились бы для устранения этих деформаций, и рентгеновским методом измерения. Удаление слоев металла производилось электрохимическим методом со скоростью  $0,05 \text{ мкм/с}$ . При вычислении величин напряжений учитывались уточнения, внесенные в методику М.А. Бабичевым и Л.А. Гликманом. Остаточные напряжения исследовались на глубине  $5 \text{ мкм}$ .

Остаточные напряжения в рассматриваемом слое определяли как сумму трех составляющих:

$$\sigma_m = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (5.32)$$

где  $\sigma_1$  – напряжение, удаляемое в рассматриваемом слое в результате разрезки образца по образующей, Па;

$\sigma_2$  – напряженно, удаляемое одновременно с удалением слоя, Па;

$\sigma_3$  – поправка, учитывающая изменения напряжения в удаляемом слое вследствие удаления всех предыдущих слоев, Па.

С учетом указанных замечаний остаточные напряжения определялись по следующим формулам:

$$\sigma_1 = \frac{2E\alpha}{3D_{cp}} \left( \frac{h}{2} - a \right) \delta_p;$$

$$\alpha = \frac{1}{1 - \mu^2},$$

где  $E$  – модуль упругости, Па;

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий невозможность искривления стенок кольца в осевой плоскости;

$D_{cp}$  – средний диаметр образца, мм;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$h$  – радиальная толщина образца, мм;

$a$  – толщина снятого слоя, мм;

$\delta_p$  – изменение диаметра образца после разрезания вдоль образующей, мм.

$$\sigma_2 = \frac{2E\alpha}{3D_{cp}} (h-a)^2 \frac{d\delta}{da},$$

где  $\frac{d\delta}{da}$  – изменение диаметра образца в процессе стравливания слоев, мм.

Входящая в формулу производная определялась с помощью параболической аппроксимации.

$$\sigma_3 = \frac{2E\alpha}{3D_{cp}} \left[ 4(h-a)\delta(a) - 2 \int_0^a \delta(\xi) d\xi \right],$$

где  $\xi$  – текущая координата всех снятых слоев.

Интеграл вычисляется по правилу трапеций.

Модуль упругости и коэффициент Пуассона принимался с учетом данных работы [135].

Оценка напряжений осуществлялась путем съемки рентгенограммы испытуемого образца и рентгенограммы образца, свободного от напряжений по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{E}{\mu} \operatorname{ctg}\theta \frac{\Delta L}{2M} \frac{1}{57,3}, \quad (5.33)$$

где  $E$  – модуль упругости материала,  $2,1 \dots 2,2 \cdot 10^5$  МПа;

$\mu$  – коэффициент Пуассона,  $0,25 \dots 0,3$ ;

$\theta$  – угол отражения рентгеновского луча;

$M$  – масштаб записи;

$\Delta L$  – смещение максимума записи.

Для расчета характеристик тонкой кристаллической структуры в виде напряжений II-го рода использовался метод аппроксимации. На основании системы уравнений находятся величины  $D$  и  $\Delta a/a$ :

$$m = \frac{2L}{D \cos\theta}. \quad (5.34)$$

$$n = \frac{2\Delta a}{a} \operatorname{tg}\theta, \quad (5.35)$$

где  $m$  и  $n$  – составные части физического уширения рентгеновской линии;

- $L$  – длина волны рентгеновского излучения;
- $D$  – величина блоков когерентного рассеяния;
- $\Delta a/a$  – относительное искажение кристаллической решетки;
- $\theta$  – угол отражения рентгеновского луча.

Рассчитав по формуле междублетное расстояние

$$\delta = \frac{L_2 - L_1}{L_{cp}} \operatorname{tg} \theta, \quad (5.36)$$

находят исправленные значения ширины линии. Таким образом, используя метод определения параметров линейно-напряженного состояния металла по смещению линий рентгенограммы, вычисляются значения напряжений второго рода  $\sigma_2$ .

Производительность оценивали по массе удаленного металла в единицу времени. Для этого взвешивали образцы до и после обработки на электронных весах OHAUS AR5120. Перед измерениями производили калибровку перечисленных приборов, используя эталонные образцы. Через каждые 2 минуты обработки производили контрольное взвешивание детали на электронных весах OHAUS № AR5120 (рис. 5.28, а), а также производили измерения наружного диаметра детали на устройстве, приведенном на рис. 5.28, б.



а



б

Рис. 5.28. Фотография оценки качества обработки: а – контрольное взвешивание на весах; б – измерение наружного диаметра колеса

Для количественного измерения коррозии материала применялся массовый метод, который связан с определением массы после выдержки в течении заданного времени в рабочей среде.

Скорость коррозии находилась по формуле:

$$K_M = \frac{q_0 - q_1}{S \cdot t}, \quad (5.37)$$

- где  $q_0$  – масса исходного образца, г;
- $q_1$  – масса образца после испытаний, г;
- $S$  – площадь поверхности, мм<sup>2</sup>;
- $t$  – время испытаний, с.

Пересчет массового показателя коррозии на глубинный (мм в год) производился по формуле:

$$K_n = 8,76 \frac{K_M}{\rho}, \quad (5.38)$$

где  $\rho$  – плотность металла, г/см<sup>3</sup>.

При проведении испытаний предусматривались исследования износостойкости в условиях, максимально приближающихся к эксплуатационным.

Первый этап исследования износостойкости проводился со смазкой, содержащей абразив.

Испытания проводили на машине трения 2070-СМТ1 в условиях трения качения, оборудованной специальным приспособлением, позволяющим подводить в место контакта трущихся образцов взвешенный в смазке абразив.

В качестве абразива применялась кварцевая пыль, изготовленная из песка фракционного состава, представленного в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Фракционный состав кварцевой пыли

| Размеры частиц, мкм                 | 0-10 | 10-20 | 20-30 | >30 |
|-------------------------------------|------|-------|-------|-----|
| Содержание частиц, массовая доля, % | 41   | 34    | 13    | 12  |

В исследовании количество абразива составляло 2 % по объему к маслу индустриальному И12А.

Испытания проводились при давлении 2,45 МПа, со скоростью скольжения 0,89 м/с. Контртелом служили частичные вкладыши из нормализованного серого чугуна или из стали 10, 20, 45. Площадь поверхности частичных вкладышей – 2 см<sup>2</sup>. За базу испытания брали 4·10<sup>4</sup> оборотов ролика (путь трения 5 км).

Разность размеров образца и контртела в каждом сечении до и после изнашивания составляла величину износа за весь опыт.

Величину удельного износа определяли по формуле:

$$I = \frac{I_{\text{ср}}}{I_{\text{тр}}} \text{ мкм/км},$$

где  $I_{\text{ср}}$  – средний износ образца за опыт, мкм;

$I_{\text{тр}}$  – путь трения за опыт, км.

Для сравнительной оценки сопротивления изнашиванию принята величина относительной износостойкости, определяемой по выражению:

$$\varepsilon = \frac{I_{\text{э}}}{I_{\text{о}}},$$

где  $\varepsilon$  – относительная износостойкость;

$I_{\text{э}}$  – износ эталона, мкм;

$I_{\text{о}}$  – износ образца, мкм.

Известно, что число наблюдений (повторность опыта) зависит от среднего квадратического отклонения и необходимой надежности (достоверности) результата. Чем больше относительные колебания результатов и чем выше необходимая надежность опыта, тем больше должно быть повторностей опыта. Повторность опытов определялась на основании результатов статической обработки предварительных испытаний. При этом надежность задавалась равной 0,9...0,95. Принятая повторность опытов при исследовании приведена в табл. 5.9.

Повторность опытов при определении характеристик образцов

| №п/п | Определяемая характеристика | Повторность опыта                   |  |       |
|------|-----------------------------|-------------------------------------|--|-------|
|      |                             | По количеству испытываемых образцов | По количеству опытов на каждом образце | Общая |
| 1    | 2                           | 3                                   | 4                                      | 5     |
| 1    | Твердость                   | 3                                   | 10                                     | 30    |
| 2    | Микротвердость              | 3                                   | 10-20                                  | 30-60 |
| 3    | Глубина упрочнения          | 3                                   | 20                                     | 60    |
| 4    | Ударная вязкость            | 10                                  | 1                                      | 10    |
| 5    | Шероховатость поверхности   | 3                                   | 3                                      | 9     |
| 6    | Тонкая структура            | 3                                   | 3                                      | 9     |
| 7    | Остаточные напряжения       | 5                                   | 1                                      | 5     |
| 8    | Усталостная прочность       | 6-8                                 | 1                                      | 6-8   |
| 9    | Износ                       | 3-4                                 | 3                                      | 9-12  |
| 10   | Момент трения               | 3                                   | 3                                      | 9     |

Из всех  $n$  отдельных результатов измерений  $x_1, x_2, \dots, x_n$  находим среднее арифметическое  $\bar{x}$  как наиболее вероятное значение измеряемой величины при данном количестве измерений.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Рассеивание результатов измерений, характеризующее их точность, оценивалось дисперсией  $S^2$  или средним квадратическим отклонением (стандартом)  $S$ . Дисперсия  $S^2$  определялась по формуле:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (5.39)$$

Среднее квадратическое отклонение (стандарт)  $S$  находим по выражению:



$$S^2 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}. \quad (5.40)$$

Относительная величина среднего квадратического отклонения оценивалась коэффициентом вариации:

$$V = \frac{s}{x} \cdot 100\% .$$

Сомнительные значения экспериментальных данных, резко отличающихся от других результатов, повторялись с помощью критерия Ирвина [136].

Точность результатов исследования оценивали показателем точности  $p$ :

$$p = \frac{V}{\sqrt{n}} \%, \quad (5.41)$$

где  $n$  - повторность опыта.

### 5.3.2. Влияние реверсивного вращения зубчатого колеса в процессе магнитно-абразивной обработки на качество обрабатываемых поверхностей зубьев

Экспериментально установлено, что поверхность венца зубчатого колеса в процессе обработки покрывается щеткой из ФАП (рис. 5.29), что нехарактерно для деталей цилиндрической формы.



Рис. 5.29. Покрытие сложнопрофильной поверхности детали щеткой из ФАП:  $a$  – фронтальный вид;  $b$  – общий вид

Объясняется это тем, что кромки прерывистой поверхности являются концентраторами магнитного поля, они наиболее подвержены «аккумуляции» магнитного поля [137].

В начале обработки щетка из ФАП имеет небольшой объем, но в процессе обработки деталь намагничивается, и объем щетки увеличивается. После снятия магнитного поля объем щетки определенное время сохраняется за счет остаточной намагниченности детали, что способствует продолжению процесса обработки, но через некоторое время объем щетки уменьшается и процесс затухает.

Следует отметить, что объем щетки прямо пропорционально зависит от степени наполнения ФАП рабочей зоны установки. При достаточном количестве порошка в зоне нет необходимости в постоянном питании процесса порошком из бункера-дозатора, т.к. движение порошка при МАО обретает замкнутый характер за счет вращения детали и разнополярности наконечников. Для реверсивного вращения обрабатываемой детали были изготовлены наконечники с двумя клинообразующими частями (рис. 5.30).

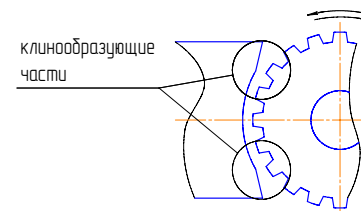


Рис. 5.30. Форма наконечников для реверсивной МАО

Для определения времени реверсивного движения был проведен следующий эксперимент. Обработывалась партия шестерен 260-1005030 ( $m = 2,5$  мм), сталь 18 ХГТ, HRC 62...64 в количестве 9 шт. Режимы обработки: вращение детали –  $n = 12,5$  мин<sup>-1</sup>; амплитуда осцилляции –  $A = 2$  мм; скорость осцилляции –  $V_{ос} = 0,1$  м/с; зазор зоны обработки –  $\delta = 1$  мм; объем подаваемого порошка –  $V_{пор} = 3,32 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/с; магнитная индукция –  $B = 1$  Тл;  $\tau = 2$  мин. Вращение – против часовой стрелки.

Обработанные шестерни были разделены на 3 партии, каждая из которых обрабатывалась по часовой стрелки на 10 с больше преды-

дущей. Шероховатость рабочей поверхности после MAO измеряли вдоль рабочих поверхностей в четырех точках.

На основании опыта были построены зависимости изменения шероховатости по эвольвенте после MAO (рис. 5.31, а, б, в).

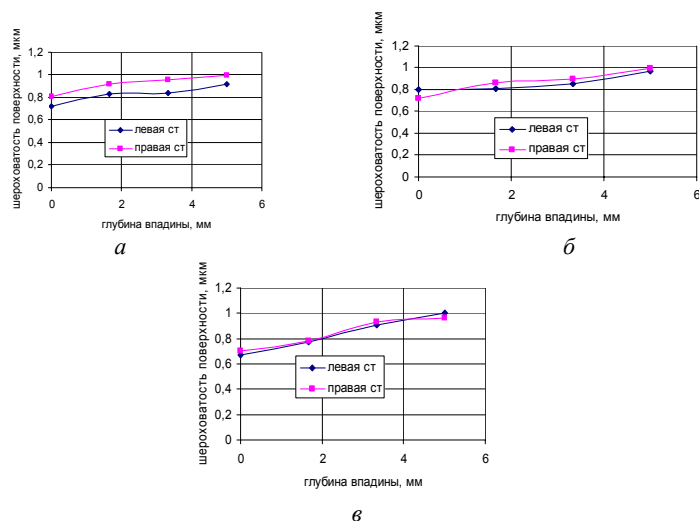


Рис. 5.31. Зависимости изменения шероховатости по эвольвенте после MAO: а – время обработки 120 с против часовой стрелки, 10 с по часовой; б – время обработки 120 с против часовой стрелки, 20 с по часовой; в – время обработки 120 с против часовой стрелки, 30 с по часовой

Анализируя рис. 5.31, можно сделать вывод, что в процессе MAO наконечниками (рис. 5.30) с целью равномерной обработки рабочих поверхностей зубьев необходимо выполнять реверс вращения детали – 2 мин против часовой стрелки и 30 с по часовой.

### 5.3.3. Формирование шероховатости рабочих поверхностей при магнитно-абразивной обработке уплотненным во впадине ферроабразивным порошком

При обработке деталей уплотненным абразивом удаляется тонкий поверхностный слой металла, определяемый величиной исходной шероховатости. Снятие металла происходит главным образом

за счет микроскобления и субмикроскобления. До полного устранения исходных неровностей профиля поверхности результирующая шероховатость определяется как остаточная исходная шероховатость плюс, наложенная за счет микроскобления.

После устранения исходных неровностей шероховатость поверхности обработанной детали зависит только от параметров микроскобления и субмикроскобления.

Рассматриваемый способ обработки можно считать процессом, аналогичным хонингованию в режиме самозатачивания, которое в данном способе производится естественным путем в результате частичного выкрашивания и разрушения абразивных зерен от трения их контактирующих поверхностей друг с другом и с металлом обрабатываемой поверхности. Кроме того, в магнитном поле происходит ориентация их наибольших осей вдоль силовых линий поля радиально обрабатываемой поверхности зуба.

Вследствие многовершинного характера контактирования каждой единичной абразивной частицы порошка с поверхностью из-за высокой плотности абразивных зерен, приходящихся на единицу площади обрабатываемой поверхности, рассматриваемый процесс имеет высокую плотность контактирования с обрабатываемой поверхностью. В связи с этим его можно сравнить с процессом хонингования тонкими и мелкозернистыми абразивными брусками, в которых роль абразивных зерен выполняют микронеровности профиля контактирующих вершин. Поэтому можно считать, что шероховатость рабочей поверхности зубчатого колеса формируется в результате массового суммарного воздействия микронеровностей зерен ФАП на микронеровности обрабатываемой поверхности зуба. Зубчатые венцы с  $m = 3,5$  мм обрабатывались после операций зубофрезерования и химико-термической обработки (цементации). В процессе MAO образовывался радиус кривизны линии притупления продольной кромки зуба, обработка рабочей поверхности зубьев от кромки, также была равной 1...2 мм (рис. 5.32, а, б), что для данного модуля зуба неэффективно.

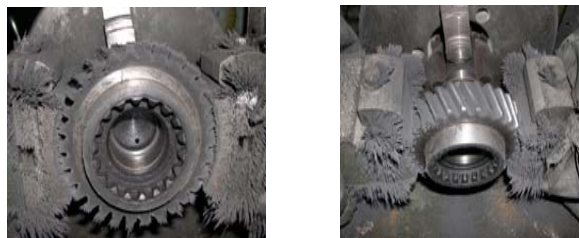


Рис. 5.32. MAO зубчатого венца с  $m = 3,5$  мм: *a* – фронтальный вид; *б* – вид сверху (общий вид)

Результаты предварительных экспериментов подтвердили неэффективность MAO эквидистантными полюсными наконечниками зубчатых колес со средним и крупным модулем.

Проводили обработку шестерни 260-1005030 ( $m = 2,5$  мм), сталь 18 ХГТ, HRC 62...64. Режимы обработки: вращение детали –  $n = 12,5$  мин<sup>-1</sup>; амплитуда осцилляции –  $A = 2$  мм; скорость осцилляции –  $V_{ос} = 0,1$  м/с; зазор зоны обработки –  $\delta = 1$  мм; объем подаваемого порошка –  $V_{пор} = 3,32 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/с; магнитная индукция –  $B = 1$  Тл;  $\tau = 2$  мин.

Шероховатость рабочей поверхности после MAO, как показало измерение зуба вдоль рабочих поверхностей в четырех точках с двух сторон, не равномерна. От вершины к ножке зуба шероховатость увеличивается (рис. 5.33).

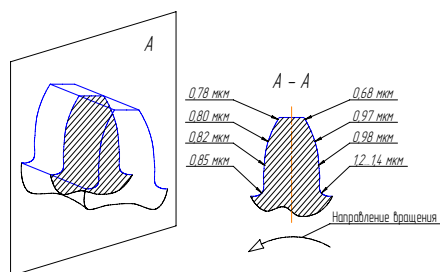


Рис. 5.33. Шероховатость рабочей поверхности зуба ( $m = 2,5$  мм) после MAO

Объясняется это тем, что уплотненная среда ФАП позволяет проникать магнитному полю во впадину (рис. 5.34). Поле фиксирует частицы порошка вдоль силовых линий, создавая тем самым уп-

рочнение образовавшегося хона, копирующего поверхность зубчатого колеса. По мере заглубления во впадину величина поля уменьшается, соответственно уменьшаются и силы прижатия порошка, упрочняющие хон, что способствует затуханию процесса микрорезания.

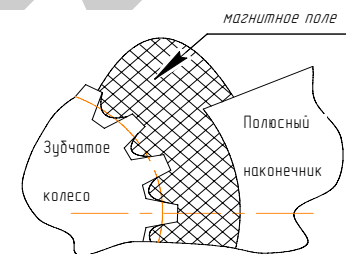


Рис. 5.34. Распределение силового воздействия поля в среде уплотненного ФАП

На основании полученных данных построены зависимости шероховатости по глубине впадины (рис. 5.35) после обработки, из которых видно, что на разных сторонах зуба значения шероховатости отличаются. Среднее значение шероховатости левой стороны меньше, чем правой. Обусловлено это тем, что в процессе обработки осуществлялось движение зубчатого колеса против часовой стрелки, что способствовало более сильному прижатию ФАП к обрабатываемой левой стороне зуба.

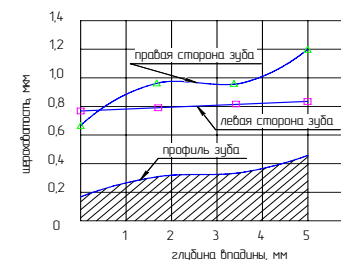


Рис. 5.35. Изменение шероховатости по эвольвенте после MAO

На основании вышесказанного следует отметить целесообразность реверсивного движения детали во время обработки, по несколько раз меняя направление движения.

### 5.3.4. Магнитно-абразивная обработка режущих инструментов

Поиск новых технологий для инструментальной промышленности необходим, чтобы обеспечить заданную форму и качество инструментов. Одним из перспективных процессов для названных целей является процесс магнитно-абразивной обработки режущих инструментов, а такими видами инструмента служат поворотные резцы для проходческих комбайнов [138] (рис. 5.36).



Рис. 5.36. Резцы РКС-1 после МАО (x 1,5)

Основные технические характеристики поворотных резцов РКС-1 для проходческих комбайнов приведены в табл. 5.10.

Таблица 5.10

Технические характеристики поворотных резцов РКС-1

| Наименование показателя, единица измерения                    | Исходный    | Экспериментальный (после МАО) |
|---|-------------|-------------------------------|
| Конструктивный вылет, мм                                      |             | 69                            |
| Диаметр хвостовика, мм  |             | 32                            |
| Длина хвостовика, мм  |             | 72                            |
| Форма головки вставки   |             | Коническая                    |
| Диаметр вставки, мм   |             | 15,5                          |
| Материал вставки  |             | ВК 8                          |
| Материал державки   |             | 30ХГСА                        |
| Шероховатость конической части державки, $Ra$ , мкм           | 6,4         | 0,75 - 0,8                    |
| Шероховатость твердосплавной вставки, по параметру $Ra$ , мкм | 3,2         | 0,6                           |
| Микротвердость конической части державки, НВ                  | 430 - 460   | 540 - 630                     |
| Микротвердость твердосплавной вставки, НВ                     | 1050 - 1170 | 1560 - 1720                   |

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

На образцах после МАО отчетливо видны следы обработки, имеющие довольно равномерную текстуру, как вдоль вектора скорости резания, так и по направлению осцилляции. Топография поверхности со следами микрорезания частицами ФАП стали 30ХГСА довольно сглаженная, без видимых нарушений поверхности и подтверждает, что основная масса материала уносится при МАО в виде стружки и навалы составляют до 20...30 %.

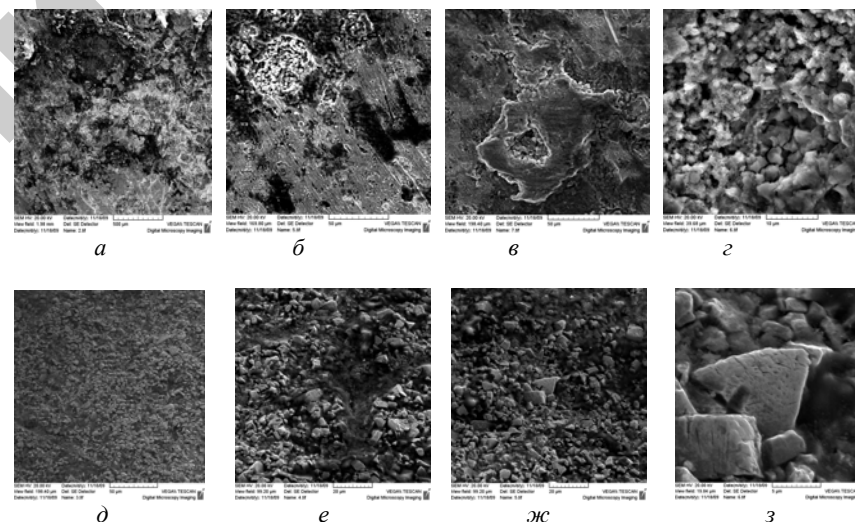


Рис. 5.37. Морфология поверхности резца РКС-1 после МАО и работы по породе: на стали 30ХГСА (а, б, в, г), на вставке ВК8 (д, е, ж, з)

Исследования на резцах РКС-1 после МАО и работы по породе показали, что на отдельных образцах отмечено вскрытие дефектного слоя, не удаленного на операции МАО. В неудаленные дефекты забивается разрушаемая порода (рис. 5.37, а, б). На их месте в первую очередь отмечается образование пленки (рис. 5.37, в). Частичный срыв пленки сопровождается последующим формированием массив-

ной пленки из деструктированной породы на конической части резца РКС-1. Отдельные армирующие вставки после работы по породе имеют продольные борозды, характеризуемые вырывами целых блоков карбидов вольфрама совместно со связкой. На отдельных образцах хорошо различимы сколы зерен вольфрама (рис. 5.37, з), которые впоследствии приводят к локальным вырывам зерен вольфрама, а затем и групп зерен со связкой.

### 5.3.5. Влияние технологических условий на структуру поверхностного слоя твердого сплава ВК8 после магнитно-абразивной обработки

При анализе состояния поверхности деталей качество их поверхности в определенных случаях характеризуется лишь величиной шероховатости поверхности и производится связь этого фактора с прочностью изделия [8]. Исследованиями авторов работы [16] установлено, что улучшение микрогеометрии поверхности способствует повышению прочности рабочих поверхностей, однако увеличение прочности в результате понижения шероховатости поверхности невелико и составляет в среднем 4...5 %.

Таким образом, микрогеометрия поверхности не является определяющим фактором, характеризующим прочность материалов. Процесс упрочнения твердого слоя в значительной степени связан с характеристиками их тонкой кристаллической структуры: размеров блоков мозаики (областей когерентного рассеяния) и величиной микроискажений решетки (напряжений II рода).

В настоящее время причинами упрочнения, согласно данным авторов [139], могут быть: возникновение механических препятствий скольжению; увеличение сил межатомных связей в кристаллической решетке; уменьшение размеров зерен структуры, когерентных областей (мозаичных блоков) и увеличение их взаимной дезориентации.

В рентгеноструктурных исследованиях размеры блоков мозаики и микроискажения кристаллической решетки карбидов вольфрама могут быть оценены с помощью физического уширения  $\beta$  отражения линий карбидов твердого сплава ВК8. Определяя влияние технологических условий процесса магнитно-абразивной обработки на

физическое уширение  $\beta$  в качестве переменных параметров были выбраны зернистость ферроабразивного порошка  $\Delta$  и магнитная индукция  $B$ , Тл. Исследуя влияние зернистости, значение которой изменялось в пределах от 150 до 350 мкм, остальные параметры сохранялись следующими: магнитная индукция  $B$ , принималось равным 1 Тл; смазочно-охлаждающее технологическое средство синтетическое СинМА-1 (ТУ 38.5901176) 91,3 % -ный водный раствор, капельная подача принудительным способом, удельный расход 200...250 мл/мин. Параметры обработки: сила тока, подаваемого на катушки соленоидов ЭМС  $I = 4...6$  А; скорость вращения детали  $V_{вр} = 2,0$  м/с; скорость осцилляции  $V_o = 0,25$  м/с; амплитуда осцилляции  $A = 1$  мм; величина рабочего зазора  $\delta = 0,8...1,4$  мм, время обработки  $t = 2$  мин; порошок Ж15КТ. При исследовании влияния магнитной индукции, значение зернистости ФАП применялось равным 315/250, а все остальные параметры сохранялись прежними.

Из графиков представленных на рис. 5.38 и 5.39, видно, что при возрастании зернистости, физическое уширение  $\beta$  уменьшается от  $2,35 \cdot 10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$  рад. При возрастании магнитной индукции от 0,4 Тл до 0,8 Тл происходит уменьшение  $\beta$  с  $2,35 \cdot 10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$  рад., дальнейшее увеличение  $B$  до 1,2 Тл не вызывает изменений  $\beta$ . Исходная величина  $\beta$  находится на уровне  $2,85 \cdot 10^{-3}$  рад.

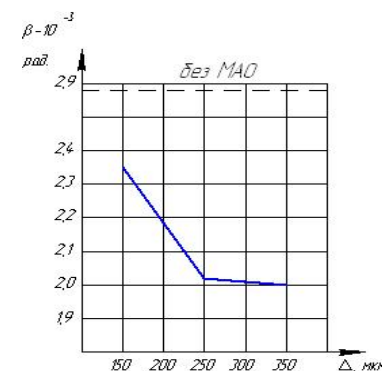


Рис. 5.38. Влияние магнитной индукции на физическое уширение

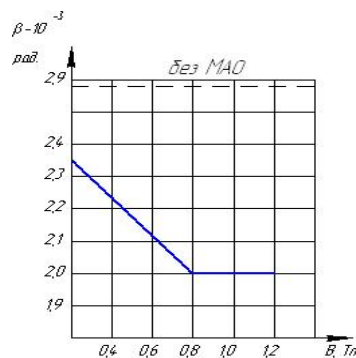


Рис. 5.39. Влияние зернистости ФАП на физическое уширение

Уменьшение физического уширения  $\beta$  при возрастании магнитной индукции от 0,4 Тл до 0,8 Тл говорит о том, что при этом происходит увеличение степени неоднородности распределения микронапряжений (микродеформаций) и уменьшение размеров областей когерентного рассеяния. При дальнейшем изменении магнитной индукции от 0,8 Тл до 1,0 Тл степень неоднородности распределения микронапряжений и размер областей когерентного рассеяния находятся на том же уровне.

Уменьшение размеров мозаичных блоков в поверхностном слое сталей увеличивает сопротивление пластической деформации металлов, вследствие уменьшения областей, через которые скольжение происходит, встречая препятствия в виде граничных поверхностей. Искажения решетки также являются препятствием для распространения сдвиговой деформации. Так как скольжение является основным механизмом пластической деформации, естественно считать, что всякое препятствие на пути скольжения должно затруднять пластическое деформирование, блокировать плоскости скольжения и этим повышать сопротивление скольжению. Скольжение, начинается в благоприятно ориентированном зерне, встречая иначе ориентированное зерно, затормаживается.

При магнитно – абразивной обработке наблюдается дробление блоков мозаики и увеличение микроискажений решетки в большей степени, чем после шлифования. Факт дробления блоков и возникновения микроискажений решетки, как у сталей, так и у твердых сплавов, объясняется упрочнением поверхностного слоя.

Учитывая вышеизложенное, при изменении магнитной индукции от 0,4 Тл до 0,8 Тл происходит упрочнение поверхностного слоя твердого сплава ВК8. Дальнейшее возрастание магнитной индукции не отражается на изменении физического уширения  $\beta$ , а, следовательно, и на упрочнении поверхностного слоя.

При увеличении зернистости ФАП наблюдается уменьшение  $\beta$ , что свидетельствует об увеличении степени неоднородности распределения микронапряжений и уменьшении размеров блоков мозаики. Как при изменении магнитной индукции  $B$ , так и при изменении зернистости ФАП, в результате механического воздействия зерен порошка происходит дробление блоков мозаики и возникают микроискажения решетки в большей степени, чем после шлифования и поверхность упрочняется. Это способствует повышению основных механических характеристик обрабатываемых материалов, что подтверждается увеличенной микротвердостью поверхностей после МАО.

#### 5.4. Формирование остаточных напряжений при магнитно-абразивной обработке деталей машин

При абразивной обработке металлов по причине возникновения упругих и пластических деформаций повышается температура и снижается плотность этих материалов. Это приводит, из-за увеличения удельного объема поверхностных слоев примерно на 0,3...0,8 %, к образованию остаточных напряжений [140]. Поверхностный слой металла, подвергающийся воздействию режущего инструмента, претерпевает ряд изменений, связанных с термодинамическим фактором процесса съема материала. Таким образом, схема формирования остаточных напряжений связывается, во-первых, с возникновением различных видов упругопластических деформаций, во-вторых, локальными температурными показателями.

Установлено, что остаточные напряжения сжатия служат резервом повышения прочности деталей машин, в то время как напряжения растяжения вызывают ее понижение и приводят к росту разрушения поверхностного слоя [8]. Механизм формирования остаточных напряжений сложен и зависит от соотношения силовых и температурных факторов. Известно, что наиболее заметное влияние

остаточные напряжения оказывают на сопротивление деталей усталости. Циклическое нагружение материала связано с пластической деформацией отдельных зон поверхностного слоя, что приводит к высокому уровню искажения кристаллической решетки. В случае если величина напряжений превышает предел выносливости, то наступает разрыв межатомных связей по плоскостям скольжения. При этом наблюдаются нарушения сплошности материала как микроскопического, так и субмикроскопического уровня, что приводит к образованию усталостных трещин и росту возможности разрушения детали. Также установлено [141], что сжимающие напряжения в поверхностном слое повышают надежность соединений с натягом. Поэтому определение остаточных напряжений 1-го рода после механической обработки деталей машин представляет большой практический интерес и является актуальным.

Данные остаточные напряжения уравниваются в объеме всей детали или ее значительной части, вследствие чего по этому объему имеет место распределение напряжений разного знака. Согласно [142], особенностью пластического деформирования микрообъемов материала, расположенных рядом с пятнами контакта, является то, что эти микрообъемы формируются в условиях сдвига под давлением. При этом величина внешнего давления, по данным Ф.П. Боудена, приблизительно равна микротвердости контактирующих металлов, что для стали составляет 1...10 ГПа. На рис. 5.40 показано, что каждая абразивная частица как при шлифовании, так и при магнитно-абразивной обработке, внедренная в поверхность обрабатываемого материала, при своем движении создает в нем две зоны напряжений, различных по знаку. Перед фронтом частиц образуется зона сжимающих напряжений, что обусловлено пластической деформацией металла. За абразивной частицей в результате силы трения создаются растягивающие напряжения. Оценивая характер движения режущей частицы при шлифовании и MAO, а также уровень развиваемых давлений в зоне обработки, можно сделать следующие заключения: за период контактирования с обрабатываемым материалом жестко закрепленная в шлифовальном круге абразивная частица вынуждена пройти большой путь резания, чем подвижно координированная при MAO. Это приводит при шлифовании без учета температурных воздействий к росту растягивающих напряжений, в то время как при MAO движение абразивной

частицы носит прерывистый характер, что обеспечивает импульсное образование зон деформированного металла. Данный характер движения служит одной из основных причин создания сжимающих напряжений после MAO.

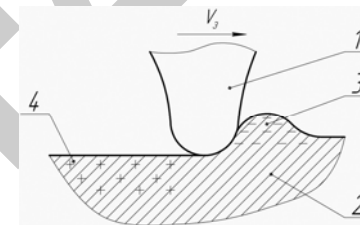


Рис. 5.40. Схема распределения зон остаточных напряжений в закаленных сталях при абразивной обработке: 1 – абразивное зерно; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – зона сжимающих остаточных напряжений; 4 – зона растягивающих остаточных напряжений;  $V_3$  – движение абразивных частиц порошка

Процесс возникновения остаточных напряжений в закаленных сталях, с учетом температурного воздействия при шлифовании представлен следующим образом [16]. Температура нагрева в поверхностном слое изменяется в соответствии с кривой ABCDE (рис. 5.41, а), причем в точке А на поверхности детали температура максимальна, в точке Е – минимальна. Максимальная температура при определенных условиях обработки методом шлифовании может приблизиться к температуре плавления материала. В процессе шлифовании слой 1, нагретый до температуры от точки  $A_{C3}$  до  $t_{max}$ , при последующем быстром охлаждении закалится вторично. Слой 2, нагретый до температуры от точки  $A_{C1}$  до точки  $A_{C3}$ , при охлаждении получит неполную закалку.

Слой 3, нагретый до температуры ниже точки  $A_{C1}$ , получит отпуск, и мартенсит претерпевает превращение. Непосредственно при шлифовании в слоях 1...3 внутренних напряжений не будет, так как нагретый металл является пластичным. На данном этапе нагретый слой 4 стремится увеличить свой объем, но так как он упруго связан со слоем 5, это происходит не в полном объеме, а лишь частично по причине температурного коэффициента объемного расширения. В результате слой 4 испытывает внутренние сжимающие напряжения, а слой 5 растягивающие (кривая 1 на рис. 5.41, б).

При охлаждении шлифованной поверхности до температуры ниже точки  $A_{c1}$  пластичность металла в слоях 1...3 резко снижается, и изменение объемов этих слоев не будет сопровождаться возникновением значительных внутренних напряжений. При весьма быстром охлаждении слоев 1...3 до температуры  $t_e$  (близкой к  $20^0$ ) в этих слоях возникнут дополнительные внутренние напряжения (кривая I, рис. 5.41, б). Если в слоях 1 и 2 имеется структура остаточного аустенита, а слои 3 и 4, имеющие относительно большую толщину, приобретут структуру мартенсита и троостита, то преобладающими окажутся остаточные напряжения растяжения (кривая II, рис. 5.41, б). Если же в слоях 1 и 2 преобладает структура вторичной закалки, а толщина отпущенного слоя незначительна, то в детали преобладают напряжения сжатия (кривая III, рис. 5.41, б).

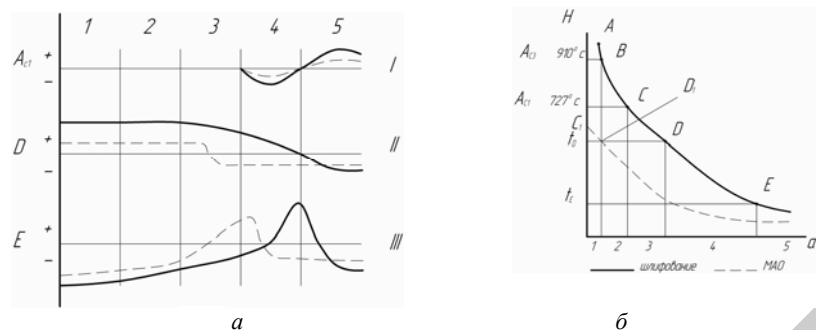


Рис. 5.41. Диаграммы: а – схема возникновения внутренних остаточных напряжений; б – изменение температуры в процессе шлифования и MAO

Высокие мгновенные температуры, развивающиеся при шлифовании, не только существенно влияют на формирование остаточных напряжений, но могут привести к появлению прижогов и микротрещин. На рис. 5.42 показан прижог при шлифовании как местное изменение структуры поверхностного слоя обрабатываемой детали, возникающее в результате интенсивного выделения теплоты на локальных участках ее поверхностного слоя. Это приводит к снижению твердости и износостойкости, что является одним из наиболее серьезных дефектов, имеющих место при обработке данным методом закаленных сталей.



Рис. 5.42. Дефект поверхности стали после обработки шлифованием

Процесс возникновения остаточных напряжений MAO при учете температурного воздействия выглядит следующим образом. Температура нагрева  $C_1 D_1 E_1$ , в точке  $C_1$  – максимум, в точке  $E_1$  – минимум. В ходе протекания операции MAO в слое 1 увеличивается вязкость материала, поскольку он приобретает структуру троостита отпуска. В слоях 1...3 напряжение не возникает, поскольку материал является пластичным. При MAO, если поверхностный слой нагревается до температуры 250...300 °С, происходит несколько процессов, связанных с термическим характером его протекания: продолжается перераспределение углерода в мартенсите, начинается распад остаточного аустенита, увеличивается размер  $\epsilon$ -карбида и происходит превращение  $\epsilon$ -карбида в цементит. Диффузия углерода из кристаллов мартенсита и рост зародышей карбида приводит к росту напряжений 1-го рода на границе раздела фаз из-за повышения различий периодов кристаллических решеток карбида и тетрагонального мартенсита.

Для определения использовался рентгеновский метод измерения, который отличается от механических прежде всего тем, что относится к числу неразрушающих. Оценка напряжений производилась путем съемки рентгенограммы испытуемого образца и рентгенограммы образца, свободного от напряжений (эталон). Определение величин напряжений 1-го рода осуществлялось по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{E}{\mu} \operatorname{ctg} \theta \frac{\Delta L}{2M} \cdot \frac{1}{57,3}, \quad (5.47)$$



где  $E$  – модуль упругости материала,  $2,1 \dots 2,2 \cdot 10^5$  МПа;  
 $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $0,25 \dots 0,3$ ;  
 $\theta$  – угол отражения рентгеновского луча;  
 $M$  – масштаб записи;  
 $\Delta L$  – смещение максимума интенсивности.

Образцами служили кольца подшипников № 840306 36 x 30 x 32 мм, сталь ШХ-15 ГОСТ 801-78, 56...60 HRC<sub>Э</sub> после шлифования, оборудование-станок СФТ 2.150.00.00.000. Параметры и режимы обработки методом MAO: величина магнитной индукции  $B = 1$  Тл; скорость резания  $V_p = 1 \dots 1,5$  м/с; скорость осцилляции  $V_o = 0,1 \dots 0,2$  м/с; амплитуда осцилляции  $A = 1 \dots 2$  мм; размерность ферроабразивного порошка (ФАП)  $\Delta = 100/160$  мкм; ФАП-Ж15КТ ТУ 6-03-09-483-81, смазочно-охлаждающие технологические средства – СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5 % -ный водный раствор, капельная подача, удельный расход  $100 \dots 150$  мл/мин; величина рабочего зазора  $\delta = 1$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора  $K_z = 1$ . В качестве метода изучения строения сплавов использовался рентгеноструктурный анализ.

Исходная структура колец подшипников, изготовленных из стали ШХ-15, прошедших термообработку: закалка + низкий отпуск, представляет собой легированный мартенсит,  $\epsilon$ -карбиды и аустенит остаточный. Показатели твердости и износостойкости при данном составе стали являются максимальными, согласно положений теории [141].

Поскольку область усталости представляется четырьмя периодами, то увеличение срока службы детали до образования магистральных трещин, приводящих к разрушению, можно осуществить путем увеличения 1-го инкубационного периода за счет препятствия созданию влияния растягивающих остаточных напряжений. Следует указать, что усталостная прочность – комплексное понятие, которое охватывает различные аспекты сопротивления детали, поэтому необходимо дифференцировать требования к структуре материала и качеству поверхностного слоя, согласно условиям эксплуатации. Усталостная прочность значительно ниже, чем другие механические свойства металлов, реагирует на изменение определенных условий функционирования детали в механизме. При прочих равных условиях данная прочность в большей степени зависит

от структуры поверхностного слоя металла, который создается технологией механической обработки. Это объясняется, особенно при наличии масштабного фактора детали, неоднородностью структуры технологического производства и отклоняется от законов подобия по напряженно-деформированному состоянию ввиду статического распределения большого числа дефектов. Следовательно, состояние поверхностного слоя определяет образование субмикротрещин, которые при дальнейшем развитии приводят к необратимым структурным изменениям и, соответственно, к изменению физико-механических показателей. Принципы регулирования процессом сопротивления усталости заключаются в применении таких методов механической обработки, которые приводят к изменению зеренной структуры и уменьшению источников и скоплений дислокаций. Эффективными в этом плане методами являются те, которые при своем использовании обеспечивают комплексное воздействие на поверхностный слой с целью достижения указанных выше явлений. Эволюция структуры данного слоя при применении метода MAO характеризуется получением необходимого диапазона величины остаточных напряжений, их знаком, в сравнении со шлифованием, что гарантирует повышение сопротивления усталости таких ответственных деталей, как кольца подшипников, которые служат опорами качения в различных узлах и механизмах. Например, показатели шероховатости и опорной длины профиля после шлифования и MAO составили соответственно:  $Ra_2 = 0,6 \dots 0,8$  мкм,  $t_p = 20$  % и  $Ra_2 = 0,08 \dots 0,1$  мкм,  $t_p = 50$  % соответственно. Следовательно, получение данной структуры поверхности с образованием мартенситного слоя и ее качественных показателей при использовании процесса MAO, обеспечивает благоприятный режим функционирования подшипникового узла в условиях граничного трения и большую устойчивость в таком сложном термодинамическом состоянии.

Результаты проведенных исследований показывают, что как при динамическом, так и термическом воздействии различных методов обработки (шлифование и MAO) уровень и знак остаточных напряжений поверхностного слоя при использовании метода MAO носит характер более высокого уровня образования сжимающих остаточных напряжений, табл. 5.11. Получение такого рода напряжений обеспечивает рост эксплуатационных показателей в виде надежности и долговечности.

Таблица 5.11

Влияние метода финишной обработки на величину напряжений I-го рода

| Метод обработки                              | Величина напряжений I-го рода, $\sigma_1$ , МПа |
|--|---|
| 1. Термообработка (закалка + низкий от-пуск) | 330 – 370                                       |
| 2. Шлифование                                | 600 – 650                                       |
| 3. Магнитно-абразивная обработка             | 810 – 840                                       |

## 5.5. Эксплуатационные свойства поверхностного слоя

### 5.5.1. Результаты испытаний резцов W6 HR при фрезеровании асфальта

Анализ априорных данных относительно влияния режимов эксплуатации и внешних условий изнашивания на способность материалов противостоять абразивному воздействию при разрушении гранитных частиц в монолитной связке представляет значительную сложность вследствие малочисленности работ, а также отсутствия системного подхода в исследованиях. Проблема состоит в том, что известные подходы при анализе определяют процесс фрезерования как резание материала с образованием стружки. Однако по своей сути фрезерование асфальтобетона поворотными резцами представляет собой внедрение инструмента в монолитный слой, состоящий из битумно-минеральной связки и гранитных абразивных частиц. Рабочий орган, взаимодействуя с частицами, освобождает последние от связки и тем самым образует разрыхленную массу. Следовательно, особенность данного вида обработки состоит в механизме удаления гранитных частиц из монолитной связки – разрыхлении. Барабан дорожной фрезы с резцами (рис. 5.43) относится к быстроходным рабочим органам, имеющим повышенные скорости обработки асфальтобетона. Принимая во внимание то, что при увеличении как линейной скорости относительного перемещения, так и угловой скорости вращения фрезы возрастают затраты, связанные с потерей мощности, повышается износ рабочих инструментов. Высокая твердость (12...16 ГПа) и прочность (10...30 МПа)

частиц гранита, входящих в состав асфальтобетона, вызывают интенсивное разрушение корпуса резца под действием сложного механизма изнашивания частицами закрепленного и незакрепленного абразива с наличием локальных ударных нагрузок и пластического оттеснения микрообъемов металла.



Рис. 5.43. Барабан дорожной фрезы

К наиболее важным внешним условиям изнашивания, в наибольшей степени оказывающим влияние на разрушение резца дорожной фрезы, следует отнести физико-механические свойства асфальтобетона, которые определяются температурой окружающей среды, прочностью и твердостью гранитных частиц. Основными параметрами работы инструмента при разрушении асфальтового бетона являются:  $P$  – глубина разрыхления,  $V_{рез}$  – скорость относительного перемещения резца,  $t$  – время обработки,  $S$  – площадь удаленного асфальтового бетона. Характерной особенностью процесса разрушения асфальтобетона является периодичность работы резцов фрезы, переменная площадь удаляемого слоя одним резцом, а также непостоянное число резцов, одновременно находящихся в работе, что вызывает переменное значение сил, моментов и мощности, необходимых для осуществления обработки. С увеличением подачи износ инструмента, отнесенный к единице пути трения, увеличивается, и относительная разница в абсолютных значениях с увеличением подачи больше при более прочных породах. Такое поведение твердых сплавов можно объяснить увеличением роли температурных трещин на процесс разрушения контактной поверхности и нагрузок в зоне контакта [143].

Для исследования влияния магнитно-абразивной обработки на износостойкость были подготовлены три партии резцов W6 HR (рис. 5.44), подвергнутые магнитно-абразивной обработке, шерохо-

ватость рабочих поверхностей составила по параметру  $R_a$  0,8; 1,2 и 1,6 мкм. Производственные испытания резцов проводились на фрезе Wirtgen W 2000 используемой для снятия дорожных покрытий. Диапазон физико-механических показателей асфальтобетона и температур окружающей среды: 6...14 °С, 3,819...4,933 МПа, скорость перемещения резца относительно поверхности асфальтобетона была принята постоянной (3...5 м/с).



Рис. 5.44. Резец W6 HR для дорожных фрез (x2)

С ростом величины подачи (глубины снимаемого слоя от 50 до 125 мм) наблюдается увеличение массового износа исследуемых резцов. Установлено, что наиболее оптимальной является шероховатость, равная  $R_a$  1,2 мкм (рис. 5.45, 5.46). Данный факт можно объяснить тем, что на начальном этапе фрезерования формируется поверхность с шероховатостью  $R_a$  1,2...1,6 мкм, и в процессе фрезерования она изменяется незначительно. Производственные испытания позволили установить, что при использовании MAO величина износа снижается на 25...30 %.

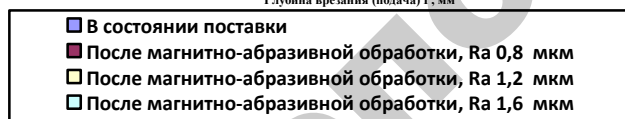


Рис. 5.45. Зависимость массового износа резцов от глубины врезания



Рис. 5.46. Фотографии резцов для фрезерования асфальта: а – после 6 часов работы в состоянии поставки; б – с использованием магнитно-абразивной обработки

По результатам проведенных исследований можно отметить, что резцы, подвергнутые магнитно-абразивной обработке, изнашиваются более равномерно и менее интенсивно, в отличие от необработанных. В процессе эксплуатации необработанные резцы изнашиваются неравномерно, с последующим отрывом твердосплавной вставки.

## 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 частицами порошка. 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 [144].

Суть явлений и происходящие процессы в зоне обработки при МАО 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.

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.

Важным компонентом рабочей технологической среды при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей являются смазочно-охлаждающие технологические среды, активирующие процесс съема металла. Установлено, что наибольшей способностью к адсорбции при магнитно-абразивной обработке обладают поверхностно активные вещества. 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 проникающая 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зинченко, В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / В.М. Зинченко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 302 с.

2. Лещенко, А.И. Достижение требуемой точности сложно-профильных поверхностей путем параметризации программной коррекции погрешностей обработки на станках с ЧПУ / А.И. Лещенко // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. — Маріуполь: ПДТУ, 2011. — Вип. 23. — С. 112–116.

3. Способ обработки фасонных вогнутых поверхностей с изменяющимся профилем. Патент №2208502 С1. РФ МКИ В23С 3/20/ Амбросимов С.К., Стежкин М.Г. ФГБОУВПО "Липецкий государственный технический университет" (ЛГТУ); № 2012113014/02 заявл. 03.04.2012; опубл. 20.07.2013. Бюл. №20, с. 4.

4. Способ финишной обработки поверхностей вращения деталей: пат. № 2 446 920 С1. РФ МКИ В23С 3/06 / В. В. Усенко, М.Ф. Курило, "Промтехнус ЧНПП" -№ 2010122116/02; заявл. 31.05.2010; опубл. 10.04.2012; Бюл. № 10, с. 5.

5. Способ обработки цилиндрических зубчатых колес шевингованием-прикатыванием: пат. № 2369469С РФ 1, МКИ В23Ф 19/06 / А. А. Маликов, А. С. Ямников, А. В. Сидоркин [и др.]. ГОУВПО Тульский государственный университет (ТулГУ); № 2008107066/02; заявл. 27.02.2008; опубл. 10.10.2009; Бюл. № 28, 4 с.

6. Способ обработки моноколеса газотурбинного двигателя: пат. № 2 482 940С1 РФ, МКИ В23С 3/18 / С. В. Кобелев, Д. В. Тукачев, Министерство промышленности и торговли Российской Федерации № 2011143575/02; заявл. 28.10.2011; опубл. 27.05.2013; Бюл. № 15, 5 с.

7. Способ обработки сложных криволинейных поверхностей: пат. № 2 497 636С1 РФ, МКИ В23С 3/20 / С. К. Амбросимов, М. А. Косенков, К. С. Амбросимов, [и др.]. ФГБОУВПО "Липецкий государственный технический университет" (ЛГТУ); № 2012113014/02 заявл. 03.04.2012; опубл. 10.11.2013; Бюл. № 31, 6 с.

8. Ящерицын, П.И. Тепловые явления при шлифовании свойства обработанных поверхностей / П.И. Ящерицын, А.К. Цокур, М.Л. Еременко – Минск: Наука и техника, 1973. – 148 с.

9. Ковшов, А.Н. Технология машиностроения: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А.Н. Ковшов. - М.: Машиностроение, 2007. - 320 с.

10. Колесов, С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник / С.Н. Колесов – М.: Высшая школа, 2008. – 535 с.

11. Черепяхин, А.А. Технология конструкционных материалов. Обработка резанием: учебное пособие / А. А. Черепяхин, В. А. Кузнецов. – М.: Академия, 2008. – 288 с.

12. Соколов, С.П. Тонкое шлифование и доводка / С.П. Соколов.- М.: МАШГИЗ, 1971. – 168 с.

13. Левченко, Н.В. Электроалмазное шлифование инструментальных материалов / Н.В. Левченко. – М., МАШГИЗ, 1970. - 208 с.

14. Корьтов, М.С. Технология конструкционных материалов: учебное пособие / М.С. Корьтов, В.В. Евстифеев. – Омск: СиБАДИ, 2010. – 236 с.

15. Кашук, В.А. Справочник шлифовщика / В.А. Кашук, А.Б. Верещагин – М.: Машиностроение, 1988. – 176 с.

16. Ящерицын, П.И. Чистовая обработка деталей в машиностроении / Ящерицын П.И., Мартынов А.Н. – Минск: Вышэйшая школа, 1983. -220 с.

17. Кугультинов, С.Д. Технология обработки конструкционных материалов: учебное пособие / С. Д. Кугультинов, А. К. Ковальчук, И. И. Портнов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 678 с.

18. Дальский, А. М. Технология конструкционных материалов: Учебник для машиностроительных специальностей вузов / Под общ. ред. А. М. Дальского. – М.: Машиностроение, 2003. – 512 с.

19. Горохов, В.А. Технология обработки металлов / В.А. Горохов.- Минск: Беларуская навука, 2000. – 438 с.

20. Калачевский, Б.А. Современные методы формообразования и обработки заготовок деталей машин: Учебное пособие для механических специальностей вузов / Б.А. Калачевский, Б.И. Калмин. – Омск: Изд-во СиБАДИ, 2003. – 145 с.

21. Jain V. K. "Analysis of Surface Texture Generated by a Flexible Magnetic Abrasive Brush" / V. K. Jain, V. Raghuram, R. Komanduri // Wear. 259, 2005, pp. 1254-1261.

22. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. - Машиностроение. Ленингр. Отделение, 1986.-176 с.

23. Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич – Мн.: Наука и техника, 1981. - 326 с.

24. Коновалов, Е. Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е.Г. Коновалов, Г.С. Шулев. – Мн.: Наука и техника, 1967. – 125 с.

25. Ящерицын, П. И. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей / П.И. Ящерицын, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов и др. - Новополоцк: ПГУ, 1997. – 136 с.

26. Акулович, Л. М. Расчет магнитной индукции в рабочем зазоре при МАО / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, В.Я. Лебедев и др. // Вестник Полоцкого государственного университета, серия С, №3, 2009. С. 146-151.

27. Jayakumar, P. "Semi Magnetic Abrasive Machining" / P. Jayakumar // 4th International Conference on Mechanical Engineering, December 26-28, 2001, Dhaka, Bangladesh, Section V, pp.81-85.

28. Vahdati, M. "Micromachining of Aluminium Pipes using Magnetic Abrasive Finishing" / M. Vahdati, N. Vahdati // Vac. Sci. Technol. Vol.27 №3, 2009, pp. 1503-1505.

29. Wang, Y. "Study on Inner Surface Finishing of Tubing by Magnetic Abrasive Finishing" / Y. Wang, D. Hu // Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, 2005, pp. 43-49.

30. Shinmura, T. "Study on Magnetic Abrasive Process-Application to Plane Finishing" / T. Shinmura, K. Takazawa and T. Hatano // Bulletin of Japan Society of Precision Engineering, Vol. 19 No. 4, 1985, pp. 289-291.

31. Bando, S. "A Study on Precision Internal Finishing for Alumina Ceramic Tubes" / S. Bando, A. Tsukada and Y. Kondo // Journal of Japan Soc. Abrasive Technology, Vol. 45 No. 1, 2001, pp. 46-59.

32. Singh, L. "Performance of Abrasives used in Magnetically Assisted Finishing: a state of the art review" / L. Singh, S. Khangura, and P. Mishra // Int. J. of Abrasive Technology, Vol. 3, No. 3, 2010, pp. 215-227.

33. Saito, T. "Development of Gas-Atomized Magnetic Tools" / T. Saito, K. Koike, H. Yamato // Key Eng. Mater., Vol. 54, 2005, pp. 287-290.

34. Geeng, W. C. "Study on Cylindrical Magnetic Abrasive Finishing using Unbonded Magnetic Abrasives" / W. C. Geeng // International Journal of Machine Tools & Manufacture, No. 42, 2002, pp. 575-583.

35. Suryanarayana, C. "Mechanical Alloying and Milling" / C. Suryanarayana // Progress in Materials Science, No.46, 2001, pp. 1-184.

36. Jain, V.K. "Effect of Working Gap and Circumferential Speed on the Performance of Magnetic Abrasive Finishing Process" / V.K. Jain // Wear, №4, 2001, pp. 384-390.

37. Khairy, A.B. "Aspects of surface and edge finish by magnetoabrasive particles" / A.B. Khairy // Journal of Materials Processing Technology, Vol. 116, 2001, pp. 77-83.

38. Kim, J.D. "Polishing of ultra-clean inner surfaces using magnetic force" / J.D. Kim // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 21, 2003, pp. 91-97.

39. Mori, T. "Clarification of Magnetic Abrasive Finishing Mechanism" / T. Mori, K. Hirota, Y. Kawashima // Journal of Materials Processing Technology, №3, 2003, pp. 143-144.

40. Yamaguchi, H. "Uniform Internal Finishing of SUS304 Stainless Steel Bent Tube Using a Magnetic Abrasive Finishing Process" / H. Yamaguchi, M. Sekine // ASME journal of manufacturing science and engineering, Vol. 127, 2005, pp. 605-611

41. Umehara, N. "Principles of Magnetic Fluid Grinding of Ceramic Balls" / N. Umehara, K. Kato // Int. J. Applied Electromagnetic in Materials, Vol. 1, 1990, pp. 37-43.

42. Акулович, Л.М. О самоорганизации процесса МАО цветных сплавов / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, Е.В. Сенчуров и др. // Доклад 4 МНТК «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» 19-21.10.2009 г. Минск, ГНУ ФТИ НАН Беларуси. С. 24-28.

43. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий / Н.С. Хомич. - Мн., БНТУ. 2006. - 220 с.

44. Минин, Л.К. Определение оптимальных режимов магнитно-абразивной обработки наружных поверхностей вращения на основе математического планирования эксперимента / Л.К. Минин // Вопросы прочности и пластичности металлов. - Мн.: Наука и техника, 1972. - С. 24-28.

45. Скворчевский, Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский [и др.]. - Мн., Наука і техника, 1991. - 216 с.

46. Yamaguchi, H. "Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing process" / H.T. Yamaguchi, A.E. Shinmura // Precision Eng., Vol. 28, 2004, pp. 135-142.

47. Сакулевич, Ф.Ю. Объемная магнитно-абразивная обработка / Ф.Ю. Сакулевич, Л.М. Кожуро. - Мн.: Наука и техника, 1978. - 168 с.

48. Майборода, В.С. Кінематика процесу магнітно-абразивної обробки твердосплавних багатограничних непереточуваних пластин в умовах кільцевої робочої зони / В.С. Майборода, Т.М. Капушак // Вісник ЖДТУ - 2004. - №4(31). Т. 1. - С. 57-65.

49. Ящерицын, П.И. Прогнозирование обработки мелко модульных зубчатых колес методом МАО / П.И. Ящерицын, А.П. Ракомсин, Л.Е. Сергеев и др., // Доклад в сборнике трудов 1 МНТК «Современные методы проектирования машин: расчет, конструирование и технология изготовления», выпуск 1. Т.1, г. Минск, УП «Технопринт», 2002. - с. 18-22.

50. Raghuram M.S. Modeling of Polishing Mechanism in Magnetic Abrasive Polishing M. S. Raghuram, Suhas S. Joshi. The 12<sup>th</sup> International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Goa, India. 2008, pp. 344-352.

51. Акулович, Л.М. Магнитно-абразивная обработка прерывистых поверхностей / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, Е.В. Сенчуров // Вестник Полоцкого государственного университета, серия В, №2, 2009. - с.72-75.

52. Singh P. Internal finishing of cylindrical pipes using sintered magnetic abrasives. P Singh, P. S. Samra, L. Singh // International Journal of Engineering Science and Technology. Vol.3, No 7, 2011, pp. 5747-5753.

53. Lin, C-T. "Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method" / C-T. Lin, L-D. Yang, H-M. Chow // International Journal of Advance Manufacturing Technology, Vol. 34, 2007, pp. 122-130.

54. Иконников, А.М., Расчёт параметров процесса магнитно-абразивной обработки поверхностей сложного профиля. "Обработка металлов" / А.М. Иконников, В.А. Федоров // ОАО НТП и ЭИ "ОРГСТАНКИНПРОМ". Новосибирск, 2003, №4. - С. 10-11.

55. Hou, Z. B. Magnetic field assisted finishing of ceramics / Z. B. Hou; R. Komanduri.- Journal of Tribology, Transactions of the ASME. V. 120 № 4 1998, pp. 645-651.

56. Скворчевский, Н.Я. Отделочная обработка холоднокатанных зубчатых колес методом МАО / Н.Я. Скворчевский, Л.Е. Сергеев, Б.М. Марголин и др. // Весці НАН Беларусі, серыя фіз.-тэхн. навук, 1995, №3, с. 30-32.

57. Yin, S "Study of Magnetic Field-Assisted Machining Process for Ferromagnetic Metallic materials" / S. Yin // J. of Japan Soc. Abrasive Technology, Vol. 46 № 3, 2002, pp. 141-145.

58. Кравченко, Л.Н. Магнитно-абразивное полирование плоскостей деталей машин и приборов / Л.Н. Кравченко [и др.]; под общ. ред. Л.Н. Кравченко. – М.: Машиностроение, 1987. – 48 с.

59. Kodacsy, J. Apparatus for cleaning deburring and polishing parts in magnetic field / J. Kodacsy // Proc. of 7-th international conference on deburring and surface finishing. Berceley USA, 2004, pp. 375-378.

60. Kamble, P.D. Use of Magneto Abrasive Flow Machining to Increase Material Removal Rate and Surface Finish / P.D. Kamble, S.P. Untawale, S.B. Sahare // International Journal of Mechanical, Automobile & Production Engineering. Vol. 2 (7), 2012, pp. 249-262.

61. Полетаев, В.А. Исследование процесса магнитной галтовки в магнитно-абразивном устройстве // В.А. Полетаев, Л.К. Чернов, Т.Ю. Степанова / Вестник ИГЭУ Вып. 4, 2012, с. 31–34.

62. Поливанов, К.М. Теоретические основы электротехники / Поливанов К. М. М.: Энергия, 1975. – 204 с.

63. Евдокимов, Ф.Е. Теоретические основы электротехники / Евдокимов Ф.Е. – М.: АCADEMIA, 2004. – 560 с.

64. Kawakubo, H. Study on Partical-Brush in Magnetic Field Assisted Machining – Finishing Characteristics of Grooves // H. Kawakubo, etc. Proc. International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21 Century- LEM21, - Niigata, Japan, Nov. 3-6, 2003, pp.385-390.

65. Брынский, Е.А. Электромагнитные поля в электрических машинах / Е.А. Брынский и [др.] М.: Энергия, 1979. – 176 с.

66. Сергеев, Л.Е. Интенсификация процесса МАО узких пазов / Л.Е. Сергеев, В.Е. Бабич // Вестник Полоцкого государственного университета, серия В, №6, 2006, с. 42-44.

67. Способ магнитно-абразивной обработки: А.с. № 1537486, МКИ В24В31/112 / Н.Я. Скворчевский, Д.Ф. Устинович, В.Н. Калина и др. ФТИ АН БССР, № 4401725/31-08, заявл. 04.04.1988; опубл. 23.01.1990. Открытия, изобретения; Бюл. № 3-4, с. 5.

68. Полищук, В.С. Магнитно-абразивная обработка – высокоэффективный метод в машиностроении // Физика и техника высоких давлений. – Т.13, №1, 2003. – с. 127-138.

69. Ламмеранен, Й., Вихревые токи / Й. Ламмеранен, М. Штафль. – М.: Энергия, 1967. – 208 с.

70. Батуев, В.В. Расчет толщины срезаемого слоя при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей / В.В. Батуев // Известия Челябинского научного центра. — Челябинск: Челябинский науч. центр, 2006. — Вып. 3 (33). — С. 29.

71. Lee, Y. C. / Machining Technology for the Micro-Burr Removal using Electro-Magnetic Field Effect / Y.C. Lee, J. H. Kim, J. H. Ahn, J. S. Kim, D. W. Lee // Proc. of KSPE Conference, Korea, - 2003, pp. 561-564.

72. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма / С. Тикадзуми. – М.: Мир. 1983. – 184 с.

73. Парселл, Э. Электричество и магнетизм / Э. Парселл. – М.: Наука. Т.2. 1983. – 262 с.

74. Бинс, К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсен. – М.: Энергия, 1970. – 215 с.

75. Kodacsy, J. Magnetic Aided Roller Burnishing Metal Parts / J. Kodacsy, J. Danyi, A. Szabo, G. Fulop. Proc. of 7th International Conference on Deburring and Surface Finishing, Berceley, USA, 2004. – (Eng), 2004, pp. 351-354.

76. Куликовский, А.Г. Магнитная гидродинамика / Куликовский А.Г., Любимов Г.А. - М.: Логос, 2005. – 326 с.

77. Говорков, В.А. Электрические и магнитные поля. / В.А. Говорков. – М.: Энергия, 1968. - 125 с.

78. Иконников, А.М. Совершенствование технологии магнитно-абразивной обработки фасонных поверхностей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.М. Иконников; Алтайский политехнический институт им. И.И. Ползунова. - Барнаул, 2004. - 18 с.

79. Yamaguchi, H. "Development of an Internal Magnetic Abrasive Finishing Process for Nonferromagnetic Complex Shaped Tubes" / H. Yamaguchi, T. Shinmura, A. Kobayashi // JSME Int. J., Series C, Vol. 44. No. 1, 2001, pp. 275-281.

80. Сакулевич, Ф.Ю. Определение магнитной индукции в сложнопрофильной рабочей зоне систем для МАП / Ф.Ю. Сакулевич, Э.Н. Кудинова // Магнитно-абразивное полирование деталей: тезисы докладов Республиканского научно-технического совещания (12 – 13 октября 1976 г.) / Акад. наук БССР; ФТИ. – Минск, 1976. – С. 19-20.

81. Крымский, М.Д. Распределение и уплотнение магнитно-абразивного порошка в рабочей зоне / М.Д. Крымский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев: ИПМ АН УССР, 1980. – С. 92-97.

82. Устройство для магнитно-абразивной обработки зубчатых колес: А.с. 1774912А3 СССР, МПК В 24 В 31/112. / Н.С. Хомич. – № 4907913/08; заявлено 06.02.91; опубл. 07.11.92 // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 34. – С. 73.

83. Домбровский, В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах / В.В. Домбровский. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

84. Владимиров, В.М. Изготовление штампов, пресс-форм и приспособлений / В.М. Владимиров. – М.: Высшая школа, 1974. 432 с.

85. Shinmura, T. "Study on a New Finishing Process of Fine Ceramics by Magnetic Abrasive Machining" / T. Shinmura // Japan Society of Prec. Eng., Vol. 28, №2, 1994, pp. 99–104.

86. 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.

87. Николов, В.Е. Обработка на равнини повърхни с феромагнитни прахове / В.Е. Николов // Научни трудове на ВТУ «Ангел Кънчев». Сер. Технология на машиностроенето и металорежещи машини. – 1981. – Т. XXIII. – С. 33-37.

88. Оликер, В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В.Е. Оликер. – М.: Металлургия. 1990. – 176 с.

89. 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.

90. Оликер, В.Е. Разработка и свойства литых магнитно-абразивных порошков / В.Е. Оликер. – Киев: ИПМ АН УССР, 1984. – 58 с.

91. 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.

92. 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.

93. 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.

94. Тодоров, Н.Х. Система за автоматизирано проектиране на процеси за МАО // Тодоров Н.Х., Пиперкова Р.Д. Докл. III Междунар. н.-т.сем. по технологиям финишной обработки «АМО'87» (г. Варна, окт. 1987 г.). – Варна, 1987. – С. 82-86.

95. Брадваров, А. Магнитно-абразивни материали на основи железокорунд с подобрени технологически свойства / А. Брадваров, В. Николов, Б. Нанев // Докл. III Междунар. н.-т. сем. по технологиям финишной обработки «АМО'87» (г. Варна, окт. 1987 г.). – Варна, 1987. – С. 52-55.

96. Оликер, В.Е. Качество полирования в зависимости от крупности магнитно-абразивных порошков // В.Е. Оликер [и др.] // Порошковая металлургия. – 1984. – №5. – С. 80-83.

97. Крымский, М.Д. Влияние формы магнитно-абразивных зерен на их режущую способность / М.Д. Крымский // Порошковая металлургия. – 1983. – №6. – С. 83-85.

98. 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.

99. Скворчевский, Н.Я. Научные основы повышения эффективности магнитно-абразивной обработки созданием сверхсильных магнитных полей и новых технологических сред / Скворчевский Н.Я. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Минск: БГПА, 1994. – 36 с.

100. Полусный наконечник для электромагнита. А.с. 356705 СССР, МКИ НОИФ 41/02 Б, А.Иоффе, А.А.Шевченко Институт физики АН Латвийской ССР, № 1289062/25-8; заявл. 25.11.1968; опубл. 30.11.1972; Бюл. №32 – 5 с.

101. Полусный наконечник электромагнита: пат. РБ № 5727; МКИ В 24 В 31/10 / П.И. Ящерицын, А.П. Ракомсин, Л.Е. Сергеев и др. ОАО «МАЗ», №3746486 заявл. 10.03.2004, опубл. 08.11.2006; Бюл. 41. – 3 с.

102. Ящерицын, П.И. Магнитно-абразивная обработка длинномерных отверстий / П.И. Ящерицын, Л.Е. Сергеев, М.И. Сидоренко и др. // Весці НАН Беларусі, серыя фіз.-тэхн. навук, 1998, № 1, с. 32-36.

103. Полусные наконечники электромагнита: А.с. 428929 СССР, МКИ В 24 В 31/10 / Б. П. Борисов, В. П. Рябчун и В. Л. Шеголев, № 1640728/25-8; заявл. 16.05.77 опубл. 25.10.78; Бюл. № 39 (45). – 5 с.

104. Устройство для абразивной обработки в магнитном поле: пат. РБ № 5617; МКИ В24В31/10 / П.И. Ящерицын, А.П. Ракомсин, Л.Е. Сергеев и др., ОАО МАЗ, № 3395278; заявл. 11.02.2002; опубл. 07.12.2005; Бюл. № 45 – с. 4.

105. Ящерицын, П.И. Расширение технологических возможностей магнитно-абразивной обработки на основе нового режущего материала / П.И. Ящерицын, Л.Е. Сергеев, А.П. Ракомсин и др. // Перспективные материалы – № 2 – 2000. – с. 72-75.

106. Способ внутреннего шлифования: А.с. 55507 СССР, МПК В 24В 37/00 / Н.И.Каргалов; – № 123546/25-8; заявл. 1.04.38; опубл. 2.10.39; Бюл. № 8. – 3 с.



107. Ящерицын, П.И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын [ и др.]. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 272 с.
108. Ящерицын, П.И. Разработка и создание инструмента для магнитно-абразивной обработки отверстий на основе гибких абразивных щеток / П.И. Ящерицын, Л.Е. Сергеев, М.И. Сидоренко // Весці НАН Беларусі, серыя фіз.-тэхн. навук, № 3, 1997. – с. 42-45.
109. Акулович, Л.М. Управления процессами формирования поверхностей при магнитно-абразивной обработке / Л.М. Акулович, И.Ю. Комик // Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК: сборник докладов Международной научно-практической конференции, г. Минск, 15-18 апреля 2009 г. В 2ч. Ч.1 / редкол. Шило И.Н. [и др.]. – Минск: БГАТУ, – 2009. – с. 422-426.
110. Подураев, В.Н. Динамическая модель элементов технологической системы с учетом кинематической неустойчивости процесса резания / В.Н. Подураев, В.И. Малыгин, Л.В. Кремлева // Вестник машиностроения. – 1996. – № 6. – с. 18–23.
111. Панин, В.Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. – Новосибирск: Наука, 1985. – 217 с.
112. Розенберг, А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А.М. Розенберг, Ю.А. Розенберг. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.
113. Гордиенко, А.И. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / А.И. Гордиенко, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов и др. – Мн.: ФТИ НАНБ; Новополоцк: ПГУ, 2000. – 172 с.
114. Хейфец, М.Л. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей / М.Л. Хейфец, Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.
115. Yamaguchi, H. “Development of Spherical Magnetic Abrasive made by Plasma Spray” / H. Yamaguchi, K. Hanada // J. of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 130, 2008, pp. 1107-1114.
116. Ферромагнитный абразивный материал и способ его получения: А.с. СССР № АС1502284, МКИ В24Д3/34 / В.Н. Чачин, А.К. Титов, Н.С. Хомич и др. Днепропетровский металлургический институт и Белорусский политехнический институт, № 4275113/31-02, заявл. 27.04.1987; опубл. 23.08.1989; Бюл. № 31. – 5 с.
117. Мартынов, А.Н. Распределение температур при обработке деталей в камере / А.Н. Мартынов, В.М. Федосеев. Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструментов: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза : Пенз. политехн. ин-т, 1985. - Вып. 13. – С. 126-130.
118. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел/ Г. Карслоу, Д. Егер - М. : Наука, 1964. – 488 с.
119. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина – М. : Энергоиздат, 1982. – 512 с.
120. Хейфец, М.Л. О самоорганизации процессов формирования свойств поверхностного слоя про комбинированных методах обработки металлов / М.Л. Хейфец // Доклады АН Беларуси. 1995. – Т.39. – № 2. – С. 109-113.
121. Пригожин, И. Современная термодинамика / И. Пригожин, Д. Кондипуди. – М.: Мир, 2002. – 460 с.
122. Гершман, И.С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И.С. Гершман // Трение и износ. – 1995. – Т. 16, № 1. – С. 61-70.
123. Бершадский, Н.Я. Структурная термодинамика трибосистем / Н.Я. Бершадский. – Киев: Знание, 1990. – 254 с.
124. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов - М.: Гардарики, 2003. – 317 с.
125. Ящерицын, П.И. Технология восстановления деталей оборудования хлебопекарного производства / П.И. Ящерицын, В.С. Голубев, Л.Е. Сергеев // Технология машиностроения, № 1, 2001, с. 40-41.
126. Ящерицын, П.И. Теория резания / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн. – Мн.: Новое знание, 2005. – 511 с.
127. Солоненко, В.Г. Резание металлов и режущие инструменты: учеб. пособие для вузов /В.Г. Солоненко, А.А. Рьжкин.– М.: Высшая школа, 2007. – 414 с.
128. Разработать состав смазочно-охлаждающего технологического средства на основе отходов производства и внедрить в технологический процесс финишной обработки поверхностей деталей машин : отчет о НИР / УО БГАТУ, рук. Л.Е. Сергеев. – Мн., 2014. – 112 с. - № ГР 20121995
129. Павлюкова, Н.Л. Разработка стенда для исследования режимов отделочной обработки изделий методом магнитно-абразивной обработки / Н.Л. Павлюкова, В.А. Полетаев // Физика, химия и механика трибосистем: Межвуз. сб. тр. Вып. 2. – Иваново: ИвГУ, 2003. – С. 21–23.
130. Ящерицын, П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. – Мн.: Вышэйшая школа, 1990. – 510 с.
131. Федосеев, В.М. Влияние технологических факторов на производительность обработке деталей в уплотненной абразивной среде. / В.М. Федосеев. Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструментов: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза : Пенз. политехн. ин-т, 1988 - Вып. 16. – С. 16-20.
132. Вукалович, М.П. Термодинамика. Учебное пособие для вузов / М.П. Вукалович, И.И. Новиков // М.: Машиностроение, 1972. – 672 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

133. Павлюкова, Н.Л. Повышение эффективности отделочной обработки деталей из медных сплавов свободными абразивами на основе исследования состава технологической среды / Н.Л. Павлюкова // Дисс. ... канд. техн. наук: — Иваново, ИГЭУ, 2004. — 176 с.

134. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.

135. Авксентьев, Ю.И. Физика твердого тела. Структура твердого тела и магнитные явления / Ю.И. Авксентьев [и др.]; под общ. ред. А.А. Кацнельсона, М.: Изд-во МГУ. - 1982. - 304 с.

136. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. — М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. — 304 с.

137. 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 «Физико-технический институт» НАН Беларуси. — Мн., 2007. - 24 с.

138. Бабич, В. Е. Технология финишной магнитно-абразивной обработки сборного породоразрушающего инструмента : Автореф. дис. ... канд. техн. наук: / В. Е. Бабич ; ГНУ «Физико-технический институт» НАН Беларуси. — Мн., 2009. — 20 с.

139. Хоменко, В.А. Магнитно-абразивная обработка метчиков / В.А. Хоменко, А.М. Иконников, А.В. Богданов // Ползуновский вестник. - 1991. - № 1. — с. 3–20.

140. Майборода, В.С. Дослідження впливу в'язкості змащувально-охолоджуючого технологічного середовища на властивості магнітно-абразивного інструменту / В.С. Майборода, О.А. Ивановский // Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. — Вып. 45. — 2004. — с. 99-102.

141. Рудзит, Я.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства поверхностей / Я.А. Рудзит. — Рига: РПИ, 1984. — 101 с.

142. Уманский, Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский [и др.]; под общ. ред. Ю.А. Скакова. - М.: Металлургия, 1982.- 632 с.

143. Акулович, Л.М. Повышение стойкости инструмента для снятия дорожного полотна в системе инфраструктуры АПК / Л.М. Акулович [и др.] — материалы Международной научно-практической конференции : Минск, 26-28 января 2012 г./ под общ. ред. Н.В. Казаровца. — Минск : БГАТУ, 2012. — с. 89-92.

144. Коновалов, Е.Г., Ключникова Л.Д. Метод расчета магнитных систем станков для МАП // В кн. Новые методы испытания и обработки материалов. — Мн.: Наука и техника, 1975. — с. 175-189.

|  |           |
|--|-----------|
| Введение .....   | 3         |
| <b>1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ .....</b>  | <b>7</b>  |
| 1.1. Обработка поверхностей лезвийным инструментом .....   | 8         |
| 1.2. Обработка поверхностей абразивным инструментом .....  | 28        |
| 1.2.1. Абразивная обработка жестко-связанным, свободным и подвижно-скоординированным зерном .....  | 28        |
| 1.3. Формообразование профиля режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке .....   | 37        |
| 1.3.1. Способы и схемы MAO .....   | 39        |
| 1.3.2. Технологические возможности MAO .....   | 43        |
| 1.3.3. Магнитно-абразивная обработка с поверхностно-пластическим деформированием .....   | 46        |
| 1.3.4. Магнитно-абразивная обработка при циркулирующей рабочей технологической среде .....   | 50        |
| 1.3.5. Процесс магнитно-абразивной галтовки .....  | 51        |
| <b>2. ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ПРОФИЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ .....</b> | <b>56</b> |
| 2.1. Методы расчета топографии магнитного поля .....   | 56        |
| 2.2. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке поверхностей различного профиля .....                               | 57        |
| 2.2.1. Магнитно-абразивная обработка наружных конических поверхностей деталей .....  | 58        |
| 2.2.2. Повышение эффективности процесса магнитно-абразивной обработки узких пазов .....  | 65        |
| 2.2.3. Магнитно-абразивная обработка полых конических поверхностей деталей .....   | 71        |
| 2.2.4. Магнитно-абразивная обработка криволинейных поверхностей пуансонов при повышенной жесткости инструмента .....                     | 81        |
| 2.2.5. Магнитно-абразивная обработка полых цилиндрических поверхностей деталей .....   | 88        |

|   |            |
|---|------------|
| 2.2.6. Магнитно-абразивная обработка цилиндрических поверхностей пуансонов .....                      | 98         |
| 2.2.7. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей поршней .....                      | 105        |
| 2.3. Расчет геометрических параметров электромагнитных систем .....                                   | 114        |
| 2.3.1. Профилирование криволинейных поверхностей пуансонов при пониженной жесткости инструмента ..... | 114        |
| <b>3. ФОРМИРОВАНИЕ ФЕРРОАБРАЗИВНОЙ ЩЕТКИ В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ .....</b> | <b>123</b> |
| 3.1. Виды ферроабразивных порошков и способы их изготовления .....                                    | 123        |
| 3.2. Магнитная проницаемость ферроабразивных порошков ...   | 129        |
| 3.3. Режущие свойства структурированного инструмента .....  | 132        |
| 3.3.1. Магнитно-абразивная обработка с использованием механических щеток .....                        | 133        |
| 3.3.2. Магнитно-абразивная обработка длинномерных отверстий .....                                     | 138        |
| 3.3.3. Магнитно-абразивная обработка на основе ферроабразивных композиционных волокон .....           | 144        |
| 3.3.4. Магнитно-абразивная обработка отверстий на основе гибких абразивных щеток .....                | 149        |
| <b>4. САМООРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ПРОЦЕССОВ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ .....</b>    | <b>154</b> |
| 4.1. Факторы нестабильности магнитно-абразивной обработки .....                                       | 154        |
| 4.2. Нестабильность структуры и физико-механических свойств заготовок .....                           | 154        |
| 4.3. Неоднородность пластической деформации при резании   | 155        |
| 4.4. Изнашивание и разрушение ферромагнитных частиц ....  | 156        |
| 4.5. Формирование абразивной щетки из массы ферроабразивных частиц в результате их самоорганизации .. | 157        |
| 4.6. Критерии процессов формирования поверхностей при магнитно-абразивной обработке .....             | 159        |
| 4.7. Самоорганизация процессов образования и регенерации абразивной щетки .....                       | 164        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.8. Моделирование и оптимизация параметров магнитно-абразивной обработки с учетом самоорганизации процесса .....   | 168        |
| 4.9. Управление процессами обработки в электромагнитном поле с использованием явлений их самоорганизации .....  | 178        |
| <b>5. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ МАО .....</b>  | <b>186</b> |
| 5.1. Синергетизм свойств металлических поверхностей в процессе их изготовления .....  | 186        |
| 5.1.1. Использование рабочей технологической среды на основе кремнистого сплава и СОТС на основе глицерина для МАО алюминиевых сплавов .....              | 187        |
| 5.1.2. Особенности термодинамического процесса магнитно-абразивной обработки поверхности плафонов.  | 194        |
| 5.1.3. Повышение эффективности схемы для магнитно-абразивной обработки цветных сплавов ...  | 203        |
| 5.2. Активация технологических сред и оптимизация их составов .....   | 209        |
| 5.2.1. Повышение эффективности СОТС для МАО .....   | 209        |
| 5.2.2. Методика исследования структурных характеристик СОТС на основе использования компьютерной микроскопии .....  | 211        |
| 5.2.3. Исследование процессов ультразвукового диспергирования СОТС .....  | 213        |
| 5.2.4. Методика исследования смазочно-охлаждающих технологических средств, оборудование и аппаратура ...  | 221        |
| 5.2.5. Влияние состава смазочно-охлаждающих технологических средств на производительность магнитно-абразивной обработки и шероховатость поверхности ..... | 222        |
| 5.3. Качество обработанных поверхностей после МАО .....   | 229        |
| 5.3.1. Методика исследования качественных и эксплуатационных показателей сложнопрофильных поверхностей, оборудование и аппаратура .....                   | 230        |
| 5.3.2. Влияние реверсивного вращения зубчатого колеса в процессе магнитно-абразивной обработки на качество обрабатываемых поверхностей зубьев .....       | 241        |

|   |     |
|---|-----|
| 5.3.3. Формирование шероховатости рабочих поверхностей при магнитно-абразивной обработке уплотненным во впадине ферроабразивным порошком .. | 243 |
| 5.3.4. Магнитно-абразивная обработка режущих инструментов .....   | 247 |
| 5.3.5. Влияние технологических условий на структуру поверхностного слоя твердого сплава ВК8 после магнитно-абразивной обработки .....       | 249 |
| 5.4. Формирование остаточных напряжений при магнитно-абразивной обработке деталей машин .....   | 252 |
| 5.5. Эксплуатационные свойства поверхностного слоя .....  | 259 |
| 5.5.1. Результаты испытаний резцов W6 HR при фрезеровании асфальта .....  | 259 |
| Заключение .....  | 263 |
| Список литературы .....   | 265 |

Научное издание

**Акулович** Леонид Михайлович  
**Сергеев** Леонид Ефимович

## **ОСНОВЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ**

Ответственный за выпуск М. А. Прищепов  
Редактор Г. В. Анисимова  
Компьютерная верстка Д. А. Пекарский  
Дизайн и оформление обложки Д. О. Бабакова

Подписано в печать 19.12.2014. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 12,72. Тираж 100 экз. Заказ 367.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр. Независимости, 99-2, 220023, Минск.