

**Н.С. ХОМИЧ**



**МАГНИТНО-  
АБРАЗИВНАЯ  
ОБРАБОТКА  
ИЗДЕЛИЙ**

Минск 2006

Н.С. Хомич

**МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ  
ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ**

Монография

Минск БНТУ 2006

Рекомендовано Ученым советом  
Белорусского национального технического университета

**Хомич, Н.С.** Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н.С. Хомич. – Мн.: БНТУ, 2006. – 218 с.

ISBN 985-479-550-0.

Монография посвящена современным проблемам финишной обработки изделий.

В книге рассмотрены особенности и условия применения энергии магнитного поля на операциях полирования и зачистки контактирующих поверхностей. Приведены данные о создании, исследовании и реализации способов, устройств и технологических сред для магнитно-абразивной обработки изделий с целью повышения их сопротивления износу, коррозии и механическому разрушению. Изложены результаты разработок и освоения в промышленности процессов и оборудования для полирования изделий, подготовки (зачистки) поверхностей перед сваркой и нанесением покрытий. Изучены возможности применения магнитно-абразивной обработки для формирования нанорельефа поверхностей изделий электронной, оптической и лазерной техники.

Издание предназначено для научных работников, специалистов в области машино- и приборостроения, металлургии.

Табл. 71. Ил. 81. Библиогр. 330 назв.

Рецензенты:

профессор кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» БНТУ, доктор технических наук В.Н. Ковалевский; заведующий лабораторией физики поверхностных явлений Физико-технического института НАН Беларуси, кандидат технических наук В.Я. Лебедев

## ВВЕДЕНИЕ

Качество продукции является главным условием ее конкурентоспособности на рынке товаров и услуг. В различных областях техники качество выпускаемых изделий определяют их функциональные характеристики, важнейшими из которых являются точность, надежность и экономичность.

При изготовлении машин и приборов в промышленности важный вклад в обеспечение качества продукции вносят технологические процессы заготовительных и металлообрабатывающих производств. При этом определяющее значение имеют уровень и эффективность осуществления финишных операций формообразования рабочих поверхностей и обеспечения эксплуатационных характеристик изделий – сопротивления износу, коррозии и механическому разрушению.

Совершенствование технической продукции ведет к неуклонному росту доли финишных операций в производственных процессах. Возрастает и значение отделочных операций в обеспечении требуемого качества изделий.

Развитие традиционных методов финишной обработки деталей машин и приборов часто не отвечает современным требованиям. Выход на новый более высокий уровень качества возможен путем создания прогрессивных технологий, основанных на использовании нетривиальных физико-химических источников энергии. Одним из таких источников является энергия магнитного поля, все более широко применяемая во многих областях техники – от атомных реакторов до медицинских приборов.

Феномен магнитного поля имеет колоссальные возможности улучшить качество жизни человеческого общества. Например, отмеченные Нобелевской премией в 2003 году научно-технические достижения в области физики (сверхпроводимость, сверхтекучесть) и медицины (томография) основаны на использовании магнитного поля.

Первое техническое решение по применению магнитного поля при финишной обработке поверхностей опубликовано 60 лет назад, однако только в последние 20 лет идея получила развитие, главным образом в научных коллективах Минска и Санкт-Петербурга. Их усилиями разработаны теоретические основы метода магнитно-абразивной обработки, созданы и реализованы в промышленности технологические процессы и образцы оборудования для полирования в магнитном поле контактирующих поверхностей деталей машин и приборов.

Значительный вклад в развитие метода магнитно-абразивной обработки внесли белорусские ученые – Е.Г. Коновалов, П.И. Ящерицын, В. Н. Чачин, Ф.Ю. Сакулевич, Л.К. Минин, Н.Я. Скворчевский и др. Коллективами научных подразделений Физико-технического института НАН Беларуси, Белорусского национального технического университета, Научно-инженерного предприятия «Полимаг» и Научно-технологического парка БНТУ «Метолит» разработаны и реализованы теоретические и практические задачи полирования в магнитном поле цилиндрических и сферических поверхностей изделий, работающих, преимущественно, в узлах трения машин и механизмов.

Поисковые исследования, выполненные автором и коллективом сотрудников под его руководством, показали перспективность применения магнитно-абразивной обработки для подготовки поверхностей изделий перед операциями сварки и нанесения покрытий. Проведена комплексная работа по созданию, разработке и промышленному освоению технологических процессов, образцов оборудования и рабочих сред для магнитно-абразивной отделки контактирующих поверхностей деталей. Решена сложная технологическая проблема значительного повышения качества путем полирования, зачистки и очистки поверхностей ответственных изделий в атомном, космическом, химическом машино- и приборостроении и других областях техники.

С 2002 года в БНТУ, УП «Полимаг» и Технопарке БНТУ «Метолит» совместно с Fraunhofer Institut Produktionstechnologie (Аахен, Германия) выполняются исследования возможностей применения метода магнитно-абразивной обработки для полирования по-

верхностей прецизионных деталей электроники, оптики и лазерной техники. Полученные результаты свидетельствуют об огромном потенциале метода в отношении формирования нанорельефа поверхности и бездефектного приповерхностного слоя.

Решение ряда задач теории и практики магнитно-абразивной обработки достигнуто совместно с коллективами научных организаций и промышленных предприятий России и Украины:

- проблема магнитно-абразивной зачистки поверхностей изделий перед сваркой решена совместно с учеными и специалистами РКК «Энергия» и Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины;

- создание, исследование и промышленное освоение технологии и оборудования магнитно-абразивного полирования труб из труднообрабатываемых материалов осуществлены с участием Государственного научного центра РФ «ВНИИ неорганических материалов им. А. А. Бочвара»;

- значительная часть исследований и все работы по освоению выпуска ферроабразивных порошков-инструментов из побочных продуктов электрокорундового производства выполнены в Днепропетровском металлургическом институте;

- создание, исследование и освоение выпуска новых составов смазочно-охлаждающих жидкостей для магнитно-абразивной обработки осуществлено в Институте химии высокомолекулярных соединений НАН Украины.

Автор выражает чувство благодарности коллегам, оказавшим содействие в выполнении работы.

# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ДОСТИЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1. Классификация методов финишной обработки

Назначение методов финишной обработки поверхностей изделий состоит в обеспечении их основных параметров, таких как:

- геометрическая форма и размеры;
- характеристики шероховатости поверхности, ее оптические, электрофизические и другие свойства;
- напряженно-деформированное состояние приповерхностного слоя.

Совокупность этих показателей во многом определяет эксплуатационные свойства изделий. На выбор метода финишной обработки поверхностей влияют многие комплексные факторы, важнейшими из которых являются следующие: функциональное назначение изделия; материал, способ его получения и обработки; экономические и экологические показатели производства и эксплуатации изделия.

Разработаны классификации методов финишной обработки по различным признакам. На рис. 1.1 приведена схема классификации методов по принципу осуществления.

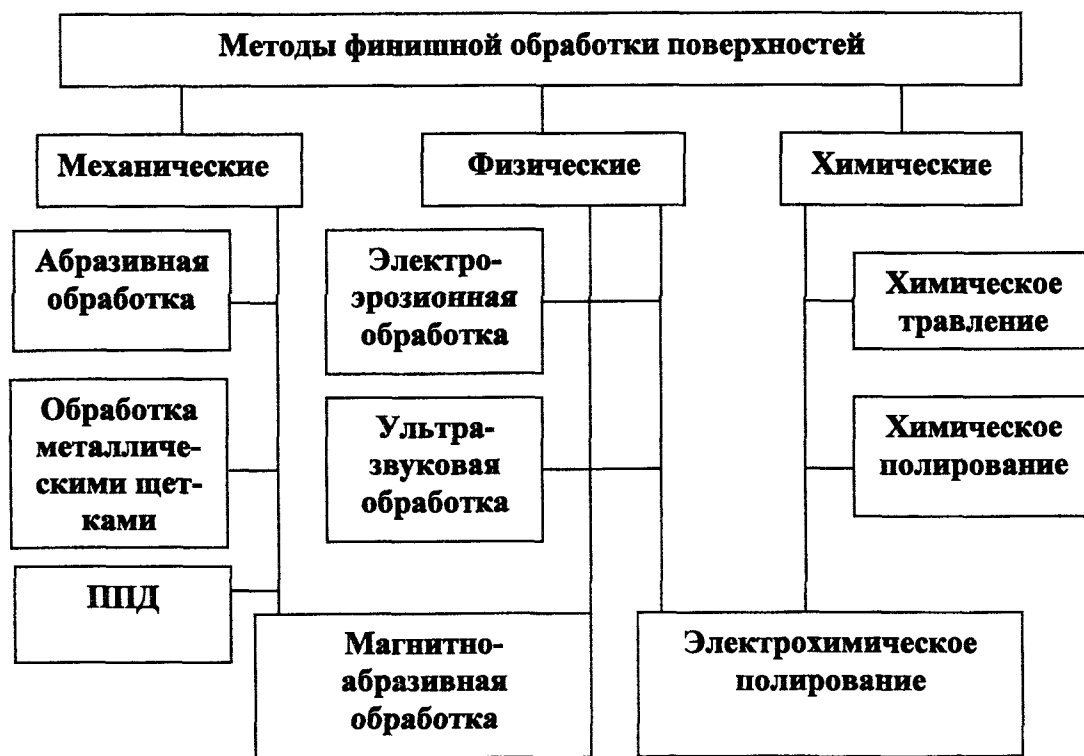


Рис. 1.1. Классификация основных методов финишной обработки поверхности по принципу осуществления

В машиностроении и металлургии наибольшее применение нашли способы абразивной обработки и электрохимического полирования. Они используются как на операциях размерной обработки поверхностей, сопрягаемых с другими поверхностями изделий, так и на операциях безразмерной обработки – полирования, зачистки и очистки поверхностей.

Электрохимическая обработка имеет два существенных недостатка, ограничивающих ее применение: повышенное потребление электроэнергии и использование в больших объемах химически агрессивных и токсичных растворов кислот и щелочей. К тому же обработанные растворы подлежат утилизации, что связано со значительными экономическими затратами. Производства, использующие процессы химического травления и электрохимического

полирования, экологически ущербны и непривлекательны в санитарно-гигиеническом отношении. Поэтому в настоящее время на операциях финишной отделки поверхностей все большее распространение получают способы абразивной обработки.

## 1.2. Анализ способов абразивной обработки

На рис. 1.2 приведена классификация способов абразивной обработки поверхностей.

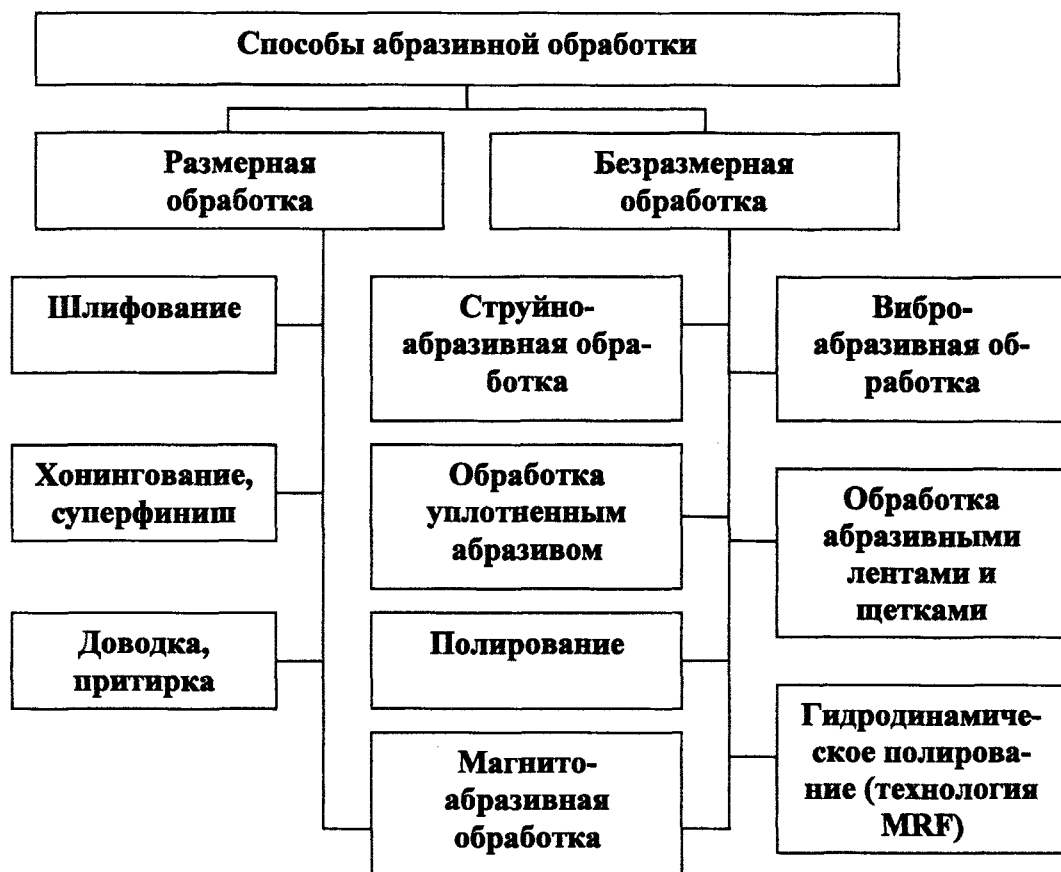


Рис. 1.2. Классификация способов абразивной обработки

### 1.2.1. Способы размерной абразивной обработки

Для большинства способов размерной абразивной обработки характерно применение инструментов со связанным абразивом в виде кругов, брусков и лент. Безразмерная обработка осуществляется, как правило, с использованием свободного абразива в виде порошков, паст и суспензий [1, 2]. Результаты обстоятельных исследований [3–6] показывают, что магнитно-абразивная обработка поверхностей в зависимости от выбранных значений технологических параметров может иметь характеристики как способа размерной обработки связанным абразивом, так и безразмерной обработки свободным абразивом.

Области применения способов финишной абразивной обработки характеризуют показатели их технологических возможностей: универсальность; характеристики формы, размеров и рельефа поверхности; напряжения и деформации в приповерхностном слое; экономичность и экологичность.

В обрабатывающей промышленности наибольшее распространение получил способ шлифования. Он обеспечивает достаточно высокую точность формообразования простых и сложных поверхностей изделий, работающих в подвижных и неподвижных соединениях. Высокую производительность способу обеспечивает линейная скорость вращения абразивного круга, достигающая 50...80 м/с и более. Например, при глубинном шлифова-

нии линейная скорость вращения обрабатываемой детали может составлять 130...150 м/мин, глубина резания – до 6 мм, а интенсивность съема металла – до 600 см<sup>3</sup>/мин [7]. Назначением режимов шлифования можно устойчиво обеспечивать шероховатость формируемой поверхности, характеризуемой  $Ra = 0,08 \dots 1,25$  мкм.

При скоростном шлифовании имеют место процессы интенсивного трения, возникающего между абразивными зёрнами и обрабатываемым металлом, а также упруго-пластические деформации поверхностного слоя металла изделия. Эти явления сопровождаются интенсивным тепловыделением. Средняя температура детали изменяется в пределах 20...350°C, контактная – в пределах 200...1100°C и мгновенная – от 1000°C до температуры плавления обрабатываемого металла [8]. Как следствие, в приповерхностном слое изделия происходят структурные превращения: изменение формы зёрен металла; изменение ориентации зёрен и образование текстуры; появление остаточных напряжений; развитие внутри- и межкристаллитных нарушений, нарушение целостности зёрен; изменение механических и физических свойств поверхностного слоя [1].

Растягивающие остаточные напряжения достигают значений 250...350 МН/м<sup>2</sup>. Дефекты проявляются визуально даже на тонко обработанных поверхностях в виде прижогов, задигов, наплывов и выхватов металла, а также в виде микротрещин. Эти и другие дефекты макро- и микроструктуры шлифованных деталей являются очагами микро- и макроразрушения металла в процессе эксплуатации. Поэтому шлифованные поверхности имеют пониженное сопротивление износу, коррозии и механическому разрушению изделий.

Улучшить качество шлифования можно путем смягчения его режимов – скорости вращения круга, глубины резания и подачи. Возможно в приповерхностном слое сформировать сжимающие остаточные напряжения величиной до 70...80 кгс/мм<sup>2</sup> (687...785 МН/м<sup>2</sup>) [1]. Однако при этом резко падает производительность процесса шлифования.

Глубина распространения остаточных напряжений внутри поверхностного слоя после шлифования составляет 0,02...0,04 мм, а толщина интенсивно напряженного слоя – 0,005...0,010 мм [1].

Суперфиниширование и хонингование применяются, как правило, для финишной обработки поверхностей простой формы высокоточных деталей подвижных соединений, таких как ролики и кольца подшипников, шпиндели станков, детали гидроаппаратуры и двигателей внутреннего сгорания. Установлено, что процесс обработки абразивными брусками по необходимости можно осуществлять либо с преобладанием резания металла абразивными зёрнами с целью получения поверхностей деталей высокой точности, либо с преобладанием трения зёрен по поверхности детали и пластического деформирования неровностей для получения поверхностей с выглаженным микрорельефом [9]. При интенсивном процессе резания контактная температура при скорости обработки 30...120 м/мин составляет 280...550°C [10], а качество поверхностного слоя того же порядка, что и при шлифовании.

После обработки абразивными брусками в режиме трения-полирования сформированный поверхностный слой имеет качественно другое строение. Его структура мелкодисперсна, на поверхности шлифов имеется большое число так называемых "ямок травления", представляющих выходы дислокаций на поверхность [10]. Величина остаточных сжимающих напряжений в приповерхностном слое глубиной до 15 мкм равна 70...90 кгс/мм<sup>2</sup> (687...883 МН/м<sup>2</sup>).

Исследование поверхностного слоя деталей, предварительно шлифованных, а затем подвергнутых суперфинишированию и хонингованию, показало, что, независимо от режимов шлифования, состояние поверхностного слоя металла глубиной до 15 мкм определяется обработкой брусками. Состояние металла в нижележащем слое определяется технологической наследственностью, т.е. результатами шлифования, и зависит от величины припуска, снятого при отделочной обработке. Так, при удалении припуска в 0,02...0,03 мм на глубине от 0,015 до 0,05 мм наблюдается слой с остаточными растягивающими напряжениями, величина которых незначительна (5...10 кгс/мм<sup>2</sup>, т.е. 49...81 МН/м<sup>2</sup>) и не может оказать влияния на работоспособность деталей [9].



Автор [11] подразделяет доводочные процессы на процессы обработки брусками со связанным абразивом (хонингование, суперфиниширование, доводка, притирка) и процессы обработки свободным абразивом в виде абразивных и алмазных порошков, паст и суспензий, нанесенных на поверхность притира-инструмента или обрабатываемой детали. При всех различиях указанных процессов сущность явлений, происходящих в поверхностном слое металла, одинакова и сводится к осуществлению двух разновидностей деформирования металла: микрорезания со снятием тончайших стружек и пластического деформирования – полирования металла [11].

В зависимости от предъявляемых требований доводка может сводиться к одному из указанных процессов. Так, при значительном превышении твердости абразива по отношению к твердости обрабатываемого металла (в 1,5...2 раза и более), при малых радиусах округления вершин абразивных зерен, больших давлениях, малой вязкости смазочно-охлаждающей жидкости и определенных режимах доводка осуществляется путем микрорезания при сравнительно небольшом удельном весе пластической деформации – полирования. При этом обычно достигают шероховатости поверхности, характеризуемой  $Ra = 0,08...0,32$  мкм. При доводке абразивами с большими радиусами округления вершин абразивных зерен, при малых давлениях и вязких смазках и соответствующих режимах процесс осуществляется преимущественно за счет пластического деформирования неровностей в поверхностном слое металла. В этом случае заполирование неровностей позволяет получить поверхности с  $Ra = 0,01...0,06$  мкм и менее.

В большинстве случаев операции доводки проводятся в две стадии. На первом этапе в режиме микрорезания уделяются необходимый припуск, на втором – в режиме полирования происходит окончательное формирование качества поверхности за счет пластического деформирования и выглаживания неровностей. При обработке свободным абразивом перевод микрорезания в процесс полирования обычно осуществляется путем замены абразивных порошков на более мелкозернистые и менее твердые с применением более вязких СОЖ, а также путем снижения скоростей и давлений [11]. Естественно, что при этом трудоемкость обработки увеличивается.

Важнейшим технологическим фактором, влияющим на шероховатость формируемой поверхности, для всех видов абразивной обработки (для процессов доводки в особенности) являются характеристики применяемых абразивных зерен. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от зернистости абразива показана в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Влияние зернистости абразива на шероховатость обработанной поверхности [12]

Способ обработки	Характеристика шероховатости поверхности $Ra$ , мкм				
	0,16...0,08	0,08...0,04	0,04...0,02	0,02...0,01	меньше 0,01
	Размеры зерен абразива, мкм				
Хонингование	20/14...14/10	10/7...7/5	3/2	–	–
Суперфиниш	28/20...20/14	10/7...7/5	5/3...3/2	3/2...1/0	–
Доводка металлов	14/10...10/7	7/5...5/3	3/2	2/1...1/0	1/0
Доводка хрупких материалов	7/5...5/3	5/3...3/2	2/1	1/0	1/0

### 1.2.2. Способы безразмерной абразивной обработки

Процесс виброабразивной обработки осуществляется путем воздействия на поверхность деталей большого количества последовательно повторяющихся микроударов частицами рабочей среды при их взаимном соударении и скольжении. Удары вызваны дей-

ствием направленных вибраций, сообщаемых рабочей камере, в которой размещены обрабатываемые детали и рабочая среда. В качестве последней используют абразивную, стеклянную или фарфоровую крошку, либо стальные шары  $d$  4...8 мм [13].

В результате ударного воздействия в процессе обработки микротвердость поверхностного слоя деталей из закаленной стали может увеличиться на 46 – 56%. Образцы из закаленной стали ШХ15, имевшие после шлифования растягивающие напряжения порядка 440...470 МН/м<sup>2</sup> (45...48 кгс/мм<sup>2</sup>) при глубине их залегания 80...100 мкм, после виброабразивной обработки имели в тонком поверхностном слое (5...20 мкм) сжимающие напряжения величиной 147...375 МН/м<sup>2</sup> (15...38 кгс/мм<sup>2</sup>). Процессы виброабразивной обработки применяются, в основном, для отделки штучных деталей массой 0,05...3,0 кг на операциях: очистки литья; удаления окалины, коррозии и загрязнений; снятия заусенцев; скругления и полирования кромок. При этом показатель шероховатости поверхности обрабатываемой детали  $Ra$  снижается с 0,9...1,2 мкм до 0,15...0,30 мкм [13].

При реализации способов обработки деталей уплотненным потоком свободного абразива отделку поверхности осуществляют абразивными частицами, находящимися в суспензии в уплотненном состоянии, в процессе их перемещения относительно обрабатываемой поверхности при определенном контактном давлении на нее. В результате обработки микротвердость поверхностного слоя деталей повышается на 10 – 12%, а глубина наклепанного слоя достигает 50...75 мкм. В поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения величиной 40...50 кгс/мм<sup>2</sup> (400...500 МН/м<sup>2</sup>), а на глубине 15...20 мкм сжимающие остаточные напряжения переходят в незначительные растягивающие. Способ применяется для отделки наружных и внутренних поверхностей вращения с простой и сложной формой профиля таких деталей как тонкостенные кольца, втулки, стаканы, гильзы и т.п. [14].

Струйно-абразивная обработка осуществляется абразивными частицами под воздействием струи газа или жидкости. Пескоструйная и дробеструйная обработка представляет собой процессы, при которых измельченный абразив увлекается воздушным потоком и направляется на обрабатываемую поверхность. Сообщаемая абразиву кинетическая энергия расходуется на ударное и диспергирующее воздействие на поверхностный слой, т.е. осуществляется упругое и пластическое деформирование и микроразрушение металла. Преимущественно применяемая на операциях очистки литья и проката от окалины и ржавчины пескоструйная обработка обеспечивает шероховатость поверхности с  $Ra = 0,32...0,63$  мкм. При использовании металлической дроби производительность способа может составлять 0,03...0,08 м/с, однако при этом до 5% подлежащих удалению частиц окалины и ржавчины в результате ударов дроби вминаются в формируемый поверхностный слой и существенно снижают его качество. Этот нежелательный эффект шаржирования можно уменьшить применением пневмо- или гидроабразивной обработки абразивными частицами или стеклянными шариками диаметром 44...590 мкм. Однако при этом производительность процесса снижается примерно на порядок [15].

Наибольшее распространение в обрабатывающей промышленности получили процессы полирования абразивными лентами. Подбором значений технологических параметров можно осуществлять полирование с обеспечением высоких значений показателей производительности (размерный съем металла  $\Delta_m$ , мкм) и качества (показатели шероховатости поверхности  $Ra$ , мкм) обработки [16]. Полировались образцы диаметром 50 мм и длиной 20 мм из стали 45 твердостью 48...52 HRC. Повышение скорости ленты увеличивает съем металла и снижает шероховатость поверхности, однако приводит к росту значений растягивающих напряжений в поверхностном слое. На глубине 20 мкм они достигают после ленточного полирования 350 МПа, а после обычного полирования – 600 МПа [16].

Влияние зернистости и скорости лент на съем металла и шероховатость поверхности [16]

Марка и зернистость алмазов	$V_{л}, \text{ м/с}$					
	1 5		2 5		3 4	
	$\Delta_m, \text{ мкм}$	$Ra, \text{ мкм}$	$\Delta_m, \text{ мкм}$	$Ra, \text{ мкм}$	$\Delta_m, \text{ мкм}$	$Ra, \text{ мкм}$
АСМ 20/14	3	0,40	11	0,07	18	0,06
АСМ 40/28	14	0,32	24	0,10	33	0,06
АСМ 80/63	20	0,32	37	0,20	50	0,20

Необходимо отметить существенное различие в результатах полирования при одних и тех же условиях обработки образцов из различных материалов (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Результаты обработки различных материалов алмазной лентой [16]

Материал	АСО 80/63	
	$\Delta_m, \text{ мкм}$	$Ra, \text{ мкм}$
Сталь 45 (48...52 HRC)	60	0,2
Твердый сплав ВК8	35	0,16
Латунь ЛС-52	195	0,80
Медь красная	240	0,80
Алюминий АК-6	410	0,60
Титан ВТ9	180	0,70

Очевидно, что для эффективного полирования каждого из перечисленных материалов необходимо назначать свои оптимальные значения технологических факторов.

Магнитно-абразивная обработка (МАО) включает в себя признаки как механического, так и физического методов обработки. Процесс МАО осуществляет, как и в механических способах, абразивный порошок, которому дополнительно придают ферромагнитные свойства. Благодаря им порошок может приобретать условно связанное состояние под воздействием наведенного в зоне обработки магнитного поля, являющегося важнейшим фактором процесса обработки [18].

Исследования изменений геометрических характеристик поверхности и характера формируемого МАО микрорельефа показали, что с увеличением подвижности зерен ферро-абразивного порошка формируемая поверхность по контролируемым характеристикам приближается к получаемой при обработке струей абразива, а с уменьшением этой подвижности – к обработанной жестким абразивным инструментом. Изменяя подвижность рабочих зерен магнитно-абразивной порошкообразной массы, т.е. изменяя ее жесткость как инструмента, процессу МАО в зависимости от требований, предъявляемых к обрабатываемой поверхности, можно придавать характерные признаки обработки свободным или связанным абразивом, а также использовать в одном цикле полирования преимущества первой или второй, изменяя режимы МАО [18]. Границы управления жесткостью магнитно-абразивного инструмента можно существенно расширить и повысить эффективность МАО путем изготовления и применения ферроабразивных частиц с определенными оптимальными значениями характеристик их формы и размеров [20].

Известно, что шлифование наиболее часто применяется в промышленности на операциях формообразования и финишной обработки поверхностей деталей. При обработке связанным абразивом количество режущих зерен в зависимости от давления на круг со-

ставляет 4 – 17%. В обычных условиях шлифования в резании принимают участие около 10% абразивных зерен, 12% оказывают давление на обрабатываемую поверхность, а 78% абразивных зерен фактически не принимают участия в абразивной обработке [21].

Очевидно, что макрорезание и диспергирование металла при шлифовании обеспечивают, в основном, 10% абразивных зерен круга. Интенсивная обработка ими возможна лишь при жестком контакте круга и поверхности детали, значительных давлениях и мгновенных температурах, близких к температуре плавления обрабатываемого металла. Возникающие при этом упругопластические деформации и тепловые удары вызывают в поверхностном слое металла огромное количество дефектов структуры. Они являются очагами зарождения коррозии и механического разрушения металла и отрицательно влияют на эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей. Повышение этих свойств можно обеспечить двумя путями. Суть первого состоит в уменьшении давления и температуры в зоне шлифования, однако это неизбежно ведет к значительному снижению производительности процесса. Второй путь предусматривает снижение давления и температуры в зоне контакта абразива и детали за счет перевода абразивного процесса из режима макрорезания в режимы микро- и субмикрорезания.

При этом значения температуры и давления снижаются примерно на порядок, но на такую же величину возрастает количество режущих микро- и субмикрорезающих элементов. В итоге интенсивность обработки обеспечивается на достаточно высоком уровне при значительном улучшении качества поверхности, что характерно для процессов струйно-абразивной и магнитно-абразивной обработки. В них по причине отсутствия связки режущий контур из абразивных элементов формируется непосредственно у обрабатываемой поверхности, а количество режущих элементов на единицу площади во много раз выше, чем при шлифовании. К существенным достоинствам магнитно-абразивной обработки следует отнести возможность в широких пределах простым техническим приемом – изменением величины тока в электромагнитах – бесступенчато изменять и устанавливать оптимальные для данного случая обработки значения жесткости абразивного инструмента-порошка. Эта и другие особенности обуславливают широкие технологические возможности финишных процессов магнитно-абразивной обработки [3, 5, 22].

### **1.3. Сущность и особенности метода магнитно-абразивной обработки (МАО)**

Сущность магнитно-абразивной обработки заключается в том, что порошковая ферромагнитная абразивная масса, уплотненная энергией магнитного поля, осуществляет абразивное воздействие на обрабатываемую деталь.

Магнитно-абразивным способом можно успешно обрабатывать поверхности: цилиндрические наружные и внутренние; плоские; тел вращения с криволинейной обрабатываемой; винтовые; с эвольвентным, трапецеидальным и другим профилем [23].

#### ***1.3.1. Основные схемы и принцип реализации***

Наиболее простым примером осуществления процесса магнитно-абразивной обработки является схема полирования наружных цилиндрических поверхностей, представленная на рис. 1.3, а.

Относительно обрабатываемой детали 1 установлена пара вращающихся полюсных наконечников 2, на которых размещены электромагнитные катушки 4. Зазор между наконечниками заполняется ферромагнитным абразивным порошком 3, который под действием магнитного поля, наводимого катушками, удерживается в зазоре и прижимается к поверхности детали. Последней сообщается вращательное движение, она перемещается относительно порошка, в результате чего происходит абразивная обработка ее поверхности. Основные принципы описанной схемы магнитно-абразивного полирования используются и при обработке других типов поверхностей (рис. 1.3) [23].

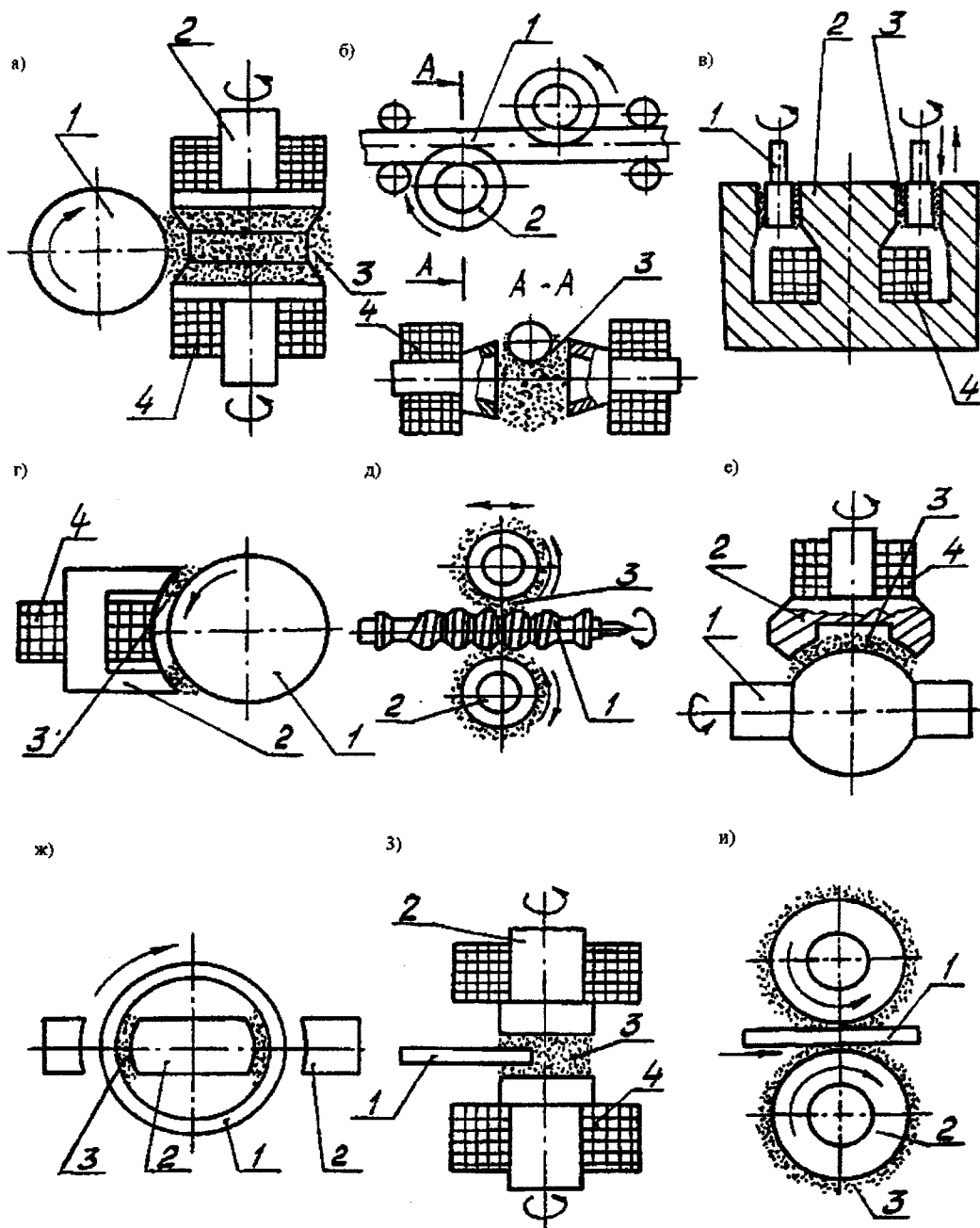


Рис. 1.3. Схемы магнитно-абразивной обработки валов *a*, прутков и труб *б*, поверхностей тел вращения *в*, крупногабаритных валов *г*, винтов *д*, сфер *е*, отверстий *ж*, кромок *з*, листов и лент *и*:

1 – обрабатываемое изделие; 2 – полюсный наконечник;

3 – ферроабразивный порошок; 4 – электромагнитная катушка

Если при MAO механизму воздействия ферромагнитных абразивных частиц на обрабатываемую деталь присущи свои оригинальные особенности, то механизм диспергирования обрабатываемого металла имеет общие черты широко распространенных и хорошо изученных способов чистовой абразивной обработки [3]. Для них сущность явлений, происходящих в поверхностном слое металла, одинакова и сводится к осуществлению двух разновидностей деформирования металла: микрорезания со снятием тончайшей стружки и пластического деформирования – полирования металла [24]. Значительное превышение твердости абразива над твердостью обрабатываемого материала (в 1,5 раза и более) [25, 26], малые радиусы округления вершин абразивных зерен, большие удельные давления, малая вязкость СОЖ способствуют осуществлению процесса доводки в режиме микрорезания при сравнительно малом удельном весе пластической деформации металла.

Эти условия обеспечивают шероховатость поверхности 9–10 класса ( $Ra = 0,1 \dots 0,2$  мкм). При использовании абразивов с большими радиусами округления вершин зерен, обеспечением малых удельных давлений, наличием вязких смазок и при соответствующих режимах доводка осуществляется преимущественно за счет пластического деформирования неровностей и поверхностного слоя металла. В этом случае заполирование неровностей позволяет получить шероховатость поверхности в пределах 11...13 ( $Ra = 0,012 \dots 0,050$  мкм) и даже 14 ( $Ra \leq 0,01$  мкм) классов шероховатости [27].

В большинстве случаев операции доводки проводятся в две стадии. На первом этапе в режиме микрорезания удаляется необходимый припуск, на втором – в режиме полирования происходит окончательное формирование качества поверхности за счет пластического деформирования и выглаживания неровностей [11].

Микрорезание достаточно пластичных металлов со снятием стружки возможно при значениях отрицательных передних углов абразивных зерен не выше  $\gamma = 45 \dots 50^\circ$ , чему соответствует отношение [8]

$$k = \frac{\alpha_z}{\rho} \approx 0,5,$$

где  $\alpha_z$  – толщина среза;  $\rho$  – радиус округления вершин зерна.

При  $k < 0,5$  наблюдается сильное пластическое деформирование металла или даже скольжение зерен по металлу, т.е. имеет место процесс микровыглаживания поверхности. При  $k > 0,5$  происходит процесс микрорезания, причем при  $k = 1,0$  микрорезание обеспечивается стабильно во всех случаях [7].

От пластичности металла зависит степень его деформации при абразивной обработке. Критерием оценки этой деформации может служить отношение массы удаленного (диспергированного) металла ( $G_d$ ) к теоретическому весу объема металла царапины ( $G_c$ ), выражаемое коэффициентом  $k_1$  [27].

Значение  $k_1 = 0$  соответствует отеснению металла из зоны контакта с образованием "навалов" по краям царапины, а при  $k_1 = 1$  происходит его полное удаление без этого отеснения. Величина  $k_1$  зависит от удельного давления на обрабатываемую поверхность, геометрии абразивных зерен и их адгезионных свойств, от смазочной среды и особенно от пластичности обрабатываемого металла. Для относительно хрупких материалов (чугун, закаленная сталь)  $k_1 = 0,8 \dots 0,9$ , а для вязких (техническое железо, медь) –  $0,3 \dots 0,5$ . Этим объясняется низкая производительность снятия припуска при доводке вязких материалов [27].

### 1.3.2. Физико-химические явления при МАО

Если при финишных методах обработки существенная роль в достижении конечных результатов принадлежит обрабатываемому материалу, который непосредственно контактирует с обрабатываемой поверхностью и формирует ее свойства, то при МАО важную роль занимает режущий инструмент, поскольку его ферромагнитными свойствами в значительной мере определяются нормальные силы воздействия на обрабатываемую поверхность [22]:

$$\overline{F_H} = \frac{1}{\mu_0} V B \Delta B,$$

где  $F_H$  – пондеромоторная сила, с которой абразивное зерно воздействует на обрабатываемую поверхность;

$\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $1,256$  мкГн/м;

$V$  – объем ферромагнитной частицы;

$B$  – величина магнитной индукции в частице;

$\Delta B$  – градиент (удельное приращение) магнитной индукции.

Величина  $F_H$  составляет для ферромагнитных абразивных гранул  $(1,0...1,2)10^{-3}$  Н и зависит от размеров и формы зерен, а также от их положения в рабочей зоне [22]. Эти условия обеспечивают собственную глубину царапин-рисок на формируемой МАО поверхности величиной  $0,18...0,5$  мкм [3]. Для сравнения: при шлифовании единичным зерном нормального электрокорунда класса зернистости  $125...80$  мкм глубине шлифования  $10...40$  мкм соответствуют нормальные силы в пределах  $2,75...11,8$  Н [28].

Применяемые при МАО абразивные частицы электрокорунда класса  $40...28$  мкм имеют радиус округления вершин в пределах  $6...12$  мкм [29]. Доказано, что в рассматриваемых условиях МАО макрорезание такими частицами невозможно [3]. В этом случае процесс снятия стружки определяется микрогеометрическими характеристиками абразивных частиц, а не их макрогеометрией.

Диспергирование и пластическое деформирование поверхностного слоя при абразивной обработке усиливается химическими и адсорбционными процессами, происходящими на поверхности детали в присутствии химических или поверхностно-активных веществ.

Процесс микрорезания при МАО сопровождается разрушением и удалением непрерывно образующихся на обрабатываемой поверхности химических пленок, преимущественно оксидных, прочность которых ниже прочности основного металла. Кроме того, в зоне обработки имеет место явление охрупчивания приповерхностного слоя. Оно вызвано переносом металла в микрообъемах в процессе образования микроцарапин – следов микрорезания. Под действием сил резания, трения и адгезии в этих микрообъемах металла создаются растягивающие напряжения и развиваются микротрещины, создаются благоприятные условия для миграции в них активных молекул. Ювенильное состояние поверхности металла после среза, наличие микротрещин и растягивающих напряжений в приповерхностном слое при сравнительно небольших скоростях осуществления процесса финишной обработки способствуют развитию адсорбирующего эффекта – снижению прочности металла в присутствии поверхностно-активных веществ-компонентов СОЖ [26]. Действие адсорбции проявляется в том, что ПАВ снижает поверхностную энергию металла, способствует зарождению пластических сдвигов и развитию дефектов структуры твердого тела, непрерывно развивающихся в процессе упругой и пластической деформации [27].

Установлено, что процесс МАО при контакте двух материалов, зерна ферроабразивного порошка и детали, резко отличающихся по твердости, абсорбционно-пластифицированный слой сосредотачивается в более мягком материале детали. Следовательно, применение СОЖ с активными компонентами позволяет управлять граничными условиями, акцентируя сдвиговые деформации в тонком слое удаляемого металла без их проникновения вглубь обрабатываемого изделия. В результате охрупчивания тонкого поверхностного слоя снижаются затраты энергии на пластическое деформирование и диспергирование металла в процессе обработки [28].

Увеличению пластичности поверхностного слоя и интенсификации съема металла при МАО сталей способствуют также проявления магнетопластического и электропластического эффектов. Для протекания обоих процессов создаются необходимые условия: во время механического и магнитного воздействия зерен порошка на обрабатываемую поверхность материал детали претерпевает циклическое перемагничивание с циклическими перемещениями доменных стенок, способствующими движению дислокаций и тем самым совершению элементарных пластических сдвигов. При перемещении обрабатываемой детали в магнитном поле в ней индуцируются электрические токи, которые также инициируют перемещение дислокаций, обладающих собственным электрическим зарядом. Очевидно, что эти процессы накачки энергии в приповерхностный слой удаляемого металла усиливают вызванные переменным магнитным полем магнотриксционные циклические деформации. Кроме этого, интенсификации процесса съема металла при МАО способствуют электрохимические явления, вызванные циклическим появлением и взаимодействием электрических зарядов на поверхности перемещающейся в магнитном поле обрабатываемой детали [22].

Совокупность физико-химических явлений, вызванных особенностями осуществления процесса MAO, способствует интенсификации процессов диспергирования поверхностного слоя металла и полирования поверхности детали.

#### 1.4. Рабочие технологические среды для магнитно-абразивной обработки

Роль технологических сред – ферроабразивных порошков и смазочно-охлаждающих жидкостей – чрезвычайно важна в процессе магнитно-абразивной обработки (MAO). Именно свойства сред определяют характер механических и физико-химических явлений в зоне обработки, показатели производительности и качества процесса отделки поверхности.

##### 1.4.1. Ферромагнитные абразивные материалы (ФАМ)

В ранних научных исследованиях и практических приложениях MAO в качестве ФАМ использовались ферромагнитные сплавы на основе железа – ферробор, серый чугун и др. [18]. Вследствие невысоких магнитных свойств и недостаточной твердости этих материалов, их применение дало посредственные результаты. Попытка использования ферритов и ферромагнитного электрокорунда по тем же причинам оказалась малоэффективной [22].

Отсутствие в технике материалов, обладающих высокими ферромагнитными и абразивными свойствами, вынудило к созданию специального композиционного материала. Его ферромагнитный компонент представляет собой техническое железо, а абразивный – частицы электрокорунда. Технологический процесс изготовления этого материала выглядит следующим образом. Железный порошок ПЖ1М или ПЖ2М (ГОСТ 9849-74) просеивается через сито с размером ячейки 250 мкм и смешивается в соотношении 4:1 с порошком электрокорунда ЭБМ40. Полученная однородная смесь прессуется в брикеты под давлением 500 ГН/м<sup>2</sup>. Брикеты подвергают спеканию при температуре 1200 °С (1473 К) в восстановительной среде, охлаждают, измельчают их в порошок и отсеивают необходимую фракцию [22].

Магнитно-абразивный материал на основе железа и электрокорунда, известный под маркой МАМ-40, обладает относительно высокими магнитными свойствами и удовлетворительной абразивной способностью. Однако прочность соединения составляющих в его зернах недостаточно высока. Уже в процессе изготовления (на операции измельчения) из железной основы выкрашивается около половины введенных ранее абразивных частиц. Среднестатистические значения линейных характеристик абразивных включений МАМ-40 значительно меньше, чем у зерен ЭБМ40 из-за дробления последних в процессе изготовления ФАМ (см. табл. 1.4) [29]. Разделение составляющих МАМ-40 наблюдается и при MAO [3], вследствие чего материал обладает низкой абразивной стойкостью. К его недостаткам следует отнести нетехнологичность и трудоемкость изготовления, а также относительно высокую стоимость.

Таблица 1.4

Состав и физико-механические свойства зерен ФАП 80% Fe + 20% ЭБМ40 зернистостью 125...100 мкм (среднестатистические данные) [29]

Наименование параметра	Количество
Содержание абразивных частиц ЭБ (% мас.)	11,5
Длина, мм	15,8
Ширина, мм	13,0
Высота, мм	9,8

Некоторые свойства известных ФАМ приведены в табл. 1.5 [22].



Физико-механические свойства ферромагнитных абразивных порошков [4]

Ферромагнитный абразивный материал	Физико-механические свойства порошка		Величина размерного съема металла при MAO ( $t_{\text{маш.}} = 60 \text{ с}$ )	
	Магнитная проницаемость, мкГн/м	Абразивная способность, мг (при истирании закаленной стали У8А)	сталь 45	сталь У8А (55...62 HRC)
Серый чугун (СЧ)	6,55	5,1	1,34	1,15
Mn – Zn – феррит 2000НМ	5,9	5,9	1,40	1,11
Ni – Zn – феррит 600НН	5,25	8,0	1,90	1,08
Кермет ЭБМ40+30%Fe	3,43	15,0	2,05	1,34
Кермет ЭБМ40+600НН	2,27	18,0	3,09	2,00

В работе [22] приведены также данные об использовании карбидов титана и хрома в качестве абразивных компонентов ФАМ (табл. 1.6). Однозначно оценить эффективность применения TiC и Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> в данном случае не представляется возможным. Если при обработке стали ШХ15 эти материалы по производительности превосходят МАМ-40, то при обработке стали У8А значительно ему уступают.

Таблица 1.6

Производительность MAO при использовании керметов с различными абразивными составляющими [21]

Обрабатываемая сталь	Состав кермета (% мас.)			
	20Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 80Fe	15Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 15TiC+70Fe	30TiC + 70Fe	30CrC + 70Fe
ШХ15	1,84	–	2,92	3,62
У8А	4,80	3,80	0,50	0,50

Анализ свойств известных ферромагнитных абразивных материалов свидетельствует о том, что применение порошков металлов или сплавов в качестве ФАМ не дает желаемых результатов. В этом отношении перспективным является использование композиционных материалов, гранулы которых содержат как ферромагнитный, так и абразивный компоненты.

Процесс MAO может быть интенсифицирован созданием композиционных ФАМ, имеющих меньшие размеры абразивных зерен, чем у МАМ-40, при условии обеспечения их надежного крепления в ферромагнитной основе [20].

#### 1.4.2. Смазочно-охлаждающие жидкости

Применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в абразивных процессах обработки решает ряд задач, основными из которых являются: снижение температуры резания, снижение шероховатости обработанной поверхности, удаление продуктов диспергирования материала из зоны обработки и с поверхности режущего контура инструмента.

Магнитно-абразивная обработка существенно отличается от традиционных абразивных способов более низкой температурой в зоне обработки (обычно 60...150 °С), преобладанием микро- и субмикропроцессов резания и выглаживания, формированием поверхности с низкой шероховатостью ( $Ra \leq 0,16$  мкм), удалением тонких слоев металла (как правило, 5...30 мкм). Естественно, что состав и свойства применяемых при MAO СОЖ должны соответствовать указанным выше отличиям.

Авторами исследований [22, 30] выделены, как наиболее важные, адсорбирующий и моющий эффекты СОЖ в процессе MAO. Дефекты поверхности металла в микрообъеме имеют вид трещин и щелей клиноподобного сечения, в которых свободная поверхностная энергия возрастает от нуля в наиболее узкой части щели до максимального нормального значения на поверхности тела. Присутствующие в СОЖ молекулы поверхностно-активных веществ (ПАВ) адсорбируются на стенках микротрещин, снижают поверхностную энергию, разупрочняют тонкий поверхностный слой и облегчают его диспергирование при обработке. Отмечена преимущественная концентрация молекул ПАВ на вершинах выступов микронеровностей, что благоприятно сказывается на результатах реализации тонких абразивных способов, в том числе и MAO [22].

Моющий эффект СОЖ проявляется многопланово и обусловлен ее химическим составом. Применяемые при MAO СОЖ должны иметь пониженную вязкость, обладать способностью проникать в микронеровности рельефа, смачивать их поверхность и обеспечивать абсорбцию молекул ПАВ. Кроме этого, важнейшей функцией СОЖ является удаление из зоны обработки и с поверхности детали пленки шлама, состоящей из продуктов диспергирования материала и частиц износа и разрушения ферроабразивных зерен. Образование пленки шлама происходит более интенсивно при использовании в качестве СОЖ эмульсий.

В массе порошка-инструмента имеет место фильтрация – расслоение СОЖ, масляная составляющая концентрируется в зоне обработки и на поверхности детали, увеличивает вязкость и прочность пленки. В итоге снижается интенсивность процессов резания и выглаживания, а также затрудняется очистка-мойка обработанной детали. В табл. 1.7 приведены данные о пленках шламов, образующихся при использовании различных СОЖ.

Таблица 1.7

Состав и характеристики прочности пленок шлама при использовании различных СОЖ [4, 30]

Вид СОЖ	Компоненты пленки, %			Способ удаления пленки
	твердые	масляные	водные	
5%-й водный раствор эмульсола Э2	65	12	23	Специальные растворители, ультразвуковая или механическая очистка
Водный раствор триэтаноламина (1%), керосина (1,5%) и олеиновой кислоты (0,5%)	91	2	7	Растворители
3%-й водный раствор Аквол-10	98	–	2	Не требует специальных средств очистки

Можно повысить интенсивность процесса MAO в 1,5 раза, применив в качестве СОЖ электролит (например, 10%-й водный раствор NaCl) с пропусканием электрического тока через зону обработки и осуществлением процесса электрохимического подтравливания поверхности обрабатываемой детали [4].

Рекомендуется подавать СОЖ в зону обработки способом свободно падающей струи под давлением не более 5 кгс/см<sup>2</sup> (0,5 МПа) [30].

На основании результатов многочисленных экспериментальных исследований предложен ряд составов СОЖ для МАО изделий из различных конструкционных материалов (табл. 1.8).

Таблица 1.8

Составы СОЖ, рекомендуемые для магнитно-абразивного полирования различных материалов [30]

Обрабатываемый металл	Состав СОЖ
Сталь углеродистая конструкционная, легированная	1) триэтаноламин (1%), олеиновая кислота (0,5%), керосин (1,5%), остальное – вода 2) Аквол-10 (1...1,5%), остальное – вода
Чугун серый, высокопрочный, ковкий	триэтаноламин (0,25%), олеиновая кислота (0,5%), мылонафт (0,6%), эмульгатор ОП-7 (0,6%), тринатрийфосфат (0,35%), нитрит натрия (0,35%), остальное – вода
Медь, бронза, латунь, алюминиевые сплавы	1) триэтаноламин (1%), олеиновая кислота (0,5%), глицерин (0,25%), остальное – вода 2) Аквол-10 (1,5...2,5%), остальное – вода

### 1.5. Фактор магнитного поля при МАО

Магнитный поток является главным динамическим фактором процесса МАО. Его величина характеризует пондеромоторное (силовое) воздействие ферромагнитных абразивных частиц на обрабатываемую деталь. Степень этого воздействия в значительной мере зависит от способности применяемого ФАМ приобретать магнитный момент. Последний тем больше, чем выше индукция насыщения материала и его магнитная проницаемость [31].

Установлено, что в общем случае процесс МАО наиболее эффективен, если магнитный поток создается выпрямленным двухполупериодным электрическим током [18]. Характер изменения такого магнитного потока  $\Phi$  от времени  $t$  условно представлен на рис.1.4.

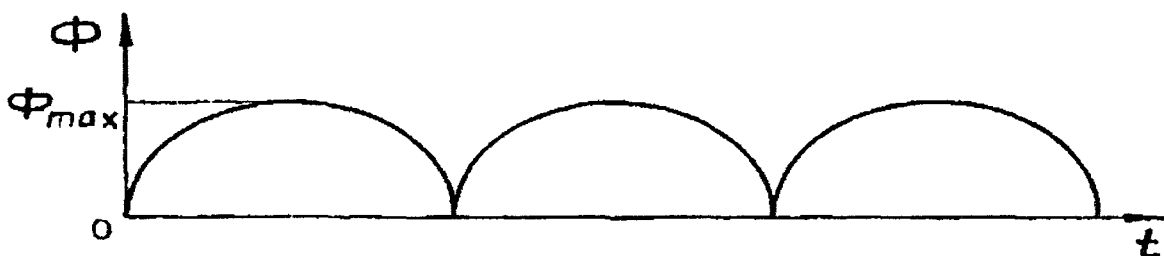


Рис. 1.4. Характер изменения во времени магнитного потока в рабочей зоне при МАО

При МАО в контакте с обрабатываемой деталью находится лишь небольшое количество абразивных гранул, режущие кромки которых с течением времени притупляются. Следовательно, необходима периодическая переориентация и перемешивание гранул в рабочей зоне. Этому способствуют вращательное и осциллирующее движение детали, а также пульсация магнитного поля. При максимальном магнитном потоке  $\Phi_{max}$  гранулы приобретают максимальный магнитный момент и оказывают абразивное воздействие на обрабатываемую деталь. При  $\Phi_{min}$  близком к нулю гранулы должны обладать минимальным магнитным моментом, т.е. иметь минимальную остаточную намагниченность (коэр-

цтивную силу). В этом случае, при наличии вращательного и осциллирующего движения детали, они будут иметь наиболее благоприятные условия для переориентации и перемешивания. Следует отметить также, что при МАО максимальная индукция в рабочей зоне достигает 1,6 Тл [18].

Величина магнитного потока в рабочей зоне существенно зависит от магнитных характеристик ферроабразивных порошков и деталей магнитопроводов электромагнитных систем станков. Эти материалы должны обладать следующими магнитными свойствами:

- а) возможно большим значением индукции насыщения;
- б) высокой магнитной проницаемостью в сильных магнитных полях;
- в) минимальной коэрцитивной силой.

Этим условиям наиболее полно удовлетворяют магнитно-мягкие материалы на основе железа с минимальным количеством примесей. Технически чистое железо (содержание примесей менее 0,05 % мас.) имеет индукцию насыщения  $B_s = 2,16$  Тл [31] и микротвердость менее  $70 \text{ кг/мм}^2$  ( $700 \text{ МПа}$ ) [32]. Для технического железа (количество примесей 0,08...0,2 % мас.) эти показатели соответственно – 2,14 Тл [30] и  $114 \text{ кг/мм}^2$  ( $1,14 \text{ ГПа}$ ) [33].

## 1.6. Анализ эффективности МАО

Оценку эффективности абразивной обработки и применяемых инструментов производят по характеристикам производительности процесса и качества сформированной поверхности [8].

Производительность процесса МАО характеризует зависимость размерного  $\Delta D$  или массового  $\Delta G$  съема металла от времени обработки [3]. Контролируя производительность процесса, представляется возможным управлять не только точностью, но и качеством обработки. По мнению авторов работы [32], главным фактором, определяющим интенсивность МАО, является механическая твердость и магнитные свойства (магнитная проницаемость) обрабатываемого материала. Влияние твердости металла объясняется тем, что контактирующие с обрабатываемой деталью зерна ФАМ, оказывая примерно одинаковое давление на поверхность магнитных сталей неодинаковой механической твердости, внедряются в металл тем глубже и чаще, чем меньшей твердостью обладает обрабатываемый металл.

Отмечены большие возможности МАО при технологическом управлении шероховатостью поверхности, причем наибольшее влияние на ее изменение оказывает время обработки. Обработка в течение более чем 40 с приводит к полному удалению микронеровностей высотой 0,3...2,0 мкм, сформированных на предшествующей операции. При этом стабильно обеспечивался 12 класс шероховатости поверхности ( $Ra = 0,02...0,04$  мкм) [32]. Даже при неполном удалении исходного микрорельефа (полирование до  $Ra = 0,08...0,16$  мкм) поверхностный слой, полученный в результате МАО, по своим геометрическим и физико-механическим параметрам качества значительно превосходит исходный шлифованный [3]. Следы предшествующей обработки в виде просечек-царапин благотворно влияют на условия смазки деталей, работающих в узлах трения. Этой причиной объясняется повышение износостойкости на 20–40% образцов после МАО по сравнению с образцами, шлифованными торцом алмазного круга [33]. И наоборот, полное удаление следов предыдущей операции позволяет получить в результате МАО поверхность со сглаженным микрорельефом, на которой отсутствуют выраженные концентраторы напряжений – впадины, риски, царапины и т.п. Контактная усталость таких поверхностей на 30–50% больше, чем у образцов после алмазного выглаживания и в 2,0...2,5 раза больше, чем после тонкого шлифования. Коррозионная стойкость деталей после МАО также возрастает [33].

При МАО интенсивность удаления металла (глубина снимаемого слоя около 15 мкм) достигает 0,35 мкм/с. Поскольку повышение физико-механических свойств поверхности находится в прямой зависимости от глубины удаляемого дефектного слоя, то оптимальным следует считать те режимы обработки, которые при удовлетворении прочих требований позволяют удалять наибольший слой металла [19].

Параметрами качества поверхности являются их макро- и микрогеометрия, физико-механические свойства приповерхностных слоев и остаточные напряжения в них.

Слой, полностью сформированный МАО, по отношению к исходному шлифованному имеет меньшую высоту (в 20...100 раз) и шаг (в 1,5...5 раз) микронеровностей, меньшие значения высоты (в 5...15 раз) и шага (в 2...4 раза) волнистости, меньшую (в 1,6...3 раза) гранность. Характеристики макрогеометрии сформированной МАО поверхности обеспечиваются главным образом особенностями схемы и сочетанием технологических режимов процесса. Изменение геометрических параметров качества поверхности в зависимости от времени обработки в магнитном поле показано на рис. 1.5 [3].

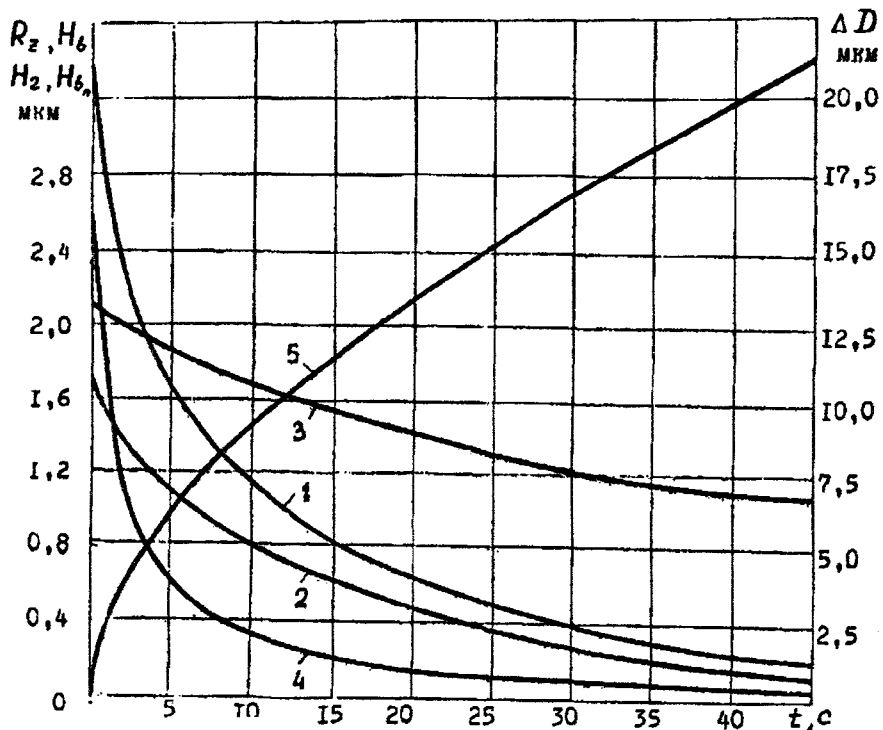


Рис. 1.5. Изменение размера образца и геометрических характеристик поверхности во время МАО: 1 – шероховатость  $R_z$ , 2 – волнистость  $H_v$ , 3 – гранность  $H_g$ , 4 – продольная волнистость  $H_{vp}$ , 5 – уменьшение диаметра  $\Delta D$

Анализ изменений макрогеометрии поверхности и характера формируемого МАО микрорельефа показал, что с увеличением подвижности ферромагнитной абразивной массы в рабочей зоне формируемая поверхность по контролируемым параметрам приближается к получаемой при обработке свободным абразивом, а с уменьшением этой подвижности – к обработанной жестким абразивным инструментом. Регулируя эластичность порошковой массы ФАП процессу МАО по необходимости можно придавать характерные признаки обработки свободным или связанным абразивом, а также использовать в одном цикле полирования преимущества первой или второй, изменяя режимы процесса [19].

Характеристики микрорельефа, в том числе и его регулярность, самым существенным образом влияют на качество поверхностных слоев [34], состояние которых определяет эксплуатационные свойства деталей машин и приборов [35]. К важнейшим физико-механическим характеристикам поверхностного слоя относятся: микротвердость ( $H''$ ), величина макро- ( $G_1$ ) и микронапряжений ( $G_2$ ), глубина залегания деформаций и дисперсность блоков мозаики ( $L$ ) [36]. Значения этих параметров качества для образцов из стали ШХ15 (58,5...60 HRC) после МАО приведены в табл. 1.9 [33].

Физико-механические характеристики поверхностного слоя, сформированного МАО (материал – сталь ШХ15, 58,5...60 HRC) [33]

Способ обработки	$R_a$ , мкм	$H^n$ , кг/мм <sup>2</sup>	$G_1$ , кг/мм <sup>2</sup>	$L$ , Å	$G_2$ , кг/мм <sup>2</sup>
Круглое шлифование	0,38	437	+10	823	8,5
МАО $t = 20$ с	0,10	565	-63	721	10,3
МАО $t = 60$ с	0,032	515	-32	780	10,0

При МАО в поверхностном слое возникают остаточные напряжения сжатия величиной 80...140 кг/мм<sup>2</sup> (0,8...1,4 ГПа), распространенные на глубину до 5 мкм [35]. Значения этих характеристик сопоставимы с результатами, полученными другими способами тонкой абразивной обработки. Например, при суперфинишировании отожженной стали в режиме резания в поверхностном слое создаются напряжения сжатия 1 рода величиной 20...30 кг/мм<sup>2</sup> (200...300 МПа), а в режиме трения-полирования – 70...90 кг/мм<sup>2</sup> (700...900 МПа). При этом микротвердость увеличивается с 160 до 210...220 кг/мм<sup>2</sup> (с 1,6 до 2,1...2,2 ГПа) [37].

Особенность процесса МАО состоит в том, что он практически исключает шаржирование поверхности деталей, т.е. отсутствует насыщение формируемого поверхностного слоя частицами ФАП [32].

### 1.7. Анализ опыта применения МАО в промышленности

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований в промышленности реализован ряд технологических процессов магнитно-абразивного полирования (МАП) поверхностей изделий различных по форме, размерам и назначению.

Удачно решена задача МАП поверхностей вращения, в том числе и фасонных. Наиболее показательное использование в производстве процесса МАП рабочих дорожек колец подшипников качения – тяжело нагруженных несущих поверхностей привода вращения лопастей вертолета [19]. Реализованы процессы полирования в магнитном поле поверхностей вращения диаметром до 200 мм и длиной до 1000 мм [3, 4]. Разработаны и нашли применение магнитно-абразивные роторные станки для полирования фасонных поверхностей деталей типа стержневых инструментов-пуансонов диаметром до 20 мм и длиной до 70 мм [38]. Схема обработки представлена на рис. 1.3, в.

Созданы оборудование и технологии для МАП отверстий диаметром 40...250 мм и длиной 20...130 мм [39, 40]. Схема осуществления процесса изображена на рис. 1.3, ж.

Для МАП плоских поверхностей деталей (размеры в плане до 230 × 410 мм) толщиной до 20 мм созданы различные типы магнитных индукторов и магнитно-абразивный роторный станок [41]. Схему обработки поясняет рис. 1.3, з.

Исследования в области МАО и опыт применения в промышленности показывают, что этот способ обработки имеет три принципиальных отличия от традиционных абразивных методов финишной отделки поверхностей. Первое из них заключается в том, что функции силового источника (сообщающего абразивным элементам необходимые силы резания и выглаживания) и упругой связки выполняет магнитное поле. Суть второго отличия состоит в уникальных особенностях применяемого инструмента – ферроабразивного порошка, дающих возможность под действием магнитного поля формировать упругий режущий контур с множеством абразивных элементов и осуществлять процессы микро- и субмикрорезания и выглаживания. Способность этого контура циклически изменять эластичность и пористость путем переориентации абразивных частиц по отношению к обра-

батываемой поверхности позволяет осуществлять процесс МАО на мягких режимах (при малых температурах и давлениях в зоне обработки) и весьма интенсивно. Третье отличие заключается в том, что высокая «пористость» порошка-инструмента способствует эффективному проникновению в зону резания водных растворов поверхностно-активных веществ, которые под воздействием пульсирующего магнитного поля активируют микро- и субмикрпроцессы резания и выглаживания, обеспечивают высокое качество поверхности, оптимальное состояние приповерхностного слоя и повышенные значения эксплуатационных характеристик обрабатываемых деталей.

Анализ теоретических и практических достижений в области магнитно-абразивной обработки показывает, что в настоящее время реализована лишь малая часть технологических возможностей метода, вытекающих из его особенностей. Потенциал этих возможностей на несколько порядков превышает достижения, приведенные выше. Выполненные научные и прикладные работы позволили создать ряд технологических процессов полирования в магнитном поле, главным образом контактирующих поверхностей деталей подвижных соединений узлов машин и приборов. Практически не изучена проблема полирования в магнитном поле поверхностей перед нанесением различного рода металлических, керамических и других покрытий. Не рассматривались задачи полирования самих покрытий.

В опубликованных работах имеются лишь ограниченные сведения о влиянии МАО на эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей – износостойкости и контактной прочности. Не исследованы возможности использования МАО для повышения важнейшей из эксплуатационных характеристик – коррозионной стойкости.

Отсутствуют данные о перспективе применения МАО для качественной подготовки (зачистки, очистки) поверхностей перед сваркой, пайкой и другими неразъемными соединениями машин и приборов, объемных металлических конструкций в различных областях техники.

На практике реализованы лишь схемы МАО поверхностей вращения и плоскостей штучных деталей. Не рассматривалась и не решена проблема полирования и зачистки длинномерных изделий машиностроения и металлургии типа прутков, труб, проволоки, листов и лент. Нет решений задач финишной обработки в магнитном поле винтовых и пространственно-сложных поверхностей деталей.

В научных публикациях нет сведений об исследованиях возможностей применения магнитно-абразивной обработки на операциях полирования прецизионных поверхностей деталей электроники (например, пластины монокристаллов кремния – подложки интегральных схем), оптики и лазерной техники (стекла, флюориты и др.). Между тем, физико-механические особенности метода МАО (низкие значения температуры в зоне обработки и давления на обрабатываемую поверхность) являются благоприятными факторами для формирования нанорельефа поверхностей и бездефектного поверхностного слоя.

### **1.8. Цель и задачи исследования**

Настоящая работа имеет целью комплексное решение научно-технической проблемы финишной обработки деталей и конструкций путем создания, исследования и практического использования эффективных технологических процессов магнитно-абразивной обработки, повышающих важнейшие эксплуатационные свойства изделий, сберегающих энергетические и материальные ресурсы, улучшающих экологические и экономические показатели промышленного производства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Теоретически обосновать и практически реализовать возможности использования магнитно-абразивной обработки (МАО) на операциях полирования, зачистки и очистки поверхностей перед нанесением покрытий и сваркой.

2. Создать, исследовать и освоить в производстве технологические процессы МАО длинномерных изделий – прутков, труб, проволоки, листов и лент.

3. Создать, исследовать и опробовать способы МАО винтовых, сферических и пространственно-сложных поверхностей деталей.

4. Исследовать и оптимизировать технологические режимы новых способов МАО, обеспечивающие повышение важнейших эксплуатационных свойств изделий – сопротивление коррозии, износу и механическому разрушению.

5. Разработать схемы обработки, устройства и оборудование для реализации новых способов полирования, зачистки и очистки поверхностей изделий.

6. Выполнить поисковые исследования и изучить возможности и условия применения метода МАО на операциях полирования прецизионных поверхностей деталей электроники, оптики и лазерной техники.

7. Создать и исследовать рабочие технологические среды – ферроабразивные порошки и СОЖ – для эффективного осуществления процессов МАО.

8. Разработать методики исследования и расчетов магнитных систем станков и устройств для магнитно-абразивной обработки.

9. Разработать и экспериментально опробовать методические основы исследования напряженно-деформированного состояния порошка-инструмента при МАО.



## ГЛАВА 2. ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Решения поставленных задач исследования лежат на стыках обширных технических областей знаний – технологии машиностроения, материаловедения и металлургии. Достижение желаемого результата возможно при максимальном использовании математических, физических и химических методов изучения объектов и анализа теоретических и экспериментальных данных. Эта сложная и многоплановая проблема решалась преимущественно с применением разработанных и проверенных на практике методик исследования. Необходимые сведения об этих методиках и ссылки на их авторов приводятся в работе по мере изложения материала.

Для изучения и решения отдельных наиболее важных специфических задач, обусловленных особенностями процессов магнитно-абразивной обработки, разработаны оригинальные методики исследования.

### 2.1. Методика исследования характеристик рельефа поверхностей, обработанных в магнитном поле

Методы исследования формы и характеристик макрогеометрии поверхности стандартизованы, широко известны и в описании не нуждаются. Поскольку магнитно-абразивная обработка (МАО) реализуется, главным образом, посредством микро- и субмикропроцессов резания и выглаживания, то весьма важным является изучение характеристик микро- и нанорельефа сформированных поверхностей.

Микрогеометрия поверхностей самым существенным образом влияет на многие эксплуатационные свойства деталей машин – трение и износ [42, 43], контактные деформации [44, 45], коррозионную стойкость [46, 47], концентрации напряжений и усталостную прочность [48], аэро- и гидродинамические свойства [49, 50], герметичность соединений [51], электрическое контактное сопротивление [52], отражение электромагнитных волн [53], точность измерений [54], прочность и качество покрытий [55], специальные технологические свойства [56, 57] и т.д.

О микрогеометрии поверхности в общем случае судят по ее микропрофилю. Наиболее часто применяемыми его характеристиками являются либо среднее арифметическое отклонение линии профиля  $Ra$ , либо высота неровностей профиля  $Rz$ . Измерения  $Ra$  и  $Rz$  осуществлялись на профилографе-профилометре модели 252 (изготовитель – завод «Калибр», Москва).

Однако по количественным значениям  $Ra$  или  $Rz$  невозможно в полной мере судить даже об отдельных эксплуатационных свойствах деталей. Доказательством этому могут служить результаты исследований [58, 59], показывающие, что поверхности, имеющие одинаковые значения  $Ra$ , но различные значения других характеристик шероховатости, имеют неодинаковую износостойкость [60].

Для более обстоятельного описания микропрофиля использовалась методика, разработанная НИИ машиноведения [61]. Сущность ее заключается в том, что записанные профилограммы исследуемой поверхности обрабатываются графически при помощи специальных приемов. В результате можно получить численные значения характеристик микропрофиля:  $Ra$ ,  $Rz$ , шаг  $S$  между неровностями, параметры аппроксимации  $b$  и  $v$  начальной части опорной кривой, радиус  $R$  округления вершин неровностей, угол  $\Theta$  наклона боковых сторон профиля к средней линии. При высокой точности обработки профилограмм данная методика является весьма трудоемкой.

Для исследования общих закономерностей образования микрорельефа поверхностей, а следовательно, и обеспечения их оптимальных эксплуатационных характеристик способом МАО с учетом свойств гранул применяемого ферроабразивного порошка (ФАП), возникла необходимость в детальном (структурном) анализе профилограмм. При решении различного рода инженерных задач нашло применение относительно большое

число методов математического описания микрорельефа поверхности [62, 63], однако, наиболее универсальным и точным является корреляционный метод, при котором профилограмма поверхности рассматривается как реализация стационарной случайной функции [64]. Данный метод основан на принципах теории случайных функций [65, 66], теории вероятностей и математической статистики [67, 68], основные аспекты его практического приложения приведены в работах [69, 70].

Поверхность, обработанная абразивным способом, имеет следы обработки, носящие как систематический характер, обусловленный кинематикой процесса (скорость резания, подача и т.д.), так и случайный характер (хаотичность ориентации абразивных зерен, неоднородность их микрорельефа, неравномерность распределения по поверхности шлифовального круга и т.п.). Согласно предлагаемому методу оценки шероховатости ее систематическая составляющая может быть описана периодической функцией, а случайная составляющая – случайной стационарной функцией. Разделить профилограмму на ее систематическую и случайную составляющие можно с помощью корреляционного преобразования, имеющего вид [65]

$$k(\tau) = \frac{1}{1-\tau} \sum_0^{1-\tau} [y(x) - y_{\text{ср}}] \cdot [y(x+\tau) - y_{\text{ср}}],$$

где  $\tau$  – аргумент корреляционной функции (разность между абсциссами двух сечений профилограммы), который принимается равным  $0, \Delta X, 2\Delta X, \dots, n\Delta X$ ;

$\Delta X$  – интервал по оси абсцисс профилограммы, равный примерно четверти шага наименьшей неровности, анализ которой еще представляет интерес для исследований;

$y(x), y(x+\tau)$  – ординаты профилограммы в выбранной системе координат, за базовую линию для отсчета ординат принимаются линии впадин профиля;

$y_{\text{ср}}$  – среднеарифметическая ордината профилограммы, равная расстоянию от линии впадин до средней линии профиля.

Длина профилограммы, необходимая для расчета корреляционной функции, определяется по формуле [71].

$$\ell \geq 2\Delta X \frac{(\lambda - \gamma)(4 - 3\gamma)}{(1 - \gamma)^2},$$

где  $\lambda$  – коэффициент снижения случайности при корреляционном преобразовании профиля, выбирается в пределах  $5 \dots 10$  (чем четче периодическая составляющая, тем меньше  $\lambda$ ).

$\gamma$  – коэффициент случайности профиля ( $\gamma = 0,4 \dots 0,7$  для профилограммы с четкой периодичностью,  $\gamma = 0,7 \dots 0,9$  для профилограммы с неясной периодичностью);

Численные значения величин  $\ell, \Delta X, \tau$  выбираются исходя из характера профилограммы и необходимой точности ее обработки [64].

Порядок расчета корреляционной функции выглядит следующим образом [72]. Составляется таблица значений ординат  $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$  профилограммы, измеренных от линии впадин через интервал  $\Delta X$ . Затем производится операция центрирования, т.е. находятся  $(y_0 - y_{\text{ср}}), (y_1 - y_{\text{ср}}), \dots, (y_n - y_{\text{ср}})$ , после чего подсчитывается  $k(\tau)$  для каждого  $\tau$ .

В результате имеем ряд значений корреляционной функции. Откладывая на оси абсцисс значения  $\tau$ , а на оси ординат  $K(\tau)$ , строим график корреляционной функции – коррелограмму поверхности (рис. 2.1). Физический смысл корреляционной функции состоит в том, что при каждом конкретном значении аргумента  $\tau$  она показывает, имеется ли корреляционная связь между неровностями на поверхности детали.

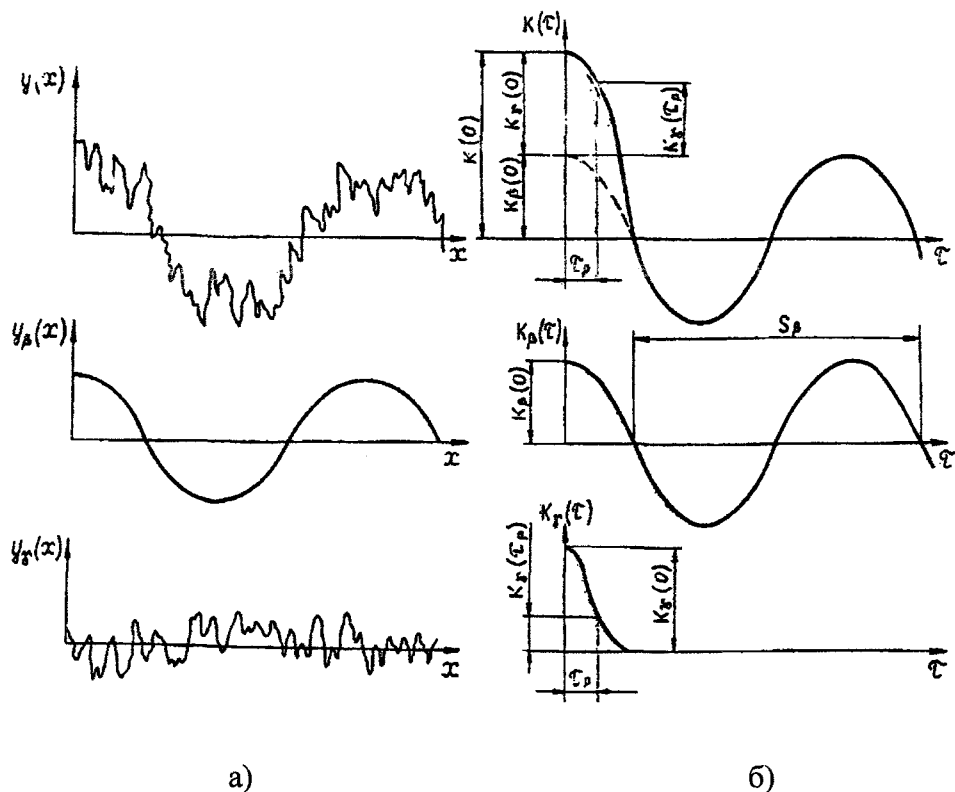


Рис. 2.1. Разделение профилограммы (а) и коррелограммы (б) на систематическую и случайную составляющие [70]

Математическое выражение коррелограммы имеет вид [70].

$$k(\tau) = R_{\alpha\beta}^2 C_\beta^2 \cos \frac{2\pi}{S_\beta} \tau + R_{\alpha\gamma}^2 C_\gamma^2 e^{-\frac{2S\tau^2}{S_\gamma^2}},$$

где характеристики с индексом  $\beta$  определяют систематическую, а с индексом  $\gamma$  случайную составляющую.

При помощи коррелограммы представляется возможным определить необходимые характеристики микропрофиля [46]. Среднее арифметическое отклонения систематической составляющей линии профиля по высоте

$$R_{\alpha\beta} = \frac{\sqrt{K_\beta(0)}}{C_\beta},$$

Значение  $K_\beta(0)$  измеряется непосредственно на коррелограмме.

Коэффициент  $C_\beta$  берется в пределах 1,00...1,22 и зависит от формы систематически расположенных неровностей [70].

Шаг  $S_\beta$  периодической составляющей [71]

$$S_\beta = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{\beta_i},$$

где  $m$  – общее число неровностей, пересекающих ось абсцисс коррелограммы.

Среднее арифметическое отклонение случайной составляющей линии профиля по высоте

$$R_{\alpha\gamma} = \frac{\sqrt{k_{\gamma}(0)}}{C_{\gamma}},$$

где  $k_{\gamma}(0)$  – измеряется на коррелограмме, а  $C_{\gamma}$  – коэффициент, зависящий от закона распределения случайной составляющей линии профиля по высоте.

Поверхности после абразивной обработки имеют нормальный или близкий к нему закон распределения, для которого  $C_{\gamma} = 1,25$  [70].

Средний шаг  $S_{\gamma}$  случайной составляющей профиля вычисляется по формуле [72].

$$S_{\gamma} = \frac{5\tau_p}{\sqrt{-\ln \frac{k_{\gamma}(\tau_p)}{k_{\gamma}(0)}}},$$

где величины  $\tau_p$  и  $k_{\gamma}(\tau_p)$  измеряются на коррелограмме, причем точка  $p$  выбирается произвольно на линии случайной составляющей коррелограммы (см. рис. 2.1).

Среднее арифметическое отклонения линии профиля по высоте.

$$R_a = \frac{\sqrt{k(0)}}{C}.$$

Коэффициент формы неровностей и закона распределения

$$C = \sqrt{1,25C_{\gamma}^2 + (1-\gamma)C_{\beta}^2}.$$

Средний шаг между неровностями

$$S = \frac{1}{\frac{\gamma}{S_{\gamma}} + \frac{1-\gamma}{S_{\beta}}}.$$

Угол наклона сторон неровностей профиля и средней линии определяется методом эквивалентной частоты [72] и вычисляется по формуле

$$\operatorname{tg}\Theta = 9,9R\alpha\left(\frac{\gamma}{S_{\gamma}} + \frac{1-\gamma}{S_{\beta}}\right).$$

Кривизна линии профиля характеризуется средним ее радиусом [70]:

$$r = \frac{40R\alpha}{\left(\frac{\gamma}{S_{\gamma}} + \frac{1-\gamma}{S_{\beta}}\right)^2}.$$

Кроме того, согласно используемому методу теоретико-вероятностного подхода к оценке микропрофиля поверхности, представляется возможным определить значения систематической и случайной составляющих среднего угла наклона сторон неровностей и

среднего радиуса кривизны линии профиля, а также длину линии профиля, опорную длину профиля и их систематическую и случайную составляющие.

Сравнительная обработка одних и тех же профилограмм по методике НИИ машиноведения и по вышеописанному методу дала хорошие совпадения результатов.

Применение теоретико-вероятностного подхода к оценке шероховатости поверхности с разделением ее на систематическую и случайную составляющие позволит исследовать структуру микрорельефа поверхности и выявить особенности влияния кинематики МАО и линейно-геометрических параметров гранул ФАП на характер получаемого микрорельефа, что в итоге дает предпосылку для оценки степени управления микрорельефом формируемых МАО поверхностей, т.е. качеством обработки.

## **2.2. Методика расчета магнитных полей и геометрических параметров полюсных наконечников**

Важнейшей отличительной особенностью процесса МАО является возможность управления «жесткостью» режущего инструмента, ферромагнитного абразивного порошка (ФАП), что обеспечивается изменением величины магнитного потока в рабочей зоне [5]. Бесступенчатое регулирование величины магнитного потока в зоне обработки позволяет управлять силовым воздействием инструмента на обрабатываемую поверхность, контролировать механизм резания и тем самым обеспечивать оптимальные условия процесса абразивной обработки, а также характер деформации приповерхностного слоя детали. «Жесткость» инструмента и степень его силового воздействия на обрабатываемую поверхность в значительной мере определяют производительность обработки, влияют на глубину внедрения абразивных зерен в обрабатываемый металл, обуславливают его напряженное состояние и качество сформированного поверхностного слоя изделия. В процессах МАО технологический термин «жесткость» инструмента можно идентифицировать с физическим фактором плотности массы ФАП в зоне обработки.

Важнейшим условием управления плотностью ферромагнитной абразивной порошковой массы является обеспечение необходимой топографии магнитного поля в пространстве между полюсными наконечниками [73]. Оно должно обеспечивать, с одной стороны, наибольшую концентрацию ферроабразивного порошка в зоне обработки; с другой – наибольшее нормальное давление порошка на обрабатываемую поверхность. При большом различии проектируемых процессов МАО, реализуемых по данной схеме, можно выделить общие требования к топографии магнитного поля: максимальный магнитный поток в рабочей зоне полюсов, зона А (рис. 2.2); минимальный магнитный поток в нерабочей зоне Б и пространстве вне полюсов; градиент составляющих сил, действующих на абразивное зерно, должен быть направлен в сторону рабочей зоны.

Обеспечение выполнения этих требований за счет выбора геометрии полюсных наконечников составляет задачу оптимизации, для решения которой наиболее подходит метод многокритериальной оптимизации [74].

Он заключается в том, что, имея математическую модель, связывающую геометрию полюсных наконечников с топографией магнитного поля, можно вычислить значения функций  $\lambda_k = f_k(X_1, X_2, \dots, X_n)$  при изменении независимых переменных  $X$  в заданном диапазоне по *Ллт*-последовательности, которая обеспечивает равномерность пробных точек целевой функции в  $n$ -мерном пространстве.\*

Геометрию рассматриваемых полюсных наконечников можно представить через шесть параметров, принимаемых за независимые переменные (рис. 2.3):  $X_1$  – длина отрезка 5 – 4;  $X_2$  – угол наклона отрезка 4 – 3 к оси  $Y$ ;  $X_3$  – длина отрезка 4 – 3;  $X_4$  – угол наклона отрезка 3 – 2 к оси  $Y$ ;  $X_5$  – длина отрезка 3 – 2;  $X_6$  – угол наклона отрезка 2 – 1 к оси  $Y$ .

---

\* Математические расчеты и вычисления по подразделу 2.2 выполнены В.И. Прибыльским.

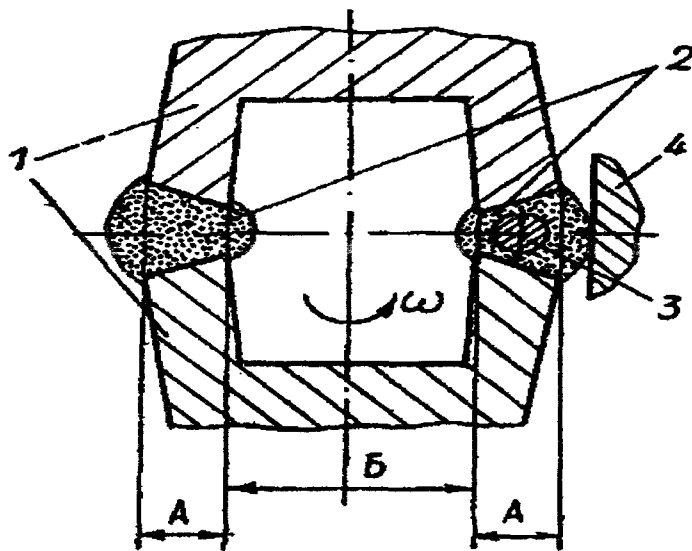


Рис. 2.2. Схема МАО с вращающимися полюсными наконечниками:  
 А, В – рабочая и нерабочая зоны соответственно; 1 – полюсные наконечники магнитной системы;  
 2 – кольцевая режущая щетка, образованная абразивным порошком,  
 3, 4 – деталь, обрабатываемая внутри порошковой массы и наружной стороной режущей щетки

Учитывая общность задачи оптимизации, рассматриваются не абсолютные размеры полюсов, а их отношения друг к другу. Диапазоны изменения отношений варьируются от 2/5 до 5/2 (например, для  $X_1$  и  $X_3$ :  $X_1/X_3 = i$ ;  $i = 2/5 \dots 5/2$ ).

Углы наклона соответствующих отрезков (рис. 2.3) меняются:  $X_2 = 180^\circ \dots 270^\circ$ ;  $X_4 = 120^\circ \dots 180^\circ$ ;  $X_6 = 30^\circ \dots 90^\circ$ . Таким образом, изменения параметров охватывают весь диапазон геометрии конструктивно-целесообразных полюсных наконечников.

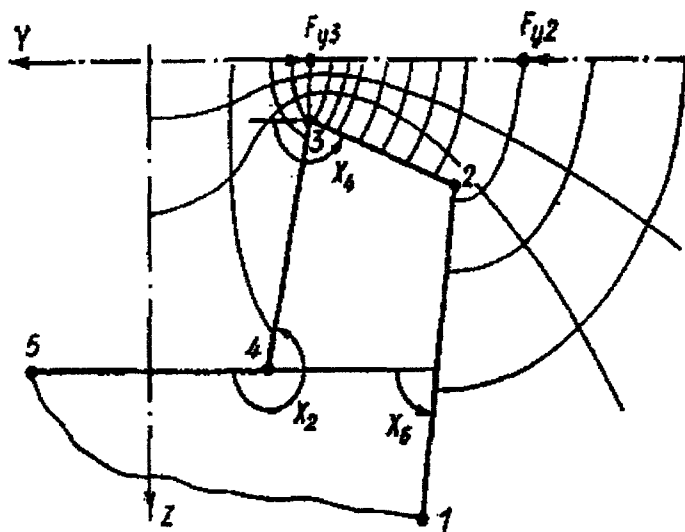


Рис. 2.3. Топография магнитного поля полюсных наконечников:  
 1, 2, 3, 4, 5 – точки, соответствующие вершинам профиля поверхности

Требования к топографии магнитного поля необходимо выразить через целевые функции  $\lambda_k = f_k(X_1, X_2, \dots, X_6)$ . Для этого рассмотрим факторы, влияющие на формирование режущего инструмента в виде абразивной порошковой массы, с точки зрения сформулированных требований к топографии магнитного поля на примере полюсных наконечников в форме чашек (см. рис. 2.2 и 2.3). Оптимальное энергетическое распределение поля обеспечит максимальный магнитный поток в рабочей зоне  $\lambda_1$  и минимальный в нерабочей  $\lambda_2$ .

Для обеспечения удержания абразивного порошка в рабочей зоне необходимы максимальные силы, направленные к зоне А. Анализ топографии магнитного поля показывает, что при выполнении первых двух требований поток магнитной индукции в рабочей зоне на участке между полюсными наконечниками, ограниченном отрезком 2–3 (см. рис. 2.3), будет максимальным. Следовательно, силы, действующие на ферромагнитное зерно, будут направлены в сторону градиента магнитной индукции (зона А). Очевидно, что составляющая силы  $F_y$  в нерабочей зоне будет направлена в рабочую. В последней  $F_y$  имеет направление или к точке 3, или к точкам 3 и 2 в зависимости от угла  $X_4$ . Составляющая силы  $F_z$  в нерабочей зоне будет направлена к точкам 2 и 3, т.е. к оси  $Y$ . В рабочей зоне – от оси  $Y$  к поверхности полюсных наконечников, причем на оси  $Y F_z = 0$ .

Таким образом, составляющие сил, действующих вдоль оси  $Z$  в рабочей зоне, будут определять сцепление порошковой массы с поверхностями полюсных наконечников, что способствует ее вращению.

Известно что на эту функцию магнитного поля влияют специально предусмотренные в реальных конструкциях полюсных наконечников концентраторы в виде зубьев различной формы [4, 5]. Очевидно (см. рис. 2.3), что составляющие сил, действующие вдоль оси  $Y$ , будут способствовать концентрации ферромагнитного порошка в рабочей зоне. Кроме того, силы, действующие на линии, соответствующие точке 3 полюсных наконечников, будут препятствовать вытеснению порошковой массы под действием сил резания (см. рис. 2.2).

Исходя из данного анализа, в качестве целевой функции  $\lambda_3$  взята составляющая силы, действующей на ферромагнитные зерна вдоль оси  $Y$  на линии, соответствующей точке 3.

Требования к распределению магнитного порошка в рабочей зоне полюсов различны в зависимости от конкретных условий обработки. Например, необходимо обеспечить плавный рост составляющих сил, действующих на зерно вдоль оси  $Y$  от точки 2 к 3 (рис. 2.3), что может характеризоваться производной  $\partial F_y / \partial y$  в точке 3 –  $\lambda_4$ .

Рассматриваем  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  и  $\lambda_4$  как наиболее общие целевые функции.

Геометрия полюсных наконечников будет оптимальной при выполнении условий

$$\lambda_1 > \max; \lambda_2 > \max; \lambda_3 > \max; \lambda_4 > \max. \quad (2.1)$$

Вид функций цели следует из закономерностей магнитного поля, которое можно определить, если в исследуемом пространстве вычислить вектор магнитного поля  $B$ . При отсутствии вихрей (электрических токов) магнитное поле можно рассматривать как потенциальное [75] и математическая модель, описывающая функции цели (в неявном виде), состоит из следующих выражений:

$$\text{Div grad } \varphi_m = 0 ,$$

$$B = - \text{grad } \varphi_m , \quad (2.2)$$

$$Fx = m \text{ grad } B_x , \quad (2.3)$$

$$\Phi = \int B dS , \quad (2.4)$$

где  $\varphi_m$  – магнитный скалярный потенциал;

$Fx$  – составляющая сил, действующих на ферромагнитное тело ( $Fy, Fz$  – аналогично);

$m$  – магнитный момент тела [4];

$\Phi$  – магнитный поток через поверхность  $S$ ;

$S$  – поверхность, ограничивающая исследуемую область.

При сложной конфигурации границ исследуемого пространства решить уравнение (2.2) аналитически невозможно.

Существующие методы приближенного численного расчета [76] в основном сводятся к трем методам: конечных разностей, конечных элементов и интегральных уравнений [77]. Каждый имеет свои особенности и достоинства для конкретных условий, но в принципе они равнозначны.

В данной работе использован наиболее разработанный и пригодный для решения поставленной задачи метод конечных разностей, который основан на замене дифференциального уравнения разностным, являющимся его дискретным аналогом в каждой конкретной точке исследуемого пространства, полученной разбиением сеткой. Каждому узлу сетки соответствует разностное алгебраическое уравнение, и решение сводится к решению системы алгебраических уравнений, которое легко осуществлять на ЭВМ ввиду незаполненности матрицы коэффициентов [78].

Вследствие сложной формы исследуемого пространства (см. рис. 2.2) очень много узлов расчетной сетки не являются вершинами квадратов, поэтому потенциалы в каждом узле сетки удобнее вычислять по формуле единичного квадрата [79] и формулам для «неправильной» сетки. Имея значения потенциала на границе области, потенциал внутри вычисляется методом простой итерации.

Вектор магнитного поля  $B$  можно вычислить с помощью формулы (2.2) непосредственно из полученных значений потенциальной сеточной функции  $\Phi_M = \Phi_{ij}(x, y, z)$  численным дифференцированием. Поскольку магнитные полюса являются телами вращения, то задача расчета поля сводится к плоской и можно применить теорию функций комплексного переменного [80], согласно которой функция потока является сопряженной потенциальной функции и вычисляется по формуле

$$\Phi_k - \Phi_{-k} = - \int_{-k}^k \frac{\partial \Phi_M}{\partial x} dy = \int_{-k}^k \frac{\partial \Phi_M}{\partial y} dx,$$

где  $\Phi_k - \Phi_{-k}$  – значение функции потока на интервале от  $-k$  до  $k$ .

Применение теории функций комплексного переменного дает возможность расчета топографии магнитного поля с помощью конформного отображения  $x$  и  $y$  в плоскости  $\Phi$ ,  $\Phi_M$  методом вектора скоростей [79]. Он иногда значительно упрощает расчеты поля и дает наглядную геометрическую картину.

Вследствие большого объема вычислений, разработана программа для ЭВМ, исходными данными которой являются координаты вершин полюсных наконечников 1, 2, 3, ... , 16 (см. рис. 2.3) размер стороны квадрата расчетной сетки и величины потенциалов на поверхности полюсов, выходными – необходимые параметры магнитного поля (составляющие вектора  $B$ , функции потока, силы, действующие на единичное зерно и др.).

Расчет значений целевых функций  $\lambda_k$  из выражений (2.14)...(2.16) весьма трудоемкий, поэтому целесообразно представить целевые функции в виде полиномов трех типов:

$$\lambda_k = \alpha_0 + \sum_{i,j=1}^n a_{ij} X_i X_j, \quad (2.5)$$

$$\lambda_k^2 = \alpha_0 + \sum_{i,j=1}^n a_{ij} X_i X_j, \quad (2.6)$$

$$\lambda_k = \alpha_0 + \sum_{i,j=1}^n \frac{a_{ij}}{x_i x_j}. \quad (2.7)$$

Для нахождения параметров полиномов можно воспользоваться методами математического планирования экспериментов [81]. С учетом детерминированности целевых функции выбирается насыщенный план Рехтшафнера, согласно которому методом ко-



нечных разностей вычисляются соответствующие значения целевых функций. Для их аппроксимации выражениями (2.5)...(2.7) возможно использовать значения  $X$  в кодированном виде [81],  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – в нормированном, т.е. применять не значения магнитного потока, а часть от общего потока, приходящуюся на исследуемую зону,  $\lambda_3$  и  $\lambda_4$  – относительные значения, полученные из расчета поля при назначении поверхностям полюсов различной геометрии одинакового потенциала.

Аппроксимация исходных данных методом наименьших квадратов с оценкой по среднеквадратическому отклонению показала, что лучшим описанием всех исследуемых функций является квадратичный полином (2.5), обеспечивающий расхождение значений всех четырех целевых функций, вычисленных по полиному, менее чем на 0,01%. Приведенные в табл. 2.1 параметры соответствующих полиномов получены при смещении центра «эксперимента» из 0 в 2, что вызвано необходимостью проверки соответствия целевых функций выражению (2.7).

Таблица 2.1

Параметры квадратичного полинома, описывающего целевые функции

$i$	$j$	Параметр $a_{ij}$ для $\lambda_k$			
		$K=1$	$K=2$	$K=3$	$K=4$
0		1,0097	0,0507	2,5966	-0,2850
1		-0,0068	-0,0050	-0,5807	-0,5891
2		-0,34311	0,1047	-1,3682	1,3962
3		0,3449	-0,1569	-0,4871	-0,2122
4		0,0569	-0,0344	-0,6763	0,0723
5		-0,2211	0,1914	0,5030	1,1979
6		-0,1177	0,1286	-0,4468	-0,8269
1	1	0,0112	-0,0099	0,1493	0,1246
2	2	0,0518	0,0068	0,3315	-0,2824
3	3	-0,0616	0,0131	0,1272	0,0575
4	4	-0,0255	0,0198	-0,2431	-0,0597
5	5	0,0428	-0,0378	-0,1461	-0,3134
6	6	0,0298	-0,0371	0,1178	0,2287
1	2	0,0076	-0,0066	-0,1310	0,0192
1	3	-0,0199	0,0186	0,0204	0,0035
1	4	0,0058	-0,0063	-0,0402	0,0061
1	5	0,0087	-0,0082	0,0516	0,0299
1	6	-0,0011	0,0044	0,0367	0,0050
2	3	-0,0270	0,0247	-0,0180	0,0268
2	4	0,0006	-0,0021	0,1136	0,0116
2	5	0,0023	-0,0006	-0,6540	-0,0171
2	6	-0,0066	0,0055	-0,0782	-0,0426
3	4	0,0100	-0,0067	-0,0640	-0,0171
3	5	0,0086	-0,0084	0,0283	0,0067
3	6	-0,0034	0,0067	0,0129	-0,0182
4	5	-0,0364	0,0354	-0,0408	-0,0068
4	6	-0,0011	0,0023	-0,0514	-0,0280
5	6	0,0089	-0,0058	0,0468	0,0096

Анализ пробных значений целевых функций, вычисленных с помощью *Лпт*-последовательности и ранжированных в соответствии с требованиями (2.1), 128 показал, что оптимальным соотношениям геометрических параметров, удовлетворяющим всем четырем критериям (2.1), соответствуют значения варианта № 59. В табл. 2.2 приведены значения целевых функций и соответствующих им геометрических параметров. При этом углы переведены в градусы, а длины отрезков – в миллиметры с учетом реальных конструкций магнитных систем. Рассмотренный пример оптимизации соответствует наиболее общим требованиям к свойствам инструмента (ферроабразивная порошковая масса). При проектировании технологических процессов МАО конкретных деталей необходимы дополнительные требования. Например, если условия обработки детали требуют максимальной запирающей силы  $F_{y3}$ , но в рабочей зоне полюсных наконечников для лучшего перемешивания абразивного порошка необходим участок с  $F_{y2} = 0$ , то, согласно  $\lambda_3 \rightarrow \min$ ;  $\lambda_4 \rightarrow \min$ , лучший вариант – № 109 (см. табл. 2.2). Однако требованиям  $\lambda_1 \rightarrow \max$ ;  $\lambda_2 \rightarrow \rightarrow \min$  этот вариант не удовлетворяет, лучший – № 25.

Таблица 2.2

Значения функций отклика и геометрических параметров полюсных наконечников в соответствующих пробных точках

Расчетное значение	Функция отклика				Геометрический параметр					
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$X_1$ , мм	$X_2$ , градус	$X_3$ , мм	$X_4$ , градус	$X_5$ , мм	$X_6$ , градус
59	0,63	0,37	-0,36	0,96	46	266	48	151	28	87
25	0,80	0,21	-0,92	0,47	38	265	31	173	44	82
107	0,78	0,21	-0,75	0,63	45	256	20	171	42	63
112	0,82	0,18	-0,31	0,55	21	261	23	177	29	66
109	0,60	0,40	-1,02	0,47	41	244	39	180	24	56

Таким образом, применяемый метод оптимизации предусматривает выбор лучшего компромиссного варианта при проектировании. При этом когда к рассмотренным общим требованиям добавляются другие, то из них формулируются соответствующие целевые функции  $\lambda_3, \dots, \lambda_3$ .

Для ряда конкретных конструкций магнитных систем и картин магнитных полей, рассчитанных по созданной методике, выполнены проверочные расчеты с использованием более точного и менее трудоемкого, по сравнению с методом конечных элементов, метода внешних конечноэлементных аппроксимаций [82]. Получено хорошее совпадение результатов расчетов с использованием обоих методов.

Отдельные положения разработанной методики расчета магнитных полей получили развитие в работе [3], в основу которой также положен метод конечных элементов. Имеется опыт создания модели магнитного поля в рабочей зоне путем решения дифференциальных уравнений с использованием метода Рунге-Кутты [84].

### 2.3. Исследование состояния ферроабразивного порошка в зазоре между параллельными плоскостями

Для управления процессом магнитно-абразивной обработки (МАО) необходимо изучить влияние магнитного поля на напряженно-деформированное состояние порошка вблизи обрабатываемой поверхности. Умение управлять напряженно-деформированным состоянием обеспечит возможность получения заданной структуры уплотненной магнитным полем массы порошка-инструмента. Для удобства моделирования ферроабразивного порошка (ФАП) считаем его квазиоднородной сжимаемой изотропной средой. Реологиче-

ские свойства такой среды определяются степенью пористости и напряженностью магнитного поля. В магнитном поле межчастичные связи ограничивают относительное перемещение частиц. Для выбора модели необходимо учитывать скорость деформирования, т.к. при достаточно медленном деформировании межчастичные связи успевают перестраиваться, и напряженно-деформированное состояние ФАП определяется величиной сдвиговой деформации. В этом случае в качестве реологической модели ФАП можно использовать модель конечно-деформируемой среды. При относительно быстром деформировании рвутся межчастичные связи в плоскости, перпендикулярной оси вращения, и слои движутся относительно друг друга. В этом случае напряженно-деформированное состояние ФАП определяется скоростью сдвиговой деформации, а не величиной относительного перемещения частиц. Поэтому для описания реологических свойств ФАП можно использовать модель типа применяемых для порошковых материалов при горячем прессовании.\*

В них отражается зависимость развивающихся напряжений от скорости деформирования и пористости материалов. Модель вязкого сжимаемого тела имеет следующий вид:

$$\sigma = 2\eta(\rho)(D - 1/3trDE) + \varphi(\rho)DE, \quad (2.8)$$

где  $\sigma$  – тензор вязких напряжений;

$D$  – тензор скоростей деформаций;

$\rho$  – относительная плотность материала;

$\eta(\rho)$ ,  $\varphi(\rho)$  – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости, зависящие от относительной плотности среды  $\rho$ .

Особенность реологической модели (2.8) состоит в том, что сопротивление среды объемному сжатию определяется скоростью деформации. Такое допущение применимо, когда развивающиеся напряжения превышают сопротивление сжатию массы порошка.

Для анализа динамики деформирования ферроабразивной порошковой массы рассмотрим задачу об ее одноосном уплотнении между параллельными дисками, один из которых вращается с угловой скоростью. Магнитное поле ориентировано вдоль оси вращения.

Прочность межчастичных связей и, соответственно, вязкость ФАП возрастают с увеличением напряженности поля. Наличие межчастичных связей может вызвать скольжение порошка по дискам. Как обычно, будем считать, что скорость проскальзывания пропорциональна касательному напряжению с коэффициентом пропорциональности  $k$ . Вследствие высокой вязкости, можно пренебречь силами инерции. Это следует из соотношения оценок времени развития скорости сдвига и масштаба времени уплотнения. Уравнения движения запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial Z} + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{r} = 0,$$

$$\frac{\partial \sigma_{31}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial Z} + \frac{\sigma_{13}}{r} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (\rho v_r r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z r) \right).$$

Поле скоростей представим в виде

$$V_r = r f(z, t), \quad V_\varphi = 0, \quad V_z = g(z, t), \quad \rho = \rho(z, t).$$

\* Математические расчеты и вычисления по подразделу 2.3 выполнены А.Ю.Тарасовой.

После определения граничных условий аналитически находим траекторию движения среды, изменение ее плотности и выражения для напряжений в порошковой массе в зазоре между дисками.

Для второй задачи скорость вращения считаем относительно малой. При достаточно медленном деформировании, когда межчастичные связи успевают перестраиваться, напряженно-деформированное состояние ФАП определяется величиной относительного смещения слоев, т.е. значением сдвиговой деформации. В этом случае следует использовать реологическую модель конечных деформаций сжимаемых материалов. Например, полулинейную модель

$$I = 2 \sqrt{\frac{g}{G_T}} (\psi_0 E + \psi_1 F + \psi_2 F^2),$$

где  $F$  – мера Фингера;

$g, G$  – метрики в отсчетной и актуальной системах координат соответственно.

Уравнения движения запишутся в виде  $\operatorname{div} I = 0$ . Задаем после перемещений

$$R = r + f_1(r, z, t), \quad \Phi = \psi + f_2(r, z, t), \quad Z = z + f_3(r, z, t).$$

Тензор деформации Эйлера-Лагранжа через перемещения

$$\varepsilon = 1/2(vu + (vu)^T + vu + (vu)^T).$$

После всех вычислений находим искомые величины.

Более подробное изложение математических расчетов и результаты конкретных вычислений по рассмотренной задаче приведены в работе [85].

## 2.4. Математическая модель динамики ферроабразивных порошковых частиц

Исследование динамики ферроабразивных частиц наиболее полно представлено в работах [3, 22] и посвящено схемам МАО тел вращения с осцилляцией полюсных наконечников и порошка-инструмента. Мало исследованы нашедшие большее распространение в настоящее время схемы МАО с вращением полюсных наконечников и ферроабразивного порошка. В этих процессах на порядок выше скорость резания и производительность обработки. В этих условиях особенно важно поведение частиц ФАП, а изучение особенностей этого поведения актуально.

Наиболее трудной задачей в математическом моделировании процесса МАО является выбор модели сплошной среды для ФАП. Каждая ферроабразивная частица, вращаясь вокруг неподвижной оси, подвержена в зоне обработки воздействию центробежных, кориолисовых сил инерции, сил упругости и вязкости, обусловленных наличием магнитного поля. Кроме того, на частицы, находящиеся в контакте с обрабатываемой поверхностью, действуют еще силы резания (трения) и силы нормального давления.

В качестве возможных исследованы варианты представления массы порошка-инструмента в виде вязкой жидкости, упругого и вязкоупругого тела. Дифференциальные уравнения динамики относительного движения ферроабразивной частицы (с учетом действия центробежных, кориолисовых, упругих сил и сил вязкости) имеют вид\*

\* Математические расчеты и вычисления по разделу 2.4 выполнены А.Е. Крушевским.

$$\left. \begin{aligned} m_1 x &= 2m_1 \omega \cdot y + m_1 (a + x) \omega^2 - C_x x - \mu_x x \\ m_1 y &= -2m_1 \omega \cdot x + m_1 (b + y) \omega^2 - C_y y - \mu_y y \end{aligned} \right\}, \quad (2.9)$$

где  $m$  – масса частиц (зерна);

$\omega$  – угловая скорость абразива;

$a, b$  – начальные координаты частицы абразива в положении покоя;

$C_x, C_y$  – жесткость упругих связей в направлении осей координат;

$\mu_x, \mu_y$  – коэффициенты вязкости в направлении осей координат.

Решение уравнений (2.9) позволило сделать следующие выводы:

1) модель сплошной среды для вращающейся ферроабразивной массы неприемлема, т.к. устойчивость системы теряется уже при малых значениях угловой скорости;

2) модель упругого тела дает незатухающие гармонические колебания, что не соответствует действительности;

3) из трех рассмотренных моделей ближе к истине модель вязкоупругого тела.

Математические преобразования уравнений (2.9) для модели вязкоупругого тела позволили получить обобщенные уравнения и графики движения ферроабразивных частиц для следующих характерных случаев:

- при устойчивом вязкоупругом режиме;
- при вязкоупругом резонансе;
- при неустойчивом вязкоупругом режиме;
- при устойчивом упругом режиме;
- при упругом резонансе.

Обобщенные графики движения частиц для перечисленных случаев приведены на рис. 2.4.

Значительный интерес представляют особенности поведения ансамбля ферроабразивных частиц в фиксированном пространстве. Для выявления общих закономерностей такого поведения рассмотрены задачи по исследованию ферроабразивной порошковой массы, имеющей: а) границы прямоугольного контура; б) форму круга.

С использованием модели вязкой жидкости и модели упругого тела установлено, что действие периодически изменяемой нагрузки на дозу порошка вызывает вынужденные колебания, как для модели вязкой жидкости, так и для модели упругого тела. Однако характер вынужденных колебаний для этих моделей существенно различен. Если для вязкой жидкости невозможно увеличение амплитуды вынужденных колебаний до бесконечности, то для упругой среды возможен резонанс, т.е. обращение в бесконечность амплитуды вынужденных колебаний при равенстве частоты возмущений и частоты собственных колебаний. Представление дозы ферроабразивной порошковой массы в виде вязкой жидкости позволяет определить поле скоростей частиц и напряжений в зависимости от времени и характеристик дозы порошка. При магнитно-абразивной обработке в течение определенного промежутка времени доза ферроабразивных частиц в межполюсном пространстве уплотняется и в заключительной стадии процесса ведет себя как упругое тело.

Решение сложного вопроса выбора математической модели порошковой среды в виде упругой, вязкоупругой, сыпучей или вязкой среды диктует необходимость решения еще более сложной задачи – описание математической модели условий взаимодействия порошка-инструмента и поверхности детали. Главным из этих условий является сила резания, возникающая в области контакта порошка и обрабатываемой поверхности и зависящая, прежде всего, от величины напряженности магнитного поля в зоне обработки.

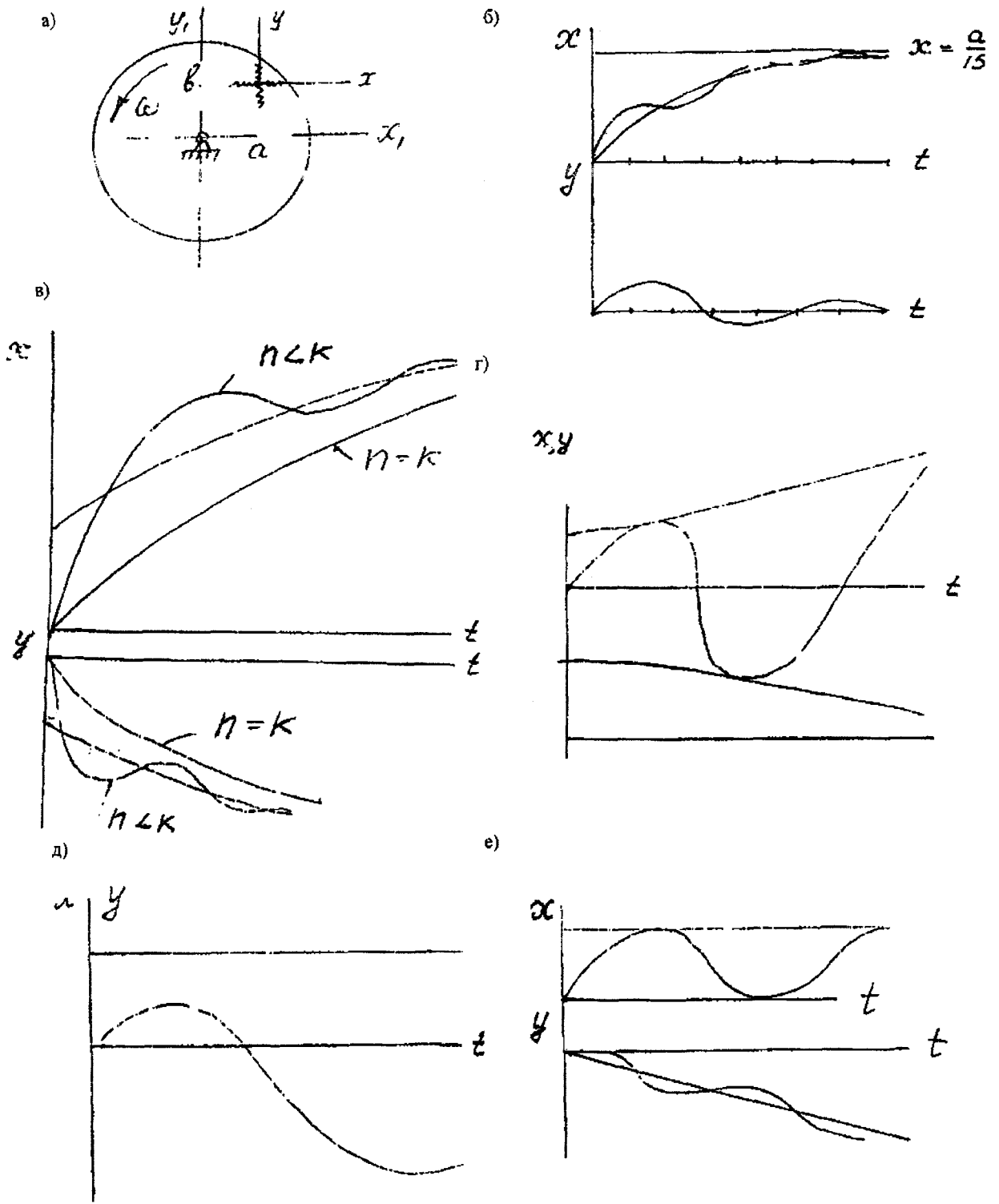


Рис. 2.4. Схема расчетной модели (а) и графики движения ферромагнитной частицы: при устойчивом режиме для вязкоупругой модели (б), при вязкоупругом резонансе (в), при неустойчивом режиме для вязкоупругой модели (г), при устойчивом режиме для упругой модели (д), при упругом резонансе (е) напряженности магнитного поля в зоне обработки

Таким образом, в динамических расчетах в качестве краевого условия следует принимать не кинематическое условие, наложенное на скорость частиц порошка, а силовое, которое накладывает зависимость на производную от скорости частиц порошка по нормали к поверхности контакта.

Рассмотрены простейшие математические модели различных процессов МАО и исследована динамика ферроабразивной среды:

- в виде бесконечной полосы;
- ограниченной прямоугольным контуром;
- при моделировании процесса обработки длинномерных цилиндрических изделий.

Установлено, что модель вязкой жидкости при соответствующем выборе коэффициента вязкости позволяет определить закон изменения скоростей частиц абразива и сил резания в зависимости от времени и координат, причем процесс во времени быстро стабилизируется и начальные условия почти не влияют на распределение частиц.

Математические расчеты моделей поведения ферроабразивных частиц нашли практическое применение при изучении кинематики и динамики процессов МАО, рассмотренных в главах 4 и 5.

## ГЛАВА 3. СОЗДАНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ РАБОЧИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

Рабочими технологическими средами при магнитно-абразивной обработке (МАО) являются ферромагнитные абразивные порошки (ФАП) и смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ). Комплекс свойств ФАП является одним из важнейших факторов, определяющих эффективность МАО [86]. Опыт показывает, что лучшие результаты дает применение при МАО композиционных ФАП, гранулы которых состоят из ферромагнитных и абразивных компонентов.

### 3.1. Ферромагнетики и абразивы как компоненты порошков-композитов

Режущая и полирующая способность ФАП в значительной мере зависит от их магнитных характеристик. Наиболее существенными из последних являются индукция насыщения и проницаемость. При этом имеется в виду магнитная проницаемость, соответствующая напряженности магнитного поля  $H = 400 \dots 600$  КА/м, свойственной процессу МАО [4].

Помимо технического железа широко известны как магнитно-мягкие материалы, его сплавы с кремнием, алюминием, кобальтом и никелем.

Сплавы железа с кремнием применяются во многих областях электротехники и достаточно хорошо изучены. Зависимость индукции насыщения от содержания кремния в этих сплавах выражается формулой [87]

$$B_s = 2,16 - 0,48 \text{ Si.}$$

При содержании Si > 33% сплавы Fe-Si теряют ферромагнитные свойства.

Сплавы железа с алюминием также широко распространены в промышленности. Соответствующая зависимость для них выглядит следующим образом [87]:

$$B_s = 2,16 - 0,57 \text{ Al.}$$

Алюминий в большей мере чем кремний понижает магнитную индукцию насыщения железа, поэтому сплавы Fe-Al при содержании Al > 16,5 % уже неферромагнитны.

Тройные сплавы Fe-Si (8...12 % мас.)-Al (4...7 % мас.) обладают высокими значениями максимальной магнитной проницаемости – до 117000 гс/э (1,17 Гн/м) в слабых магнитных полях напряженностью 10 Э (800 А/м) [88]. Эти сплавы имеют повышенную механическую твердость – НРС 45...55 [89], являются достаточно хрупкими и хорошо поддаются механическому измельчению.

Сплавы Fe-Co (30...50 % мас.) хотя и имеют высокие значения индукции насыщения  $B_s = 2,43$  Тл [3], но их механическая твердость не превышает  $HV \leq 100$  кг/мм<sup>2</sup> (1 ГПа) [87]. Учитывая еще и относительно высокую стоимость этих сплавов, их применение для ФАМ не является перспективным. Аналогичный вывод будет справедливым и относительно железо-никелевых сплавов.

Необходимо отметить, что пластическая деформация ферромагнитных материалов ухудшает их магнитную индукцию насыщения и проницаемость [90].

Чувствительны ферромагнитные материалы и к термообработке. Закалка, например, понижает  $\mu$  и  $B_s$ , а отжиг, наоборот, повышает их [91].

Примеси углерода, кислорода, серы и водорода существенно уменьшают значения  $\mu$  и  $B_s$  железа [31].

Таким образом, на основании выполненного анализа можно сделать вывод о том, что в качестве ферромагнитных компонентов композиционных ФАМ целесообразно использовать техническое железо и его сплавы с алюминием и/или кремнием.

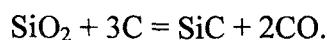


Эффект воздействия ферромагнитных абразивных частиц на обрабатываемую деталь при МАО весьма существенно зависит от свойств абразивного компонента ФАМ. В качестве этого компонента могут быть использованы традиционные абразивные материалы, которые условно подразделяются на естественные и искусственные. Естественные абразивные материалы в настоящее время в металлообрабатывающей промышленности применяются редко, вследствие недостаточной твердости (кварц, наждак) или ограниченности природных запасов (корунд, алмаз и др.) [92]. К наиболее широко распространенным искусственным абразивным материалам относятся электрокорунд, карбиды кремния и бора, алмаз.

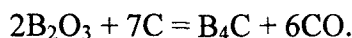
Искусственные абразивные материалы в промышленных масштабах получают, как правило, электротермией соответствующей шихты [93] с последующим измельчением охлажденного продукта и классификацией по зерновому составу.

Электрокорунд представляет собой продукт плавки глинозема и состоит из кристаллической окиси алюминия с добавками окислов хрома, титана, кремния, циркония и др.

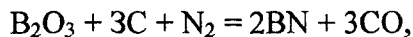
Карбид кремния получают в печах сопротивления восстановлением кремнезема углеродистым материалом по следующей реакции:



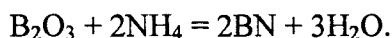
Карбид бора изготавливают электротермическим восстановлением борного ангидрида углеродом



Кубический нитрид бора (эльбор) обычно получают либо взаимодействием борного ангидрида с углеродом и азотом при температуре 1500...1800°C (1773...2073 К) по реакции



либо взаимодействием борного ангидрида с аммиаком в присутствии углерода при температуре 800...1200°C (1073...1473°K) по реакции



Искусственные алмазы получают синтезом углерода при температуре 1200...3000°C (1473...3273 К) и давлении 55...100 тыс. атм (5,5...10 ГПа).

Об эффективности применения абразивного материала обычно судят по его абразивным свойствам, которые характеризуют способность механически обрабатывать (резать, царапать, диспергировать) другой материал [24]. Чаще всего применяемый способ определения абразивной способности разработан во ВНИИАШ и заключается в том, что навеска исследуемых зерен 0,05 г (0,5 мкН) одного гранулометрического состава помещается между вращающимися стальным и стеклянным дисками и сошлифовывает со стеклянного диска за определенный промежуток времени некоторое количество стекла. Количественно абразивная способность характеризуется отношением объема сошлифованного стекла к объему навески [94]. Иногда при определении абразивной способности принимаются равные по объему дозы испытуемых порошков, а количественной характеристикой является масса сошлифованного стекла за определенный промежуток времени [95].

Абразивная способность материалов является сложной функцией их физических, химических и механических свойств [8, 25]. Наиболее важными из них являются: твердость, механическая прочность, геометрическая форма и размеры частиц. Твердость абразивных материалов, как правило, характеризуют микротвердостью, о величине которой судят по размерам отпечатка, оставляемого на поверхности исследуемого образца нагру-

женной алмазной пирамидой. Установлено, что с повышением механических свойств зерен повышается их абразивная способность [96]. Механическую прочность абразивных частиц определяют, в основном, двумя способами. Первый из них заключается в том, что определенное количество абразивных частиц помещают в матрицу и посредством пуансона сдавливают их с определенным усилием. По количеству зерен, сохранившим первоначальные размеры, делают заключение о прочности материала.

Суть второго способа согласно ГОСТ 9205-70 состоит в определении средней нагрузки в граммах, при которой зерна исследуемого материала разрушаются. Значения микротвердости и механической прочности некоторых абразивных материалов приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Физико-механические свойства абразивных материалов

Материал	Плотность [96] г/см <sup>3</sup>	Микротвердость				Предел прочности дан/мм <sup>2</sup> [100]		Абразивная способность		
		кг/мм <sup>2</sup>	источник	ГН/м <sup>2</sup>	источник	при изгибе	при сжатии	удельная [101]	относительная [95]	относительная [99]
Алмаз	3,52	8000...10000		84...99			—	17,0	—	—
Эльбор	3,45	8160...9430	[96]	71...98	[24]		15...200	—	—	—
B <sub>4</sub> C	2,54	3400...4380		39...49		31	180	13,38	0,410	—
SiC	3,15	2850...3350		28...35		25,5	225	9,17	0,323	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,95	2000...2500		17...27		8,72	75,7	4,17	0,194	—
TiC	4,94	3100		30,2		26...105	138	1,6	0,176	1,57
ZrC	6,60	2900		28,4			83,4	2,3	0,125	3,92
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	—	—		13,0			—	4,5	—	2,25
WC	15,7	1800		16,6		—	—	5,4	—	7,09
VC	5,50	2550	[98]	—	[99]	—	—	—	—	—
TiB <sub>2</sub>	4,52	3480		30,2		24,5	135	10,6	0,095	9,22
ZrB <sub>2</sub>	6,17	2200		25,8		9,3	158	7,86	0,197	7,20
VB <sub>2</sub>	5,1	2080		23,0		—	—	1,80	—	1,75
W <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	13,1	2700		22,5		—	—	8,3	0,223	8,00
CrB <sub>2</sub>	—	—		19,1		128	128	0,6	0,074	0,56

Наряду с физико-механическими свойствами размеры и геометрия зерна определяют его работоспособность при любых операциях абразивной обработки [28]. Размеры зерен характеризуются их длиной  $L$ , высотой  $h$  и шириной  $b$ . Разработанный американским обществом по испытанию материалов (ASTM) стандартный метод определения размера зерна основывается на сравнении площадей зерен в плоском сечении со стандартными картами. Существует общее соотношение между номером зерна по ASTM и средней длиной пересекающего отрезка (таблица пересчета приведена в стандарте ASTM E112-63) [97].

Углы заострения  $\varepsilon$  вершин граней зерна и радиусы их округления  $\rho$  оказывают решающее влияние непосредственно на механизм процесса абразивной обработки [28, 102]. Отношение размеров  $L/b$  является параметром, характеризующим отклонение формы зерна от изометричной [28].

Линейно-геометрические характеристики абразивных зерен принято определять по их контурам, полученным фотографированием в проходящем свете [102] или зарисовкой с помощью рисовальных аппаратов [28]. В работе [103] указывается, что эти способы измерения размеров частиц обладают существенной погрешностью и более точным является

ся определение линейно-геометрических характеристик наблюдением зерен в отраженном свете. Размеры зерен электрокорунда и карбида кремния приведены в табл. 3.2. Примерно такие же численные значения размеров имеют эльборовые [104] и алмазные [105, 106] зерна.

Таблица 3.2

Линейно-геометрические характеристики зерен абразивных материалов [28]

Абразив	Зерни- стость, мкм	Средняя длина зерна $l$ , мкм	Средний радиус округления вершин $\rho$ , мкм	Средний угол при вершине $\epsilon$ , градус	$l/b$	$l/h$
Электрокорунд	500... 400	670	29	114	2,2	1,42
Карбид кремния зеленый		660	27	105	—	—
Карбид кремния черный		760	31	110	—	—
Электрокорунд	315... 250	770	21	108	2,3	1,66
Карбид кремния черный		450	27,5	110	—	—
Электрокорунд	200... 100	330	14,5	111	2,63	1,9
Карбид кремния зеленый		376	14,5	111	2,5	2,05
Карбид кремния черный		305	12	101	—	—
Электрокорунд	40...28	78	3,8	97	—	—
Карбид кремния зеленый		51	3,5	99	—	—

В исследованиях [28, 107] высказывается утверждение о наличии зависимости углов заострения вершин и радиусов их округления от размеров зерен. В работе [103] эти выводы подвергаются сомнению.

Зерновой состав абразивных порошков определяют ситовым анализом, т.е. производят механический рассев пробы на наборе сит с контрольными сетками. Пробы для испытания отбираются согласно ГОСТ 17260-71. Ширина зерна определяет номер его зернистости, соотношение размеров длины, ширины и высоты зерна ( $L:b:h$ ) характеризует его форму.

Форма и рельеф абразивных зерен в значительной мере определяют их механическую прочность и абразивную способность, а также существенно влияют на производительность процесса, силы резания, шероховатость обработанной поверхности и напряженное состояние поверхностного слоя [1].

Поскольку форма тела является понятием, не связанным с размерами тела и не изменяющимся при изменении его масштаба, то количественно форму зерен можно оценивать лишь безразмерными параметрами, такими как соотношение между объемными или линейными характеристиками тела. Бесконечное многообразие форм геометрических тел (микрочастиц) исключает возможность оценки формы каким-либо универсальным параметром, отражающим все аспекты формы [108]. Более того, для характеристик, сопоставления и классификации форм нет единой методики и терминологии даже для качественной оценки формы зерен абразивных материалов [109].

При количественном подходе к оценке формы неравноосных микрочастиц основным критерием является степень неравноосности, выражаемая отношением длин малой и большой осей микрочастицы [110]. Форму зерен оценивают также коэффициентом [109]

$$K_{\phi} = \frac{W_p}{W_u},$$

где  $W_p$  – масса зерна;

$W_u$  – масса частицы того же материала, имеющей форму эллипсоида.

Этот коэффициент характеризует меру отступления формы реальной абразивной частицы от формы идеального эллипсоида с полуосями  $l$ ,  $b$  и  $h$ , выраженную через соотношение их масс.

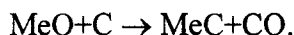
Подобный подход использован, например, при оценке влияния восьми видов измельчения электрокорунда и карбида кремния на форму частиц. В результате установлено, что способ механического измельчения не оказывает существенного влияния на форму получаемых абразивных зерен [109]. Установлено также, что хрупкие материалы, за исключением материалов с резко выраженной анизотропией механических свойств, распадаются при разрушении ударом на частицы, для которых справедливо отношение  $l : b : h = 1,5 : 1 : 0,7$  [111].

В плане возможного использования в качестве абразивных компонентов композиционных ФАМ представляет определенный интерес анализ свойств еще одной группы высокотвердых материалов – тугоплавких соединений переходных металлов IV–VI групп периодической системы элементов.

Традиционно применяемые абразивные материалы – электрокорунд, карбиды кремния и бора – в некоторых случаях не отвечают предъявляемым требованиям. Например, операция шлифования с использованием этих абразивов уменьшает циклическую прочность образцов из титановых сплавов на 25–40% по сравнению с образцами, изготовленными из того же материала в состоянии поставки, несмотря на то, что у шлифованных образцов чистота поверхности на 3–4 класса выше [112]. Объясняется это явление неблагоприятными последствиями взаимодействия обрабатывающего и обрабатываемого материалов. Качественный и количественный результат подобного взаимодействия зависит от электронного строения веществ [113]. На основании анализа энергетического состояния внешних электронных оболочек веществ, находящихся в контакте, представляется возможным объяснить механизм взаимодействия контактирующих тел при различных процессах обработки металлов и неметаллов [114]. Примером может служить теоретическое обоснование и практическое подтверждение положительного эффекта при шлифовании титановых сплавов абразивами из карбидов и боридов некоторых переходных металлов [112].

Абразивные материалы на основе карбидов и боридов переходных металлов IV–VI групп периодической системы элементов могут успешно применяться при обработке цветных металлов, их сплавов, сталей, чугунов, стекла и полупроводниковых материалов. Применение в обрабатывающей промышленности этих абразивных материалов позволяет повысить качество шлифования, полирования и доводки, в ряде случаев недостижимое при использовании природных и искусственных алмазов и других абразивов [114].

Порошки тугоплавких соединений обычно получают термохимическим синтезом соответствующих окислов. Карбиды можно получить восстановлением окислов металлов углеродом в вакууме [100]



Бориды же могут быть изготовлены восстановлением окислов металлов бором в вакууме при температуре 1700...1800°C [109]



Полученные таким способом порошки тугоплавких соединений имеют зернистость 40...10 мкм, поэтому в практике часто применяют операции брикетирования этих порош-

ков и спекания брикетов с последующим измельчением до необходимой зернистости. Или же вместо операций брикетирования и спекания применяют электродуговую плавку [112].

Поскольку поведение частиц в процессе полирования определяется, помимо электронного строения, их формой, размерами, макро- и микродефектами структуры, то, при прочих равных условиях, способ получения порошков играет весьма важную роль [95, 114]. От условий изготовления порошков зависят их механические и физические свойства, а также геометрические формы и размеры зерен. В качестве примера можно привести влияние способа получения порошка карбида циркония на механическую прочность зерен (см. табл. 3.3).

В данном случае прочность зерен определялась согласно ГОСТ 9205-70 и оценивалась средним значением нагрузки в граммах, при которой зерно разрушалось. Увеличение прочности: абразивных частиц влечет за собой повышение их абразивной способности [116].

Таблица 3.3

Влияние способа получения на прочность абразивных зерен из карбида циркония (грамм/зерно) [114]

Зернистость, мкм	Способ получения			
	углетермическое восстановление в печи Таммана при $t$		оплавление карбида при углетермическом восстановлении	электродуговой переплав
	2400°C	2500°C		
200...160	220	370	156	616
160...125	190	270	139	463
125...100	150	260	142	360
100...80	130	230	—	270

Так как определяющим фактором в оценке эффективности применения абразивных материалов является их абразивная способность, то представляет определенный интерес сопоставление мнений специалистов по вопросу взаимосвязи абразивной способности тугоплавких соединений с другими их свойствами. В работе [99] указывается, что на абразивную способность материалов влияет хрупкость частиц, их форма, но твердость, вероятно, является определяющей величиной. В то же время прямой корреляции между абразивной способностью и микротвердостью боридов и карбидов переходных металлов не наблюдается [96].

Примечательно заключение о том, что механические характеристики не являются решающим критерием при выборе абразивных материалов [96], в то же время определяющим фактором является степень химического взаимодействия между абразивом и поверхностью [117].

Еще в ранних исследованиях установлено, что применение абразивов тем эффективнее, чем выше их физико-химическая инертность к обрабатываемому материалу [118]. Для нормального протекания процесса абразивной обработки важно предотвратить химическое взаимодействие между абразивом и обрабатываемым материалом, приводящее к схватыванию и налипанию материала на абразивные зерна, росту сил трения и увеличению шероховатости обработанной поверхности [117]. Такое взаимодействие абразива и металла интенсифицируется с ростом электронного обмена между ними [114].

С точки зрения возможного применения частиц тугоплавких соединений в качестве абразивного компонента ФАМ весьма большой интерес представляет характер взаимодействия материала этих частиц с жидким железом (табл. 3.4). Ведь спекание брикетов смеси исходных компонентов ФАМ может происходить при температурах, достаточных для появления жидкой фазы [4].

Характер взаимодействия жидкофазного железа с некоторыми тугоплавкими соединениями и соответствующий краевой угол смачивания [119]

Нет взаимодействия		Перенос элементов из тугоплавких соединений в расплав		Перенос атомов металла в тугоплавкое соединение		Взаимный перенос	
Me-MeX	Θ, градус	Me←MeX	Θ, градус	Me→MeX	Θ, градус	Me↔MeX	Θ, градус
Fe-ZrB <sub>2</sub>	122	Fe-BN	112	Fe-Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	0	Fe-TiC	40
		Fe-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	90	Fe-Mo <sub>2</sub> C	0	Fe-ZrC	50
				Fe-WC	0	Fe-TiB <sub>2</sub>	118
						Fe-CrB <sub>2</sub>	25

Смачиваемость тугоплавкого соединения жидким металлом непосредственно связана с характером их химического взаимодействия, определяемым в свою очередь, их электронным и кристаллическим строением [119, 120]. Смачиваемость определяется по методу покоящейся капли и оценивается величиной краевого угла, образуемого касательной к капле жидкости в точке ее контакта с твердой поверхностью [121]. Полное растекание жидкости по поверхности твердого тела указывает на совместимость целого комплекса их свойств. Именно совместимость предполагает когерентное сочленение существующих фаз, их смачиваемость и хорошую спекаемость независимо от того, будет ли спекание жидкофазным или твердофазным [122]. При взаимодействии тугоплавких карбидов с металлами группы железа протекают эвтектические реакции [123].

Для процесса спекания и формирования структуры композиционного материала большое значение имеет взаимная растворимость спекаемых фаз и смачивающая способность металла основы [123].

Таким образом, при выборе абразивного компонента ФАМ следует учитывать физико-механические свойства, форму, линейно-геометрические характеристики абразивных частиц и характер их физико-химического взаимодействия как с ферромагнитной основой ФАМ, так и с обрабатываемым материалом.

Практика свидетельствует о том, что существующие абразивные материалы не могут быть использованы в равной степени эффективно для обработки всех конструкционных и инструментальных материалов. Каждый абразив, в том числе и алмаз, имеет свои конкретные области рационального применения [97]. На основании этого тезиса можно поставить под сомнение возможность создания универсального ферромагнитного абразивного материала, одинаково успешно применяемого во всех случаях практического приложения магнитно-абразивной обработки.

## 3.2. Композиционные ферроабразивные порошки

### 3.2.1. Методики исследования ферромагнитных и абразивных свойств порошков-композитов

Исследование магнитных свойств ферроабразивных порошков (ФАП) сводилось к построению и анализу основной кривой намагничивания, по которой можно определить необходимые магнитные характеристики – индукцию насыщения и магнитную проницаемость в сильных магнитных полях.

В основу данной методики заложены рекомендации ГОСТ 15058-69 "Материалы магнитомягкие. Методы испытания в постоянных полях". Измерить магнитные свойства порошков представляется возможным баллистическим методом на установке модели БУ-3

[124]. Исследуемый порошок засыпается в стеклянную трубку и уплотняется вручную. Открытый конец трубки закрывается пробкой из самотвердеющей пластмассы. Трубку с порошком и надетую на нее измерительную катушку помещают в соленоид, и, задавая значения намагничивающего тока, снимают показания баллистического гальванометра.

Магнитную индукцию в порошковой массе с учетом существенного отличия поперечных сечений образца и измерительной катушки вычисляют по формуле

$$B = \frac{C_8 \alpha}{2SW} - \mu_0 H \left( \frac{S_{\text{общ}}}{S} - 1 \right),$$

где  $C_8$  – постоянная гальванометра;

$\alpha$  – отклонения указателя гальванометра, мм;

$S$  – площадь поперечного сечения образца;

$W$  – число витков измерительной обработки;

$\mu_0$  – магнитная постоянная, равная 1,256 мкГ/м;

$S_{\text{общ}}$  – площадь поперечного сечения измерительной обмотки;

$H$  – напряженность магнитного поля.

Величина  $H$  определяется по формуле

$$H = K J,$$

где  $K$  – постоянная соленоида;

$J$  – сила тока в обмотке соленоида.

По полученным значениям  $B$  и  $H$  строится основная кривая намагничивания, анализ которой дает величины магнитной проницаемости

$$\mu = B / H$$

и индукции магнитного насыщения  $B_s$ .

Возможности измерения магнитных характеристик порошков на установке БУ-3 с использованием соленоида ограничены тем, что он обеспечивает магнитное поле, напряженностью не более 64 кА/м. При этом погрешность измерения компактных материалов составляет  $\pm 3\%$ . Контрольные измерения магнитных характеристик ФАП в полях напряженностью до 800 кА/м осуществлялись на специальном приборе конструкции НАМИ. Принцип выполнения измерений аналогичен вышеописанному.

В данной методике, разработанной для сравнительных испытаний магнитных свойств порошков, не учитываются размагничивающий эффект порошковой массы и неравномерность уплотнения порошка в трубке, поскольку их количественная оценка весьма трудоемка. Оба этих фактора вносят в результаты измерений систематическую ошибку, которая практически одинакова для всех образцов и не превышает 3%.

Универсальными характеристиками эффективности абразивной обработки являются показатель интенсивности диспергирования обрабатываемого материала (размерный или массовый сьем) и параметр качества сформированной поверхности (например, отклонение линии профиля по высоте). Такой подход в самых общих случаях применим и к МАО.

О достоинствах традиционных абразивных материалов судят по их абразивной способности, которую определяют согласно методике ВНИИ абразивов и шлифования и оценивают интенсивностью сошлифовывания стеклянного диска гранулами испытываемого материала [125]. Поскольку об абразивной способности порошков, применяемых при МАО, невозможно объективно судить, игнорируя их ферромагнитные свойства, то вышеупомянутая методика является неприемлемой для данного случая. Метод оценки абразивных свойств резанием единичным зерном [8, 126] также не может быть использо-

ван. В его основу заложен принцип суждения об абразивных свойствах по особенностям воздействия на обрабатываемый материал единичного жестко закрепленного абразивного зерна. При MAO режущий инструмент не является жестким, а его абразивная способность зависит от параметров магнитного потока в рабочей зоне, количества гранул ФАП и характера их механического взаимодействия.

Поэтому для сравнительных испытаний ферромагнитных абразивных порошков было принято решение оценивать их абразивную способность непосредственно по результатам их применения при MAO. Испытания осуществлялись на специальной установке модели ЭУ-1 (рис. 3.1, а) с использованием в качестве обрабатываемых образцов в виде втулок (рис. 3.1, б) из стали ШХ15 твердостью 58...62 HRC.

MAO на установке ЭУ-1 выполняется по схеме, представленной на рис. 3.1, б [127].

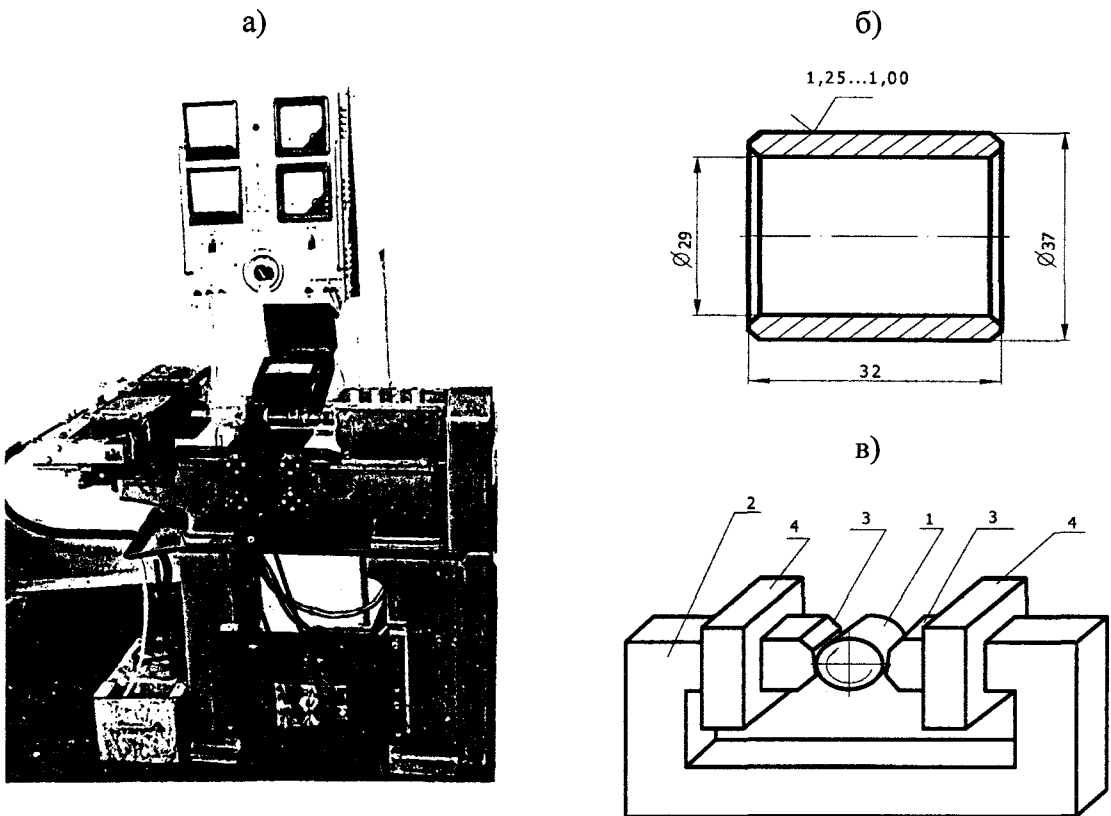


Рис. 3.1. Установка (а), схема (б) и образец (в) для испытания абразивной способности ФАП

ЭУ-1 представляет собой токарно-винторезный станок ТВ-4, оснащенный специальной наладкой, включающей магнитную систему и механизм осцилляции. Обрабатываемый образец 1 надевается на оправку и закрепляется в шпинделе, которому сообщается вращательное движение. Осциллирующее движение образцу сообщает механизм осцилляции. Магнитная система, установленная на месте верхних салазок суппорта станка состоит из магнитопровода 2, полюсных наконечников 3 и электромагнитных катушек 4. Смазочно-охлаждающая жидкость подается в зону резания электронасосом.

Режимы резания при испытаниях строго фиксированы и являются оптимальными для MAO стали ШХ 15 при использовании ФАП на основе железа и электрокорунда [3]. Скорость вращения детали  $V_g = 2$  м/с, средняя скорость осцилляции  $V_{оср} = 0,2$  м/с. Рабочие поверхности полюсных наконечников расположены концентрично обрабатываемой поверхности с радиальным зазором 0,8 мм. Суммарный угол охвата детали полюсными наконечниками  $2\alpha = 180^\circ$ . Магнитная индукция в зазоре  $B = 1,1$  Тл. В качестве СОЖ используется 7%-й раствор эмульсола Э-2 в воде.



Процесс определения абразивной способности ФАП сводится к следующему. Наружную поверхность образцов шлифовали до шероховатости  $1,0 < Ra < 1,25$  мкм. Измерение шероховатости до и после МАО производили на профилографе-профилометре. Измерение массы образцов выполняли на аналитических весах. В каждом опыте обрабатывалось по пять образцов. МАО осуществляли дозой испытуемого ФАП, равной  $2,5 \text{ см}^3$ , в течение определенного промежутка времени. Об абразивной способности порошка судили по двум показателям – уменьшению массы образца  $\Delta G$  и характеристике  $Ra$  шероховатости полученной поверхности.

### **3.2.2. Ферроабразивные порошки на основе железа и электрокорунда**

Для эффективного осуществления процесса магнитно-абразивной обработки создан специальный ФАМ на основе железа и электрокорунда [128]. Однако широкому применению в промышленности препятствовали некоторые его существенные недостатки. Главный из них – непрочное соединение частиц железа и электрокорунда в гранулах композиционного материала.

Причина этого явления заключается в том, что железо и окись алюминия химически не взаимодействуют и в твердом состоянии практически не растворяются друг в друге [129]. А отсутствие химической связи в зонах контакта частиц железа и электрокорунда обуславливает низкую механическую прочность гранул в целом.

Улучшение свойств материала  $\text{Fe-AL}_2\text{O}_3$  можно было ожидать при уточнении его температуры спекания. Величина этого главного фактора процесса изготовления указывается в интервале от  $900^\circ\text{C}$  до  $1200^\circ\text{C}$  [4]. В результате выполненных экспериментов установлено, что оптимальные свойства материала "железо-электрокорунд" обеспечивает температура спекания, равная  $1250^\circ\text{C}$  [86].

Весьма существенное влияние на абразивную способность ФАМ оказывает его гранулометрический состав. Для  $\text{Fe-AL}_2\text{O}_3$  известно, что лучшие показатели имеет порошок зернистостью  $160 \dots 125$  мкм [3], однако объяснение этого факта не приводится.

Нами установлено, что наиболее высокую абразивную способность этот ФАМ имеет при гранулометрической фракции  $210 \dots 160$  мкм (рис. 3.2, а). При этом не обнаружена линейная связь между абразивными и магнитными свойствами материала. Магнитная проницаемость порошка падает с уменьшением его зернистости (рис. 3.2, б).

Наличие оптимума абразивных свойств  $\text{Fe-AL}_2\text{O}_3$  зернистостью  $210 \dots 160$  мкм можно, по-видимому, объяснить благоприятным для процесса резания соотношением линейногеометрических характеристик ФАМ – размер частиц электрокорунда  $40 \dots 28$  мкм – и обрабатываемой поверхности детали –  $Ra - 1,25 \dots 0,63$  мкм.

С целью повышения прочности материала  $\text{Fe-AL}_2\text{O}_3$  в шихту при его изготовлении вводили добавку (10 % мас.) феррита железа  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  или жидкого стекла. Этим добавкам предназначалась роль связки между ферромагнитным и абразивным компонентами в гранулах композиционного материала. Однако к улучшению абразивной способности порошка эти меры не привели. Безуспешной в этом отношении оказалась и попытка активации фосфорной кислотой поверхности частиц железа и электрокорунда перед операциями прессования и спекания (табл. 3.5) [130].

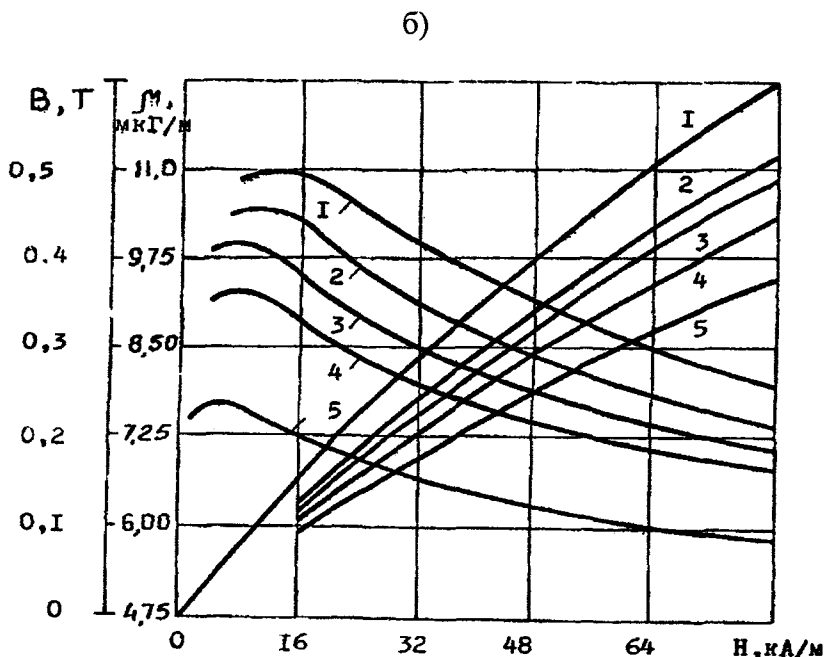
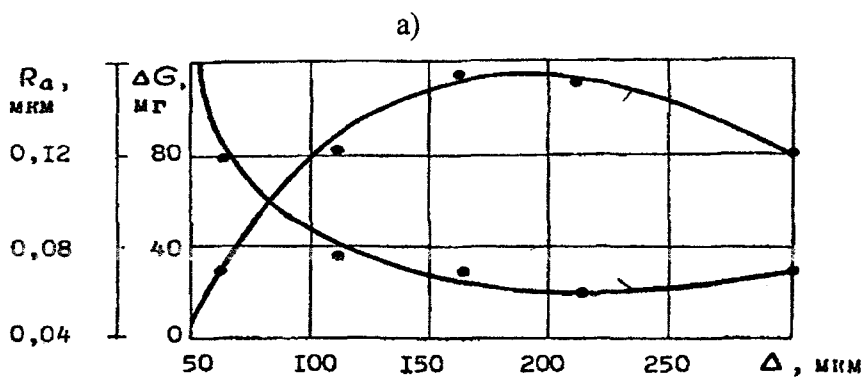


Рис. 3.2. Влияние гранулометрического состава ФАМ Fe-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на его абразивные (а) и магнитные (б) свойства: 1 - Δ = 300...210; 2 - Δ = 210...160; 3 - Δ = 160...110; 4 - Δ = 110...60; 5 - Δ = 60...0

Таблица 3.5

Свойства ФАМ Fe-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с различными добавками

№ п/п	ФАП, химический состав, % мас.	Абразивная способность		Магнитная проницаемость (H = 64 кА/м), мкГн/м
		ΔG, мг	Ra, мкм	
1	Fe-AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20%)	108	0,065	8,00
2	[Fe-AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20%)] - жидкое стекло	90	0,110	7,50
3	[Fe-AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20%)]- Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (10%)	104	0,070	7,77
4	[Fe-AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20%)] HPO <sub>3</sub> (1%)	110	0,066	8,12

Результаты этих экспериментов подтвердили необходимость создания новых композиционных ферромагнитных абразивных материалов.

Была предпринята попытка применения при MAO абразивных гранул, покрытых слоем ферромагнитного металла. Нанесение покрытия осуществлялось химической или электрохимической металлизацией в ванне, содержащей водный раствор солей осаждаемого металла [131]. Восстанавливаемый из солей металл равномерно осаждается на поверхности абразивных частиц, находящихся в ванне во взвешенном состоянии. Таким способом

получены никелевые, железные и никель-кобальтовые покрытия толщиной 0,6...6,5 мкм на гранулах электрокорунда, карбидов кремния и бора. Результаты испытаний этих порошков показали, что они обладают низкой магнитной проницаемостью ( $\leq 3,81$  мкГн/м) и, как следствие, плохими абразивными свойствами. Повысить магнитные свойства можно увеличением толщины покрытия, но в этом случае металл покрывает режущие грани абразивных частиц, что отрицательно сказывается на абразивной способности материала [86].

Некоторого повышения эффективности металлизированных абразивов удалось достичь применением их при MAO в смеси с порошком железа в объемном соотношении 1:1 [132]. Однако эти механические смеси имеют один существенный недостаток. Их использование при MAO эффективно лишь в первые 20–40 с работы, после чего процесс обработки интенсивно затухает, поскольку частицы металлизированного абразива из-за низких магнитных свойств плохо удерживаются в рабочем зазоре и выбрасываются из него центробежными силами.

Непрочное соединение частиц железа и электрокорунда в гранулах материала Fe- $Al_2O_3$  является главной причиной его относительно низкой абразивной способности. В этом материале компоненты соединены друг с другом механически, т.е. железо при спекании частично или полностью обволакивает частицы электрокорунда и таким образом удерживает их в гранулах. Представляется возможным повысить прочность гранул композиционного материала при обеспечении в зоне контакта компонентов их адгезионного взаимодействия. Этого можно достичь применением высоколегированного ферросплава (например, ферромарганца) в качестве абразивного компонента композиционного ФАМ. Выбор остановлен на ферромарганце, потому что он обладает достаточно высокой механической твердостью – микротвердость сплавов Fe-Mn достигает  $1200$  кг/мм<sup>2</sup> (12,0 ГПа). С использованием метода математического планирования эксперимента [133, 134] исследовано влияние температуры спекания и содержания марганца в абразивном компоненте на рабочие характеристики материала. Матрицы планов эксперимента приведены в работе [83]. Установлено, что лучшие показатели имеет ФАП Fe-(Fe-Mn), содержащий 30...40 % мас. Mn и спеченный при температуре 800°C (1073 К) [86, 135]. Однако этот ФАП по режущим и полирующим свойствам несколько уступает композиту Fe- $Al_2O_3$ , поэтому проведение работ по созданию новых ФАП актуально.

### **3.2.3. ФАП на основе железа и карбидов (боридов) переходных металлов**

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что абразивная способность всех испытанных композиционных ФАП является относительно невысокой по двум основным причинам – либо вследствие недостаточной прочности соединения компонентов в гранулах Fe- $Al_2O_3$ , либо из-за невысокой твердости абразивного компонента Fe-(Fe-Mn). Следовательно, существенного улучшения абразивной способности можно ожидать при использовании в качестве абразивного компонента таких материалов, которым свойственны высокие значения механических свойств, прежде всего твердости, а также способность образовывать с железом промежуточные фазы и эвтектику при температуре спекания. Этим условиям наиболее полно удовлетворяют карбиды и бориды переходных металлов IV–VI групп периодической системы элементов – титана, хрома, вольфрама, циркония, молибдена, ванадия и др. Их механическая твердость составляет  $1800...3480$  кг/мм<sup>2</sup> (18,0...34,8 ГН/м<sup>2</sup>), а предел прочности на изгиб –  $9,3...105,0$  дан/мм<sup>2</sup> (см. табл. 3.1). К тому же при повышенных температурах они достаточно активно взаимодействуют с железом и образуют устойчивые промежуточные фазы (см. табл. 3.4).

В качестве исходных компонентов при изготовлении ФАМ на основе железа и тугоплавких соединений использованы порошки железа марки ПЖ2М (ГОСТ 9849-74) и карбидов (боридов), полученные термическим восстановлением окислов соответствующих металлов\*. Гранулометрический состав порошков MeC, MeB – 63...0 мкм.

\* ФАП на основе железа и MeC, MeB изготовлены в ОКТБ ИПМ НАН Украины.

Технологический процесс изготовления материалов Fe-MeC, MeB обычный для композиционных ФАП и содержит операции смешивания исходных компонентов в необходимой массовом соотношении, прессования брикетов под давлением 600 Н/мм<sup>2</sup>, их спекания при температуре 1473 К в течение 0,5 часа в атмосфере водорода, измельчения спеков в порошок и выделения на ситах проб гранулометрического состава 250...80 мкм.

Абразивная способность и некоторые другие свойства полученных материалов приведены в табл. 3.6 [130].

Таблица 3.6

Свойства ферромагнитных абразивных материалов на основе железа и карбидов (боридов) переходных металлов

№ п/п	Абразивный компонент		Абразивная способность ФАМ		Магнитная проницаемость ( $H = 64 \text{кА/м}$ ), мкГн/м
	обозначение	содержание (% мас.)	$\Delta G$ , мг	$Ra$ , мкм	
1	TiC	10	158	0,077	8,41
		20	116	0,9 <sup>5</sup>	8,40
		30	91	0,144	8,24
		40	82	0,206	7,80
		50	75	0,240	7,43
2	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	10	77	0,17	6,70
		20	70	0,25	6,20
		30	90	0,15	6,12
3	ZrC	10	90	0,08	8,10
		20	88	0,30	7,91
		30	89	0,22	7,81
4	WC	10	52	0,18	8,07
		20	56	0,10	7,96
		30	51	0,22	7,84
5	TiB <sub>2</sub>	20	130	0,16	5,84
6	CrB <sub>2</sub>	20	126	0,28	6,47
7	ZrB <sub>2</sub>	20	106	0,25	6,12
8	W <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	20	146	0,27	6,96
9	Mo <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	20	143	0,17	6,65

Среди композиционных ФАП на основе железа и карбидов переходных металлов наибольший интерес представляет собой материал Fe-TiC. Высокие значения абразивных и магнитных характеристик дают основания предполагать его успешное применение в промышленности.

Предварительные испытания всех материалов Fe-MeB дали хорошие результаты [136]. Для более полного суждения о возможностях этих ФАП поставлен эксперимент, целью которого было определение оптимальной температуры их спекания. Результаты этого эксперимента приведены на рис. 3.3. Оптимальная температура спекания материалов Fe-MeB находится в пределах 1050°C (1273...1323 К), а их абразивная способность уменьшается в такой последовательности: TiB<sub>2</sub>, CrB<sub>2</sub>, Mo<sub>2</sub>B<sub>5</sub> и ZrB<sub>2</sub>. Однако следует иметь в виду, что эта последовательность справедлива для данных условий сравнительных испытаний, в частности, при обработке образцов из стали ШХ15. При MAO образцов из высокопрочного магниевого чугуна, например, материал Fe-W<sub>2</sub>B<sub>5</sub> показал абразивную способность на 20% выше, чем материал Fe-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>.

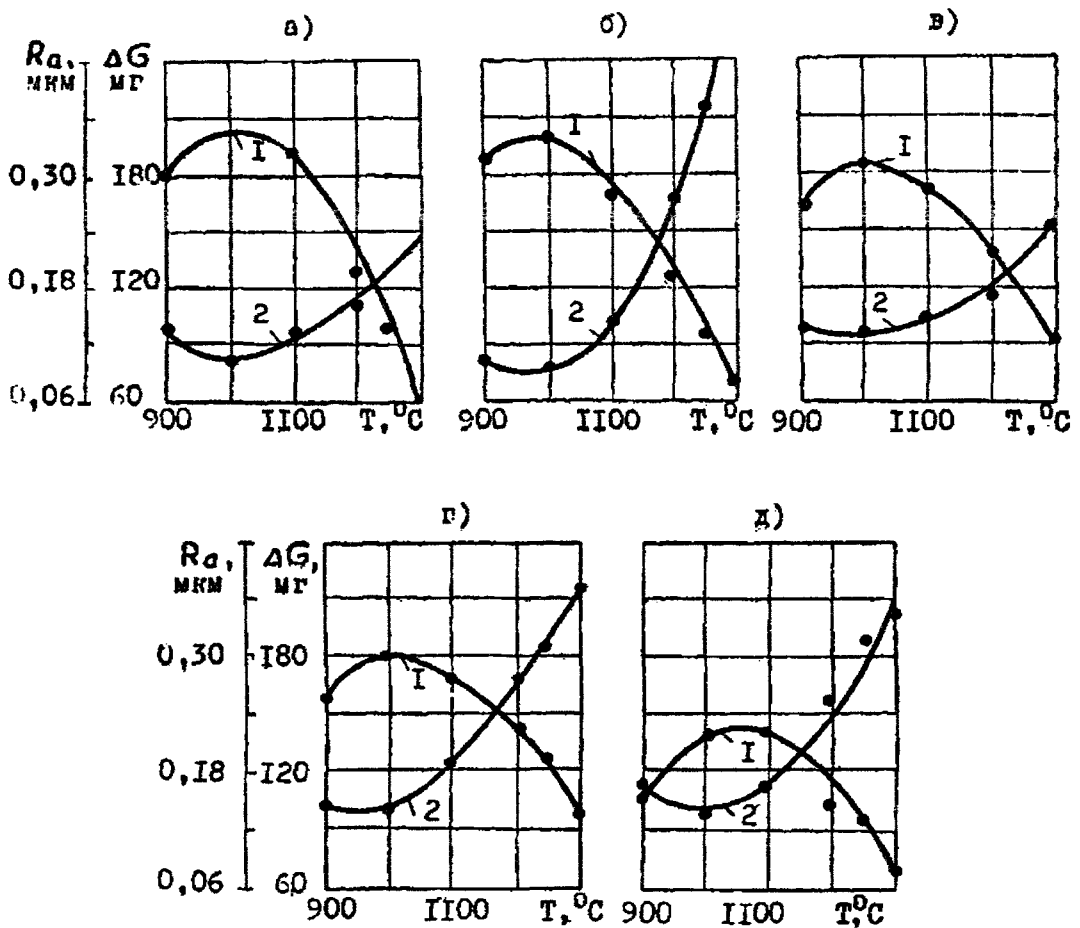


Рис. 3.3. Абразивные свойства (1 –  $\Delta G$ , 2 –  $Ra$ ) ФАМ на основе железа и боридов переходных металлов:  
 а – Fe-TiB<sub>2</sub>; б – Fe-CrB<sub>2</sub>; в – Fe-Mo<sub>2</sub>B<sub>5</sub>; г – Fe-W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>; д – Fe-ZrB<sub>2</sub>

Окончательно судить об эффективности использования материалов на основе Fe-MeВ можно лишь с учетом конкретных условий их применения.

Обнаделяющие результаты предварительных испытаний явились основанием для более обстоятельного исследования материала Fe-TiС с целью повышения его абразивной способности при MAO. Для определения оптимальных значений наиболее важных технологических факторов его изготовления были поставлены эксперименты согласно матрице центрального композиционного ортогонального плана второго порядка. В качестве входных параметров были приняты: длительность спекания материала, мин; температура спекания, °C; содержание абразивного компонента, % мас. и гранулометрический состав материала, мкм. В качестве функций отклика выбраны характеристики абразивной способности  $\Delta G$  и  $Ra$ . Регрессионный анализ результатов экспериментов дал следующие зависимости [137]:

$$y_1 = \Delta G = 197 + 4x_1 + 6,9x_2 - 5x_3 - 4,75x_4 + 5,12 x_1x_3 - \\ - 6,25 x_1x_4 - 16,36x_1^2 - 5,2x_2^2 - 14,7x_3^2 - 11,35x_4^2;$$

$$y_2 = Ra = 0,074 + 0,013x_1 - 0,02x_2 + 0,005x_3 + 0,02x_1^2 + 0,015x_2^2 + 0,017x_3^2 + 0,016x_4^2.$$

Графическая интерпретация этих уравнений представлена на рис. 3.4.

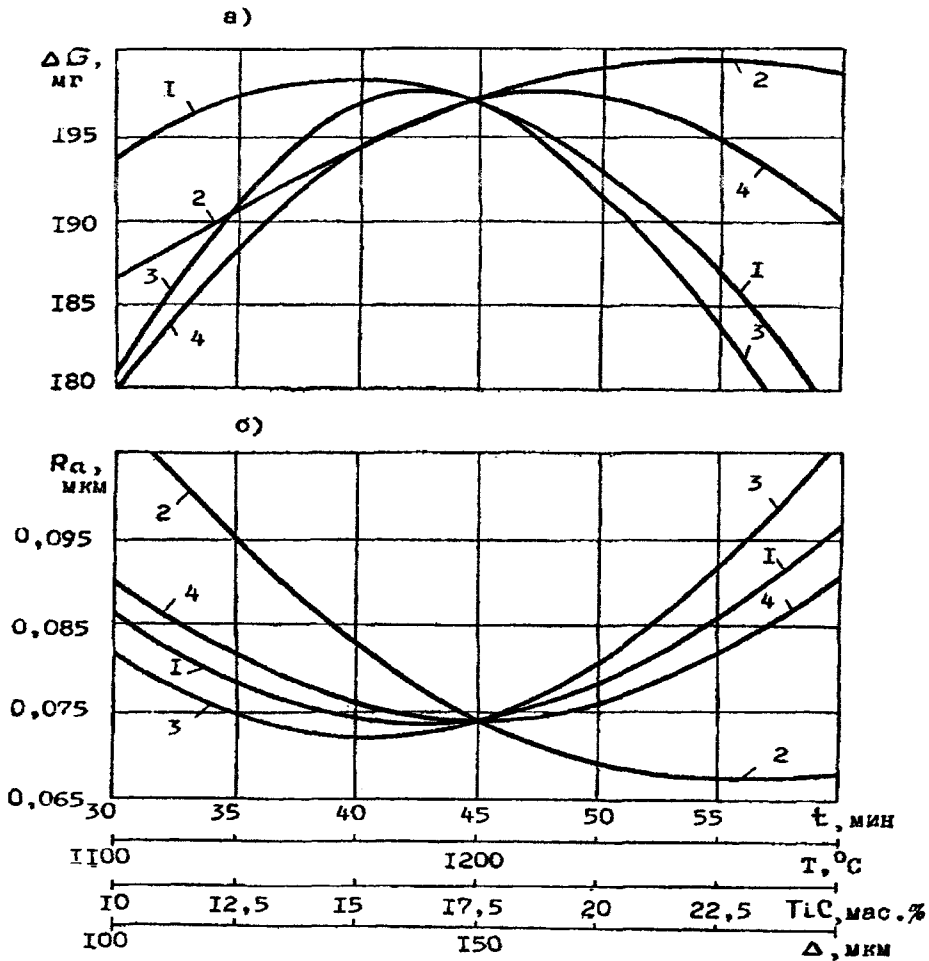


Рис. 3.4. Зависимости абразивных свойств материала Fe-TiC от технологических параметров процесса изготовления: 1 -  $f(t)$ , 2 -  $f(T)$ , 3 -  $f(\text{TiC})$ , 4 -  $f(\Delta)$

На рис. 3.5 приведены графики двумерных сечений поверхностей отклика данного эксперимента. Вся совокупность представленной информации свидетельствует о том, что наиболее существенным образом на абразивную способность Fe-TiC влияет температура спекания, несколько слабее влияние количества TiC в материале и длительности спекания. Оптимальными технологическими режимами процесса изготовления ФАП на основе железа и карбида титана являются: температура спекания - 1300°C (1573 K), длительность спекания - 30 мин, содержание карбида титана в материале должно быть равно 15 % мас. Ориентируясь на промышленное производство Fe-TiC, из экономических соображений следует стремиться к возможно более широкому диапазону зернового состава применяемого материала. Для определения границ такого диапазона были испытаны пробы Fe-TiC различного гранулометрического состава. Данные этих испытаний, приведенные в табл. 3.7, подтверждают целесообразность применения при MAO материала Fe-TiC с размером гранул 250...80 мкм.

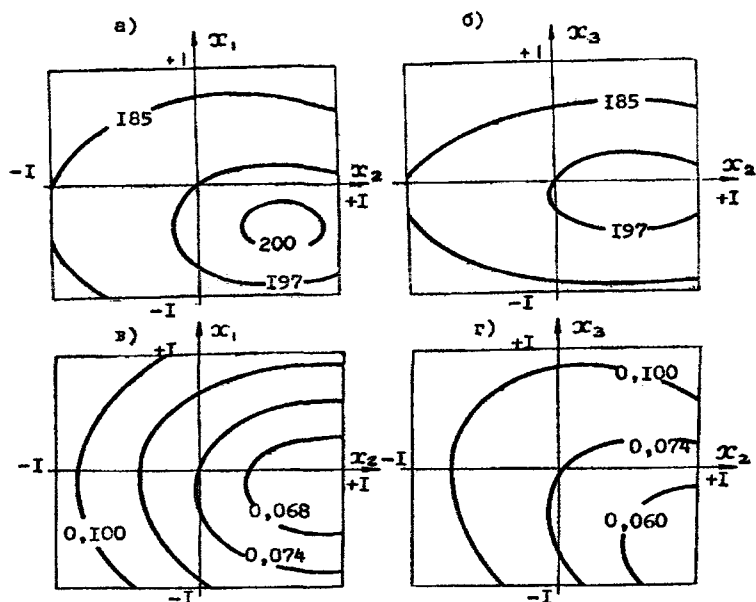


Рис. 3.5. Влияние взаимодействий параметров процесса изготовления Fe-TiC на его абразивную способность: а – двумерное сечение поверхности отклика  $\Delta G = f(t, T)$ ; б –  $\Delta G = f(T, TiC)$ ; в –  $Ra = f(t, T)$ ; г –  $Ra = f(T, TiC)$

Таблица 3.7

Влияние гранулометрического состава ФАМ на его абразивные свойства

Ферромагнитный абразивный материал	Гранулометрический состав, мкм	Абразивная способность	
		$\Delta G$ , мг	$Ra$ , мкм
Fe-TiC (15% мас.)	100...63	174	0,096
	125...100	210	0,077
	160...125	223	0,062
	200...160	220	0,074
	250...200	212	0,079
	250...63	217	0,064

Исследование микроструктуры порошков Fe-TiC показало, что включения TiC наблюдаются как в виде отдельных зерен неправильной формы, так и в виде окантовок по границам частиц железа. На границах раздела двух фаз имеет место эвтектика "TiC" в количестве от 2 до 8 % мас. (рис. 3.6).

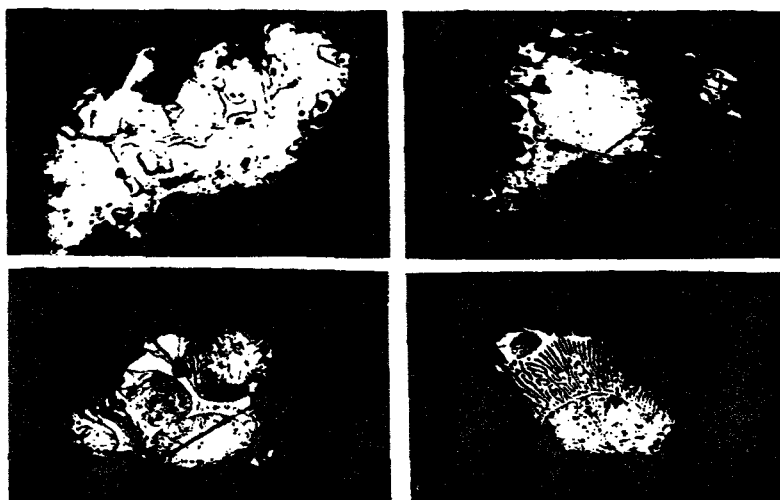


Рис. 3.6. (x450). Микроструктура гранул порошков Fe-TiC

Глобулы металлической фазы имеют ферритную, ферритно-перлитную либо перлитную структуры. Микротвердость структурных фаз: ферритной основы 115...128 кг/мм<sup>2</sup> (1,15...1,28 ГПа), перлитной основы 170...186 кг/мм<sup>2</sup> (1,70...1,86 ГПа), эвтектики 780...934 кг/мм<sup>2</sup> (7,80...9,34 ГПа), отдельных карбидных включений 2500 кг/мм<sup>2</sup> (25 ГПа) [130].

Результаты выполненных исследований были использованы при организации промышленного изготовления ферромагнитного абразивного материала Fe-TiC в цехе опытного производства ОКТЬ ИПМ НАН Украины согласно ТУ 88 УССР 147.002-75.

Наиболее обстоятельные исследования абразивной обработки в магнитном поле [3, 4] выполнены для ФАП на основе железа и электрокорунда. Использование Ж-15КТ в основном производстве вызвало необходимость определения оптимальных условий его применения. С этой целью был поставлен эксперимент по исследованию влияния основных технологических факторов МАО – магнитной индукции в рабочей зоне и скорости вращения детали – на эффективность использования Ж-15КТ. При помощи математического планирования эксперимента, включающего составление матрицы, обработку результатов опытов, регрессионный и дисперсионный анализы, получены следующие математические модели:

$$y_1 = \Delta G = 194 + 5,6x_1 + 20,2x_3 - 11,6x_1^2 - 24x_2^2 - 18,5x_3^2;$$

$$y_2 = Ra = 0,08 + 0,007x_1 - 0,02x_3 + 0,006x_1x_3 - 0,004x_1^2 + 0,012x_3^2.$$

Эти модели представлены графически на рис. 3.7.

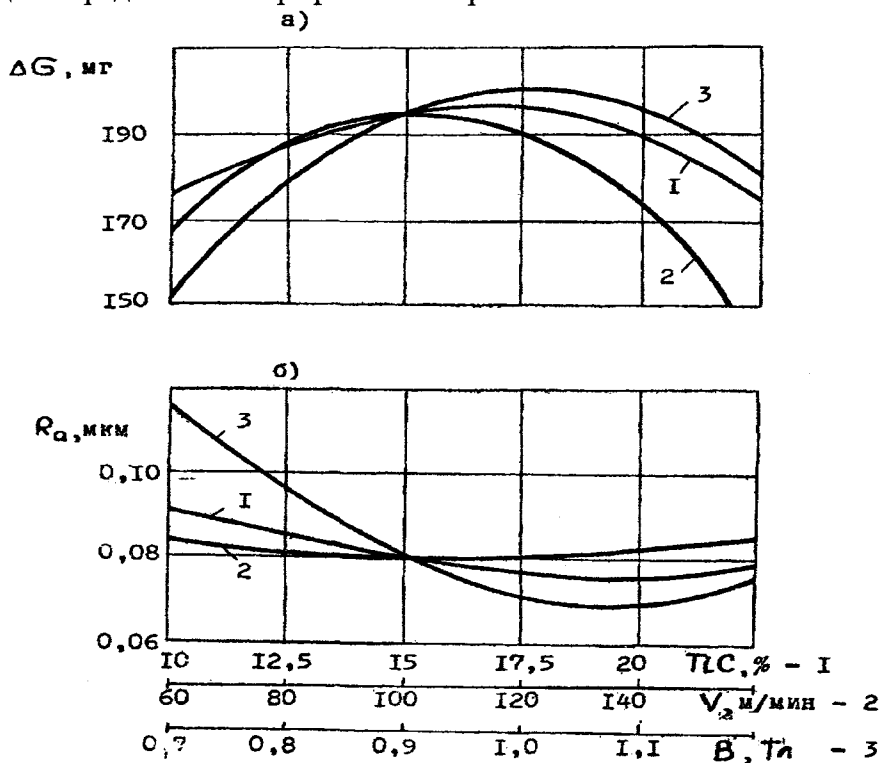


Рис. 3.7. Зависимость абразивных свойств материала Ж-15КТ от основных технологических параметров МАО

Графики двумерных сечений поверхностей отклика отображает рис. 3.8. Их анализ подтверждает правильность выбора химического состава материала Fe-TiC. Оптимальные значения скорости вращения детали ( $V = 2$  м/с) и индукции в рабочей зоне ( $B = 1,1$  Тл) близки аналогичным характеристикам, рекомендуемым для материала Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [3].



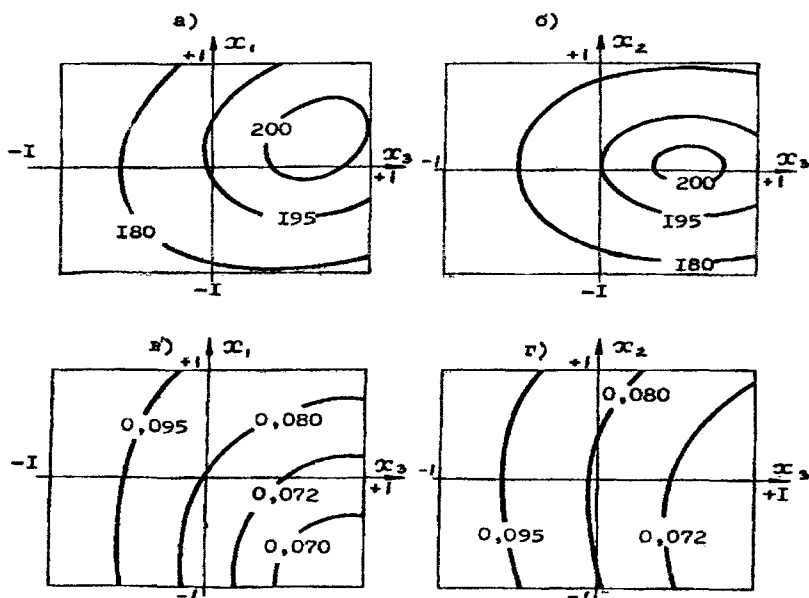


Рис. 3.8. Влияние взаимодействий параметров процесса MAO на абразивную способность применяемого Ж-15КТ: а – двумерное сечение поверхности отклика  $\Delta G = f(\text{TiC}, B)$ ; б –  $\Delta G = f(V, B)$ ; в –  $Ra = f(\text{TiC}, B)$ ; г –  $Ra = f(V, B)$

Следует отметить, что порошок Fe-TiC, полученный в лабораторных условиях при строгом соблюдении оптимальных технологических режимов процесса изготовления, позволяет достичь 12а класса шероховатости поверхности за 30 с обработки в магнитном поле. Несколько худшую абразивную способность промышленного материала Ж-15КТ можно объяснить некоторыми отклонениями производственных технологических режимов изготовления материала от заданных. На свойствах этого порошка отрицательно сказывается и некоторая неоднородность смеси исходных порошков перед прессованием, и неодинаковая по объему плотность спрессованных брикетов, неравномерность нагрева брикетов при спекании и т.п.

С целью возможного упрощения технологического процесса изготовления Ж-15КТ была предпринята попытка исключить операцию прессования брикетов из шихты. В этом случае смесь порошков железа и карбида титана подвергалась спеканию в состоянии свободной насыпки. Полученные спеки обладали повышенной пористостью и легко измельчались в порошок. Абразивная способность таких порошков на 15–20% ниже, чем у Ж-15КТ. Это можно объяснить тем, что в результате прессования повышается плотность смеси и увеличивается площадь контакта частиц железа и карбида титана. При спекании наблюдается более сильное химическое взаимодействие в зонах контакта частиц, и, как следствие, выше прочность их соединения.

Создание специального ферромагнитного абразивного материала Ж-15КТ и организация его промышленного производства способствовали расширению области применения MAO. В целях более эффективного использования этого ФАМ необходимо было установить насколько он универсален, при обработке каких конструкционных материалов его применение наиболее эффективно, насколько хорошо он сохраняет режущую способность при длительном использовании. Для ответа на эти вопросы был поставлен эксперимент по определению эффективности обработки различных металлов и сплавов в магнитном поле порошком Ж-15КТ [138].

MAO поверхности образцов размерами диаметра, равного 10x25 мм, осуществлялась на магнитно-абразивном роторном станке модели MAPC [38], схема работы которого представлена на рис. 1.3, в. Режим MAO: скорость вращения детали  $V_g = 1,5$  м/с; скорость осцилляции  $V_{осп} = 0,2$  м/с; скорость кругового движения  $V_{кр} = 0,005$  м/с; амплитуда

осцилляции  $A = 1,5$  мм; рабочий зазор  $\delta = 1,2$  мм; магнитная индукция в рабочем зазоре  $B = 1,0$  Тл; коэффициент заполнения порошком рабочей зоны  $K_3 = 1,0$ ; СОЖ – 7%-й раствор эмульсола Э2 в воде, длительность обработки – 60 с, гранулометрическая фракция порошка Ж-15КТ – 160...125 мкм.

Результаты эксперимента и данные о механических и физических свойствах конструкционных и инструментальных материалов приведены в табл. 3.8. Их сопоставление свидетельствует о том, что наиболее эффективным является применение Ж-15КТ при МАО ферромагнитных сталей повышенной твердости. Нужно отметить, что вязкие и пластичные материалы вообще плохо поддаются абразивной обработке [7]. На результаты МАО существенно влияет и магнитная проницаемость обрабатываемого материала: чем она выше, тем больше величина магнитного потока в зазоре и тем интенсивнее процесс резания.

Таблица 3.8

Свойства различных материалов и результаты их абразивной обработки в магнитном поле порошком Ж-15КТ

№ п/п	Полируемый материал, физико-механические свойства					Результаты МАО	
	Марка	Магнитная проницаемость ( $H = 40$ кА/м), мкГн/м	Предел прочности при растяжении $G$ , Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение при растяжении $\delta_b$ , %	Твердость НВ, кг/мм <sup>2</sup>	$\Delta G$ , мг	$Ra$ , мкм
1	Сталь 10 ГОСТ 1050-60	39,60	340	31	137	40,0	0,380
2	Сталь 45 ГОСТ 1050-60	33,93	610	16	197	30,0	0,075
3	Сталь 40Х ГОСТ 4543-71	28,90	1000	10	207	29,0	0,110
4	Сталь У8А ГОСТ 1435-54	36,44	800	–	187	27,0	0,060
5	Сталь 4Х13 ГОСТ 5632-61	22,62	520	20	229	22,5	0,125
6	Латунь Л62 ГОСТ 1019-47	1,26	300	35	90	20,0	0,190
7	Сталь Х18Н10Т ГОСТ 5632-72	1,26	520	40	197	10,0	0,220
8	Сплав титана ОТ4 ГОСТ 1987-74	1,26	800	30	260	7,5	0,450

Резервы улучшения результатов МАО диамагнитных, вязких и пластичных материалов следует искать в совершенствовании схем обработки, применении других, более эффективных ФАМ, обладающих оптимальными механическими свойствами, формой и структурой гранул. Действенно в этом плане и использование специальных составов СОЖ [30].

Определение абразивной стойкости материала Ж-15КТ преследовало цель установить степень сохранения режущей способности частиц при длительной работе. Дозу порошка объемом 15 см<sup>3</sup> помещали в рабочую зону станка МАРС и полировали образцы из стали У10А, периодически определяя уменьшение массы их в результате обработки. Измерения показали, что режущая способность порошка Ж-15КТ хотя и уменьшилась в два раза после 90 мин работы, но все же оставалась на достаточно высоком уровне (см. рис. 3.8). Материал Fe- $Al_2O_3$  обладает более низкой абразивной способностью и ее уменьшение с течением времени более заметно (рис. 3.9).

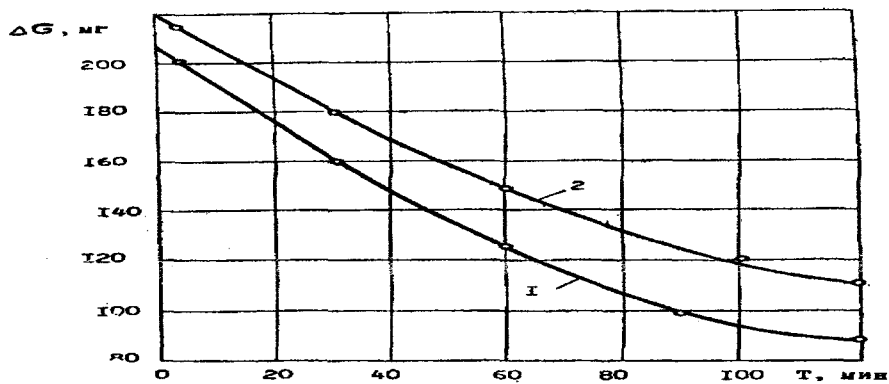


Рис. 3.9. Абразивная стойкость Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1) и Ж-15КТ (2)

Лучшие показатели абразивной способности и стойкости порошка Fe-TiC, по сравнению Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, обусловлены более высокой механической твердостью абразивного компонента и более прочным соединением компонентов в гранулах.

### 3.2.4. Псевдоплавленные ферроабразивы

Значительно улучшить эксплуатационные свойства ФАП можно путем оптимизации его химического состава, структуры и строения зерен. Более совершенные в этом отношении ферромагнитные абразивные порошки получены способом пропитки карбида титана расплавленным железом [139].

Сущность способа состоит в том, что исходные компоненты (титан, железо, углерод) смешивают, уплотняют и нагревают при температуре 1700...1750°C. В процессе нагрева образуется карбид титана, который пропитывается перегретым расплавом железа. Используемый технологический прием основан на том, что некоторые переходные металлы, в том числе и титан, обладают большой химической активностью по отношению к неметаллам, например к углероду. Поэтому при нагревании исходной смеси Ti+C+Fe образуется преимущественно карбид титана, чему способствует применение в качестве исходных компонентов как высокоактивных тонкодисперсных порошков титана и сажистого углерода, так и менее реакционноспособных крупных порошков железа. Уровень взаимодействия образовавшихся карбидов с железом определяется их взаимной растворимостью и химическим взаимодействием, зависящими от режимов процесса изготовления материала [140].

Основные характеристики псевдоплавленных ФАМ Fe-TiC приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Состав, структура и основные свойства псевдоплавленных магнитно-абразивных материалов на основе железа и карбида титана

Содержание TiC, % масс.		Химсостав ФАП, % мас.				Характеристика микроструктуры	Микротвердость, ГН/м <sup>2</sup>		Абразивная способность при MAO	
расчет.	факт.	Ti	C <sub>связ</sub>	C <sub>своб</sub>	Fe		TiC	железная матрица	ΔG, мг	Ra, мкм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
30	29,3	24,0	6,3	0,8	68,3	карбид в виде овальных включений; перлит-ледебурит	30,0... 31,5	3,1...3,7	400	0,082
40	38,6	30,8	9,6	0,9	57,9	то же	31,0... 31,5	2,1...3,6	430	0,080

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
50	47,1	38,3	10,0	2,0	49,3	глобули карбида; феррит-перлитная структура	28,3... 30,0	1,5...3,1 11,4...12	470	0,083
60	58,3	48,9	11,6	0,8	38,9	хлопьевидный карбид; перлит-ледебурит	31,0... 31,5	2,5...3,2 8,4...11,0	335	0,085
70	69,1	59,0	12,0	0,2	29,7	то же	31,0... 31,5	2,7...3,5 9,8...11,0	300	0,088
80	78,9	63,8	14,4	0,7	18,9	структура литого карбида	30,5... 31,5	1,6...2,6	285	0,125

Металлографический анализ псевдоплавленных материалов Fe-TiC показал, что при содержании абразивной составляющей от 30 до 48% ее зерна имеют округлую (глобулярную) форму и равномерно распределены в объеме железной матрицы. С увеличением содержания TiC (до 60%) уменьшается количество округлых частиц абразива, его зерна приобретают хлопьевидную форму. Интересно отметить зависимость размера глобулей абразива от его концентрации в композите. При содержании в ФАМ 30–40% карбида титана размер глобулей последнего не превышает 10 мкм. С увеличением концентрации карбида до 50–60% величина его зерен возрастает до 40...50 мкм, а при содержании карбида титана более 70% его зерна группируются в блоки. Образование карбидной фазы в виде округлых глобулей объясняется поверхностными явлениями на граничных участках фаз карбида титана и железа. Их ограниченная взаимная растворимость, а также стремление системы принять форму с минимальной энергией, а следовательно, и с минимальной поверхностью раздела фаз, приводит в конечном итоге к округлению и выглаживанию поверхности карбидных включений [139].

Лучшие абразивные свойства отличают материал, содержащий (40–50%) TiC и превосходящий другие композиции по механической прочности [137]. Данные его испытаний приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Результаты испытаний при МАО псевдоплавленных ферромагнитных абразивных материалов Fe-TiC (50%)

Ферромагнитный абразивный материал	Зернистость ФАМ, мкм	Уменьшение массы образцов в результате МАО ΔG, мг	Характеристика шероховатости поверхности Ra, мкм	
			до МАО	после МАО
<b>Псевдоплавленные ФАМ на основе железа и карбида</b>				
а) с объемным расположением абразива	315...180	541	0,85	0,16
		503	0,65	0,16
		501	0,24	0,16
б) с поверхностным расположением абразива	315...180	522	0,64	0,20
		468	0,55	0,13
		422	0,30	0,084
	180...100	280	0,47	0,080
	100...40	140	0,23	0,062
	40...0	36	0,12	0,030
<b>ФАМ, полученные синтезом</b>				
а) Ti-C-Fe-Si (10%)	315...180	701	0,75	0,25
		567	0,46	0,19
		535	0,32	0,14
б) TiC-Fe-Si (10%)	315...180	705	0,75	0,26
		625	0,65	0,21
		619	0,32	0,19

В Научно-технологическом центре «Реактив-электрон» НАН Украины разработан и освоен выпуск гаммы псевдоплавленных магнитно-абразивных материалов на основе железа и карбидов титана, ванадия, циркония, молибдена и других переходных металлов. Согласно ТУ6-09-03-483-81 организовано промышленное производство псевдоплавленого материала Fe-TiC, который успешно используется при магнитно-абразивной обработке деталей из различных материалов.

Подробная информация об этих разработках изложена в работе [141].

### **3.2.5. Ферроабразивные порошки из побочных продуктов производства электрокорунда**

При производстве электрокорунда в процессе плавки бокситов образуется побочный продукт в виде ферросплава, содержащего 81–92% железа, 7–17% кремния, 0,3–7,0% титана, 0,3–3,3% алюминия и 0,3–2,5% углерода. Эти элементы в ферросплаве могут присутствовать в виде фаз, микротвердость которых достаточно высока: силицида FeSi – 1260...1450 кг/мм<sup>2</sup> (12,6...14,5 ГПа), твердого раствора Fe<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> – 1000...1100 кг/мм<sup>2</sup> (10,0...11,0 ГПа) и тройного соединения FeSiTi – 1500...1600 кг/мм<sup>2</sup> (15,0...16,0 ГПа) [142].

Ферросплав в жидком виде скапливается на поду электропечи, при охлаждении электрокорундового блока принимает линзовидную форму и содержит обычно 2,5–10% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [143].

Приведенные сведения дают основание предполагать успешное использование продукта ферросплава в качестве ферромагнитного абразивного порошка при MAO. Для проверки справедливости этого предположения были выполнены эксперименты по получению и исследованию различных проб ферросплава электрокорунда производства Запорожского абразивного комбината\*.

Необходимо отметить, что включения железа в электрокорунде, как абразивном материале, крайне нежелательны, поскольку сильно ухудшают эксплуатационные свойства абразивных кругов [7]. Поэтому выплавленный и отлитый в блоки электрокорунд дробится на куски размером менее 25 мм и, с целью выделения ферросплава, подвергается трехстадийной магнитной сепарации.

Первая ее стадия осуществляется при напряженности магнитного поля  $H = 800...1000$  Э (64...80 кА/м), вторая – после измельчения кусков в гранулы размером менее 3 мм при напряженности  $H = 1,5...2,0$  кЭ (120...160 кА/м). Этой же зернистости абразив подвергается третьей стадии сепарации при  $H = 2,5...3,0$  кЭ (200...240 кА/м).

Полученные трехстадийной магнитной сепарацией частицы ферромагнитного электрокорунда представляют собой конгломерат из «корольков» попутного ферросплава (30–70 % об.), монокристаллов и сростков кристаллов корунда (70...30 % об.). Их химический состав характеризуется следующим содержанием массовых долей элементов: 7,80–10,90% Si, 0,80–2,30% C, 0,03–0,09% S, 0,12–0,30% P, 2,60–3,40% Ti, 0,07–2,0% Al; сумма массовых долей Mn, Ca, Mg, Cr, Cu, Ni не превышает 0,97–2,07%; железо – остальное. Элементы, входящие в состав сплава, за исключением C, Ti, S, образуют неоднородные твердые растворы в  $\alpha$ -феррите, т.е. матрицу. В ней распределены кристаллические фазы карбидов TiC<sub>x</sub>, сульфокарбидов Ti (C<sub>x</sub>S<sub>y</sub>), сульфидов TiS<sub>x</sub> и нитридов TiN<sub>x</sub>. Объемное содержание соединений титана в сплаве достигает 4,5...5,5%, из которых доля карбидов TiC составляет 90–91%, а размеры их включений, в основном, не превышает 5...7 мкм [144].

Технологические эксперименты по использованию этих порошков при MAO дали удовлетворительные результаты [145], однако перспективы промышленного применения таких ФАП ограничены из-за относительно невысоких магнитных свойств ( $\mu_n = 800$  кА/м = 1,65 мкГн/м) [5].

\* Работы по получению и исследованию проб ферромагнитных абразивов выполнены совместно с коллективом лаборатории электротермии абразивных материалов Днепропетровского металлургического института.

Более интересным и обнадеживающим представляется использование при МАО в качестве ФАП измельченного кремнистого сплава, сформированного в процессе плавки электрокорунда на поду электропечи в виде линзы. Его состав характеризуется следующим соотношением массовых долей компонентов: 8,5–12,5% Si, 0,20–0,50% Mn, 0,10–0,40% Cr, 0,12–0,17% P, 0,017–0,30% S, 0,7–2,0% Al, 0,95–1,95% C, 1,10–3,20% Ti, 0,20–0,50% Mg; сумма массовых долей Ni, Cu, Pb, Zn, Sn, Ca не превышает 0,10–0,30%; железо – остальное.

Элементы, входящие в состав сплава, за исключением Ti и S, образуют неоднородные твердые растворы в  $\alpha$ -железе – матрицу, микротвердость которой составляет 4,80...6,00 ГПа. В  $\alpha$ -растворах распределены кристаллические фазы карбидов  $TiC_n$  (23,80...31,20 ГПа), сульфокарбидов  $TiC_xS_{1-x}$  и нитридов  $TiN_m$  (19,12...21,60 ГПа). В некоторых наиболее богатых серой образцах обнаружены участки содержащие сульфиды  $Al_2S_3$  и  $Ti_2S_3$ , а также сферические включения  $\alpha-Al_2O_3$  (корунд).

Объемное содержание кристаллических фаз в сплаве достигает 4,5–5,5%. На долю карбидов  $TiC_n$  приходится более 90% от суммы всех кристаллических фаз, при этом их размеры не превышают 6...7 мкм. Доля сульфокарбидов и нитридов титана в сумме не превышает 0,30...3,50 %об., остальные фазы содержатся в незначительных количествах. Распределение карбидов  $TiC_n$  в попутном металле близко к равномерному.

Значения абразивных и магнитных характеристик ФАП на основе кремнистого сплава приведены в табл. 3.12, микроструктура и электронные фрактограммы поверхностей зерен представлены на рис. 3.10. Результатом многочисленных исследований и экспериментов по отработке технологий изготовления и применения ферроабразива на основе кремнистого сплава на Запорожском абразивном комбинате согласно ТУ2.036.0222227.154-88 организовано производство магнитно-абразивного материала марки ФАД-9К [146].

Таблица 3.12

Абразивные и магнитные свойства ферроабразивных порошков

№ п/п	Марка порошка (технические условия, авторское свид. на изобретение)	Способ получения	Абразивные свойства			Магнитная проницаемость ( $H = 400$ кА/м) мГ/м
			$\Delta G$ , мг	$Ra$ , мкм	класс шероховатости	
1	2	3	4	5	6	7
1	Fe- $Al_2O_3$	прессование смеси, спекание, измельчение	108	0,065	11	1,97
2	Fe-(Fe-Mn) (а.с.500975)		102	0,14	10	2,20
3	Ж15-КТ (ТУ88УССР147002-75)		217	0,064	11	2,16
4	Fe-TiC (Ту6-09-03-483-81, а.с.1162238)	псевдоплавление, измельчение	430	0,08	11	1,75
5	Ферромагнитный электрокорунд (а.с.891409)	сепарация отходов электрокорундового производства	161	0,11	10	1,65
6	ФАД-9К (ТУ2.036.0222227.154-88, а.с.891410)	измельчение попутного ферросплава электрокорундового производства	142	0,09	10	2,07
7	(Fe-Si)-AlB(20%) (а.с.1502284)	электроплавка, измельчение	164	0,08	11	1,92
8	(Fe-Si)-TiB(20%) (а.с.1502284)		190	0,07	11	1,89
9	(Fe-Si)-TiC(15%)		325	0,062	11	1,94

1	2	3	4	5	6	7
10	Fe-B <sub>4</sub> C	прессование, спекание, измельчение	53	0,32	9	1,95
11	Fe-SiC (ферабраз-1)	горячая прокатка, измельчение	160	0,15	10	1,88
12	Fe-AlN (30%) (а.с.1096087)	внутреннее азотирование	115	0,16	10	1,86
13	ПРЖ-8Ю (ТУ6-02-07-114-78, ТУ14-1-3336-82, а.с.703321)	распыление расплава	23	0,35	8	2,14
14	ПОЛИМАМ		95	0,18	9	2,03
15	Фехросал-1 (ТУ231-65-80-85)	распыление, сверхбыстрое охлаждение, измельчение	142	0,15	10	2,05
16	Fe-TiC	метод СВС	133	0,17	9	1,90
17	ПФОР6М5 (ТУ27-114-02-88)	отходы инструментального производства	125	0,08	11	1,83

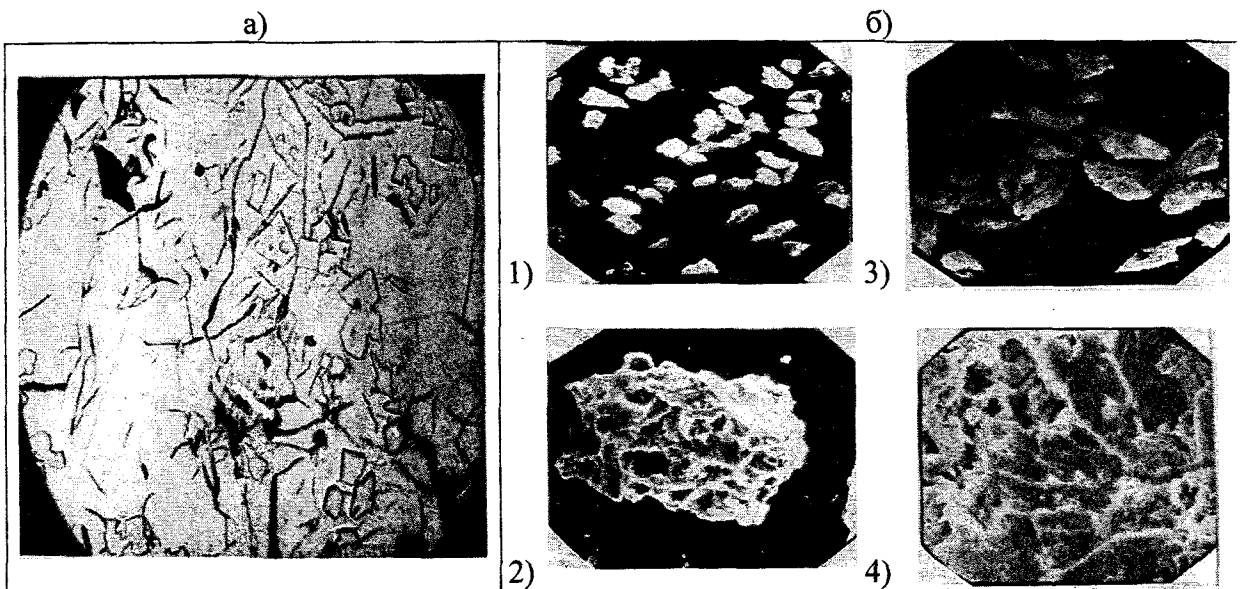


Рис. 3.10. Микроструктура (а) и электронные фрактограммы поверхностей (б) зерен ФАП ФАД-9К:  
а) черные продолговатые включения – пластинчатый графит, светлые и серые включения правильной и неправильной формы – TiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, светлое и серое поле – матрица;  
б) 1 – x400, 2 – x1200, 3 – x120, 4 – x600

В поисках вариантов улучшения рабочих свойств ФАД-9К выполнен комплекс мероприятий по расчету шихт, организации и проведению руднотермических дуговых восстановительных электроплавов с целью получения ФАП на основе кремнистого сплава, содержащего абразивные включения одного из соединений – AlB, TiB, TiC и VC [143]. Методами оптической (NEOPHOT 21) и растровой электронной (JSM-35) микроскопии исследованы микроструктура и микрорельеф поверхностей частиц и их излома [147, 148].

Ферроабразивные частицы материала Fe-Si-AlB состоят из матрицы в виде ненасыщенного твердого раствора Si, Al и C в α-железе. Дибориды AlB<sub>2</sub> и додекабориды AlB-12 распределены в основе колониями, наблюдается чередование участков поверхности шлифа с игольчатыми, вытянутыми и кубическими (размытыми) включениями (рис. 3.10, а). Конфигурация боридов алюминия в местах выхода на поверхность излома чаще продолговатая, имеет форму параллелепипедов (рис. 3.11, б). Объемное содержание режущих

компонентов в ФАП составляет 25–27%, массовая доля свободного углерода не превышает 0,27–0,29%. ФАП Fe-Si-AlB обладает хорошими абразивными и магнитными свойствами (см. табл. 3.12), однако, имеет повышенную хрупкость и усложненную технологию плавки.

Полученный электроплавкой борокарбидным методом ФАП Fe-Si-TiB (10–25 % мас.) имеет кристаллическую структуру, представленную на рис. 3.11. В матрице зерен, состоящей из твердого раствора Si, Ti, Al и C в железе и имеющей микротвердость 0,30...0,69 ГПа, распределены кристаллические фазы, имеющие удлиненную игольчатую или агрегатную форму в виде сросшихся кубов, а также эвтектику (см. рис. 3.12). Микротвердость светлых кристаллических фаз  $TiB_2$  (TiB) составляет в среднем 30,8 ГПа, а темно-серых фаз  $B_4C$  – 38,7 ГПа. Поверхность излома зерен Fe-Si-TiB (10–25%) идентична для всех исследованных составов, имеет большое число микровыступов, а строение излома свидетельствует о чисто хрупком характере разрушения частиц [147]. Материал Fe-Si-TiB имеет повышенные эксплуатационные свойства (см. табл. 3.12) и те же, что и в предыдущем случае, недостатки – повышенную хрупкость и относительную сложность технологии изготовления.

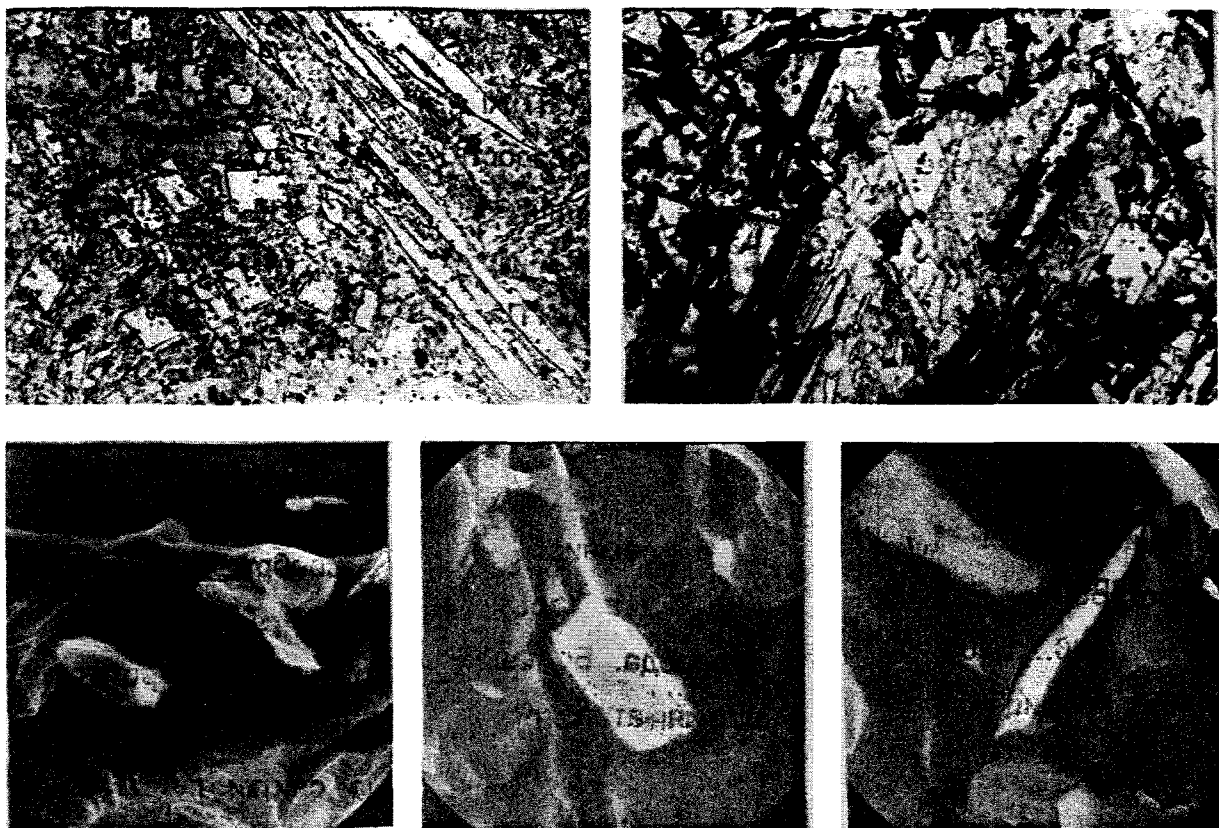


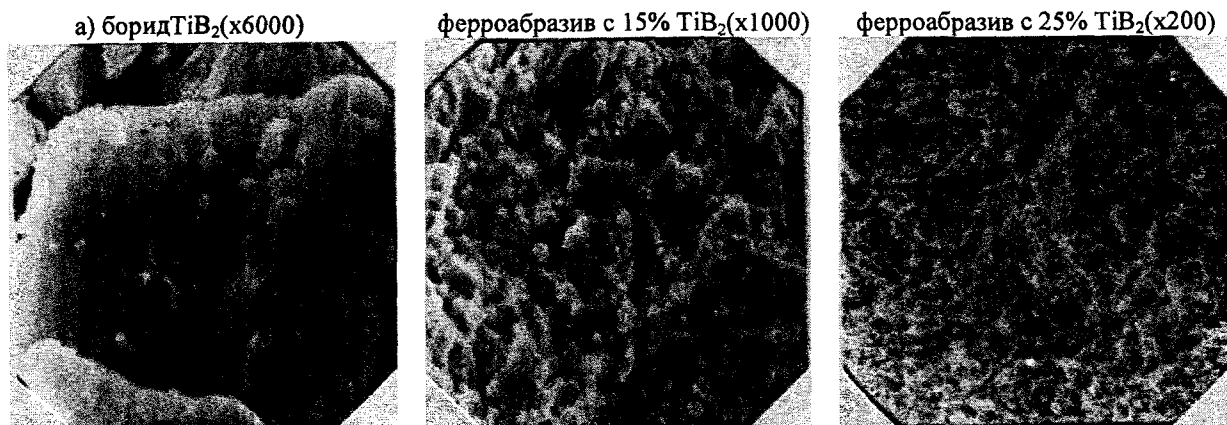
Рис. 3.11. Микроструктура (а) и микрорельеф (б) ФАП на основе кремнистого сплава с боридами алюминия: а)  $\times 240$ ; игольчатые, продолговатые фазы светлого тона – бориды алюминия; б)  $\times 1200$ ; светлые продолговатые включения – бориды алюминия

Содержащийся в кремнистом сплаве титан в количестве 1,1–3,2 % мас. обеспечивает связывание в карбиды  $TiC_n$  и сульфокарбиды  $TiC_xS_{1-x}$  примерно 0,35–0,85% мас. углерода.

Большая часть углерода (0,60...1,10% мас.) в виде чешуйчатого или пластинчатого графита распределена в матрице сплава (см. рис. 3.10, а). Для устранения вредного влияния свободного углерода на качество магнитно-абразивной обработки был избран один из возможных путей – связывание графита в карбиды введенным в расплав карбидообразующим металлом. Такой прием позволяет также повысить концентрацию карбидов (абразива) в магнитно-абразивных порошках и тем самым улучшить их режущие свойства.



По техническим и экономическим соображениям в качестве карбидообразующего элемента выбран титан. После расплавления и перегрева металла в электропечи в расплав присаживали титан в виде ферротитана марки Ti1 (28–35% Ti). По завершении процессов карбидообразования расплав выпускали в песчаную форму для охлаждения. Охлажденные слитки путем измельчения и рассева перерабатывали на ферромагнитные абразивы. Порошки ферромагнитных абразивов подвергали очистке от посторонних неметаллических примесей в электромагнитном сепараторе при напряженности магнитного поля 70 кА/м.



а) борид  $TiB_2$  ( $\times 6000$ )  
 б) Микроструктура зерен ферроабразива фракции 315...160 мкм с 10%  $TiB_2$ . Светлые участки – матрица из Fe, В, С сплава. Стрелками указаны: 1 – бориды титана, 2 – карбиды

Микроструктура зерен ферроабразива фракции 315...160 мкм с 15%  $TiB_2$ . Светлые участки – матрица из Fe, В, С сплава. Кристаллические фазы: 1 – эвтектика, 2- агрегаты сросшихся кубов боридов титана, 3-  $Ti(C,В)$  ( $\times 200$ )



Микроструктура зерен ферроабразива фракции 315...160 мкм с 20%  $TiB_2$ . Матрица из Fe, В, С сплава, кристаллические фазы: бориды титана ( $\times 100$ )



Микроструктура зерен ферроабразива с 25%  $TiB_2$  из центра а массой 59 кг. Удлиненные кристаллические фазы – бориды титана ( $\times 200$ )

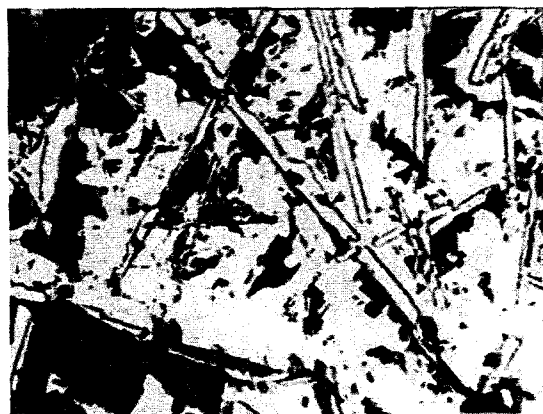


Рис. 3.12. Электронные фрактограммы поверхностей излома (а) и микроструктура (б) ферроабразива (Fe-Si)- $TiB_2$  (10–25% мас.)

Металлографический анализ, методы оптической и растровой электронной микроскопии позволили установить, что объемное содержание абразивов в материале составляет 11–16%. Матрица зерен состоит из твердого раствора элементов сплава в  $\alpha$ -железе (рис. 3.13).

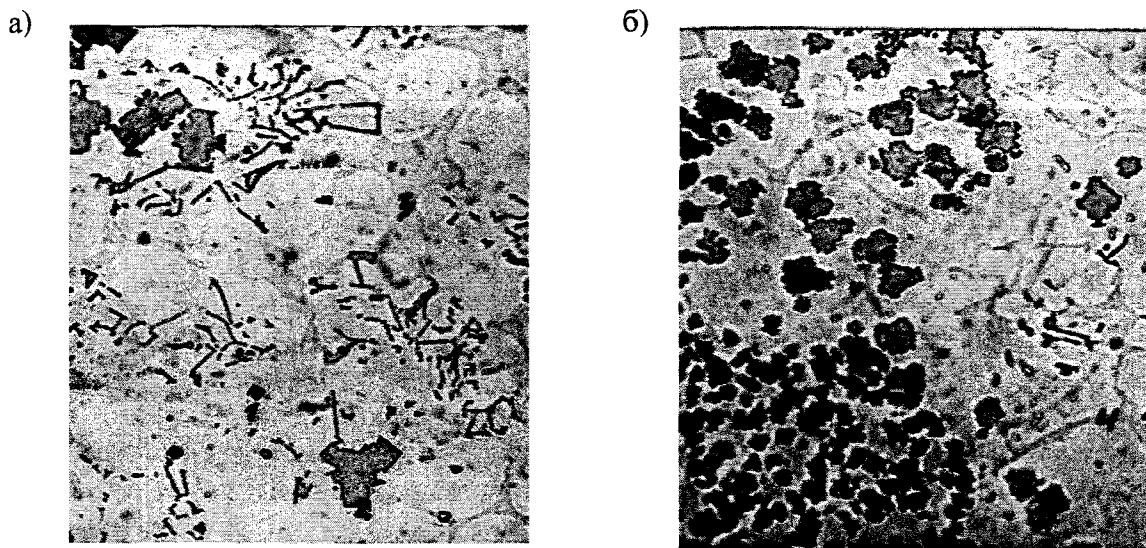


Рис. 3.13. Микроструктура образцов кремнистого сплава с добавкой 6% ванадия (*а*) и титана (*б*)  $\times 320$ . Свет отраженный; 1 – карбиды ванадия; 2 – карбиды титана; 3 – твердые растворы ванадия с железом и кремнием; 4 – твердые растворы титана с железом и кремнием

Микрорельеф рабочих поверхностей зерен имеет строение характерное для кремнистого сплава и содержит множество пирамидообразных выступов, ступенек и других микрообразований с острыми вершинами и гранями [149]. Ферроабразив Fe-Si-TiC обладает высокими абразивными свойствами (см. табл. 3.12), его применение при магнитно-абразивной обработке имеет хорошие перспективы.

### 3.2.6. Другие ФАП

Возможность получения ФАП с более высокими абразивными свойствами, чем у композита Fe-TiC, можно практически реализовать двумя путями: введением в железную основу абразивного компонента, превосходящего по твердости карбид титана и не уступающего ему по прочности соединения с железом; повышением механической твердости ферромагнитной основы ФАП при сохранении ее высоких магнитных свойств.

Высокая микротвердость карбида бора (до 49 ГПа) [24], а также химическая активность при повышенной температуре явились основанием для попытки использовать его в наших целях. Однако полученные результаты оказались неудовлетворительными (см. табл. 3.12). Причина здесь, видимо, в том, что карбид бора активно взаимодействует с железом при температуре выше  $1100^{\circ}\text{C}$  (1373 К), а спекание при более низкой температуре не обеспечивает необходимой прочности соединения компонентов в гранулах. Разрешение этого противоречия найдено путем дополнительной химико-термической обработки кремнистого сплава производства электрокорунда. Порошок сплава смешивают с борсодержащим порошком, смесь выдерживают 25–30 мин при температуре  $1000$ – $1050^{\circ}\text{C}$  и охлаждают в жидкой среде. После сушки ФАП извлекают из смеси магнитной сепарацией [150]. Рабочие характеристики композита Fe-Si-(Ti, B) приведены в табл. 3.12.

Известно, что гранула ФАП в среднем в четырех случаях из пяти контактирует с обрабатываемой поверхностью ферромагнитной основы [3]. Увеличение ее механической твердости должно, естественно, повысить абразивную способность материала в целом. Более всего подходят для этих целей железо – кремниевые сплавы с небольшим (до 10 % мас.) содер-

жанием кремния. Поскольку отечественной промышленностью не выпускаются сплавы Fe-Si, содержащие 15–20 % мас. Si, то возникла необходимость проверки целесообразности изготовления порошка (Fe-Si)-TiC двумя приемлемыми способами порошковой металлургии. Сущность первого из них заключается в изготовлении порошка Fe-Si (6,5 % мас.) с размером частиц 250...63 мкм, смешивании его с порошком TiC, прессовании брикетов под давлением 2500 кг/см<sup>2</sup> (250 МПа), их спекании при температуре 1100°C (1373 К) в течение 0,5 часа и измельчении спеков. По второму способу смешивались в определенном соотношении порошки железа, кремния и карбида титана, прессовались и спекались в течение часа, затем измельчались. Длительное спекание необходимо для протекания процесса диффузионного насыщения железа кремнием из "точечных источников" [151]. Результаты испытаний абразивных и магнитных свойств материалов, полученных обоими способами, приведены в табл. 3.12. (Fe-Si)-TiC, изготовленный первым способом, показал хорошие результаты и может быть рекомендован для абразивной обработки в магнитном поле стальных деталей. Микроструктура ФАП представлена на рис. 3.13, в. Материал, изготовленный по второму способу, дал при МАО значительно худшие показатели. Это обстоятельство, а также низкая магнитная проницаемость порошка, свидетельствуют о том, что температуры 1100°C (1373 К) и часовой выдержки при спекании недостаточно, чтобы произошло равномерное по объему распределение кремния в железе в результате его диффузии из "точечных источников". Увеличение же температуры и длительности спекания в данном случае приводит к дополнительным энергетическим затратам и увеличению трудоемкости процесса изготовления. По этим причинам второй способ изготовления (Fe-Si)-TiC следует признать малоперспективным.

Предпринятая попытка создать эффективный ФАП путем диффузионного насыщения бором частиц порошка железа не дала значимых результатов. Эффект от некоторого повышения твердости борированных частиц сводится на нет значительным снижением магнитных свойств порошка [86].

Широко применяемый в качестве абразива карбид кремния обладает высокой микротвердостью и абразивной способностью (см. табл. 3.1). Однако использованию его в качестве абразивного компонента ФАП препятствует то обстоятельство, что при температуре выше 1100°C (1373 К) в зонах контакта железа с карбидом кремния образуется жидкая фаза в результате диффузионного насыщения железа кремнием и углеродом и образования сравнительно легкоплавких эвтектических сплавов [152]. По этой причине оказалось невозможным изготовить материал Fe-SiC общепринятым способом порошковой металлургии. В Институте проблем материаловедения НАН Украины разработан оригинальный способ получения порошков этого ФАП. Суть его заключается в смешивании порошков железа и карбида кремния с некоторыми добавками. Смесь подвергается холодной прокатке в полосу толщиной 11...12 мм, которая при температуре 900–1050°C (1173–1323 К) в инертной атмосфере прокатывается до толщины 5 мм. Полученная полоса охлаждается и измельчается в порошок необходимого гранулометрического состава. В процессе изготовления ФАП не происходит существенного химического взаимодействия железа с карбидом кремния. Прочность материала марки "Ферабраз-1" обеспечивается механическим сцеплением частиц ферромагнитного и абразивного компонентов, как и в случае с Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Абразивные свойства Fe-SiC (см. в табл. 3.12) свидетельствуют о возможном эффективном применении этого композиционного материала при абразивной обработке в магнитном поле [153].

Оригинальная технология получения ФАП марки "Ферабраз-2" заключается в использовании метода внутреннего азотирования расплавленных порошков из сплавов железа с нитридообразующими элементами – кремнием и алюминием [154]. Материал характеризуется высокой стойкостью, низким содержанием свободного углерода и повышенной полирующей способностью [155].

Широкое применение при МАО цветных металлов нашли ФАП, получаемые распылением расплава. В результате выполненных в ФТИ АН БССР исследований и экспери-

ментов создан ФАП марки ПРЖ-8Ю и организовано его производство [156]. Результаты этих исследований приведены ниже в главе 7. В ОКТБ ИПМ НАН Украины продолжены работы в этом направлении, созданы ФАП типа «ПОЛИМАМ» (микроструктура на рис. 3.13, з) и «ЦАРАМАМ», обладающие высокой полирующей способностью, но низкими режущими свойствами [157]. Вариант получения ФАП распылением на установке УРВ-5 в сочетании со сверхбыстрым охлаждением частиц реализован в отделе 65 БРНПО ПМ. Распыленные воздухом капли расплава охлаждались со скоростью  $10^5 \dots 10^6$  °C/с на двух вращающихся водоохлаждаемых медных валках и превращались в тонкие (20...100 мкм) чешуйки. Их измельчение в шаровой мельнице дает частицы ФАП с множеством острых режущих микровыступов и кромок. Микроструктура порошковых частиц представлена на рис. 3.13, д. На ФАП химсостава: С (2–3%), Cr (8–10%), Si (7–9%), Al (1–3%), Fe – остальное – разработаны ТУ 231-65-80-85 и выпущена опытная партия порошка «Фехросал-1».

Интересной представляется разработанная в отделе 65 БРНПО порошковой металлургии технология получения ФАП методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Суть метода СВС состоит в том, что локальное воспламенение исходной смеси порошков Fe, Ti и С инициирует реакцию экзотермического взаимодействия между исходными компонентами. Процесс взаимодействия (горения) осуществляется в тонком слое вещества и самопроизвольно распространяется по всему объему исходной смеси. Температура, возникающая во фронте горения, определяется составом шихты, условиями проведения синтеза и может достигать 4000°C (4273 К). Микроструктура ФАП приведена на рис. 3.13, е и представляет собой зерна абразива TiC, равномерно распределенные в матрице  $\alpha$ -Fe. Рабочие свойства ФАП представлены в табл. 3.12.

Перспективное направление в области создания ФАП заключается в использовании для этих целей мелкодисперсных стружек (шламовых отходов), получаемых на операциях точения, фрезерования, шлифования при изготовлении и заточке сверл, резцов, фрез и других инструментов на высоколегированных инструментальных сталях. Эти отходы содержат около 50% металлической фазы (продукты шлифования инструментов), до 25% неметаллической абразивной фазы (продукты разрушения абразивных кругов) и до 25% остатков смазочно-охлаждающей жидкости. Из этой массы в результате сушки при температуре 110–120°C (383–393 К) и магнитной сепарации извлекается порошок с преобладающей зернистостью 63...40 мкм (рис. 3.14). Порошковые частицы неправильной геометрической формы имеют развитую поверхность, их матрица представляет собой быстрорежущую инструментальную сталь, например P<sub>6</sub>M<sub>5</sub>, в которую внедрены отдельные частицы абразива. Порошковые продукты сушки и сепарации уже пригодны в качестве ФАП для магнитно-абразивной обработки. При необходимости эту порошковую массу можно подвергнуть спеканию с последующим измельчением до традиционно применяемой фракции ФАП 400...50 мкм [158, 159]. Абразивные, магнитные и геометрические характеристики ферроабразивного порошка ПФОР6М5 приведены в табл. 3.12 и на рис. 3.15.

Представленные в табл. 3.12 значения абразивных свойств ФАП получены при магнитно-абразивной обработке образцов из стали ШХ15 (58...62 HRC). Порошки, показавшие невысокие режущие свойства в этом случае, могут успешно применяться при MAO изделий из других материалов, например, цветных сплавов. Вопросы применимости ФАП и обрабатываемости материалов в магнитном поле рассмотрены ниже в главе 8.

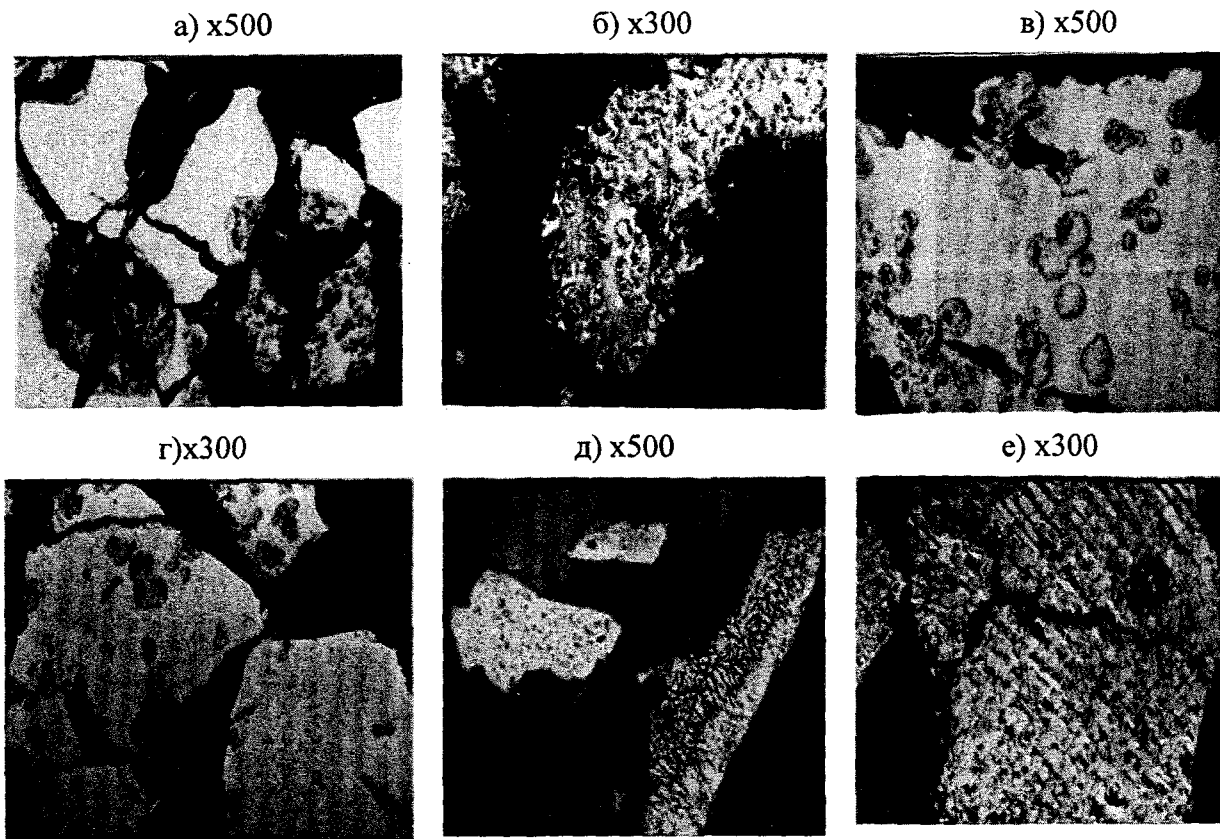


Рис. 3.14. Микроструктура ферроабразивных порошков: *а* – ФАД-9К; *б* – псевдоплавленный Fe-TiC (40%); *в* – (Fe-Si)-TiC(15%); *г* – ПОЛИМАМ; *д* – фехросал; *е* – полученный методом СВС

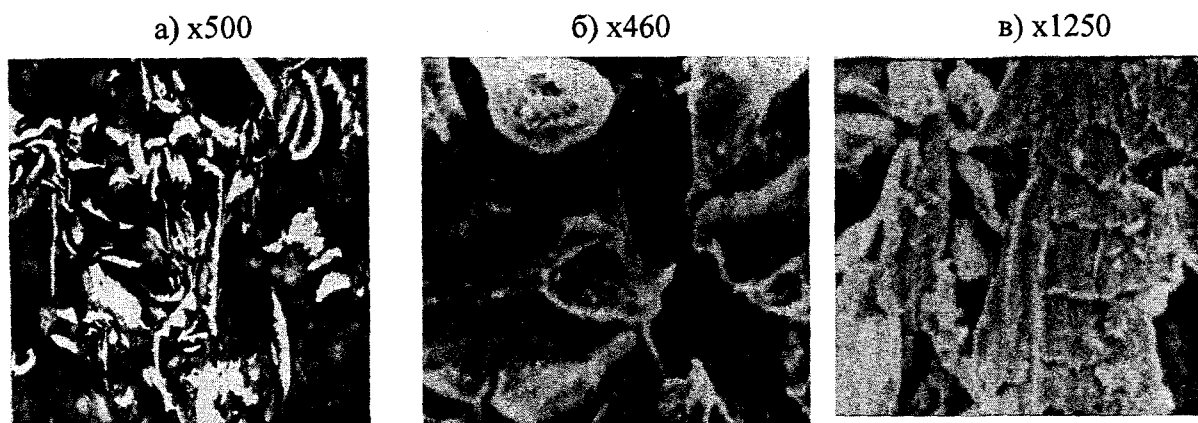


Рис. 3.15. Форма и размеры (*а*), микрорельеф поверхности (*б*, *в*) частиц порошка ПФО Р6М5

### 3.3. Смазочно-охлаждающие жидкости

Специфика процесса MAO предъявляет к применяемым СОЖ комплекс требований, отличающихся от традиционных эффективных при шлифовании и других процессах абразивной обработки. При MAO смазывающая способность СОЖ не является существенной, поскольку силы резания не велики. Даже наоборот, обеспечивающая активную смазку в зоне резания вязкая СОЖ затрудняет контакт частиц порошка с обрабатываемой поверхностью и ухудшает условия микро-, субмикрорезания и выглаживания. Охлаждающая способность СОЖ при MAO также не актуальна, поскольку температура в зоне резания не превышает 200°C (473 К).

В работах [22, 30], рассматривающих особенности применения СОЖ при МАО, главное внимание уделялось изучению и обеспечению их диспергирующих и моющих свойств. Рекомендуемые для МАО составы СОЖ приведены выше в подразделе 1.4.2. Они представляют собой коллоидные низкой концентрации водные растворы химически активных добавок, таких как триэтаноламин, олеиновая кислота, глицерин и др.

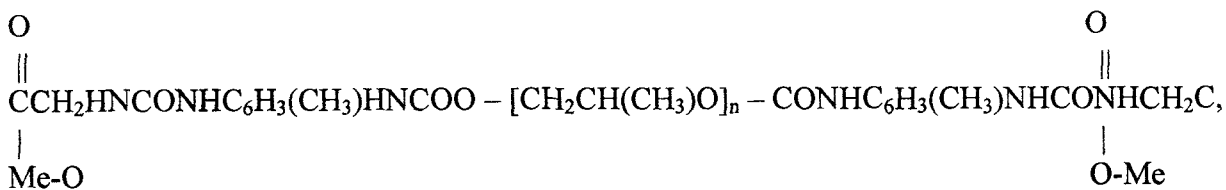
Наш опыт по исследованию и реализации процессов МАО показал, что чрезвычайно важными и эффективными являются такие свойства СОЖ как проникающая способность, блескообразование и пассивирование обрабатываемой поверхности. Этим условиям в наибольшей степени отвечает введение в состав СОЖ добавок поверхностно-активных веществ (ПАВ). Наибольший эффект дают синтетические ПАВ на основе олигомеров и их производных, так как обладают чрезвычайно высокой поверхностной активностью, которая многократно превышает значения этого параметра для традиционных ПАВ [160].

Значительное повышение эффективности СОЖ дало применение в качестве ПАВ лапрола 3003 (олигомер типа полиоксипропиленгликоля) в количестве до 0,5 % мас. СОЖ, содержащая по 0,5 % мас. триэтаноламина, олеиновой кислоты и лапрола, показала хорошие результаты при МАО изделий из различных материалов, ее свойства и рекомендации по применению изложены в главах 4 и 5 при описании реализуемых на практике технологических процессов полирования и зачистки изделий в магнитном поле.

С учетом накопленного научно-технического потенциала на базе лаборатории механодеструкции полимеров Института химии высокомолекулярных соединений НАН Украины выполнены работы по синтезу и исследованию высокоэффективных ПАВ, в качестве которых опробованы водорастворимые олигомеры, полимеры и блок-сополимеры окиси этилена и пропилена, а также полиоксиэтилен- и полиоксипропиленгликолевые эфиры первичных спиртов, высших карбоновых кислот, СЖК или эфиров СЖК, алкилфенолов и т.п. Эти соединения обычно предлагаются в комбинации с солями триэтаноламина или щелочных металлов олеиновой, стеариновой и других карбоновых кислот. Учитывая это, была поставлена задача осуществить синтез новых олигомерных ПАВ, представляющих собой модифицированный олигооксипропилен с концевыми группами – солями щелочных металлов олигоуретансульфонилмочевины, лигоуретанмочевиноуксусной и олигоуретанмочевиноэтилсерной кислот и изучить диспергирующее действие их водных растворов, а также бинарных растворов полимер-олигомерных ПАВ с целью разработки новых высокоэффективных составов СОЖ для МАО материалов.

Сверхвысокая поверхностная активность свойственна принципиально новым олигомерным соединениям, которые представляют собой, например, гибкую полиэфирную цепочку, содержащую на обоих концах щелочные соли карбоновой или сульфоновой кислоты [160]. Установлено, что с повышением ММ неполярного блока в два-четыре раза поверхностная активность бианкерных олигомерных ПАВ (БОПАВ) резко, на 1–3 порядка, увеличивается, что объясняется изменением конформации неполярного блока – переходом от статистически распределенных петель к регулярным складкам, расположенным параллельно поверхности. Такое расположение гибкого неполярного блока реализуется только благодаря наличию в молекуле БОПАВ двух концевых полярных (якорных или анкерных) групп, прочно закрепляющихся на поверхности. Согласно [160], такой вариант упаковки не только повышает поверхностную активность соединения, но и должен привести к усилению эффективности их в качестве детергентов, смачивателей, стабилизаторов и т.д., что позволяет предполагать перспективность использования БОПАВ в качестве компонентов СОЖ для обработки металлов. В связи с этим был разработан синтез бианкерных олигомерных соединений – дикалиевых солей олигоуретанмочевиноуксусной кислоты (ДКСОУМУК), олигоуретанбисмочевиноэтилсерной (ДКСОУМЭКС) и олигоуретанбиссульфонилмочевины (ДКСОУСМ), которые по результатам исследования диспергирующего действия их водных растворов, а также бинарных растворов полиакриламид – БОПАВ, рекомендуются в качестве компонентов СОЖ для МАО металлов.

Химическая формула ДКСОУМУК имеет следующий вид [161]:



где Me-K;  $n = 38$ .

Синтез соли ДКСОУМУК осуществляют следующим образом [157]. На первой стадии в расплаве получают изоцианатный форполимер – реакцией олигооксипропиленгликоля (мол. м. 2200) с толуилендиизоцианатом (смесь изомеров 2,4- и 2,6- в соотношении 65:35) при отношении NCO/OH=2. Изоцианатный форполимер в ацетоновом растворе обрабатывают 2-кратным молярным количеством калиевой (или натриевой) соли аминокислоты, которую получают путем 100%-й нейтрализации аминокислоты водным раствором щелочи. Конечный продукт выделяют путем высушивания до постоянной массы при 65°C.

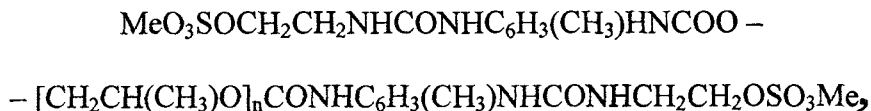
В конденсированном состоянии синтезированная дикалиевая или динатриевая соль ОУБМУК представляет собой твердое вещество, растворимое в воде, диметилформамиде, диметилацетамиде.

Строение полученного соединения доказывают с помощью ИК-спектров, а также титрованием концевых карбоксильных групп соединения, полученного в кислой форме. Экспериментально определенное содержание карбоксильных групп (3,4% COOH) для дикалиевой соли ОУБМУК и 3,46% COOH для динатриевой соли ОУБМУК близко к теоретически рассчитанному 3,25 и 3,29% COOH соответственно.

В ИК-спектре синтезированной дикалиевой (или динатриевой соли) ОУБМУК имеются полосы поглощения при 1600 см<sup>-1</sup>, соответствующие  $\gamma_{\text{ас}}$  COO<sup>-</sup> групп, полоса 1380 см<sup>-1</sup>, относящаяся к симметричным колебаниям карбоксилатной группы, полоса при 1730 см<sup>-1</sup>, связанная с валентными колебаниями –СО-группы уретанового фрагмента, полосы 1540–1560 см<sup>-1</sup> – деформационные колебания –NH-, а также широкая полоса в области 3200–3400 см<sup>-1</sup> – валентные колебания NH-группы.

Молекулярная масса дикалиевой (или динатриевой) соли олигоуретанбисмочевинуксусной кислоты определялась методом эбуллиоскопии. Экспериментально определенная молекулярная масса (2710) хорошо согласуется с теоретически рассчитанной (2770). Для динатриевой соли мол. м. 2650 и 2740 соответственно.

Химическая формула ДКСОУМЭСК имеет вид [162]



где Me-K;  $n=38$ .

Синтез соли ДКСОУМЭСК осуществляется следующим образом [162].

При постоянном перемешивании без доступа влаги и воздуха в течение 4 ч при 100°C выдерживают смесь 28,97 г олигооксипропиленгликоля мол. м. 2120 и 4,76 г 2,4-, 2,6-толу-илендиизоцианата. Полученный макродиизоцианат растворяют в 20 мл диметилформамида и добавляют к нему при энергичном перемешивании предварительно полученную соль из 4,05 г  $\beta$ -аминоэтилсерной кислоты и 1,61 г КОН в 6 мл воды. Смесь перемешивают 0,5 ч. Конечный продукт выделяют путем высушивания до постоянной массы при температуре, равной 65°C.

Строение полученного соединения доказывают с помощью ИК-спектра, а также данными элементарного анализа на S.

Найдено, %: S 2,4. Вычислено, %: S 2,19.

В ИК-спектрах полученной соли имеются полосы поглощения  $1660\text{--}1680\text{ см}^{-1}$ ,  $1710\text{--}1730\text{ см}^{-1}$ , связанные с валентными колебаниями СО-группы мочевиной и уретановой группировок соответственно,  $1540\text{ см}^{-1}$  деформационные колебания NH, широкая полоса с максимумом  $3360\text{ см}^{-1}$  валентные колебания NH-группы, а также наблюдается уширение полосы  $1100\text{ см}^{-1}$  за счет наложения колебаний группы  $\text{SO}_3$ .

Молекулярную массу дикалиевой или динатриевой соли олигоуретанбисмочевинно-этилсерной кислоты определяют методом эбуллиоскопии. Экспериментально определенная мол. м. 2790 хорошо согласуется с теоретически рассчитанной 2826. Для динатриевой соли и дикалиевой мол. м. 2750 и 2794 соответственно.

Концентрат СОЖ, представляющий собой смесь водорастворимых олигомеров и поверхностно-активных веществ успешно используется во многих технологических процессах полирования и зачистки в магнитном поле изделий из различных материалов. Данные о применении этих СОЖ, повышающих производительность обработки, качество обработанных поверхностей и эксплуатационные свойства изделий приведены ниже в главах 4 и 5.

В ИХВС НАН Украины по результатам исследований организовано производство концентрата СОЖ согласно ТУ 88 УССР 95.066-91. В результате накопленного опыта по изготовлению и применению СОЖ технические условия уточнены и переизданы согласно Изменению № 6 с датой введения в действие с 28.03.2001г.

Информация о составах концентратов СОЖ на основе водорастворимых олигомеров, их свойствах, результатах испытаний и особенностях практического применения более подробно изложена в работе [163].



## ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ПОЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ

Исследования и эксперименты в области магнитно-абразивной обработки (МАО) изделий имеют практической целью создание и реализацию процессов финишной отделки поверхностей. Преимущественно решаются задачи обеспечения повышенных эксплуатационных свойств деталей – износостойкости и контактной прочности [3, 22, 30]. Например, технически сложная проблема полирования рабочих поверхностей дорожек внутренних и наружных колец подшипников качения опоры привода вращения лопастей вертолета решена с использованием схемы МАО с осциллирующими полусными наконечниками (см. рис. 3.1, б) [18]. В результате достигнуто повышение в 1,5...2 раза контактной прочности и износостойкости шлифованных поверхностей тяжело нагруженных ответственных деталей [19].

Однако схема МАО тел вращения с осцилляцией полусных наконечников при успешном использовании в единичном и мелкосерийном производстве имеет существенные технологические ограничения производительности полирования и не может эффективно использоваться в серийном и массовом производстве по причине невысоких значений скорости резания (1...3 м/с). Затруднительно использовать эту схему обработки для полирования поверхностей вращения большого диаметра ( $D > 150$  мм), а также финишной обработки длинномерных изделий, в т.ч. прутков, труб и проволоки.

В целях решения перечисленных задач и расширения технологических возможностей метода МАО выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований по созданию и практическому освоению технологических процессов на основе новых способов, устройств и рабочих технологических сред для МАО поверхностей вращения разнообразных изделий из различных материалов.

### 4.1. МАП крупногабаритных валов

Проблема полирования поверхностей валов большого диаметра актуальна для валов листопркатного производства, каландров бумагоделательных машин, рабочих органов-барабанов машин химического и пищевого машиностроения и других аналогичных изделий в различных областях техники.

Для решения стратегических задач государственного уровня в соответствии с Постановлением ЦК КПСС и СМ СССР, отрасли полимерного машиностроения было поручено создать комплекс оборудования для производства сверхтонких фото- и киноплёнок. Ключевым изделием этого комплекса является гамма барабанов-кристалли-затворов расплава полимера диаметром 0,2...1,5 м и длиной до 6,5 м. Рабочая цилиндрическая поверхность этих валов площадью до 8 м<sup>2</sup> должна иметь класс шероховатости  $\nabla 12... \nabla 13$  ( $Ra = 0,01...0,004$  мкм).

Для решения этой проблемы потребовалось создать уникальный технологический процесс, включающий в себя три основополагающие операции: получение заготовки из улучшенного по составу металла (сталь 35 ГОСТ 4543-71) с равновесной мелкозернистой структурой; комплекс операций химико-технической обработки; шлифование с использованием специальных приемов; магнитно-абразивное полирование; нанесение хромового покрытия и финишное магнитно-абразивное полирование покрытия [164\*, 165]. При реализации этого процесса оригинальным способом электрошлакового литья [166] изготавливается высококачественная заготовка, которая после токарной обработки и шлифования подвергается азотированию и закалке до твердости 50...56 HRC. Затем тонким шлифованием и абразивной обработкой торцом алмазного круга обеспечивается шероховатость

\* "Способ изготовления полых деталей цилиндрической формы" (авторы В.П. Горшунов, Л.И. Бондаренко, В.Н. Чачин, Н.С. Хомич, В.А. Кудинов, В.А. Извеков, Л.Р. Тисновский, СССР) защищен патентами: Великобритании № 2172821, 1988 г.; Швейцарии № 661747, 1988 г.; Канады № 1234337, 1988 г.; Франции № 8414879-2570627, 1988 г.; ГДР № PD254503A3, 1988 г.; ФРГ № 3490700, 1988 г.

поверхности  $\nabla 10$  ( $Ra \leq 0,16$  мкм). Последующим полированием фетровыми кругами с использованием алмазных паст достигается шероховатость поверхности  $\nabla 11 \dots \nabla 12$  ( $Ra = 0,04 \dots 0,08$  мкм).

Большая трудоемкость и ограниченные возможности существующей технологии вынудили специалистов Киевского ПО "Большевик" к поиску новых способов финишной обработки валов. Выбор был остановлен на абразивной обработке в магнитном поле, возможности которой реализованы следующим образом. Было создано устройство для магнитно-абразивного полирования крупногабаритных валов, представляющее собой наладку, устанавливаемую на салазки токарно-винторезного станка модели 165 (рис. 4.1, б) [167\*, 168]. Схема устройства представлена на рис. 4.1, а. Она состоит из П-образного магнитопровода, охватывающего сектор полируемого вала. На магнитопроводе расположены электромагнитная катушка и пара полюсных наконечников, имеющих возможность осцилляции вдоль оси полируемой детали посредством эксцентрикового привода. Зазоры между полюсниками и обрабатываемой поверхностью детали имеют серповидную форму, а рабочие поверхности самих полюсников выполнены с продольными и поперечными пазами, что позволило концентрировать магнитные потоки и интенсифицировать процесс обработки. Минимальная величина зазора составляет 1 мм, а максимальная – 3,5 мм. При значении тока в катушках, равном 9 А, магнитная индукция в рабочих зазорах достигает 0,8 Тл. Величина продольной подачи составляет 3,8 мм/об при амплитуде осцилляции 1,5 мм и частоте 260 дв.х./мин [169].

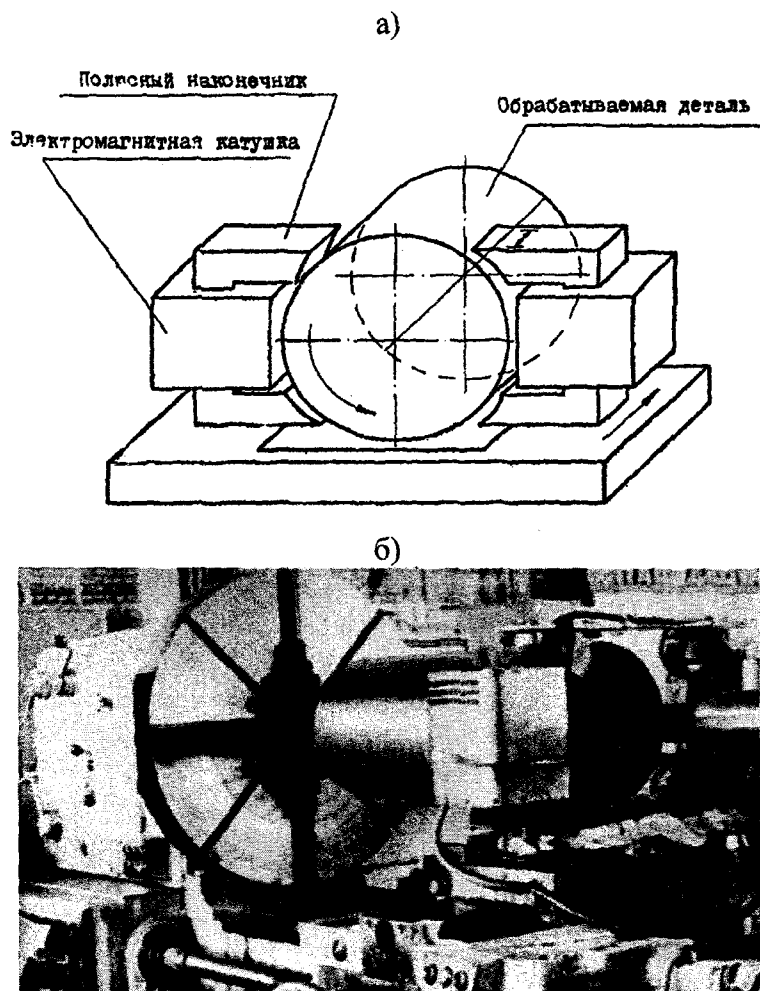


Рис. 4.1. Схема работы (а) и общий вид (б) наладки для МАО валов-каландров

\* "Устройство для магнитно-абразивной обработки" (авторы: В.Н. Чачин, Л.И. Бондаренко, Н.С. Хомич, В.А. Кудинов, В.А. Извеков, Л.Р. Тисновский, В.П. Горшунов; СССР ) защищено патентами ФРГ № 3490701, 1987 г.; ГДР № 244468, 1987 г.; Италии № 1181847, 1988 г.; Франции № 8500602, 1988 г.; Финляндии № 78855, 1989 г.

В качестве рабочих технологических средств при МАО крупногабаритных валов используются ферроабразивный порошок Fe-TiC (ТУ6-09-03-483-81) и СОЖ в виде водного раствора полимерсодержащих ПАВ. Эти технологические параметры при МАО вала ( $d = 0,4$  м,  $l = 1,0$  м) обеспечивают за 45...60 мин снижение  $Ra$  от 0,5...1,0 до 0,01...0,04 мкм.

На головном предприятии бумагоделательных машин многопрофильного концерна Valmet (Финляндия) согласно контракту № 7311/098811 от 22.06.88 г. опробована возможность магнитно-абразивного полирования вала ( $d = 0,4$  м,  $l = 1,2$  м), на поверхность которого методом детонационного напыления нанесено металлокерамическое покрытие из сплава ВК6, имеющее многочисленные поры размером 10...70 мкм и  $Ra = 0,6...0,8$  мкм. В результате МАП с использованием наладки СФТ2.107 с вращающимися полюсными наконечниками в течение 2 часов показатель  $Ra$  шероховатости поверхности снижен до 0,17...0,30 мкм при округлении краев пор-раковин.

## **4.2. Оборудование и технологии магнитно-абразивной обработки труб**

В машиностроении и, особенно, в металлургии существует множество проблем, связанных с финишной обработкой наружных длинномерных труб, прутков и катанки. Применение для этих целей механических способов полирования и зачистки затруднительно, а обычно используемые методы химического травления и электрохимического полирования являются экологически ущербными и дорогостоящими.

Характерным примером поиска решения сложной технологической проблемы может служить комплекс исследований и экспериментов по изучению возможностей и условий применения МАП для полирования наружных поверхностей труб и оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) атомных реакторов.

### **4.2.1. Анализ проблемы и поисковые исследования**

Чрезвычайно жесткие условия эксплуатации – среда перегретого пара с температурой 300°C (573 К) и давлением 200 атм (19,6 МПа), – а также повышенная степень надежности в работе предопределили высочайшие требования к коррозионной стойкости ТВЭЛОВ, следовательно, к качеству обработки их поверхности. Материалами для изготовления ТВЭЛОВ служат цирконий-никелевые сплавы и высоколегированные (нержавеющие) стали.

В производстве труб и изделий из сплавов циркония в качестве основной операции отделки поверхности используют травление в растворах плавиковой кислоты. Применяют также и различного вида механическую обработку: шлифование, полирование различными пастами, стеклоструйную обработку. При этом достигается различное качество и шероховатость поверхности труб [170].

Однако применение растворов плавиковой кислоты в масштабах промышленного производства имеет ряд существенных недостатков, к которым можно отнести:

- использование большого количества растворов кислот, щелочей и промывных вод, очистка или регенерация которых затруднена и требует больших затрат;
- вредные условия труда в травильных отделениях;
- загрязнение окружающей среды;
- трудность автоматизации операций травления;
- возможность ухудшения качества готовых труб и изделий за счет загрязнения поверхности ионами фтора при недостаточной отмывке.

Поэтому большой интерес представляет замена травления “сухими” операциями механической обработки. Можно выделить следующие требования, предъявляемые к отделочным операциям и свойствам сформированных поверхностей оболочек ТВЭЛОВ и изделий:

- 1) обеспечение производительности на уровне 1...3 м/мин обработки поверхностей труб и изделий диаметром 3...14 мм и длиной до 8 м при съеме металла на диаметр: для труб – до 100 мкм и для изделий до 10 мкм;

2) получение поверхности с оптимальной шероховатостью после обработки  $Ra = 0,1 \dots 0,3$  мкм (по крайней мере, не хуже  $0,5 \dots 0,6$  мкм);  
 обеспечение равномерного характера обработки по всей длине изделия и по его диаметру;

3) нежелательность использования при обработке вращения детали и, в крайнем случае, ограничение скорости вращения максимальным значением 20 об/мин;

4) минимальное загрязнение поверхности частицами абразива;

5) возможно меньшая деформация обрабатываемой поверхности зернами абразива;

6) коррозионная стойкость в воде и паре высоких параметров.

Первые три требования относятся к техническим характеристикам процессов и геометрическим размерам труб и изделий, четвертое связано с опасностью возникновения при вращении деформирующих изделие биений, а пятое и шестое являются необходимым для обеспечения высокой коррозионной стойкости.

Традиционные процессы абразивной обработки связанными абразивными зёрнами (кругом, брусом или гибкой абразивной лентой) позволяют в основном выполнить первые три требования, но, в силу присущих им недостатков [1, 16, 21], не могут обеспечить выполнение 4-го, 5-го, 6-го, а следовательно, и 7-го требований. Это было показано в ряде исследований, например, в работе [171], и подтверждается практикой промышленного производства.

Предварительный анализ особенностей магнитно-абразивной обработки показал, что в этом процессе, в принципе, могут быть устранены недостатки процессов абразивной обработки связанным зёрном и что с помощью магнитно-абразивной обработки могут быть обеспечены требуемые специфические свойства поверхностей.

При анализе литературных источников не обнаружено сведений о разработках схем и процессов магнитно-абразивного полирования (МАП) наружных поверхностей малого диаметра и большой длины. Поэтому работа в данном направлении была начата с выбора эффективной схемы МАП, создания макетов и проведения поисковых исследований.

Разработан и опробован ряд схем МАП прутков и труб, представленных на рис. 4.2.

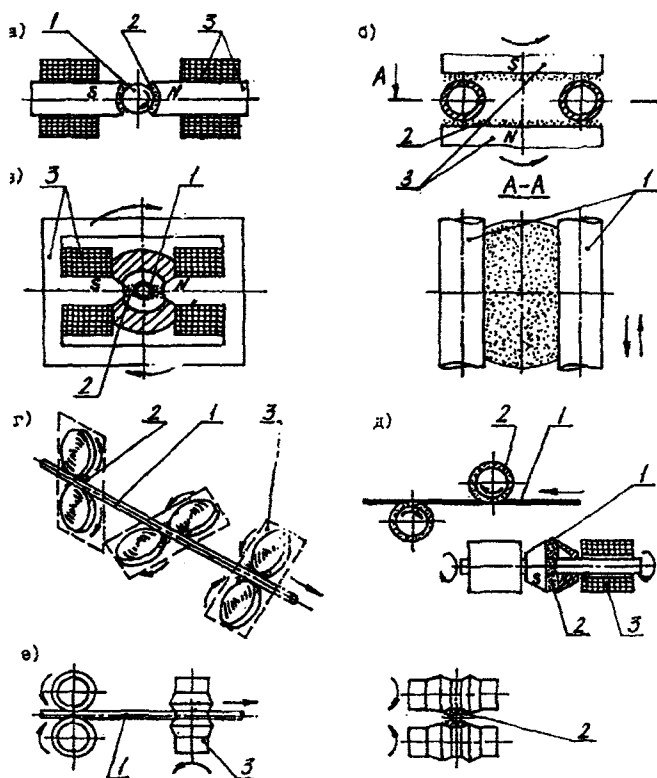


Рис. 4.2. Схемы МАП прутков и труб: 1 – обрабатываемое изделие, 2 – ферроабразивный порошок, 3 – магнитная система

Первая схема магнитно-абразивной обработки с неподвижными полюсными наконечниками и вращающимся изделием, представленная на рис. 4.2, *а*, является наиболее простой. В этом случае движение абразивного резания создается только за счет вращения изделия. Процесс МАП по этой схеме эффективен при скорости вращения изделия  $V > 50$  м/мин, что технически сложно обеспечить при обработке трубчатых изделий малого диаметра и относительно большой длины. Данная схема используется для обработки коротких цилиндрических изделий.

При реализации второй схемы МАП (рис. 4.2, *б*) движение резания складывается из трех движений: вращения торцевой плоскости магнитных полюсов со щеткой абразивного материала касательно поверхности обрабатываемого изделия, вращения изделия вокруг своей оси и поступательного перемещения изделия вдоль своей оси относительно полюсов. Результаты исследований, приведенные в работе [172], показали, что технологические параметры обработки не удовлетворяют требованиям по качеству поверхности и съему металла.

Шероховатость поверхности после обработки по схеме рис. 4.2, *а* составляла  $Ra = 0,15...0,25$  мкм, а по схеме рис. 4.2, *б* –  $Ra = 0,2...0,3$  мкм.

В процессе финишной механической обработки нежестких изделий малого диаметра и большой длины желательнее, по возможности, исключить их вращение. В этом случае упрощается конструкция устройства, но усложняется задача равномерной качественной обработки изделия по всей поверхности.

В схеме обработки, предоставленной на рис. 4.2, *в*, движение резания осуществляется за счет вращения ферромагнитного абразивного порошка вместе с магнитной системой в диаметральной плоскости трубы, которая сама не вращается, а только поступательно перемещается вдоль своей оси. Схема МАП реализована в конструкции станка модели 270, который обеспечивает подачу детали 5...50 мм/с, частоту вращения полюсных наконечников  $7...50$  с<sup>-1</sup>, магнитную индукцию в рабочей зоне 0,4...1,2 Тл. При МАП образцов труб со скоростью 3 м/мин обеспечивается  $Ra = 0,32...0,40$  мкм, а съем металла составляет 5...7 мкм на сторону.

С учетом требования съема металла при финишной обработке изделий до 10 мкм на сторону и малого диаметра изделий было признано целесообразным разработать схему, в которой магнитные полюса с абразивными частицами на них вращаются вокруг собственной оси, что дало бы возможность увеличить скорость абразивного резания при использовании вращения полюсов с меньшим числом оборотов. Было предложено использовать магнитные полюса в виде дисков. Схема магнитно-абразивной обработки вращающимися магнитными полюсами приведена на рис. 4, *г* [173]. В этой схеме движение резания обеспечивается вращением дисковых полюсов, на кромках которых имеется щетка из частиц ферромагнитного абразивного порошка. Плоскости дисков параллельны оси изделия (или трубы). Щетка из частиц абразива охватывает значительную часть трубы, а три пары дисков, плоскости которых развернуты друг относительно друга на 120°, обеспечивают равномерный охват всей поверхности. При поступательном движении изделия параллельно своей оси происходит обработка вдоль его образующей.

Эксперименты по МАП производились с использованием дисков диаметром 140 мм с узкой рабочей кромкой шириной 2 мм. Обработывали образцы труб диаметром 9 мм и длиной 10...120 мм, собираемые на латунной оправке в сборки суммарной длиной до 1000 мм, и имитаторы изделий длиной до 1500 мм. Режимы МАП: скорость резания – 3 м/с, скорость подачи – 2,4...3,0 м/мин, рабочий зазор – 1,8...2,4 мм, магнитная индукция в рабочем зазоре – 0,4 Тл. Обеспечивалось значение  $Ra = 0,2...0,3$  мкм при съеме на сторону 6...9 мкм. После МАП образцы имели светлую матовую поверхность.

Фотографии микрорельефа поверхностей образцов циркониевых труб до и после обработки представлены на рис. 4.3.

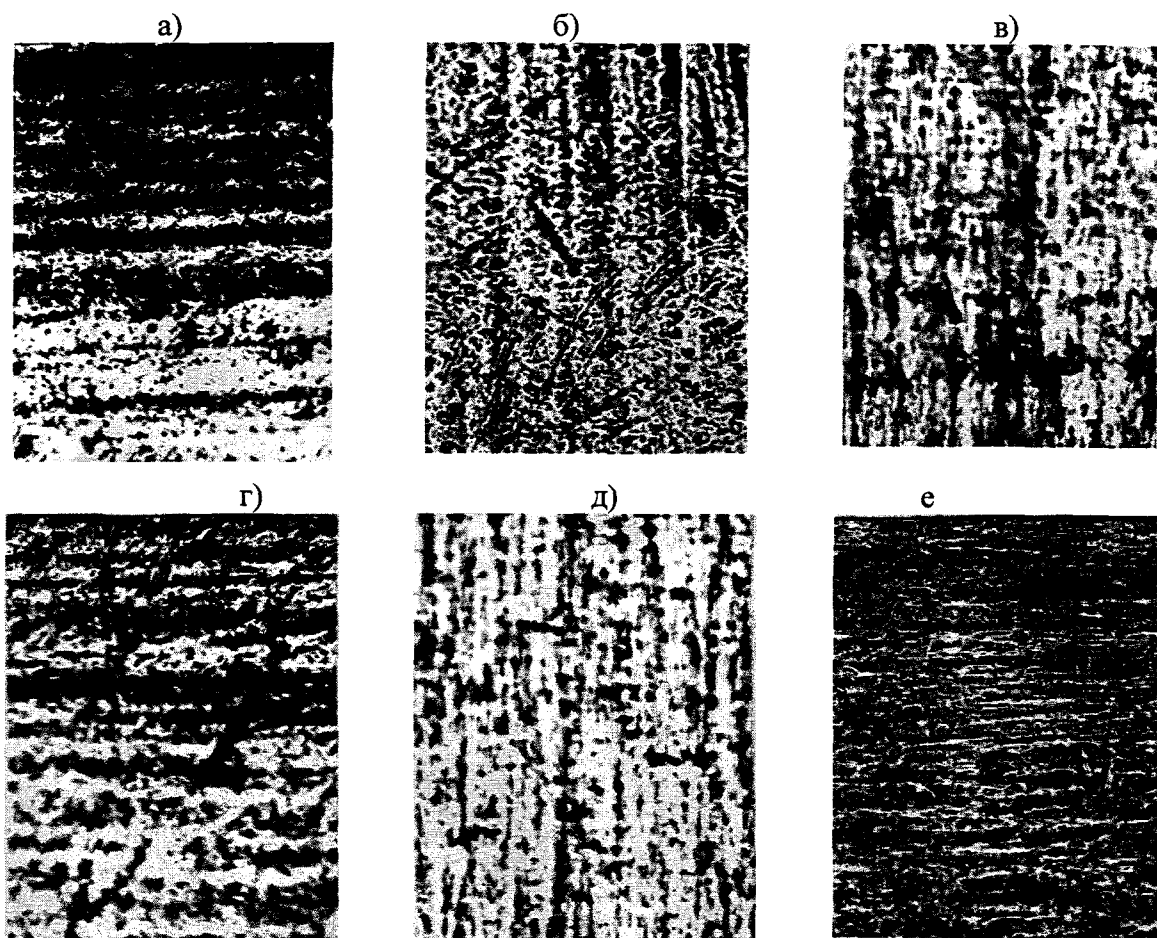


Рис. 4.3. Фотографии микрорельефа образцов циркониевых труб (х60) после прокатки (а), шлифования абразивной лентой (б), магнитно-абразивной обработки по схемам: рис. 4.2. а (в), рис. 4.2, б (г), рис. 4.2, в (д) и рис. 4.2, г (е)

Для оценки эффективности схем МАП труб помимо размерного съема исследовали состояние поверхности визуальным осмотром в поле стереомикроскопа, фотографированием на микроскопе “Интерфаг” (Х60) и определением показателя  $Ra$  шероховатости поверхности на профилографе-профилометре. Кроме этого по методике ВНИИНМ проводились коррозионные испытания образцов в водной среде при температуре 400°C (673 К) и давлении 100 атм (9,8 МПа). После выдержки в течение 72 и 200 часов определялись привесы образцов, и оценивался внешний вид окисной пленки на их поверхности. Результаты исследований приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты МАП и коррозионных испытаний образцов труб из циркониевых сплавов

Вид обработки	Съем металла на сторону, мкм	$Ra_{ср}$ , мкм	Результаты коррозионных испытаний		
			привес образцов, мг/дм <sup>2</sup>		внешний вид окисной пленки
			72 часа выдержки	200 часов выдержки	
1	2	3	4	5	6
прокатка	—	0,4	—	—	—
шлифование абразивной лентой	20...30	0,5	—	—	—
травление	—	—	16	23	плотная черная глянцевая пленка

1	2	3	4	5	6
МАП по схеме: рис. 4.2, а	1...3	0,20	18	34	плотная темная матовая пленка
рис. 4.2, б	2...4	0,25	–	29	плотная темная матовая пленка
рис. 4.2, в	5...7	0,18	17	28	плотная темная тускло блестящая пленка
рис. 4.2, г	6...9	0,18	18	33	плотная темная матовая пленка

Анализ полученных результатов свидетельствует, что метод МАП имеет определенные перспективы для использования на финишных операциях отделки поверхностей труб и изделий из циркониевых сплавов. Лучшие суммарные показатели, близкие к требуемым, имеет схема МАП с вращающимися полюсными наконечниками.

#### 4.2.2. Исследование кинематических особенностей процесса МАП труб

В результате поисковых исследований предложена схема МАП труб малого диаметра, представленная на рис. 4.2, д [174]. Для анализа кинематики таких схем МАП, предусматривающих вращение полюсных наконечников с рабочими торцовыми поверхностями, целесообразно использовать приемы и допущения, применяемые при изучении особенностей кинематики процесса шлифования [8, 175]. Условно принимаем, что единичное режущее зерно ферромагнитного абразивного порошка жестко связано с поверхностью полюсного наконечника нормальной силой магнитного притяжения.

Для описания кинематики процесса магнитно-абразивной обработки, реализуемого рассматриваемыми схемами, целесообразно определить траекторию движения режущего зерна, длину дуги его контакта с обрабатываемой поверхностью и мгновенную скорость резания единичного зерна.

Рассмотрим два случая магнитно-абразивной обработки наружных поверхностей цилиндрических тел с использованием вращающихся чашеобразных полюсных наконечников: 1) расстояние между осями вращения чашки и детали  $h = 0$  (рис. 4.4, а); 2)  $h \neq 0$  (рис. 4.4, б-г). В первом случае оси вращения полюсного наконечника и детали пересекаются, во втором – перекрещиваются. Каждая из этих схем реализует три движения: вращение полюсного наконечника, вращение и поступательное вдоль оси перемещение трубы.

Траектория движения режущего зерна для рассматриваемого способа обработки аналогична таковой для круглого шлифования торцом чашечного круга [170].

$$\left. \begin{aligned} x &= R \left( \cos \psi \pm \frac{U}{60V_{\text{пр}}} \psi \right) \\ z &= R \left( \sin \psi \pm \frac{U_{\text{д}}}{60V_{\text{пр}}} \psi \right) \end{aligned} \right\},$$

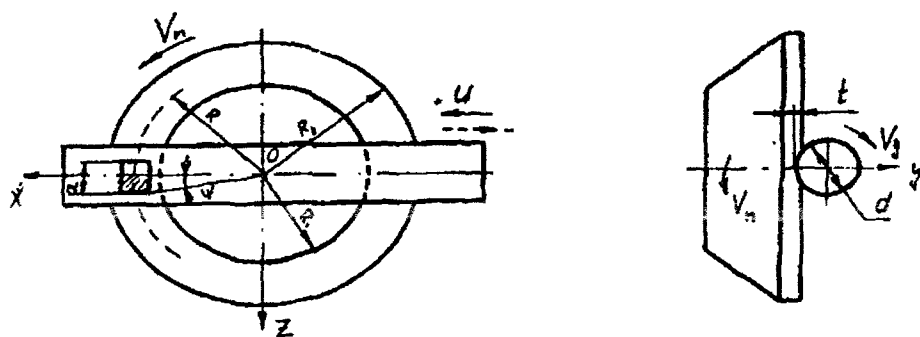
где  $R$  – радиус круга;

$\psi$  – угол наконечника контакта круга с деталью;

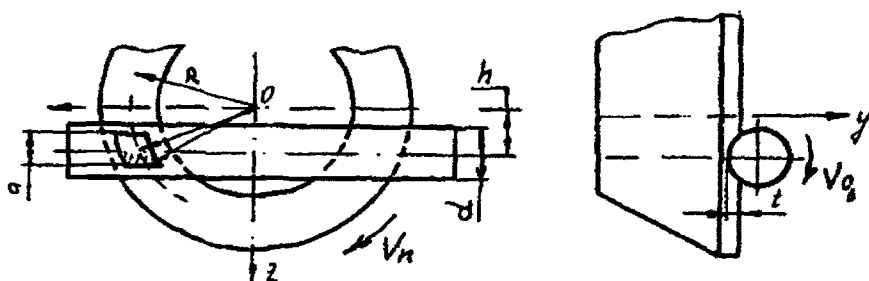
$V_{\text{д}}$  и  $V_{\text{кр}}$  – скорость вращения детали и круга;

$U$  – продольная подача детали.

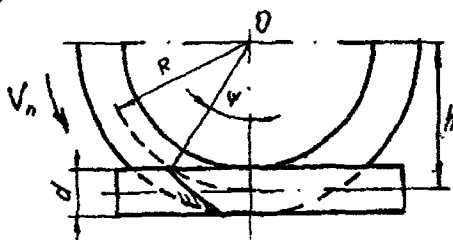
a)



б)



в)



г)

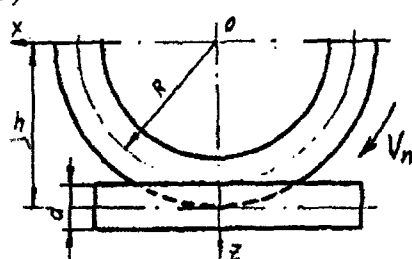


Рис. 4.4. Схемы МАП труб с пересекающимися (а) и перекрещивающимися (б-г) осями вращения полюсного наконечника и изделия:  
 б)  $0 < h < R$ ; в)  $h = R$ ; г)  $h > R$

При данном количестве движений для описания закона движения точки (зерна) по поверхности детали двух уравнений недостаточно. Необходимо уравнение, отражающее изменение третьей координаты (это изменение обусловлено поступательным движением детали). Необходимость такого подхода подтверждается и в работе [175].

В результате указанных выше движений траекторией резания (или траекторией следа режущего зерна на обрабатываемой поверхности) будет некоторая винтовая эпициклическая кривая, которую можно описать следующей системой параметрических уравнений:

$$x = a \cos t; y = a \sin t; z = bt.$$

Используя данные работ [8,175], можно записать параметрические уравнения траектории резания для магнитно-абразивной обработки цилиндрических деталей чашкообразными полюсными наконечниками:



$$\left. \begin{aligned} x &= R \left( \cos \psi \pm \frac{U}{V_{\Pi}} \psi \right) \\ y &= R \frac{U}{V_{\Pi}} \psi \\ z &= R \left( \sin \psi \pm \frac{V_{\Delta}}{V_{\Pi}} \psi \right) \end{aligned} \right\}, \quad (4.1)$$

где  $R$  – радиус полюсного наконечника;

$\psi$  – угол контакта совокупности ферромагнитных абразивных зерен с деталью;

$V_{\Delta}$ ,  $V_{\Pi}$  – скорость вращения детали и полюсного наконечника;

$U$  – движение подачи детали.

Рассмотрим мгновенную скорость резания. Из известных соотношений теоретической механики мгновенную скорость резания можно определить следующим образом:

$$V_{\text{рез}} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}.$$

Проекции скорости резания на оси координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) соответствуют первым производным от координат точки  $(x, y, z)$  в произвольный момент времени  $t$ , т.е.

$$V_x = dx/dt; \quad V_y = dy/dt; \quad V_z = dz/dt.$$

Длина дуги контакта ферроабразивного зерна с обрабатываемой поверхностью трубы для схем, представленных на рис. 4.4, будет существенно отличаться.

Рассмотрим первый случай ( $h = 0$ ). Элементарная длина дуги контакта совокупности абразивных зерен с деталью

$$dL_{h=0} = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2},$$

$$\frac{dx}{d\psi} = -R \sin \psi \pm \frac{RU}{V_{\Pi}},$$

$$\frac{dx}{d\psi} = \frac{RU}{V_{\Pi}},$$

$$dL_{h=0} = \sqrt{\left(-R \sin \psi \pm \frac{RU}{V_{\Pi}}\right)^2 + \left(\frac{RU}{V_{\Pi}}\right)^2 + \left(R \cos \psi \pm \frac{RV_{\Delta}}{V_{\Pi}}\right)^2} d\psi.$$

Если считать, что  $\psi$  – величина малая, то  $\cos \psi = 1$ , и после преобразования получаем

$$dL_{h=0} = \frac{R}{V_{\Pi}} \sqrt{2U^2 + 2V_{\Delta}^2} d\psi.$$

Полная длина дуги контакта совокупности ферромагнитных абразивных зерен с деталью в пределах угла контакта  $\psi$

$$L_{h=0} = \frac{R}{V_{\Pi}} \sqrt{2U^2 + 2V_{\Pi}^2} \int d\psi = R \frac{\psi}{V_{\Pi}} \sqrt{2U^2 + 2V_{\Pi}^2}, \quad (4.2)$$

т.к. величина угла  $\psi = \sqrt{td - t^2}$ , то уравнение 4.2 примет следующий вид:

$$L_{h=0} = \frac{R}{V_{\Pi}} \sqrt{2U^2 + 2V_{\Pi}^2} \sqrt{td - t^2}. \quad (4.3)$$

Перепишем выражение 4.3, обозначив

$$\frac{R}{V_{\Pi}} \sqrt{2U^2 + 2V_{\Pi}^2} = M,$$

$$L_{h=0} = M \sqrt{td - t^2}. \quad (4.4)$$

Теперь рассмотрим случай, когда  $h \neq 0$ . Для траектории резания остается в силе система 4.1. Используя данные 4.2, полная длина дуги контакта в пределах угла  $\psi$

$$L_{h \neq 0} = M \frac{R}{z} \arccos \frac{h - \sqrt{td - t^2}}{R}. \quad (4.5)$$

Следует отметить, что выражение 4.5 справедливо не для любых значений  $h$ . Если  $h$  таково, что справедливо неравенство

$$h - \frac{a}{2} \leq R \leq h + \frac{a}{2},$$

то для определения полной дуги контакта необходимо пользоваться выражением:

$$L_{h \neq 0} = M \frac{R}{z} \arccos \frac{h - \sqrt{td - t^2}}{R}. \quad (4.6)$$

Величина в выражениях 4.4–4.6 определяет изменение длины дуги контакта совокупности ферромагнитных абразивных зерен с деталью в результате сложного движения детали. С увеличением либо скорости вращения детали, либо скорости ее подачи, либо той и другой вместе увеличивается длина дуги контакта.

Определенное влияние на кинематику процесса оказывает взаиморасположение обрабатываемой детали и полюсных наконечников. При увеличении  $h$  длина дуги контакта, как следует из 4.4–4.6, увеличивается, возрастает и площадь контакта совокупности абразивных зерен с деталью. Последнее обстоятельство способствует повышению количества абразивных зерен, участвующих в формировании обрабатываемой поверхности, что приводит к уменьшению нагрузки на единичные зерна и, следовательно, повышению эффективности процесса обработки.

Кроме того, по мере приближения зоны резания к периферии круга ( $h$  возрастает) уменьшается угол  $\alpha$  между касательной к следу зерна на поверхности резания и образующей цилиндра детали. При увеличении  $h$  от 0 до  $R$  угол  $\alpha$  соответственно меняется от  $90^\circ$  до 0. Если величина  $h$  несколько меньше  $R$ , то для совокупности зерен имеет место

широкий разброс значений угла  $\alpha$  и увеличение кривизны траектории резания. Следовательно, увеличивается частота пересечений следов обработки, повышается однородность микрорельефа и снижается высота микронеровностей формируемой поверхности.

#### 4.2.3. Расчет геометрических параметров полюсов магнитной системы станка для МАП труб

Форма и соотношение геометрических размеров полюсных наконечников определяют физические и технологические свойства инструмента – кольцевой ферроабразивной щетки. Важнейшим условием управления плотностью ферромагнитной абразивной порошковой массы является обеспечение необходимой топографии магнитного поля в пространстве между полюсными наконечниками. Поле должно обеспечивать, с одной стороны, наибольшую концентрацию ферроабразивного порошка в зоне обработки, с другой стороны, наибольшее нормальное давление порошка на обрабатываемую поверхность.

Магнитная система станка для МАП должна обеспечивать:

- необходимые энергетические параметры источника электромагнитного поля;
- минимальные потери при передаче энергии в рабочую зону станка;
- рациональную топографию магнитного поля в рабочей зоне для формирования режущего инструмента в виде ферроабразивной порошковой массы [176].

Расчет магнитного поля аналитическими методами невозможен, поэтому расчет был произведен одним из численных методов – методом конечных элементов [73] с использованием методических приемов, изложенных в разделе 2.2. Учитывая, что материал магнитопровода имеет нелинейные магнитные свойства, решение получено методом итераций.

В результате выполненных кинематических расчетов и проведения экспериментов на устройстве, реализующем схему МАП (рис. 4.2, д), было найдено решение по ее совершенствованию применительно к МАП труб малого диаметра [177]. В межполюсное пространство введены специальной формы диамагнитные проставки, а пары полюсных наконечников развернуты друг относительно друга на  $90^\circ$ .

На рис. 4.5 представлены зависимости магнитной индукции в межполюсном пространстве от силы тока  $J$  в катушках: кривая 1 – для схемы рис. 4.2, д, кривая 2 – для схемы рис. 4.2, е. С учетом результатов расчетов и экспериментов на основании схемы рис. 4.2, е была разработана конструкторская документация и изготовлен станок модели 8.014 для МАП прутков и труб. Для уточнения параметров магнитной системы станка 8.014 принята ее расчетная область с указанием подобластей (P1...P16), представленная на рис. 4.6.

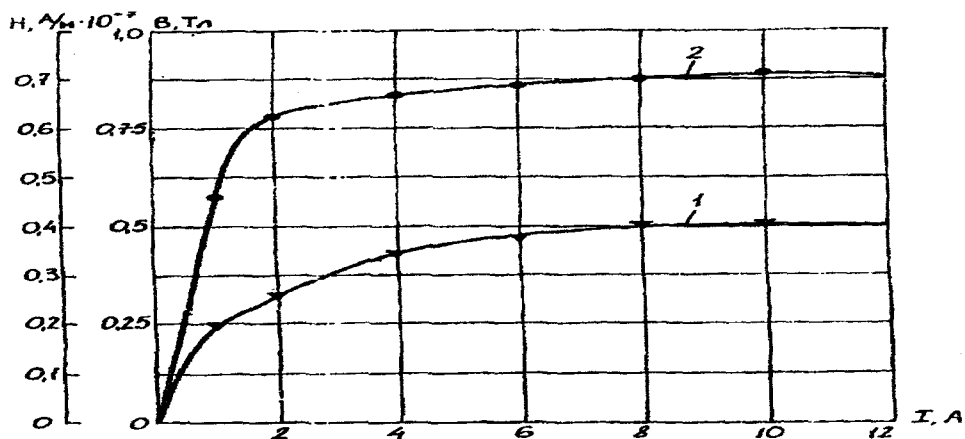


Рис. 4.5. Зависимость магнитной индукции  $B$  в межполюсном пространстве от силы тока  $J$  в катушках устройств для МАП труб

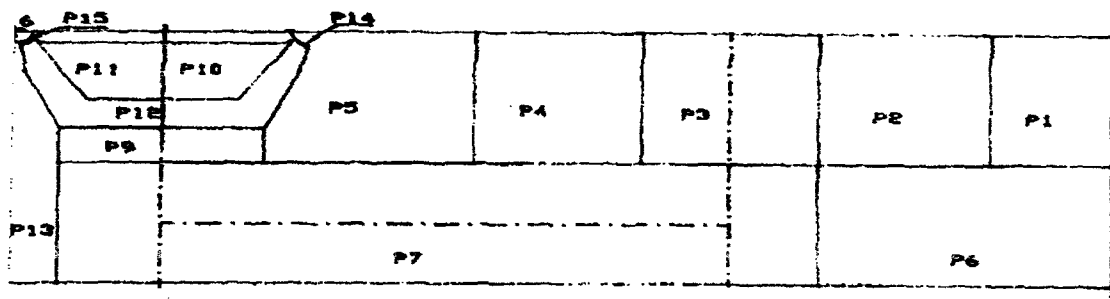


Рис. 4.6. Расчетная область магнитной системы станка 8.014

Оптимизация формы и размеров полюсных наконечников магнитной системы проводилась по изложенной в разделе 2.2 методике, основанной на моделировании магнитных полей с применением скалярного потенциала и численных расчетов дифференциальных уравнений в частных производных (метод конечных элементов, метод конечных разностей) [176].

Элементы расчетного поля, расположенные непосредственно в области формирования режущей ферроабразивной щетки, являются наиболее важными. В табл. 4.2 представлены результаты расчета магнитной индукции  $B$  (Тл) в элементах рабочего зазора с деталью (подобластей P15, P16), а в табл. 4.3 – результаты расчета магнитной индукции в элементах рабочего зазора без детали (подобласть P14).

Таблица 4.2

Результаты расчета магнитной индукции  $B$  (Тл) в элементах рабочего зазора с деталью

№ п/п	$x$	$y$	$B_x$	$B_y$	$B$	$M_y$
579	-47,6	102,5	0,2570	-0,6032	0,6557	3,64
580	-46,1	103,2	0,3131	-0,7701	0,8313	3,42
581	-47,0	103,2	0,1951	-0,7529	0,7778	3,52
582	-44,7	104,1	0,4879	-1,2728	1,3631	2,72
583	-45,5	104,1	-0,1822	-1,2092	1,2228	2,91
584	-44,0	104,6	-0,4042	-1,6498	1,6986	2,51
585	-43,2	106,0	-0,3623	-1,5502	1,5920	2,54
586	-44,0	105,8	-0,3813	-1,5519	1,5981	2,53
587	-42,9	106,9	-0,2929	-1,4566	1,4858	2,60
588	-42,6	108,5	-0,0000	-1,4673	1,4673	2,61
589	-43,2	107,9	-0,2232	-1,6277	1,6429	2,52

Таблица 4.3

Результаты расчета магнитной индукции  $B$  (Тл) в элементах рабочего зазора без детали

№ п/п	$x$	$y$	$B_x$	$B_y$	$B$	$M_y$
1	2	3	4	5	6	7
565	47,6	103,0	-0,4770	-1,2199	1,3099	2,79
566	48,1	105,6	-0,2058	-1,1022	1,1212	3,03
567	47,1	104,2	-0,3817	-1,3005	1,3554	2,73
568	48,8	108,2	0,0000	-1,0346	1,0346	3,15
569	47,6	107,1	-0,1837	-1,1493	1,1639	2,99
570	46,0	107,9	0,0000	-1,1823	1,1823	2,96

1	2	3	4	5	6	7
571	42,6	108,2	0,0000	-1,1579	1,1579	2,99
572	43,4	107,0	0,1449	-1,2498	1,2582	2,86
573	44,9	106,7	-0,1229	-1,2310	1,2372	2,89
574	42,8	105,6	0,0630	-1,3495	1,3510	2,74
575	43,3	104,7	0,3244	-1,7030	1,7337	2,50
576	44,1	104,1	-0,3390	-1,5283	1,5654	2,54
577	45,9	103,8	-0,4625	-1,2916	1,3719	2,71
578	45,1	104,8	-0,0749	-1,4614	1,4634	2,62

На рис. 4.7 дано графическое изображение результатов расчета магнитной индукции в элементах рабочей зоны с деталью (рис. 4.7, а) и без детали (рис. 4.7, б).

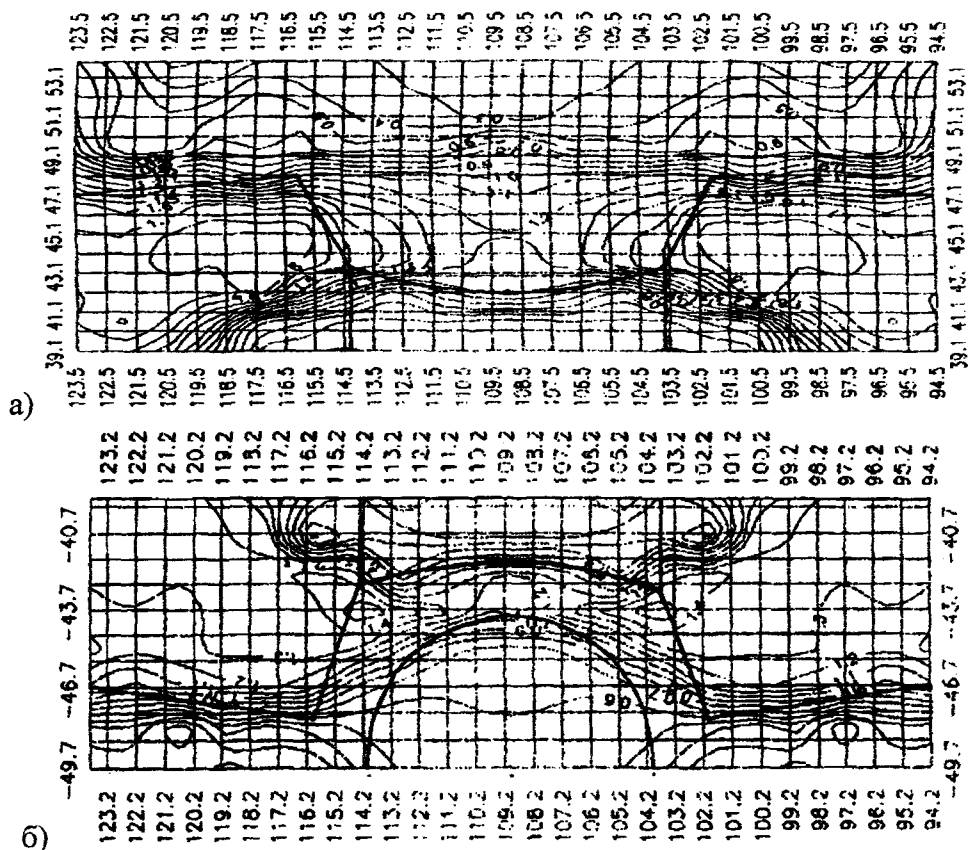


Рис. 4.7. Графическое изображение результатов расчета магнитной индукции  $B$  (Тл) в элементах рабочей зоны: а – с деталью; б – без детали

Как видно из рис. 4.7, порошок полностью заполняет рабочую зону полюсных наконечников. При входе детали в рабочую зону (см. рис 4.7, а) порошок равномерно распределяется в рабочем зазоре, создавая "кольцевую эластичную щетку", которая охватывает половину окружности изделия и производит обработку.

#### 4.2.4. Технологические исследования процесса МАП циркониевых труб

Станок модели 8.014 для МАП прутков и труб имеет следующие технические характеристики:

частота вращения полюсных наконечников,  $c^{-1}$

15; 18; 23

магнитная индукция в рабочих зазорах, Тл	0,2...0,8
диапазон регулирования рабочего тока в катушках, А	1...5
величина рабочих зазоров, мм	1...4
скорость подачи обрабатываемого изделия, м/мин	1,2; 2,4; 3,6
потребляемая мощность, кВт	6,8
объем доз порошка, см <sup>3</sup>	18...35
габаритные размеры станка (длина × ширина × высота), мм	2500x1050x1910
масса станка, кг	2200

Поисковые исследования показали, что качество МАП циркониевых труб существенно зависит от свойств применяемых ферроабразивных порошков и, в особенности, составов СОЖ. По этой причине был поставлен эксперимент с целью выбрать ФАП из серийно выпускаемых, а также определить наиболее эффективный состав СОЖ. Обработка образцов труб осуществлялась на станке 8.014 при следующих основных технологических режимах: скорость резания – 5 м/с; скорость подачи – 1,2 м/мин; ток в катушках – 2 А; рабочий зазор – 2 мм. Испытанию подверглись ФАП: ПФОР6М5 ТУ-114-02-88; Fe-TiC ТУ6-09-03-483-81 и ФАД-9К ТУ 2,036,02227,154-88. В качестве СОЖ применяли водный раствор триэтанолamina (1%), олеиновой кислоты (1%) и одной из шести добавок (1%) модифицированных олигомерных ПАВ ТУ88 УССР 95,066-91 [161, 162]. Обрабатывались образцы циркониевой трубы диаметром 9,2 мм и длиной 30 мм с исходной шероховатостью, характеризуемой  $Ra = 0,4...0,7$  мкм. Результаты обработки приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Результаты испытаний ФАП и СОЖ при полировании образцов циркониевых труб

№ опытов	ФАП	№ СОЖ	Результаты МАП	
			$Ra$ , мкм	Съем металла на сторону, мкм
1	ПФО Р6М5	–	0,42...0,64	1
2		1	0,48...0,6	1
3		2	0,4...0,6	1
4		3	0,2...0,28	1
5		4	0,4...0,62	3
6		5	0,44...0,56	2
7		6	0,46...0,56	4
8	Fe-TiC	–	0,3...0,58	4
9		1	0,3...0,56	5
10		2	0,38...0,52	6
11		3	0,34...0,54	5
12		4	0,44...0,58	4
13		5	0,36...0,6	5
14	6	0,58...0,66	4	
15	ФАД-9К	–	0,36...0,58	2
16		1	0,4...0,46	2
17		2	0,54...0,6	4
18		3	0,48...0,58	3
19		4	0,28...0,58	4
20		5	0,38...0,64	5
21		6	0,36...0,66	4

Лучшие результаты по производительности процесса и качеству обработанной поверхности дала обработка образцов труб с использованием порошка кремнистого сплава ФАД-9К и порошка на основе железа с добавками карбида титана Fe-TiC. Из предложенных составов СОЖ для циркониевых сплавов рекомендуется использовать водный раствор триэтаноламина (1%), олеиновой кислоты (1%) и поверхностно-активных веществ (АУК-Na-КМЦ) (1%). При оптимизации технологических параметров процесса МАП циркониевых труб согласно эксперименту, построенному по плану Хартли [81] и проведенному на станке 8.014, функциями отклика были взяты (см. табл. 4.5).

Таблица 4.5

Параметры и результаты МАП образцов циркониевых труб

№ опы- тов	Параметры МАП				Результаты МАП		
	рабочий зазор, мм, $X_1$	ток в катуш- ках $I$ , А, $X_2$	подача трубы, м/мин, $X_3$	частота вращения полюсов, $C^{-1}$ , $X_4$	$Ra$ , мкм, $Y_1$	съем метал- ла на сто- рону, мкм, $Y_2$	величина микрона- пряжений, МПа, $Y_3$
1	3	3	3,6	23	0,30	9,08	118
2	1	3	1,2	23	0,24	15,76	127
3	3	1	1,2	23	0,24	9,45	114
4	1	1	3,6	23	0,34	7,40	120
5	3	3	3,6	15	0,30	14,15	115
6	1	3	1,2	15	0,26	22,65	116
7	3	1	1,2	15	0,25	14,93	120
8	1	1	3,6	15	0,30	5,05	116
9	3	2	2,4	18	0,21	9,41	123
10	1	2	2,4	18	0,20	9,22	125
11	2	3	2,4	18	0,28	12,20	112
12	2	1	2,4	18	0,21	6,52	127
13	2	2	2,4	18	0,15	11,17	123
14	2	2	1,2	18	0,20	11,46	111
15	2	2	2,4	23	0,28	12,28	121
16	2	2	2,4	15	0,26	13,95	118
17	2	2	3,6	18	0,22	7,91	132

$Y_1$  – шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  мкм;

$Y_2$  – размерный съем материала образца  $H$ , мкм;

$Y_3$  – величина микронапряжений поверхности, МПа.

В результате математической обработки по функциям отклика  $Y_1, Y_2, Y_3$  получена регрессионная модель процесса:

$$Y_1 = 1,915 - 0,003X_4; \quad Y_2 = 92,21 + 7,8X_2 - 0,15X_4;$$

$$Y_3 = 2,25 + 9,43X_1 + 17,54X_2 - 1,51X_3 + 1,87X_1^2 - 2,63X_2^2 - 11,5X_1X_2.$$

Общий оптимум по критериям  $Y_1 \rightarrow \min; Y_2 \rightarrow \max; Y_3 \rightarrow \min$  рассчитывался с помощью  $L_{pl}$  – последовательности [74]. Оптимальные режимы обработки циркониевых труб при различном размерном съеме  $H$  (мкм) приведены в табл. 4.6.

## Оптимальные режимы МАП циркониевых труб

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
$\delta$ , мм	$I$ , А	$V$ , м/мин	об/мин	$Ra$ , мкм	$H$ , мкм	МПа
1,6	1,4	3,5	1172	0,22	5	131,2
2,0	2,3	2,2	1314	0,24	10	118,9
3,0	3,0	2,5	908	0,33	15	99,7

**4.2.5. Исследование характеристик качества циркониевых труб**

Коррозионная стойкость изделий из циркония и его сплавов в значительной мере зависит от качества поверхности, достигаемого в результате операций финишной обработки. С целью очистки поверхности циркониевых изделий от загрязнений, возникающих в ходе различных технологических операций, поверхностный слой удаляют, как правило, химическим травлением в смеси плавиковой и азотной кислот. При этом на поверхности металла остаются фториды, которые в условиях эксплуатации снижают коррозионную стойкость изделий.

В настоящее время в существующем цикле штатного производства элементов предусмотрены две операции осветления в электролите, содержащем фтор, что в конечном итоге приводит к появлению фиксированных фторидных загрязнений на поверхности элементов. Первое осветление перед отжигом удаляет оксидную пленку, которая образуется на предыдущих стадиях изготовления, а именно при нагреве заготовок и последующем горячем прессовании. В ходе термообработки, проводимой для снятия внутренних напряжений, снова происходит окисление поверхности элементов, а образующаяся пленка окислов удаляется в процессе второго осветления.

Кроме фторидных загрязнений при обработке по существующей технологии на поверхности изделий возможно наличие следующих дефектов:

- налипшая медь, не удаляемая в растворе азотной кислоты;
- темные пятна оксида различного размера, не удаляемые при осветлении;
- задиры поверхности – дефект прессования.

Дефекты типа налипшей меди и черные пятна оксида удаляются лишь ручной зачисткой.

Альтернативой существующей технологии является разработанная технология бесфтористой финишной обработки, основанная на последовательности магнитно-абразивной обработки (МАО), электрохимического полирования (ЭХП) и анодирования (А) поверхности изделий.

Функция магнитно-абразивной обработки – подготовка поверхности изделий перед электрохимическим полированием. Опыт изготовления опытных партий показал, что многие изделия после операции электрохимического полирования имели темные пятна, которые удаляются лишь при ручной зачистке. Очевидной причиной появления таких дефектов является присутствие кислорода в защитной атмосфере печи отжига. С другой стороны, часть макетов, изготовленных по варианту с осветлением перед отжигом, имела на поверхности отдельные мелкие темные пятна, которые во время электрохимического полирования не удалялись, а на их месте образовывались “язвы”. Возможной причиной такого рода дефектов является подкисление поверхности изделия на стадии экструзии. Поэтому для предотвращения брака на стадии электрохимического полирования необходимо применять операцию магнитно-абразивной обработки для подготовки поверхности и гарантированного удаления оксидной пленки.

Поверхность имитаторов изделий обрабатывалась на установке 8.014 с применением в качестве абразивного материала кремнистого сплава ФАД-9К (фракционный состав < 160 мкм) и СОЖ следующего состава: ОК (олеиновая кислота) + ТЭ (триэтанолламин) + (РАУК + Na-КМЦ) – поверхностно-активное вещество.



В процессе отработки технологии МАП проведено исследование влияния режимов обработки поверхности образцов труб из сплава Э110 на их качество: уровень остаточных поверхностных микронапряжений и фрактографию поверхности.

Оценка микронапряжений II-го рода производилась рентгеноструктурным методом на дифрактометре ДРОН-2.0. Съёмка производилась в режиме непрерывной записи в трех точках образца на диаграммную ленту в интервале углов  $134^\circ \dots 138^\circ$  с использованием  $\text{Si}_{\text{K}\alpha}$  – излучения.

В качестве эталона для сравнения использовался образец, предварительно отожженный в вакууме при  $T = 580^\circ\text{C}$  в течение 3 часов. Уровень микронапряжений определялся по величине полуширины спектральной линии (205) –  $\alpha$ -циркония. Разделение дуплета на  $\text{K}\alpha_1$  и  $\text{K}\alpha_2$  – составляющие проводили методом Речингера.

Расчет величины микронапряжений проводили по формуле

$$G_{\text{II}} = \left( \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right) = E \frac{\sqrt{B^2 - B_0^2}}{4 \text{tg} \Theta_{\text{HKL}}}, \text{ МПа,}$$

где  $E$  – модуль нормальной упругости (модуль Юнга);

$B$  – интегральная полуширина линии (205)  $\alpha$ -циркония для исследуемого образца, рад;

$B_0$  – интегральная полуширина линии (205)  $\alpha$ -циркония для образца сравнений;

$\Theta_{\text{HKL}}$  – угол скольжения для линии (205)  $\alpha$ -циркония.

Погрешность результатов исследования в диапазоне определенных микронапряжений (с вероятностью 0,95) составляет +3,0 МПа.

Фрактографические исследования поверхности образцов проводились на растровом электронном микроскопе РЭМ-100У при ускоряющем напряжении 30 кВ. Оценка качества поверхности после бесфтористой финишной обработки проводилась на образцах, обработанных на следующих режимах:

размер образца, мм	5x5
частота вращения полосных наконечников, $\text{с}^{-1}$	15
подача трубки, м/мин	1,2
технологический ток, А	1,5
зазор между деталью и полюсным наконечником, мм	3,0
размер образца, диаметр мм	9,15
частота вращения полосных наконечников, $\text{с}^{-1}$	15
подача трубки, м/мин	1,2
технологический ток, А	4,0
зазор между деталью и полюсным наконечником, мм	2,0

В результате МАП с поверхности изделий удаляется оксидная пленка и темные пятна, поверхность приобретает серебристый матовый оттенок. Фотографии микрорельефа поверхности после различных видов обработки представлены на рис. 4.8.

Результаты исследования микронапряжений II-го рода в приповерхностном слое образцов приведены в табл. 4.5–4.7. Значения напряжений после МАП выше, чем после других видов обработки, однако сочетание операций МАП и ЭХП обеспечивает напряженно-деформированное состояние поверхности образцов более высокого качества, чем штатный и другие процессы обработки.

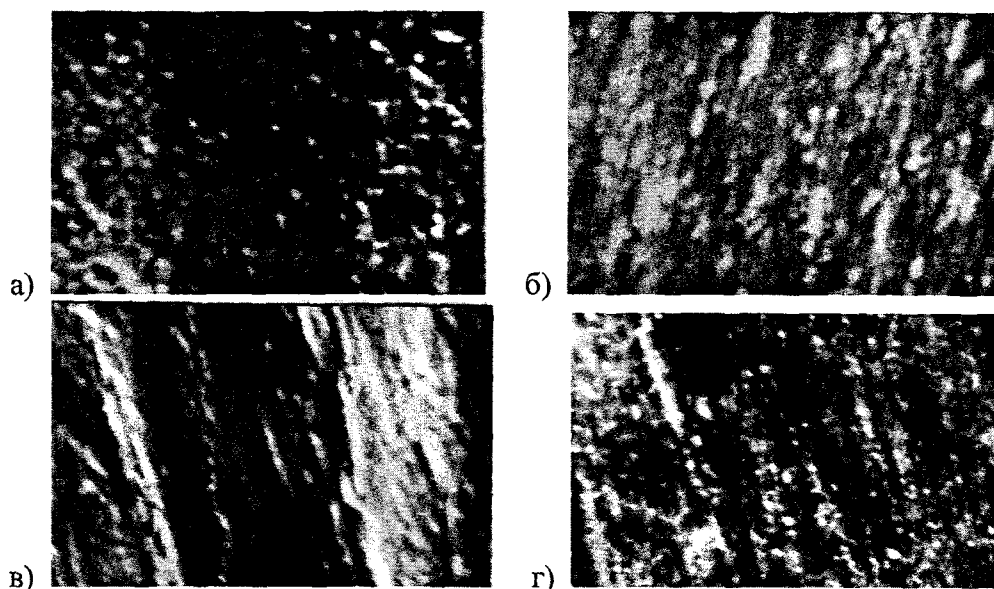


Рис. 4.8. Микрорельеф поверхности образцов трубчатых изделий диаметром 9,15 мм (а, в) и сечением 5х5 мм (б, г) после различных видов обработки (х600): а – травление; б – травление, МАП; в – МАП; г – МАП, ЭХП

Изучение коррозионной стойкости образцов-имитаторов проводилось на основе длительных автоклавных испытаний при  $T = 300^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 100$  МПа в течение 1000 часов. Для проведения испытаний отбиралось по 6–10 образцов на каждый режим обработки поверхности.

В процессе коррозионных испытаний производилась визуальная оценка поверхности и оценка изменения веса гравиметрическим методом. В конце коррозионных испытаний все образцы покрыты черной оксидной пленкой. Результаты коррозионных испытаний представлены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Значения микронапряжений II-го рода и коррозионная стойкость образцов-имитаторов

№ опыта	Процесс обработки	Результаты обработки				
		Микронапряжения II-го рода, МПа	Коррозионная стойкость мг/дм <sup>2</sup> после выдержки, час			
			72	200	500	1000
1	Штатный	30	3,2	6,1	11,8	14,2
2	Осветление, ЭХП	38	4,0	7,2	11,6	14,5
3	МАП	105	3,5	5,8	11,7	13,3
4	МАП, ЭХП	18	2,2	2,7	4,2	5,6

Исследования химического состава поверхности на наличие остатков материала абразива на ней проводились методом лазерного эмиссионного микроспектрального анализа на микроанализаторе LMA-10 в следующем режиме:  $U = 850$  кВ, диаметр отпечатка – 500 мкм, глубина – 1...5 мкм с подвозбуждением. Следов материала абразива на поверхности всех исследуемых образцов не обнаружено.

Результаты реакторных испытаний образцов-имитаторов в штатных условиях ЛАЭС подтвердили высокую коррозионную стойкость изделий, обработанных магнитно-абразивным способом. В основном производстве ПО «Машиностроительный завод» (г. Электросталь) освоен технологический процесс МАП изделий на станке модели 8.014.

Интересные результаты по изучению технологических возможностей метода MAO представлены в работе [177]. Ее авторы используют технологию MAO для одновременной механической очистки, выглаживания рельефа поверхности и модифицирования поверхностного слоя. Приводятся примеры MAO образцов сплава Zr – Nb с использованием ферроабразивных порошков на основе железа и карбидов Ti, Mo, W и Ta при скорости резания не менее 8,3 м/с и без применения СОЖ. В результате MAO в модифицированном поверхностном слое образуются сжимающие микронапряжения величиной до 138,5 МПа. Толщина наклепанного слоя достигает 10 мкм. По мнению авторов, в зоне обработки возникает короткоживущая «трибоплазма», в результате действия которой на поверхности возникают соединения, включающие элементы абразива, металла подложки и окружающей атмосферы, происходит микролегирование поверхностного слоя. Как следствие, в результате MAO улучшаются механические, химические и коррозионные свойства образцов из сплава Zr – Nb [177].

Изучению физико-механических процессов при MAO керамики ( $Si_3N_4$ ) посвящена работа [178]. Подтверждается эффективность полирования в магнитном поле керамических изделий с обеспечением  $Ra < 5$  нм. Отмечается, что в отсутствие СОЖ при скорости резания 5,24 м/с и давлении ферроабразивного порошка в 34,5 КПа температура на поверхности образца может достигать 1150°C [178]. Тем самым подтверждается важное значение охлаждающего эффекта СОЖ, применяемой при MAO.

Авторы работы [179] высказывают мнение, что СОЖ в процессе MAO выступает не как средство охлаждения заготовки, а как электролит и как носитель поверхностно-активных веществ, тем самым обеспечивает в зоне обработки процесс электролиза. В результате электрохимического растворения осуществляется съём материала с поверхности обрабатываемой заготовки [179].

#### **4.2.6. Результаты МАП труб из различных материалов**

В соответствии с заказами потребителей были проведены исследования и эксперименты, организовано изготовление партии станков модели 8.014, отработаны и освоены в основном производстве ряда предприятий технологические процессы магнитно-абразивного полирования труб из различных материалов: стали 10 [180...182], латуни Л63 и томпака Л96 [181], дюралюминия Д16Т [184] и Д31, нержавеющей стали Х18Н9Т и титанового сплава.

В результате МАП наружная поверхность теплопроводной трубы из стали 10 очищалась от оксидной пленки и загрязнений (с целью повышения теплопроводности) перед напрессовкой на нее трубчатого теплообменника. Трубы из других материалов полировались в магнитном поле для придания их поверхности декоративного вида. О качестве обработки в этом случае судили по отражательной способности (степени блеска) поверхности, определяемой по стандартной методике с помощью фотометра объективного универсального модели ФОУ-2.

Определение оптимальных параметров процессов МАП труб, оценку производительности и качества обработки осуществляли с использованием метода математического планирования эксперимента. В качестве плана эксперимента был выбран план Хартли со звездным плечом  $\alpha = \pm 1$ . Результаты экспериментов приведены в табл. 4.8.

Результаты МАП труб из различных материалов

№ п/п	Образцы труб		Результаты МАП						
	Материал, диаметр	Ra, мкм	Оптимальные режимы				Ra, мкм	H, мкм	Oc, %
			$\delta$ , мм	I, А	$V_n$ , м/мин	$n$ , с <sup>-1</sup>			
1	сталь 10, 10 мм	0,9...1,8	3,7	2,92	3,4	19	1,14	10	—
2			2,7	2,6	1,5	18	0,74	15	—
3			2,6	3,0	1,2	17	0,68	20	—
4	Латунь Л63, 10 мм	0,52...1,2	3,2	2,5	3,0	18	0,23	10	124
5			2,8	2,6	1,6	17	0,20	20	147
6			2,3	2,0	1,3	20	0,20	30	126
7	томпак Л96, 10 мм	0,12...0,3	2,9	1,73	3,3	21	0,5	10	99
8			2,8	2,6	2,0	19	0,44	20	128
9			2,8		1,6	17	0,37	30	146
10	дюралюминий Д16Т, 12 мм	0,4...0,7	2,8	1,0	3,2	21	0,12	6	103
11			3,0	2,8	3,5	17	0,15	12	147
12			2,5	2,5	1,8	20	0,15	18	117
13	дюралюминий Д31, 16 мм	0,5...1,0	3,0	2,4	3,6	20	0,61	10	133
14			2,7	2,4	2,6	19	0,42	15	123
15			3,2	2,2	1,6	17	0,66	20	157
16	Х18Н10Т, 4 мм	0,8...1,2	4,0	5	1,9	21	0,82	5	33
17			3,0	5	1,2	20	0,63	10	35
18	титановый сплав 6 мм	0,6...0,9	0,8	5	1,2	21	0,54	10	37
19			0,8	4	1,2	19	0,36	15	48

Переменными факторами приняты: рабочий зазор  $\delta = 2...4$  мм, сила тока в катушках  $I = 1...3$  А, скорость подачи детали  $V_n = 1,2...3,6$  м/мин и частота вращения полюсных наконечников  $n = 15...23$  с<sup>-1</sup>. В качестве ФАП использован кремнистый сплав ФАД-9К ТУ 2.036.0222227.154-88, а в качестве СОЖ – водный раствор (по 1 % мас.) триэтаноламина, олеиновой кислоты и ПАВ-олигомера ТУ 88 УССР 95.066-91. Исследуемыми параметрами являются размерный съем металла, шероховатость и отражательная способность сформированной поверхности.

Фотографии микрорельефа поверхности образцов труб из стали 10, латуни Л63 и дюралюминия Д16Т в исходном состоянии и после магнитно-абразивного полирования представлены на рис. 4.9.

В результате доработки конструкции станка 8.014, проведения дополнительных экспериментов и исследований разработан и освоен в основном производстве Нижнетуринского машиностроительного завода технологический процесс магнитно-абразивной зачистки наружных поверхностей труб из стали 10 производительностью 10 м/мин. При этом размерный съем составлял 4...6 мкм, а показатель шероховатости поверхности  $Ra = 0,7...1,2$  мкм.

Об успешном использовании результатов выполненных исследований и экспериментов при разработке технологий магнитно-абразивного полирования длинномерных деталей – прутков и труб сообщается в работе [185].

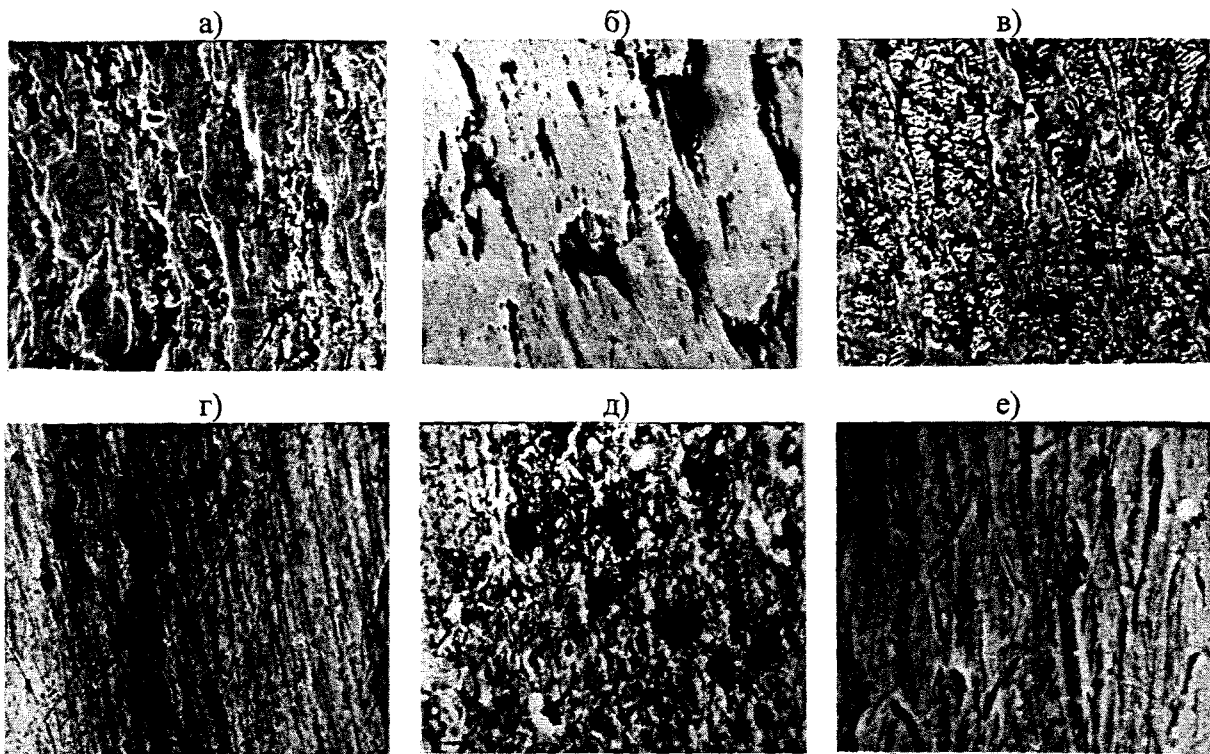


Рис. 4.9. Фотографии микрорельефа поверхности образцов из стали 10 (а, б), латуни Л63 (в, з) и дюралюминия Д16Т (д, е) в исходном состоянии (а, в, д) и после МАП (б, з, е). Увеличение  $\times 500$

### 4.3. МАП валов

Задачи финишной отделки наружных цилиндрических поверхностей валов, осей, втулок и т.п. встречаются в различных областях техники и решаются, как правило, с использованием абразивных способов обработки. При многих достоинствах все они обладают рядом существенных недостатков, главным из которых является значительное количество дефектов структуры сформированного поверхностного слоя в виде микротрещин, прижогов, задиров и пр. Эти дефекты являются микроочагами, инициирующими ускоренное механическое и коррозионное разрушение изделий.

Применение МАО с использованием эластичного порошка инструмента, мягких режимов обработки, энергии магнитного поля и специальных СОЖ позволяют формировать приповерхностный слой изделия с минимумом дефектов-очагов разрушения. Уже только по этим соображениям применение МАО для финишной отделки наружных цилиндрических поверхностей весьма перспективно.

Разработан ряд схем МАП валов, реализуемых с осцилляцией полюсных наконечников [18, 186–188]. Их анализ и опыт применения показывают, что при достаточно простой конструкции устройств для МАО они имеют сложный и ненадежный механизм осцилляции детали или полюсных наконечников, а замкнутая электромагнитная система имеет значительные габариты и массу. К тому же эти схемы из-за кинематических особенностей имеют технологические ограничения производительности и качества обработки из-за невысоких скоростей резания и недостаточно интенсивного пересечения следов обработки.

Значительно более широкие технологические возможности имеют схемы МАП с использованием вращающихся полюсных наконечников [174]. Замкнутая кольцевая “щетка” из ферроабразивного порошка формируется между рабочими поверхностями обращенных друг к другу полюсов в виде полых усеченных конусов с повышенными значениями магнитной индукции у их рабочих поверхностей ( $B = 0,8 \dots 1,6$  Тл). Вследствие это-

го “щетка” являет собой относительно большую уплотненную массу ферроабразивных частиц, допускающую без разрушения рабочего контура линейную окружную скорость до 6 м/с. Поскольку детали в процессе МАП также сообщается вращательное движение с такого же порядка скоростями, то суммарная скорость резания при МАО может достигать 4...10 м/с. Схема позволяет простыми приемами – сочетанием линейных скоростей вращения полюсов и детали, а также разворотом осей вращения полюсов – регулировать в широких пределах ( $5...85^\circ$ ) угол пересечения следов обработки на формируемой поверхности. Эти технологические возможности, а также свободный доступ СОЖ в зону обработки обеспечивают схеме высокие значения производительности и качества полирования.

На рис. 4.10, а представлена рабочая зона станка мод. СФТ2.107 для МАП валов [174]. Основой его является токарно-винторезный станок, например, К62, на салазках суппорта которого размещены одна или две пары полюсных наконечников с электромагнитными системами.

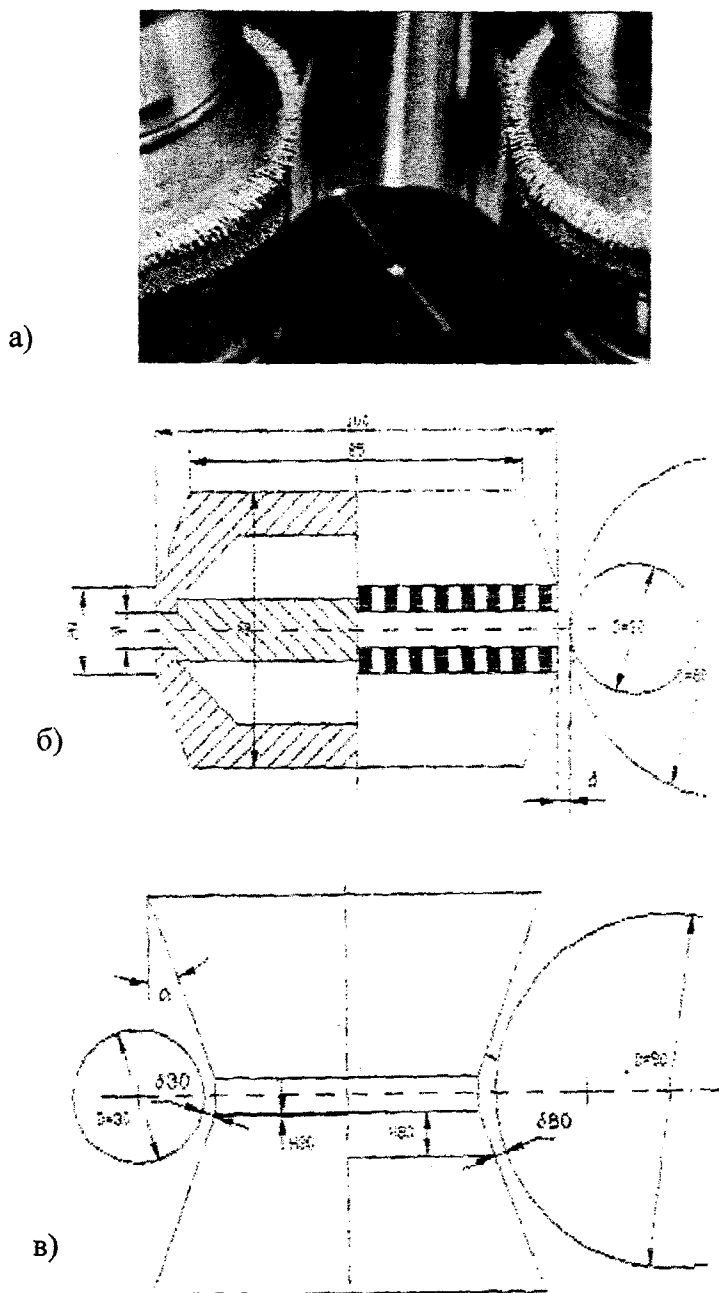


Рис. 4.10. Рабочая зона станка СФТ2.107 (а), форма и размеры полюсов с выпуклым (б) и вогнутым (в) контурами

Оптимизацию геометрической формы и размеров полюсов производили по методике, изложенной в разделе 2.2. Для практического использования предложены схемы МАП с выпуклым и вогнутым контурами рабочих поверхностей полюсов (рис. 4.10, б, в). Один из вариантов расчета топографии магнитного поля в рабочей зоне представлен на рис. 4.11.

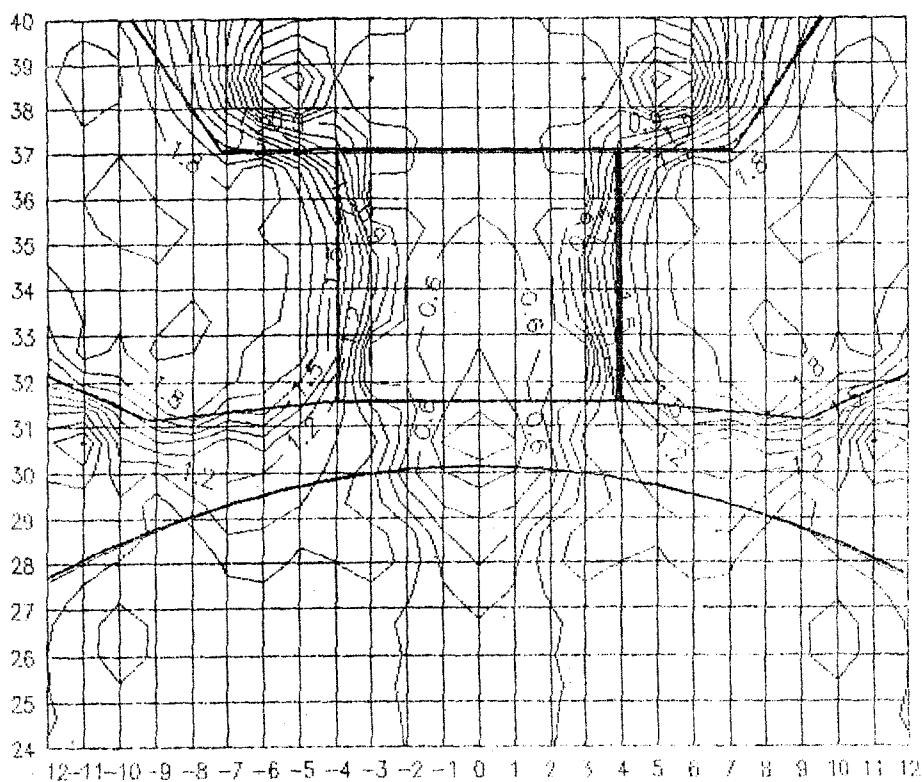


Рис. 4.11. Топография магнитного поля рабочей зоны станка СФТ2.107 при МАП вала  $d = 60$  мм из стали ШХ15

Исследование технологических возможностей схемы МАП валов осуществлялось, как обычно, с помощью метода математического планирования экспериментов. Полировали образцы из стали ШХ15 (60...65 HRC) с исходной шероховатостью  $Ra = 0,8...1,2$  мкм с использованием ФАП Fe-TiC и СОЖ в виде водного раствора ТЭА, ОК и ПАВ-олигомера. Для вариантов с выпуклым и вогнутым контурами полюсов определены зависимости показателей производительности (съем металла  $g$ ,  $\text{мг/см}^3 \cdot \text{мин}$ ) и качества ( $Ra$ , мкм) от диаметра полируемого вала, а также линейных скоростей вращения вала и полюсов.

Выбрать оптимальное сочетание перечисленных факторов позволяют данные рис. 4.12 и табл. 4.9. Процесс МАП валов диаметром 30...80 мм оптимален при линейной скорости вращения: детали – 2,4...2,8 м/с, полюсов – 2,5...4,2 м/с.

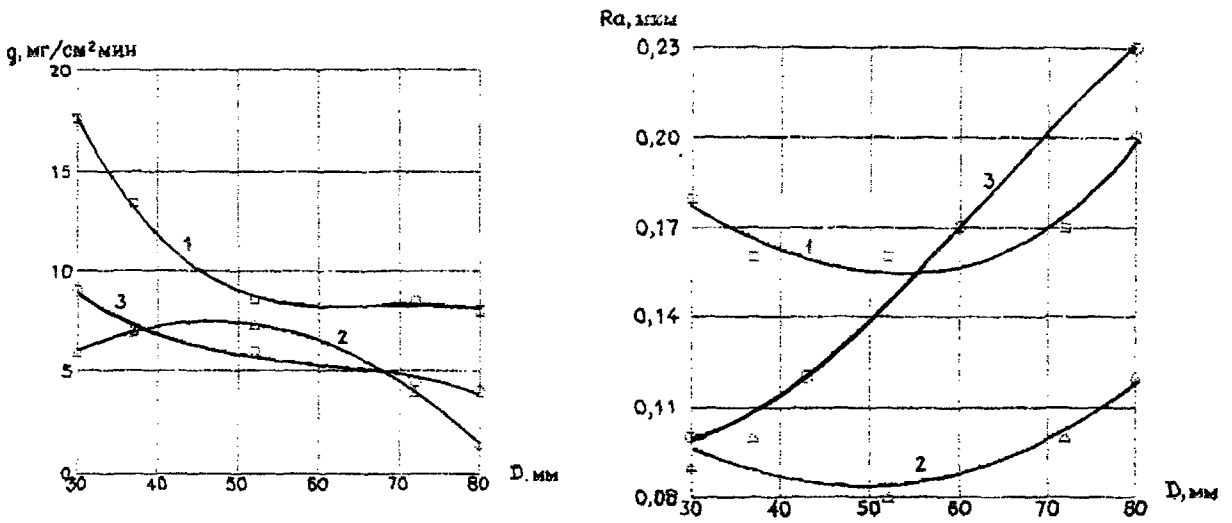


Рис. 4.12. Результаты МАП валов диаметром 30...80 мм:  
 1 – с использованием вращения полюсов (рис.4.10, б);  
 2 – с использованием вращения полюсов (рис.4.10, в);  
 3 – с использованием осцилляции полюсов

Таблица 4.9

### Оптимальные режимы МАП валов

Параметры МАП				Результаты МАП	
Тип полюса	Диаметр вала, мм	Скорость детали, м/с	Скорость полюсов, м/с	$g, \text{мг/см}^2 \cdot \text{мин}$	$Ra_{\text{ср}}, \text{мкм}$
рис. 4.10, б	32	2,3	5,0	15,6	0,10
рис. 4.10, в	47	2,5	4,0	8,7	0,16

Характерным примером повышения износостойкости контактирующих поверхностей трения скольжения является процесс МАП штоков-игловодителей швейных машин. Износ обработанных магнитно-абразивным способом 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 МАО штоков ниже на 30%.

Существенный эффект получен и при использовании МАП на операции полирования рабочих поверхностей стержневых инструментов-пуансонов для глубокой вытяжки деталей патронного производства [38, 189, 190]. Станки модели МАРС-3 для МАП изделий-стержней диаметром до 15 мм освоены в производстве КБАЛ (г. Климовск) и обеспечивают повышение в 1,6...2,5 раза износостойкости пуансонов по сравнению со шлифованными и механически полированными.

Полированию в магнитном поле поверхностей вращения изделий из высокоуглеродистых и легированных сталей твердостью 60...62 HRC посвящена работа [191]. Показано, что в процессе МАО в результате многоциклового перемагничивания в поверхностном слое толщиной около 10 мкм имеет место частичный распад остаточного аустенита и происходит упорядочивание структуры металла. Это обстоятельство, а также снижение шероховатости поверхности (от  $Ra = 0,4$  мкм после шлифования до  $Ra = 0,03$  мкм после МАО) повышают в 3 раза износостойкость полированных в магнитном поле образцов по сравнению со шлифованными. В этой же работе [191] представлено также решение оригинальной задачи по полированию в магнитном поле наружных и внутренних поверхностей трубок-резонаторов из сплава «инвар» с толщиной стенки 30 мкм.



#### 4.4. МАП сфер

Изделия со сферическими поверхностями в технике применяются довольно часто. Например, в конструкциях автомобилей сферы используются в механизмах рулевого управления и трансмиссии.

Формообразование точных сферических поверхностей деталей машин и приборов является сложной технологической задачей. Примером такой задачи является финишная обработка сферических поверхностей диаметром 85...295 мм – рабочих элементов шаровых пробок клапанов трубопроводов. По существующей технологии сферу формировали и обеспечивали ее геометрическую точность точением. Затем для достижения необходимой шероховатости поверхности применялась трудоемкая операция ручного полирования. Использование шлифования для этих целей требует больших затрат на специальное оборудование, инструмент и техническое обеспечение его периодической правки. Эти причины объясняют интерес к применению МАП для полирования сфер.

Из ряда известных технических решений наиболее применимо следующее. Для МАП сфер деталей типа шаровых пальцев рулевого управления автомобилей предложена схема, согласно которой между вращающимися полюсами-наконечниками размещена полируемая деталь, которой сообщается вращательное и колебательное движение [192]. Для повышения равномерности обработки предлагается на рабочих поверхностях полюсных наконечников выполнить криволинейные рифления, например в виде спирали Архимеда. Очевидна относительная сложность реализации схемы и целесообразность ее применения лишь для обработки поверхностей небольшого диаметра. Поскольку известные схемы МАП сфер не являются эффективными, то для решения поставленной задачи предложена схема, представленная на рис. 4.13, а.

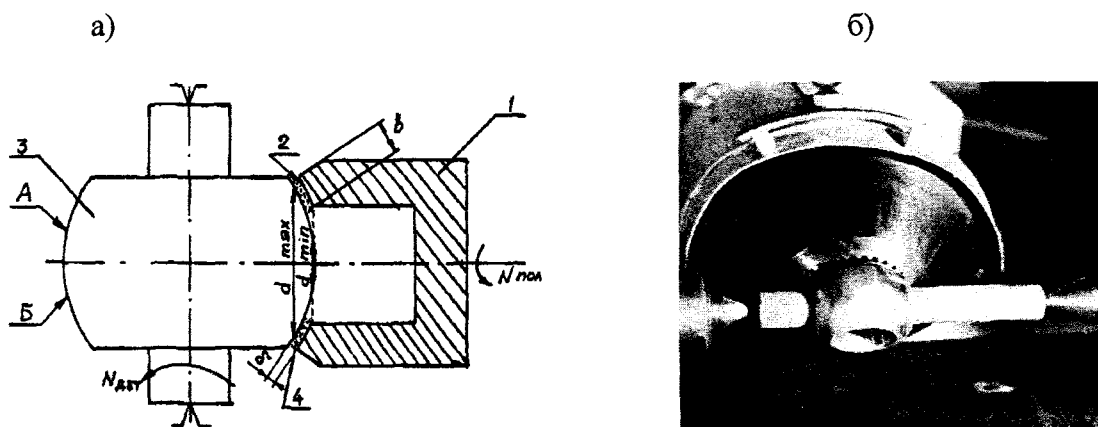


Рис. 4.13. Схема МАП сфер (а) и общий вид рабочей зоны модуля 8.016 (б):  
1 – полюсный наконечник; 2 – рабочая поверхность наконечника; 3 – полируемая сфера;  
4 – ферроабразивный порошок

Полюсный наконечник 1 установлен с возможностью вращения вокруг своей оси, проходящей через центр обрабатываемой сферы 3. Рабочая поверхность 2 наконечника эквидистантна полируемой поверхности сферы. Ферроабразивный порошок 4 заполняет кольцевой рабочий зазор  $\delta$ , под действием магнитного поля уплотняется и образует полировальную «эластичную щетку», контактирующую со сферой на участке, ограниченном  $d_{\max}$  и  $d_{\min}$ . Сфере и наконечнику сообщают вращения вокруг своих осей.

Схема МАП сфер реализована на базе токарно-винторезного станка с применением специального модуля, содержащего электромагнитную систему и привод вращения полюсных наконечников. Модуль устанавливается на суппорт станка.

Принимая во внимание широкий диапазон диаметров полируемых сфер (85...295 мм), проработаны два варианта компоновки модуля с его возможным базированием на станках модели ИК62 или 163. Произведен расчет электромагнитных систем для обоих вариантов

согласно разработанной методике (раздел 2.2), основанной на моделировании магнитного поля с применением скалярного потенциала и численных расчетов дифференциальных уравнений в частных производных (метод конечных элементов, метод конечных разностей). Анализ результатов расчетов отдает предпочтение варианту компоновки модуля на станке 163, обеспечивающему оптимальные параметры магнитной системы и значения магнитной индукции в рабочей зоне в пределах 0,3...0,9 Тл. Разработана конструкция и изготовлен модуль 8.016 для МАП сфер, общий вид которого представлен на рис. 4.13, б.

При определении технологических параметров процесса МАП сфер учтены кинематические особенности схемы полирования. Полируемая поверхность сечением по максимальному диаметру условно разделена на части А и Б. Очевидно, что при МАП части сферы А (см. рис. 4.13, а) линейные скорости вращения детали и полюса в рабочем зазоре  $\delta$  совпадают по направлению, а для части сферы Б векторы этих скоростей направлены навстречу друг другу. Естественно, если скорости вращения полюса и детали одного порядка, то процесс МАП части Б сферы будет значительно интенсивнее, чем части А, что неизбежно отрицательно скажется на геометрической точности и однородности микро-рельефа формируемой сферы.

При обработке и промышленном освоении технологии МАП сфер определены следующие значения параметров процесса полирования. Имея целью формирование минимальной шероховатости поверхности, максимальная скорость вращения (2...5 м/с) сообщается полюсному наконечнику, а скорость вращения детали выбрана в пределах 0,06...0,01 м/с. При величине рабочего зазора  $\delta = 0,8...2,5$  мм МАП стальных и латунных сфер диаметром 85...295 мм позволяет за 30...180 с уменьшить показатель шероховатости поверхности  $Ra$  с 0,8...1,7 мкм до 0,08...0,20 мкм при размерном съеме на сторону в пределах 10...30 мкм.

#### 4.5. МАП винтов и червяков

Постоянно возрастающие требования к качеству машин ведут к увеличению доли финишной обработки в технологических процессах изготовления изделий, совершенствованию существующих и созданию новых способов, расширяющих возможности отделочных технологий. Как правило, именно на этих операциях в машиностроении значительны затраты ручного труда. Характерным примером в этом отношении может служить операция полирования витков червячных валов. Точность геометрии профиля витка, высокое качество поверхности – это требования, предъявляемые к винтовым поверхностям червячных валов. Традиционные способы финишной обработки винтов и червяков – шлифование и полирование.

Шлифование предназначено для устранения деформаций, возникающих при химико-термической обработке, обеспечения точности и шероховатости поверхности. Однако шлифование профиля витка приводит к уменьшению сжимающих напряжений и, следовательно, понижению прочности. Кроме того, во время шлифования происходит импульсный местный тепловой нагрев поверхностного слоя металла, что приводит к изменениям в микроструктуре и твердости. В результате местного теплового нагрева возникают прижоги, что приводит к снижению внутренних сжимающих напряжений, а в некоторых случаях к появлению трещин.

Операция полирования применяется в случае повышенных требований к шероховатости поверхности профиля витка. Полирование с использованием паст как твердыми, так и мягкими притирами не приводит к существенному улучшению качества поверхности. К недостаткам операции можно отнести: неравномерность обработки профиля витка; наличие на поверхности вырывов и задиrow; малый срок службы притира; высокая трудоемкость; малая производительность; невозможность исправления погрешностей профиля; незначительное улучшение шероховатости.

На эффективность применения МАО витков и червяков указывают следующие основные особенности процесса:

– непрерывный контакт порошка с обрабатываемой поверхностью детали, что дает возможность повысить точность ее геометрических размеров и формы и снижает циклические нагрузки на систему СПИД;

– отсутствие жесткого крепления абразивного зерна в связке, способствующее самопроизвольному адаптированию режущего инструмента к форме обрабатываемой поверхности, устраняющее вероятность появления в зоне критических давлений и температур и повышающее физико-механические показатели качества поверхностного слоя материала изделия;

– возможность управления жесткостью инструмента и регулирование за счет этого съема металла с формобразующей поверхности изделия.

В пробном эксперименте МАП витков использована схема с осциллирующими полусносными наконечниками [18], охватывающими с зазорами полируемую деталь, вращаемую вокруг своей оси. Однако при этой схеме обработки невозможно обеспечить равномерный съем металла с поверхности витков. Их вершины обрабатываются более интенсивно, поскольку на них концентрируется магнитный поток и сосредоточена основная масса полирующих частиц, в то время как впадины между витками практически не подвергаются обработке.

С учетом результатов пробных экспериментов и накопленного опыта в области магнитно-абразивной обработки принято решение о разработке и опробовании двух схем МАП червяков [193].

Первая схема предусматривает воздействие ферромагнитного абразивного порошка (ФАП) на полируемый червячный вал с учетом пондеромоторного и реологического эффектов (рис. 4.14, а). Предполагается эффективным использование этой схемы для МАП мелко модульных червячных валов.

Представляется перспективным МАП крупномодульных червячных валов по второй схеме, приведенной на рис. 4.14, б. Она, как и первая схема, предусматривает использование полусносного наконечника в виде «контрчервяка» или одновременное полирование двух изделий.

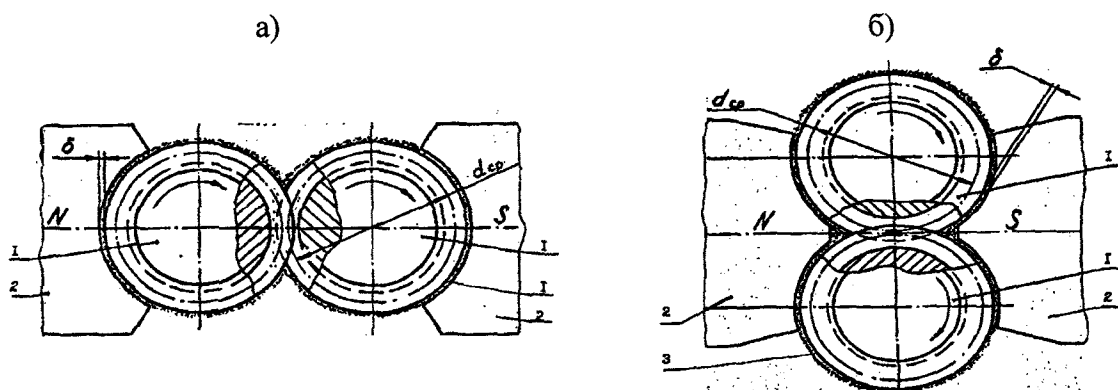


Рис. 4.14. Схемы МАП мелко модульных (а) и крупномодульных (б) червяков:  
1 – обрабатываемое изделие; 2 – полусносный наконечник; 3 – ферроабразивный порошок

Для экспериментального исследования схем МАП червяков (см. рис. 4.14) создано макетное устройство модели М330 [194], обеспечивающее кинематику процесса полирования.

Технологические исследования проводились для червяков номенклатуры Ленинградского завода «Редуктор», Можгинского завода машиностроения и Барышского редукторного завода. Модуль червяков 1,25...3,15 мм, число заходов – 1, 2 и 4, материал – сталь 40Х, исходная шероховатость поверхности –  $Ra = 1,25...1,0$  мкм. Условия экспериментов: линейная скорость вращения изделий – 2 м/с; рабочий зазор –  $\delta = 0,8$  мм; магнитная индукция в рабочей зоне – 0,5 Тл; порошок состава Fe-TiC (40%) зернистостью 315...100 мкм; длительность обработки – 60 с.

На первом этапе исследований проверены технологические возможности двух схем в отношении обеспечения качества полирования различных участков поверхности витков. Качество обработки определяли по параметру  $Ra$ , а также по равномерности обработки, характеризуемой отношением  $Ra_{\max}$  во впадинах витков к  $Ra_{\max}$  на их выступах. Равномерность обработки принималась удовлетворительной при  $Ra_{\max \text{ впад}}/Ra_{\max \text{ выст}} \leq 1,5$ . Результаты экспериментов приведены в табл. 4.10.

Таблица 4.10

Результаты МАП витков червяков

Схема МАП	Модуль червяка $m$ , мм	Шероховатость поверхности витка $Ra$ , мкм			Равномерность обработки
		у вершины	на боковой поверхности	во впадине	
Схема на рис. 4.14, а	1,25	0,12...0,16	0,16...0,20	0,20...0,25	1,5
	1,6	0,12...0,16	0,16...0,25	0,20...0,32	2,0
	3,15	0,16...0,20	0,20...0,32	0,32...0,50	2,5
Схема на рис. 4.14, б	1,25	0,20...0,25	0,20...0,30	0,25...0,50	2,0
	1,6	0,16...0,20	0,16...0,25	0,20...0,32	1,6
	3,15	0,12...0,16	0,16...0,20	0,16...0,20	1,3

Упрощенный анализ процесса МАП показывает, что лучшие результаты по интенсивности и равномерности обработки червяков имеют место при активной переориентации порошковых частиц в зоне обработки и при их равномерном абразивном воздействии на обрабатываемую поверхность по всей ее площади. Именно таким условиям в большей мере отвечает первая схема обработки (рис. 4.14, а) при величине рабочего зазора  $\delta = 0,3...0,8$  мм в процессе МАП мелко модульных ( $m < 1,6$  мм) червяков. При полировании крупномодульных изделий ( $m \geq 1,6$  мм) предпочтительно применение второй схемы обработки (см. рис. 4.14, б), для которой величина рабочего зазора  $\delta$  составляет  $0,8...1,5$  мм [194].

Наряду с высокими значениями производительности (время обработки 40...60 с) и качества ( $Ra$ ) разработанный способ МАП червяков имеет очевидные ограничения области применения. Так, в изученной номенклатуре изделий редукторных заводов имеются червяки, которые невозможно ввести в зацепление друг с другом, поскольку у них диаметры буртиков и посадочных мест под подшипники больше диаметров выступов витков.

В результате экспериментов на макете станка МЗ30 по магнитно-абразивному полированию червяков обнаружен еще один недостаток этой схемы обработки. Суть его состоит в сложности обеспечения в процессе обработки гарантированного бокового зазора между полируемыми поверхностями витков. При установке и закреплении обрабатываемых изделий необходимо точно фиксировать их положение друг относительно друга. К тому же при вращении и реверсе червяков незначительное нарушение их синхронного движения может привести к изменению величины бокового зазора.

В некоторых случаях для МАП червяков целесообразно использовать устройство, в котором носителем ФАП является ферромагнитный диск, установленный между вращающимися полусными наконечниками [195]. Диск вводится в канавку винта, а устройству сообщается движение подачи, равное шагу витка за один оборот детали-червяка. Порошок, вращаясь вместе с диском, полирует рабочую поверхность витка. Применение этого устройства обеспечивает достаточно низкую шероховатость полированной поверхности —  $Ra = 0,12...0,20$  мкм. Достоинством схемы является простота осуществления процесса обработки. В качестве ее недостатка можно указать относительно большее время полирования (до 2,5 мин) двух- и четырехзаходных червяков, поскольку в данном случае каждый виток обрабатывается отдельно.

С учетом вышеизложенных результатов исследований предложена схема МАП червяков, в которой используется принцип обкатывания (рис. 4.15, а) [196]. Полируемому

изделию 3 сообщается вращение вокруг собственной оси. С ним в зацепление вводится намагниченная шестерня 1, на поверхностях зубьев которой распределяются ферромагнитные абразивные частицы 2. При перемещении зубьев и порошковых частиц относительно витков червяка осуществляется процесс его полирования. Для реализации этой схемы обработки создан экспериментальный образец станка модели СФТ2.107. Рабочая зона станка представлена на рис. 4.15, б [197].

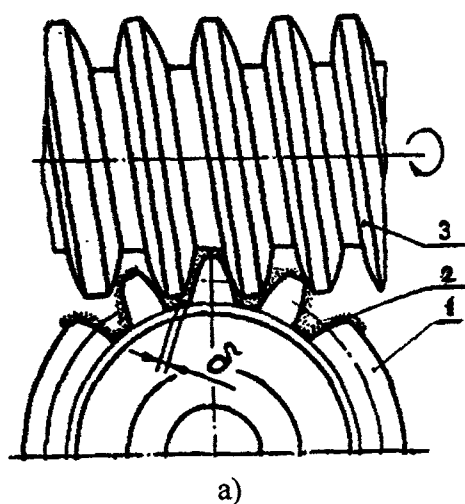


Рис. 4.15. Схема (а) и рабочая зона станка (б) для МАП винтов и червяков:  
1 – полюсной наконечник; 2 – ферроабразивный порошок; 3 – полируемая деталь

Станок выполнен на базе токарно-винторезного станка модели 1М616. На суппорте смонтирована обрабатывающая головка, содержащая электромагнитную систему с вращающимися полюсными наконечниками. Станок оснащен бункером-дозатором для автоматической подачи порошка в зону обработки и системой подачи и очистки СОЖ. Управление электросхемой станка осуществляется от отдельного пульта.

Экспериментально установлены следующие оптимальные значения режимов МАП червяков: частота вращения изделия –  $12...17 \text{ с}^{-1}$ , продольная подача –  $150...250 \text{ мм/мин}$ , магнитная индукция в рабочей зоне –  $0,7...0,9 \text{ Тл}$ . В результате МАП за время  $30...60 \text{ с}$  обеспечивается размерный съем  $5...20 \text{ мкм}$  и шероховатость рабочих поверхностей витков червяков, характеризуемая  $Ra = 0,10...0,20 \text{ мкм}$  [194].

Повышения эффективности МАП винтов удалось достичь при помощи оригинальной модернизации полюсных наконечников станка СФТ2.107, нашедшей отражение в конструкции станка 8.019. Новый станок более компактен, удобен в обслуживании. Организован выпуск партии станков 8.019, отработаны и внедрены технологические процессы МАП червяков на ряде специализированных предприятий.

Подтверждена возможность интенсифицировать процесс МАП введением в конструкцию полюсов станка 8.019 подпружиненных роликов, способствующих лучшему распределению порошка-инструмента в рабочей зоне и повышению равномерности обработки [198].

Для определения влияния МАП и шероховатости полированной поверхности образцов на нагрузочную способность был поставлен следующий эксперимент. Магнитно-абразивным способом отполированы три партии тел трения – роликов из стали 18ХГТ с различной шероховатостью поверхности:  $Ra = 0,78...0,68 \text{ мкм}$ ;  $Ra_2 = 0,60...0,13 \text{ мкм}$ ;  $Ra_3 = 0,083...0,063 \text{ мкм}$ . В лаборатории материаловедения НПО «ВНИИ редуктор», согласно отраслевой методике И29.0.00МА, выполнены испытания пар трения Бр010Ф1-18ХГТ на нагрузочную способность. В результате испытаний установлено, что снижение шероховатости поверхности образцов, характеризуемой показателем  $Ra$ , с  $0,78$  до  $0,063 \text{ мкм}$  повышает на  $50\text{--}60\%$  нагрузочную способность пары трения.

Конструкция станка 8.019 позволяет путем простой переналадки с использованием оригинального устройства полировать в магнитном поле зубья шестерен [199].

#### 4.6. МАП лопаток газотурбинных двигателей

Сложная проблема механизации и автоматизации процессов полирования лопаток газотурбинных двигателей и других машин имеет технические и социальные аспекты. Большинство операций финишной обработки лопаток осуществляется вручную. Актуальна задача повышения производительности труда, улучшения качества изделий и обеспечения современного уровня культуры производства.

Известна попытка полировать в магнитном поле перо лопаток с использованием станков модели МАРС путем придания детали движений осцилляции и перемещения по кругу в ванне, заполненной ферроабразивным порошком [200]. Габариты рабочей зоны станка ограничивают размеры полируемых деталей, а эффективность полирования невысока из-за малой скорости резания (до 0,5 м/с), что недостаточно для осуществления интенсивного процесса абразивной обработки. Увеличение же скорости приводит к быстрому разрушению лопаткой «режущего контура» порошка, сформированного магнитным полем.

На основании накопленного опыта по полированию в магнитном поле поверхностей изделий с различными радиусами кривизны и по результатам пробных экспериментов предложены схемы МАП лопаток с использованием вращающихся полюсных наконечников (рис. 4.16) [201]. Полюсные наконечники образуют рабочее пространство *A*, заполненное ферроабразивным порошком 2. Полюсам с порошком сообщается вращение, а детали – поступательное перемещение подачи.

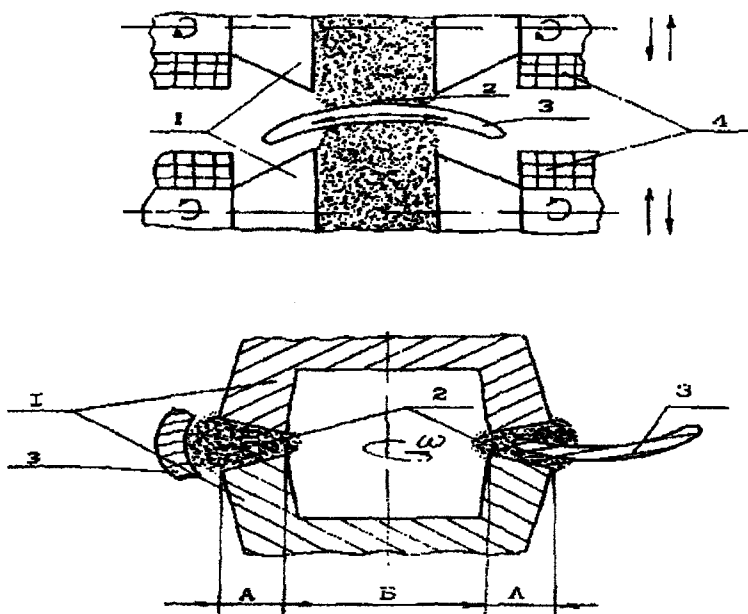


Рис. 4.16. Схемы МАП пера лопаток: 1 – полюсные наконечники; 2 – ферроабразивный порошок; 3 – полируемая деталь; 4 – электромагнитные катушки.  
*A* и *B* – соответственно рабочее и нерабочее межполюсные пространства

Пробные эксперименты на образцах-имитаторах, выполненные на станке СФТ2.107, показали возможность МАП поверхности лопаток с радиусом кривизны от 0,5 до 200 мм. Представляется возможным обеспечить значения характеристики шероховатости поверхности  $Ra \leq 0,1$  мкм при размерном съеме 10...20 мкм. Предлагаемые схемы (см. рис. 4.16) позволяют осуществлять рабочее движение порошка относительно обрабатываемого изделия со скоростью до 250 м/мин. При этих условиях длительность полирования пера длиной до 300 мм может составлять 2...10 мин в зависимости от материала, формы и размеров лопатки, состояния ее поверхности до и после МАП [201].

Существенное влияние на показатели МАП оказывает комплекс технологических факторов, в том числе и параметров магнитного поля в зоне обработки. Расчетным и экс-

периментальными методами исследована топография магнитного поля в рабочей зоне при МАП поверхностей различной кривизны. Определены форма и размеры двух вариантов полюсных наконечников – с выпуклым и вогнутым профилями рабочего контура [202].

С использованием математического планирования поставлен эксперимент по определению оптимальных значений технологических факторов МАП лопаток с диапазоном радиуса кривизны поверхности 15...40 мм. Установлены оптимальные значения основных параметров: скорость резания – 3...6 м/с, магнитная индукция в рабочем зазоре – 0,6...0,9 Тл, величина рабочего зазора – 1...2 мм. Полюса с выпуклым контуром обеспечивают более высокую производительность МАП, а с вогнутым контуром – более низкую шероховатость формируемой поверхности [202].

Совместно с Уральским филиалом НИИД выполнены эксперименты по исследованию влияния лазерного упрочнения и МАП на физико-механические и эксплуатационные свойства образцов лопаток из стали ЭИ96Ш и титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ-9. Лазерное упрочнение (без оплавления металла) приводит к повышению микротвердости поверхностного слоя на 75–125%. МАП обеспечивает на поверхности стали ЭИ96Ш шероховатость  $Ra \leq 0,08$  мкм, титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ-9 –  $Ra = 0,16...0,32$  мкм, а также создает в слое толщиной 5...10 мкм напряжения сжатия 5...15 кг/мм<sup>2</sup> (50...100 МПа). Воздействие лазерного упрочнения и МАП к изменению химического состава и снижению эрозионной стойкости поверхностного слоя не приводят, коррозионная стойкость после упрочнения несколько повышается, после полирования остается неизменной [203].

Работы по созданию и освоению оборудования и технологии магнитно-абразивного полирования поверхностей лопаток газотурбинных двигателей приостановлены на стадии экспериментов из-за отсутствия финансирования.

#### **4.7. Полирование внутренних поверхностей труб**

Решение задач финишной отделки внутренних поверхностей труб небольших сечений затруднено по причинам ограниченного доступа к полируемой поверхности и технологической сложности обеспечения кинематики процесса с максимально интенсивным пересечением следов обработки. Наиболее часто применяемые для этих целей гидроабразивные и струйноабразивные способы не обеспечивают высокого качества и равномерности обработки, существенно искажают параметры макрогеометрии поверхности.

При работе устройств связи в СВЧ-диапазоне предъявляются высокие требования к состоянию и качеству исполнения их входных трактов, в том числе и волноводных каналов. Задача обеспечения геометрических размеров волновода решается путем прокатки с последующим дорнованием по внутреннему сечению. Однако качество внутренней поверхности профиля не позволяет достичь высоких радиотехнических характеристик изделия. Малые размеры сечения профиля и относительно большая длина волноводов препятствуют эффективному использованию традиционных методов полирования для обеспечения требуемого качества внутренних поверхностей этих изделий.

Применение для этой цели метода магнитно-абразивной обработки представляется перспективным по следующим соображениям:

- для осуществления процесса обработки достаточно воздействия магнитного поля на зерна ферроабразива без непосредственного их контакта с источником поля;
- ввиду высокой эластичности и регулируемой жесткости порошка-инструмента абразивное воздействие на поверхность можно вести на уровне ее микронеровностей, сохранив исходные геометрические параметры профиля в пределах жесткого допуска.

Целью эксперимента является формирование по возможности наиболее низкой шероховатости внутренней поверхности волноводов прямоугольного профиля различных типоразмеров из латуни и меди.

При изучении большого объема технических и патентно-информационных источников выявлены 19 вариантов возможного решения задачи, однако их анализ показал, что

известные технические решения не позволяют эффективно полировать внутренние поверхности трубчатых изделий прямоугольной формы малого сечения [204]. Для МАП внутренних поверхностей труб предложена оригинальная схема обработки, изображенная на рис. 4.17, а [205].

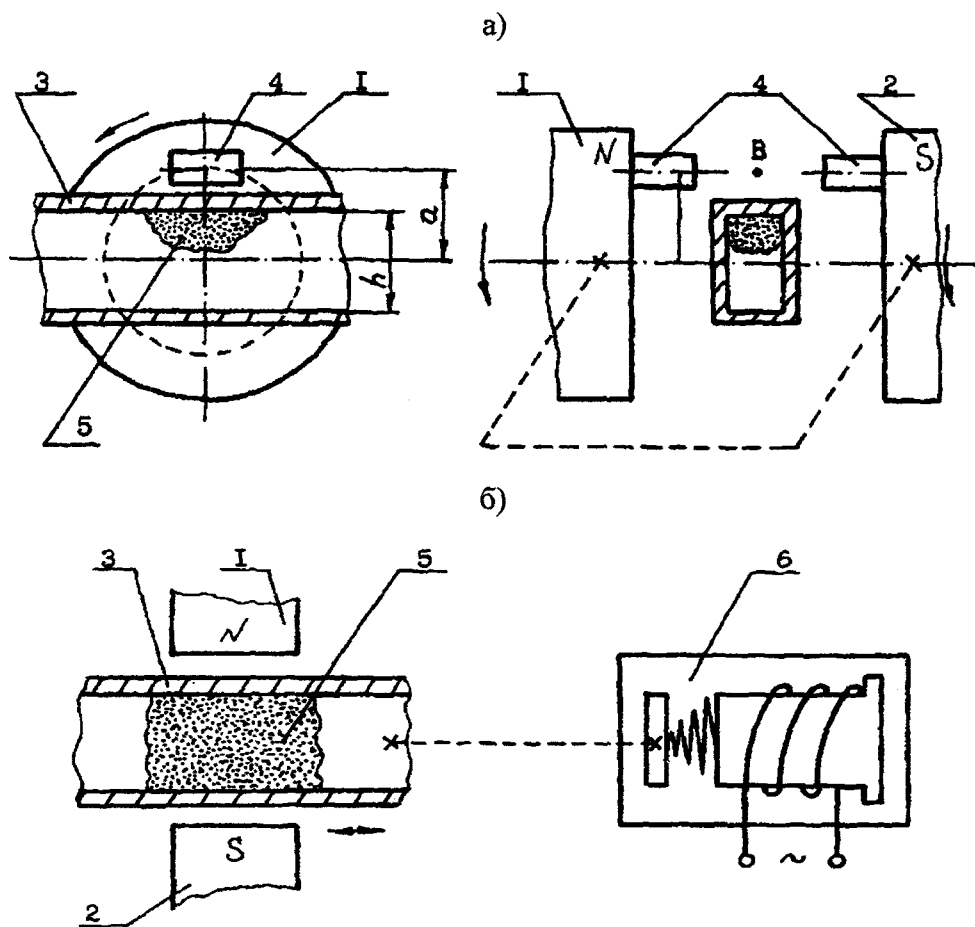


Рис. 4.17. Схемы магнитно-абразивной обработки внутренней поверхности профиля без осцилляции (а) и с осцилляцией (б) образца: 1, 2 – полюсные наконечники; 3 – обрабатываемый образец; 4 – концентратор магнитного потока; 5 – ферроабразивный порошок; 6 – электромагнитный привод осцилляции

Перемещение определенной дозы ферроабразивного порошка 5 происходит в результате перемещения максимума градиента магнитного потока, сконцентрированного разнополюсными концентраторами 4, которые установлены на синхронно вращающихся полюсных наконечниках 1 и 2. Для определения работоспособности этой схемы обработки был проведен следующий эксперимент.

Условия проведения эксперимента:

обрабатываемый профиль, сечение, мм	5,5x11,0
концентратор магнитного потока, сечение, мм	6x6
магнитная индукция по оси между концентраторами в т. В, Тл (рис. 4.17)	0,7
частота вращения сердечников, с <sup>-1</sup>	1...4
радиус вращения концентраторов, мм	5...12
ферроабразивный порошок	ФАД-9К, 315/100 мкм
объем дозы ФАП, см <sup>3</sup>	0,3...0,6
время обработки <i>t</i> , мин	5

На первом этапе проведения эксперимента определялись условия, при которых зерна ферроабразивного порошка (ФАП) начали перемещение относительно обрабатываемой поверхности со скоростью вращения концентраторов магнитного потока. Результаты



эксперимента оценивались визуально по интенсивности удаления окисной пленки с внутренней поверхности профиля. Определяющую роль в процессе обработки играют такие факторы, как радиус вращения концентраторов  $\alpha$ , частота вращения и доза ФАП, заключенного в профиле. Увеличение дозы порошка свыше  $0,4 \text{ см}^3$  приводит к распределению зерен по всей длине зоны обработки, что препятствует концентрации порошка в зоне прохождения максимального магнитного потока. Увеличение радиуса вращения концентраторов  $\alpha$  ведет к уменьшению скорости резания. Для данной схемы обработки величина  $\alpha$  находится в пределах  $(0,5 \dots 1) h$ , где  $h$  – высота профиля. Частота вращения концентраторов взаимосвязана с величиной магнитной индукции между ними и с магнитными свойствами используемого порошка. Для данных условий реализации схемы обработки частота вращения концентраторов находится в пределах  $(1,7 \dots 2,5) \text{ с}^{-1}$ . Следовательно, скорость резания ферроабразивных зерен будет не выше  $5 \text{ м/мин}$ , что недостаточно для интенсивной обработки поверхности. При значениях  $\alpha = 0,7 h$  и  $n = 2 \text{ с}^{-1}$  были обработаны образцы профиля сечением  $5,5 \times 11,0 \text{ мм}$  с исходной шероховатостью внутренней поверхности  $Ra = 0,52 \text{ мкм}$ . После обработки в течение 10 мин с поверхности был удален окисный слой в пределах рабочей зоны, а показатель шероховатости поверхности равен  $0,25 \text{ мкм}$ . При обработке профиля меньшего сечения движение ферроабразивной массы практически отсутствует.

Для обработки волноводов с меньшими размерами сечения предлагается схема, изображенная на рис. 4.17, б.

Принцип работы этой схемы основан на использовании инерции покоя объема ферроабразивного порошка 5, уплотненного энергией магнитного поля, созданного между полюсами магнитной системы 1 и 2. Образец 3 получает движение осцилляции от привода 6. Работоспособность этой схемы обработки была проведена при следующих значениях технологических факторов:

размеры внутреннего сечения профиля, мм	5,2x2,6
амплитуда осцилляции, мм	6x3
частота осцилляции, Гц	12
магнитная индукция в зоне обработки, Гл	25
ферроабразивный порошок	0,1
объем дозы ФАП, $\text{см}^3$	ФАД-9К, 315/100
время обработки, мин	1,5
длина зоны обработки, мм	10
	70

В результате обработки параметр шероховатости  $Ra$  снизился с  $0,45 \dots 0,40 \text{ мкм}$  до  $0,15 \dots 0,08 \text{ мкм}$ .

Следующий этап экспериментов заключался в том, что после нанесения покрытия из серебра необходимо было снизить шероховатость покрытия, обеспечив при этом минимальный съем материала.

Поставленная задача решалась путем применения для обработки ферроабразивного порошка со сферической формой зерен. Зерна ФАП, перекатываясь по обрабатываемой поверхности, должны оказывать на нее минимальное абразивное воздействие. Снижение шероховатости поверхности будет происходить за счет прикатывания сферическими зернами вершин микронеровностей покрытия. Ферроабразивный порошок должен отвечать следующим требованиям: обладать минимальными режущими свойствами; иметь правильную сферическую форму зерен или по возможности близкую к ней; на поверхности зерен не иметь отростков, которые при скалывании могут быть закатаны в слой покрытия.

Из большой гаммы имеющихся магнитно-абразивных порошков в наибольшей мере отвечает предъявляемым требованиям ФАП на основе сплава железо-кремний, полученный распылением струи расплава [156]. Частицы порошка имеют форму близкую к сферической.

МАП образцов с серебряным покрытием осуществляли на вышеприведенных режимах в течение трех минут. Исходная поверхность покрытия имела матовый оттенок, а после МАП приобрела зеркальный блеск. Оценка качества обработки образцов проводилась по параметрам шероховатости и изменению размеров в процессе обработки.

Данные приведены в табл. 4.11.

Таблица 4.11

Результаты МАП внутренних поверхностей труб

№ п/п	Сечение внутренней поверхности образцов $b \times h$ , мм	Показатель шероховатости поверхности $Ra$ , мкм				Размеры $b \times h$ , мм			
		до МАП	после МАП	после серебрения	после МАП по серебру	до МАП	после МАП	после серебрения	после МАП по серебру
1	6,2 x 3,1	0,55	0,34	0,40	0,27	6,18 3,11	6,21 3,13	6,15 3,07	6,19 3,11
2	7,2 x 3,4	0,46	0,21	0,30	0,25	7,20 3,44	7,21 3,48	7,18 3,42	7,19 3,43
3	7,2 x 3,4	0,42	0,19	0,35	0,21	7,16 3,44	7,20 3,49	7,16 3,45	7,17 3,44

В опытах 1 и 3 образцы труб после серебрения полировались порошком ФАД-9К, а в опыте 2 – сферическим порошком Fe-Si. Очевидно, что лучшие значения  $Ra$  обеспечивает порошок ФАД-9К. Полученные результаты не являются предельными. Существенно улучшить эффективность МАП внутренних поверхностей труб можно оптимизацией значений технологических параметров процесса.

Японские специалисты выполнили эксперименты по магнитно-абразивной обработке внутренних поверхностей стальных немагнитных труб [206]. Для МАО выбрана схема, в которой пульсирующее магнитное поле сообщает обрабатываемому инструменту (в виде мелко рубленой проволоки диаметром 0,5...2 мм) возвратно-поступательное движение внутри обрабатываемого изделия. В результате МАО шероховатость внутренней поверхности трубы снижается на 15–30%, а твердость поверхностного слоя повышается в 1,5–2 раза.

Имеется пример эффективного полирования в магнитном поле внутренних поверхностей тонкостенных конических отверстий деталей – светоотражателей из алюминиевых сплавов [207].

## **ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ЗАЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ ПЕРЕД СВАРКОЙ**

Поскольку магнитно-абразивная обработка (МАО) позволяет обеспечивать формирование приповерхностного слоя с минимальным количеством дефектов структуры – очагов разрушения, то представляется весьма заманчивым использовать этот метод обработки для повышения коррозионной стойкости металлов и сплавов.

Известно, что только в ФРГ потери от коррозии металла составляют более 20 млрд марок в год [208]. В США эти потери оцениваются в 25 млрд долларов в год [209].

Первые шаги в направлении изучения эффективности использования МАО для повышения сопротивления изделий коррозионному воздействию были предприняты при решении сложной технологической задачи – подготовки поверхностей деталей перед их сваркой.

Настоящая комплексная работа по зачистке в магнитном поле поверхностей деталей перед сваркой начата и доведена до промышленного освоения по заказу НПО «Энергия». Целью работы явилось не только повышение эффективности подготовительных операций перед сваркой, но и повышение качества сварных швов, прочности и надежности сварных корпусных конструкций летательных аппаратов.

В настоящее время сварка, как эффективный метод получения неразъемных соединений металла, стала одним из основных технологических процессов в авиастроении, машиностроении и строительстве.

Увеличение объема производства сварных конструкций выдвигает проблему интенсификации процесса сварки при одновременном обеспечении более высокой их работоспособности.

Практика показывает, что 15–20% (в отдельных случаях до 80%) рабочего времени сварщика тратится на вспомогательные операции, непосредственно не связанные с самим процессом сварки [210]. Поэтому уровень автоматизации и механизации подготовительных операций влияет на производительность всего сварочного производства.

Работоспособность сварных конструкций, нередко эксплуатируемых в самых неблагоприятных условиях (высокие и низкие температуры, циклические нагрузки, агрессивные среды и т.д.), во многом зависит от качества сварных соединений. Возникновение дефектов в сварном шве, ухудшающих прочность и надежность сварной конструкции, в значительной степени определяется некачественной подготовкой под сварку свариваемых поверхностей (неполное удаление окисных пленок, недостаточная очистка от смазки и других механических загрязнений) [211].

Таким образом, повышение производительности и качества подготовки свариваемых поверхностей составляет важное направление интенсификации и улучшения качества сварочных работ. При этом основное внимание при подготовке поверхности под сварку уделяется качеству удаления слоя окислов на свариваемых поверхностях.

Традиционная подготовка поверхности под сварку предполагает либо зачистку ее механическими способами (наждачной бумагой, шабером или с помощью металлических проволочных щеток), либо химическую очистку. Однако упомянутые способы имеют ряд недостатков, главными из которых являются низкая производительность и формирование электрохимически активной поверхности, склонной к быстрому возобновлению удаленной окисной пленки. В то же время пробный эксперимент по использованию магнитно-абразивного способа для подготовки свариваемых поверхностей дал обнадеживающие результаты, что явилось основанием для выполнения поисковых исследований.

### **5.1. Поисковые исследования**

Основным материалом образцов для проведения работ по магнитно-абразивной зачистке (МАЗ) свариваемых поверхностей был выбран сплав системы Al-Mg-Mn (АМг-6), как наиболее распространенный в самолето- и ракетостроении, химической промышленности и других областях техники. Химический состав сплава АМг-6 приведен в табл. 5.1.

Химический состав сплава АМг-6 (ГОСТ 4784-74)

Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cu	Ti	Al
5,8...6,8	0,5...0,8	< 0,4	< 0,4	< 0,2	< 0,1	0,02...0,1	остальное

Среди многочисленных факторов, определяющих качество сварного соединения, является подготовка поверхности под сварку. Исследуя эффективность применения МАО на операции «подготовка поверхности под сварку», заранее естественно предположить оптимальность и стабильность технологических факторов самого процесса сварки. В этом случае все изменения характеристик сварного соединения будут вызваны разными условиями подготовки поверхности, т.е. различными состояниями свариваемых поверхностей.

Установлено, что наличие и толщина окисной пленки, химическая и механическая чистота свариваемых поверхностей являются основными показателями качества подготовки поверхности под сварку [211, 212]. В работе [213] указывается на влияние энергетического уровня поверхности, оцениваемого по величине разности потенциалов  $\Delta U$ , на качество сварного соединения. Энергетический уровень поверхности и, соответственно, работа выхода электронов, обусловлены процессом подготовки поверхности и проявляются в изменении плотности дислокаций. Любая технологическая операция, вызывающая деформацию приповерхностного слоя и приводящая к повышению плотности дислокаций, характеризуется высоким энергетическим уровнем формируемой поверхности. Такие поверхности отличаются повышенной скоростью образования окисной пленки.

Например, получены минимальные значения  $\Delta U = 385$  мВ через 8 часов после двойного цикла операций обезжиривания органическими растворителями, травления в 5%-м растворе щелочи, осветления в растворе азотной кислоты и пассивирования в 85%-м растворе ортофосфорной кислоты в течение 15 минут при температуре 28°C (301 К). Для сравнения, через 8 часов после шабрения  $\Delta U = 1200...1300$  мВ [213].

Конечная толщина образующейся в естественных производственных условиях окисной пленки составляет от 5...20 нм [212] до 0,01 мкм [214, 215]. В зависимости от влажности и температуры окружающей атмосферы толщина естественного слоя окислов может повышаться в 10 раз [202]. Зачищенная поверхность сразу же начинает покрываться новым слоем окиси. На свежесформированной поверхности алюминия уже за 0,1 мкс образуется плотный слой окиси, препятствующий контактной сварке [215].

Коррозия алюминия в воде при 20°C (293 К) протекает в три стадии. На первой стадии на поверхности образуется аморфная окисная пленка толщиной 80...100 Å (8...10 нм). На второй – образуется кристаллический беллит, на третьей – кристаллический байерит. Толщина пленки беллита увеличивается со временем от 20 Å (2 нм) до нескольких сотен ангстрем, толщина слоя байерита достигает 1000 Å (0,1 мкм) [217].

Скорость образования пленки на зачищенной поверхности, ее толщина и плотность для разных методов подготовки различна [218]. Это и определяет разное время выдержки до сварки после химического травления и механической обработки шабрением или металлическими щетками. В первом случае срок выдержки ограничен 48 часами, во втором – 16...24 часами [211].

В течение этого срока толщина окисной пленки не препятствует формированию качественного сварного шва. По истечении его требуется повторная зачистка поверхности, в противном случае действия флюсов или сварочной дуги окажется недостаточно, чтобы удалить выросшую по толщине окисную пленку [211, 212].

Окисная пленка не является единственным источником дефектов сварного соединения, обусловленных условиями подготовки поверхности. К другим факторам, отрицательно влияющим на формирование сварного шва, можно отнести наличие различных по величине абразивных и других инородных включений, загрязнение поверхности «вредными» химическими веществами и т.п. [219, 220].

Основными требованиями, определяющими пути создания эффективной магнитно-абразивной подготовки свариваемых поверхностей, можно назвать следующие:

- 1) обеспечение размерного съема не менее 0,1...1,0 мкм, гарантирующего полное удаление окисной пленки со свариваемых поверхностей;
- 2) формирование химически чистой (без загрязнений различного вида и масштаба) поверхности;
- 3) получение низкого энергетического уровня поверхности, в частности, обеспечение возможно меньшей плотности дислокаций, т.е. меньшей разности потенциалов.

Следует отметить, что изложенные предпосылки дают основание говорить о магнитно-абразивной зачистке. (Здесь магнитно-абразивная зачистка понимается как вариант магнитно-абразивной обработки, имеющей своей главной целью удаление с обрабатываемой поверхности слоя окислов.)

Примером эффективного применения магнитно-абразивной зачистки может служить обработка поверхностей печатных плат с целью удаления слоя окислов и формирования развитого микрорельефа [5].

Патентно-информационный поиск на глубину более 35 лет выявил около 10 вариантов схем МАО кромок деталей. При анализе их возможностей предпочтение отдано схеме, представленной на рис. 1.3, з. В соответствии с ней зачищаемая кромка протягивается через ферроабразивный порошок (ФАП), помещенный в зазор между полюсными наконечниками и вращающийся вместе с ними [221].

Схему магнитно-абразивной зачистки (МАЗ) кромок реализовали на установке модели ЭУ-5, которая помимо привода вращения полюсов и электромагнитной системы содержит стол для крепления обрабатываемой детали и сообщения ей движения продольной подачи [41].

Технические характеристики установки ЭУ-5:	
частота вращения полюсных наконечников, с <sup>-1</sup>	0...7,5
скорость подачи, м/с	0...0,003
магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл	0...1,5
суммарная мощность электродвигателей, кВт	4,2

При поисковых исследованиях магнитно-абразивной зачистке (МАЗ) подвергались плоские образцы из сплава АМг-6 размерами 400x100 мм и толщиной 2...8 мм с исходной шероховатостью поверхности, характеризуемой  $Ra = 2,5...1,5$  мкм. На данном этапе работ ставилась задача одновременной зачистки торца образцов и их боковых кромок на расстоянии 12...15 мм с обеспечением низкой шероховатости поверхности, равной 0,2...0,05 мкм. Следовало также предварительно оценить влияние различных ферромагнитных абразивных порошков и СОЖ на показатели производительности и качества процесса зачистки. По результатам пробных опытов по МАЗ кромок и их свариваемости приняты следующие значения основных режимов зачистки:

частота вращения полюсов, с <sup>-1</sup>	8,5
продольная подача, мм/мин	400
магнитная индукция, Тл	0,8
величина рабочего зазора, мм	2,0...2,5
число проходов	6...12

Результаты экспериментов представлены в табл. 5.2 и 5.3.

Результаты испытаний обрабатываемости пластин АМг-6  
различными порошками и СОЖ

№ опыта	№ образца	Марка порошка	СОЖ	Результаты МАЗ	Примечание	Оценка
1	4	19В (с пропиткой)	–	поверхность светлая	пены нет	удовл.
2	4	Ж-15КТ	Синма-2, 20%	поверхность блестящая	пена в зоне обработки	хор.
3	5	Кремнистый сплав (КС)	Синма-2, 20%	поверхность блестящая, есть отдельные царапины	пена в зоне обработки	хор.
4	5	Кремнистый сплав (КС)	Глицерин чистый	поверхность темная	пены нет	неуд.
5	6	Кремнистый сплав (КС)	Акванол-1	поверхность блестящая, есть отдельные царапины	пены нет	хор.
6	6	Кремнистый сплав (КС)	Акванол-1 +глицерин	поверхность светлая	слабая пена белого цвета	удовл.
7	7	19В	Акванол-1	поверхность светлая	пены нет	удовл.
8	7	Р6М5	Акванол-1 +глицерин	поверхность светлая	пена в зоне обработки	удовл.
9	б/н	Р6М5	Синма-2, 20%	поверхность блестящая	пена желтого цвета	хор.
10	б/н	Р6М5 парт.1	Синма-2, 20%	поверхность блестящая	пена желтого цвета	хор.
11	–	Р6М5 парт.3	Синма-2, 20%	поверхность блестящая	пена желтого цвета	хор.
12	–	Fe-TiC псевдопл.	Синма-2, 20%	поверхность темная	черная пена	неуд.

Таблица 5.3

Исследование обрабатываемости пластин из сплава АМг-6

№ опыта	Порошок (зернистость, мкм), СОЖ	Вращение полюсов	Характеристика обработанной поверхности	Особенности МАЗ	Результаты сварки
2	Ж15-КТ (200/100), Синма-2 (20%)	противоположное	боковые поверхности и торец блестящие $Ra = 0,1 \dots 0,05$ мкм	нагрев рабочей зоны $< 60^\circ\text{C}$	без дефектов
5	КС (315/100), без СОЖ	одностороннее	поверхность матовая, темная	нагрев рабочей зоны $< 80^\circ\text{C}$	сплошные поры по всему шву
6	Ж15-КТ (200/100), Синма-2 (20%)	одностороннее	поверхность блестящая $Ra = 0,05$ мкм;	нагрев рабочей зоны $< 40^\circ\text{C}$	без дефектов
7	Fe-TiC псевдоплав. Синма-2 (20%)	одностороннее	блеск слабый, съём незначительный	нагрев рабочей зоны $< 40^\circ\text{C}$	сплошные поры по всему шву

Лучшие показатели процесса зачистки обеспечивает применение порошка Ж15КТ и в качестве СОЖ – водный раствор «Синма» (20%).

Установлено, что при противоположном вращении верхнего и нижнего полюсных наконечников происходит разогрев рабочей зоны до  $80^\circ\text{C}$  за 2...4 прохода. При этом име-

ет место интенсивное испарение компонентов СОЖ, нарушаются оптимальные условия контакта режущих зерен с обрабатываемой поверхностью. При одностороннем вращении сердечников производительность обработки не снижается, а нагрев рабочей зоны в течение всего процесса полирования не превышает 40°C. Следует отметить, что и при одностороннем направлении, если разность скоростей вращения верхнего и нижнего сердечников превышает 10%, имеет место заметный нагрев рабочей зоны. Очевидно, что для создания наиболее благоприятных условий резания необходимо обеспечивать полную синхронизацию скоростей вращения обоих полюсных наконечников.

## 5.2. Создание макета, проведение экспериментов

В целях обстоятельного исследования технологических возможностей процесса МАЗ кромок деталей создано макетное устройство М398 [221], принцип работы которого поясняет рис. 1.3, з. Макет установили на вертикально-фрезерный станок 6Н11, общий вид его представлен на рис. 5.1, а. На рис. 5.1, б показана рабочая зона макета М398. Рабочий инструмент 3 (см. рис. 1.3, з) представляет кольцевую щетку ферромагнитного абразивного порошка (ФАП), имеющую определенную глубину и ширину. Ширина кольца определяется расстоянием между торцами расположенных друг напротив друга чашеобразных полюсных наконечников 2, соединенных между собой шарниром. Полюсным наконечникам сообщается движение вращения. Глубина кольцевой щетки при данном значении магнитной индукции зависит от геометрии полюсного наконечника, динамики процесса и величины одноразовой порции ФАП, засыпаемого в межполюсное пространство. Обрабатываемый лист 1 вводится своей кромкой в межполюсное пространство на глубину, необходимую для получения такой ширины зоны обработки, которая была бы достаточна для нормального протекания процесса сварки, обычно 10...20 мм. Листу сообщается возвратно-поступательное движение в плоскости, перпендикулярной оси вращения полюсных наконечников. Рабочий инструмент формируется под действием магнитного поля, наводимого в межполюсном пространстве двумя электромагнитными катушками 4, соединенными магнитопроводом.

Значение линейной скорости вращения полюсных наконечников  $V_{рез} = 2,9$  м/с выбрано средним из рекомендуемых для процесса магнитно-абразивной обработки. Кинематическая схема станка позволяет выбирать величину продольной подачи образца в пределах 35...980 мм/мин.

Эффективность магнитно-абразивной зачистки свариваемых кромок целесообразнее всего определить по показателям состояния зачищенной поверхности и параметрам качества выполненного сварного соединения. В литературе аспект влияния состояния подготовленной под сварку поверхности на качество сварных швов практически не рассматривается. Среди основных причин дефектов сварных швов, обусловленных состоянием подготовленной поверхности, называются следующие: плохая очистка свариваемых кромок; загрязнение или увлажнение кромок перед сваркой; повышенная концентрация растворенного в свариваемом металле водорода в результате нерациональной подготовки поверхности; попадание в зону сварки частиц окисной пленки в результате нетщательной подготовки кромок [211, 219, 220]. Анализ информации указывает, что у специалистов принята единственная обобщенная характеристика состояния подготовленной под сварку поверхности, влияющая на уровень параметров сварного шва, — толщина и плотность окисной пленки.

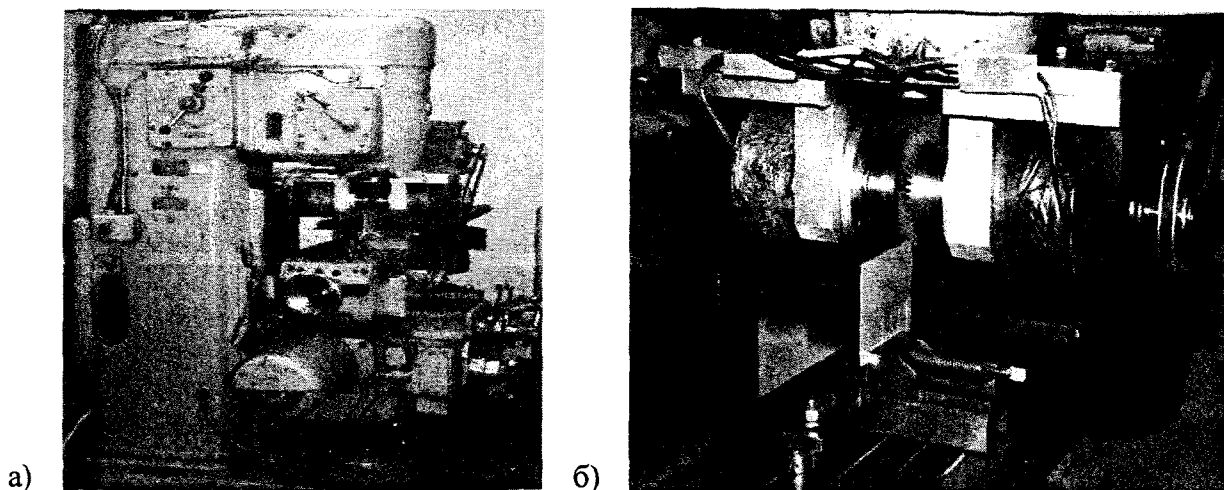


Рис. 5.1. Общий вид станка 6Н11 с макетом М298 (а) и его рабочая зона (б)

В результате проведения пробных экспериментов по МАО свариваемых кромок из сплава АМг-6 стала очевидной еще одна характеристика состояния подготовленной поверхности – количество и размеры внедренных в обработанную поверхность частиц абразива. Результаты рентгеноспектрального микроанализа подтвердили предположение о магнитно-абразивной природе обнаруженных внедрений. Были количественно оценены их размер и плотность распределения по поверхности. Эту характеристику, нежелательную с точки зрения обеспечения качества сварного шва, есть основание рассматривать как временное явление, которое может быть устранено при определенных оптимальных условиях магнитно-абразивной зачистки.

Экспериментально установлено, что сплошная (без пропусков) зачистка поверхности в магнитном поле имеет место при минимальном размерном съеме металла в 3 мкм. Учитывая, что толщина окисной пленки на алюминии составляет около 0,1 мкм [214, 215], МАЗ обеспечивает полное удаление окисной пленки при сплошной обработке поверхности.

Таким образом, к характеристикам состояния подготовленной под сварку поверхности отнесены состояние окисной пленки, плотность распределения по поверхности и размер внедрений в результате магнитно-абразивной обработки.

Отсутствие каких-либо сведений по количественному и качественному влиянию этих характеристик на уровни общепринятых характеристик качества сварных соединений вынуждает в каждом отдельном случае делать заключение об эффективности того или иного режима МАО только после сварки и проверки качества полученного шва.

Исследования проводились на плоских пластинах из сплава АМг6 3 типоразмеров: 300x100x4; 300x100x2; 100x50x2. Во всех случаях обработка велась по большей стороне.

Процесс определения эффективности магнитно-абразивной зачистки свариваемых кромок сводится к следующему. Образцы, предназначенные для магнитно-абразивной обработки, подвергаются обезжириванию и щелочному травлению в соответствии с ОСТ 92-1152-75. Кромки подготовленных таким образом образцов зачищали магнитно-абразивным способом на всю длину. После МАО остатки ФАП и СОЖ удалялись путем протирки белой хлопчатобумажной салфеткой, смоченной бензином, и последующей протирки сухой салфеткой. Обработанные пластины, во избежание попадания пыли и других загрязнений, упаковывали в бумагу.

Часть зачищенных образцов подвергали фрактографическому исследованию поверхностей кромок. Исследования проводились в физической лаборатории предприятия НПО «Энергия» на сканирующем электронном микроскопе PSEM-500 с приставкой для энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа EDAX-711.



Далее подготовленные пластины сваривали попарно, кромками встык. Автоматическую аргонодуговую сварку выполняли в цеховых условиях предприятия НПО «Энергия». В качестве присадочной проволоки использовали серийную проволоку Св АМг-6 диаметром 2 мм ГОСТ 7871-75, подготовленную способом щелочного травления. Режим сварки:  $V_{св} = 10$  м/ч;  $J_{св} = 180...200$  А.

Последним этапом была оценка качества сварных швов. Качество сварных соединений оценивали по результатам рентгеновского контроля, металлографии и механическим свойствам.

В качестве постоянных были выбраны следующие параметры МАЗ: величина рабочего зазора на сторону  $\delta = 1,5$  мм; магнитная индукция в межполюсном пространстве  $B = 0,5$  Тл; скорость резания  $V_{рез} = 2,9$  м/с; доза ферромагнитного абразивного порошка (ФАП) – 175 мл; зернистость ФАП  $\Delta = 315/100$  мкм; ширина обработанной зоны – 10 мм. Ширина межполюсного пространства установлена из расчета

$$a = 2\delta + b,$$

где  $a$  – ширина межполюсного пространства,  $\delta$  – величина рабочего зазора на сторону,  $b$  – толщина пластины.

В данном эксперименте величина  $a$  составляла 5 или 7 мм. Время нахождения образцов в зоне обработки ограничивалось 3,6 мин. Эта величина обусловлена значением подачи  $S = 165$  мм/мин и числом проходов  $n = 2$ , выбранным на основании предварительных экспериментов.

Из-за отсутствия достаточной информации о поведении ФАП и СОЖ при МАЗ алюминия и об обеспечении должного качества зачистки было принято решение проверить эффективность применения для этих целей ряда рекомендуемых ФАП и СОЖ [221].

Условия и результаты проведения экспериментов приведены в табл. 5.4. Качество обработанных поверхностей при различных технологических режимах оценивали по внешнему виду.

Таблица 5.4

Условия и результаты магнитно-абразивной обработки свариваемых кромок

№ опыта	ФАП	СОЖ	Состояние поверхности после обработки
1	2	3	4
2	Fe-TiC (40%)	Олеиновая кислота (1%) + триэтанолламин (1%) + лапрол (1%) + вода	Темносерого цвета матовая поверхность
3	Fe-TiC (40%)	Синма-2 (10%-й р-р в воде)	Темная матовая поверхность
5	Fe-Al (8%) - Si (5%)	Керосин (1%) + глицерин (1%) + вода	Светлая поверхность с матовым оттенком
6	Fe-Al (8%) - Si (5%)	Синма-2 (10%-й р-р в воде)	Светлая поверхность с матовым оттенком. Следы СОЖ на поверхности кромок
10	Fe-Al (8%) - Si (5%)	Олеиновая кислота (1%) + триэтанолламин (1%) + глицерин (1%) + вода	Светлая блестящая поверхность со следами потускнения
8	Fe-Al (8%) - Si (2,5%) - P (0,4%)	Синма-2 (10%-й р-р в воде)	Светлая матовая поверхность
9	Fe-Al (8%) - Si (2,5%) - P (0,4%)	Олеиновая кислота (1%) + триэтанолламин (1%) + глицерин (1%) + вода	Светлая с равномерным блеском поверхность

1	2	3	4
11	Fe-Al (8%) - Si (2,5%)- P (0,4%)	Олеиновая кислота (1%) + триэтанолламин (1%) + лапрол (1%) + вода	Светлая блестящая поверхность с матовыми разводами
13	Fe-Al (8%) - Si (5%)	Синма-2 (100%-й концентрации)	Светлая матовая поверхность. Обильные остатки СОЖ на поверхности (легко удалимые)
14	Fe-Al (8%) - Si (2,5%)- P (0,4%)		
15	Серый чугун		
16	Электрокорунд ферромагнитный		

Как видно из табл. 5.4, состояние поверхности после магнитно-абразивной обработки в значительной степени определяется химическим составом и физическими свойствами рабочей среды – ферромагнитного абразивного порошка и смазочно-охлаждающей жидкости. Применение порошков на основе карбида титана обуславливает резкое интенсивное изменение поверхностного слоя алюминиевого сплава, проявляющееся в потемнении (вплоть до черного цвета) обработанной поверхности. Такое состояние полученной поверхности можно считать неприемлемым, т.к. в этом случае предполагаемое изменение химического и фазового состава поверхностного слоя, его физико-механических свойств приведет к недопустимому снижению механических и коррозионных свойств сварного соединения. Применение различных СОЖ при обработке порошком на основе карбида титана не вызывает заметных изменений в состоянии сформированной поверхности. На основании изложенных особенностей применения порошка Fe-TiC при обработке цветных металлов было принято решение исключить его из дальнейших экспериментов.

Во всех других случаях, независимо от используемых ФАП и СОЖ, была получена светлая поверхность без видимых механических дефектов после обработки. Однако некоторые особенности для различных режимов МАО имели место и проявлялись они в различной степени блеска и цветовых оттенков сформированной поверхности. Исходя из опыта применения МАО можно утверждать, что сильное потемнение зачищенной поверхности вызвано адгезией пылевидных частиц ФАП, содержащих железо и углерод. Матовый оттенок после МАЗ свидетельствует о химическом взаимодействии образованной поверхности с активными компонентами ФАП и СОЖ. Все эти включения в поверхностном слое нежелательны, поскольку ухудшают качество сварных швов. Поэтому можно считать наиболее приемлемыми результаты, полученные в опыте 9 (см. табл. 5.4).

Для изучения полученных результатов и проверки сделанных выводов необходимо провести детальное исследование поверхности, зачищенной на выбранных режимах; осуществить сварку кромок листов (в том числе и при различных заранее планируемых отклонениях при сварке); провести исследование качества сварного шва. Определенный интерес представляет и выяснение влияния длительности выдержки подготовленных к сварке пластин на свойства сварного соединения.

### 5.3. Оценка эффективности магнитно-абразивной зачистки кромок

В соответствии с методикой определения эффективности магнитно-абразивной зачистки свариваемых кромок подготовленные образцы были обработаны и сварены попарно. Поверхность некоторых образцов до сварки исследовалась методом фрактографии с помощью сканирующего электронного микроскопа. Сварные швы подвергали рентгеновскому просвечиванию, а затем сваренные образцы разрезали на темплеты, предназначенные для металлографических исследований и механических испытаний.

На макетном устройстве М398 были обработаны четыре партии пластин размером 300x100x4 мм и столько же партий с размером пластин 300x100x2 мм. Для каждой партии

был установлен свой срок выдержки между зачисткой поверхности и сваркой. Этот срок составлял 2, 5, 10 и 30 суток. Сварка после каждого срока выдержки осуществлялась как без отклонений от нормального, определенного требованиями ОСТ 92-1114-80, процесса сварки, так и с отклонениями (сварка с зазором 1 мм, смещение электрода 1,5 мм, смещение кромок 1 мм).

Режимы магнитно-абразивной зачистки свариваемых кромок, выбранные на основании пробных экспериментов, указаны в табл. 5.5. Каждый образец после обработки промывался водой, протирался белой хлопчатобумажной ветошью, смоченной бензином, и упаковывался в бумажный конверт.

Таблица 5.5

Режимы магнитно-абразивной зачистки кромок

Размер образца, мм	S, мм/мин	V, м/с	δ, мм	B, Тл	Число проходов	ФАП		СОЖ
						состав	Δ, мкм	
300x100x4	165	2,9	1,5	0,4	2	Fe-Al(8%)- Si(2,5%)- P(0,4%)	315/ 100	Триэтаноламин (1%) + олеиновая кислота (1%) + глицерин (1%) + вода
300x100x2	125	2,9	1,5	0,5	1			

Результаты исследования поверхностного слоя, сформированного МАЗ, и качества сварных соединений представлены на рис. 5.2, 5.3 и в табл. 5.6.

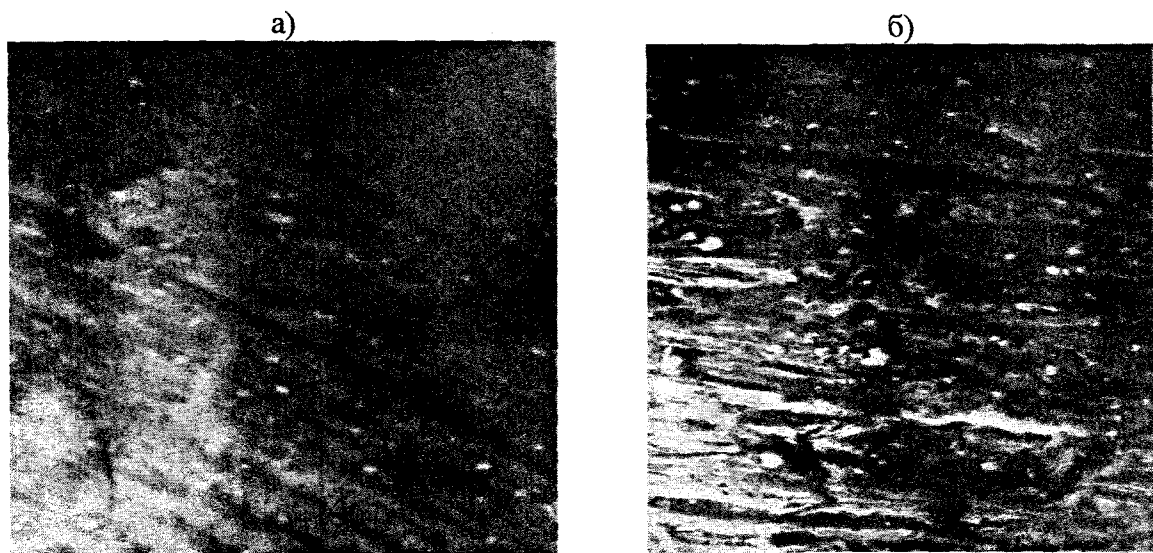


Рис. 5.2. Фрактограммы (x640) боковой поверхности (а) и торца (б) кромки, обработанной магнитно-абразивным способом

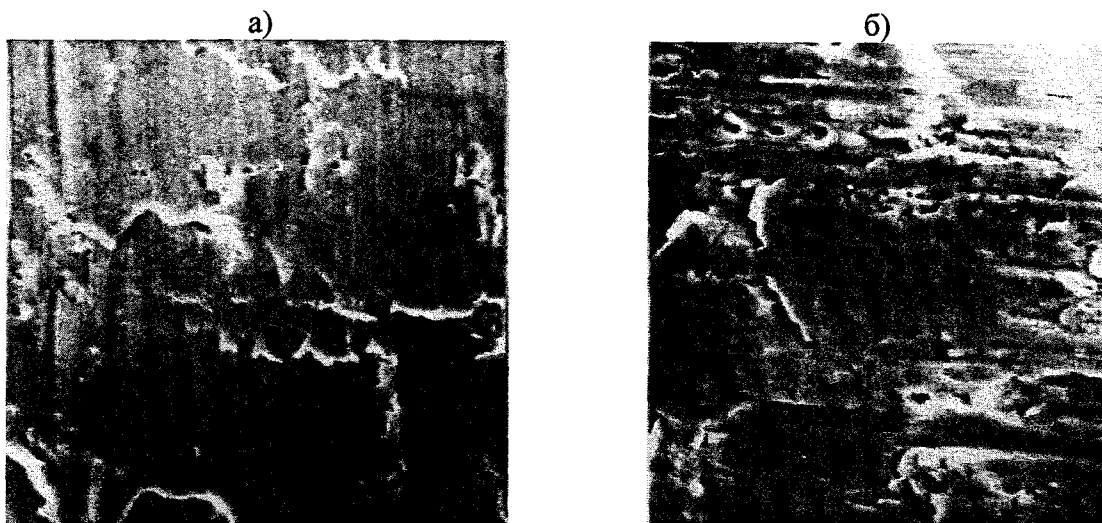


Рис. 5.3. Фрактограммы (x640) боковой поверхности (а) и торца (б) кромки, обработанной шабрением

Для поверхности, сформированной магнитно-абразивным способом (см. рис. 5.2), характерны мелкие углубления (типа царапин), заметные при достаточно большом увеличении (x640). На поверхности после МАЗ отсутствуют характерные для шабренной поверхности (см. рис. 5.3) наплывы из основного материала и остатков окисной пленки. При исследовании всех образцов, зачищенных магнитно-абразивным способом, на поверхности обнаружены локальные (точечные) внедрения абразивных частиц (на рис. 5.2 – белые точки, разбросанные по всему полю зоны обработки). Размер этих внедрений колеблется от 2 до 5 мкм, а плотность распределения их по поверхности составляет 2750...6050 шт./см<sup>2</sup>. Число и размер внедрений на боковой поверхности и поверхности кромки не одинаково. В последнем случае внедрение абразивных частиц оказывается более интенсивным. Это связано с условиями протекания процесса обработки по данной схеме. Поверхность кромки подвергается более сильному воздействию набегающей ферромагнитноабразивной щетки, чем боковая поверхность, на которую давление порошка оказывается значительно слабее. Разность силового воздействия и вызывает неравномерность распределения внедрений для различных поверхностей.

Наиболее распространенными дефектами сварных швов, так называемыми макродефектами, являются поры и окисные включения [211]. Они были приняты во внимание при обнаружении дефектов сварного соединения.

В табл. 5.6 представлены результаты рентгеновского просвечивания. Как видно из таблицы, качественные сварные швы, выполненные без отклонений в процессе сварки, получаются даже при выдержке зачищенных образцов в течение 30 суток. Образцы, выдержанные в течение 5 суток, дают качественное сварное соединение при всех запланированных отклонениях в процессе сварки. Эти отклонения начинают сказываться лишь при выдержке 10 суток и более. В этом случае, чем больше срок выдержки, тем больше площадь скопления и размер пор в сварном шве. Возможно, что окисные включения размером  $L_1 = 50$  мкм и  $L_2 = 30$  мкм, обнаруженные после сварки с зазором в 1 мм, образцов, выдержанных 10 суток, – результат применения некачественного ферромагнитного абразивного порошка. (Это единственный случай, зафиксированный протоколом эксперимента, когда вся партия пластин, предназначенных для сварки после 10 суток выдержки, обрабатывалась бывшим в употреблении порошком.) Поэтому можно считать, что расположение кромок с зазором в стыке не сказывается на качестве сварного соединения для всех выбранных сроков выдержки зачищенных образцов.

## Результаты рентгеновского просвечивания сварных швов

Технологические отклонения в процессе сварки	Результаты рентгенконтроля при длительности выдержки образцов до сварки в сутках			
	2	5	10	30
Без отклонений	+	+	+	+
С зазором 1 мм	+	+	Окисные включения $L = 50\text{мм}, L = 30\text{мм}$	+
Смещение электрода 1,5 мм	+	+	Окисные включения с порами $L = 15\text{мм}$	Скопление пор $S = 5 \times 2\text{мм}^2$
Смещение кромок 1 мм	+	+	Скопление пор $S = 2 \times 1\text{мм}^2, S = 1,5 \times 1\text{мм}^2$	Скопление пор $S = 3,2 \times 1\text{мм}^2,$ $S = 3,5 \times 0,81\text{мм}^2$

Примечание: «+» – сварные швы отвечали требованиям по размеру и количеству пор и окисных включений установленным ОСТ 92-1114-80.

В табл. 5.7 представлены результаты механических испытаний сварных швов. Механические характеристики сварных швов оценивались в соответствии с ОСТ 92-1114-80 по пределу прочности на изгиб  $\sigma_b$  и предельному углу изгиба  $\alpha$ . Поверхность излома изучалась под микроскопом с целью обнаружения дефектов (окисных включений). Как видно из таблицы, значения  $\sigma_b$  и  $\alpha$  для образцов без дефектов и с дефектами колеблются в широких пределах. Временное сопротивление изменяется для бездефектных образцов от 25,0 до 35,6 кгс/мм<sup>2</sup> (от 245 до 349 МПа), для образцов с дефектами от 21,0 до 30,0 кгс/мм<sup>2</sup> (от 206 до 294 МПа). Угол изгиба для бездефектных образцов составляет 47°...100°, а для образцов с дефектом – 54°...66°. Наличие дефектов в металле шва снижало прочность до 40%. Этого нельзя сказать об изменении пластичности. При наличии дефекта с площадью 8х1 мм<sup>2</sup>  $\alpha = 66^\circ$ , в то же время для некоторых бездефектных образцов  $\alpha = 47^\circ...56^\circ$ .

Таблица 5.7

Влияние срока выдержки зачищенных магнитно-абразивным способом пластин (толщина 4 мм) и технологических отклонений в процессе сварки на механические свойства сварных соединений

№ п/п	Технологические отклонения в процессе сварки	Механические характеристики швов после выдержки до сварки							
		2 суток				5 суток			
		$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup> без деф.	$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup> с деф.	$S$ , мм <sup>2</sup>	$\alpha^\circ$	$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup> без деф.	$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup> с деф.	$S$ , мм <sup>2</sup>	$\alpha^\circ$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Без отклонений	30,9	–	–	71	32,4	–	–	71
2	С зазором 1 мм	31,2	–	–	77	34,0	–	–	59
3	Смещение электрода 1,5 мм	32,1	23,1	3х1	70	34,8	–	–	65
4	Смещение кромок 1 мм	26,9	24,1	непривар	64	31,8	–	–	69

		10 суток				30 суток			
		$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup> без деф.	$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup> с деф.	$S$ , мм <sup>2</sup>	$\alpha^\circ$	$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup> без деф.	$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup> с деф.	$S$ , мм <sup>2</sup>	$\alpha^\circ$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Сез отклонений	32,0	28,1	2 (2x0,5) (2x0,7) (4x0,5)	68	33,3	21,0	8x1	81
2	С зазором 1 мм	32,2	26,8	3x0,3	57	33,5	–	–	73
3	Смещение электрода 1,5 мм	32,5	–	–	61	34,5	–	–	73
4	Смещение кромок 1 мм	25,5	25,9	2x0,5 2x0,3	67	29,5	30,2	1x1 2,5x1	76

Примечание:  $\sigma_b$  без деф.,  $\sigma_b$  с деф. – предел прочности на изгиб швов без дефектов и с дефектами;  $S$ , мм<sup>2</sup> – площадь дефекта, обнаруженного в изломе;  $\alpha$  – предельный угол изгиба.

Количество образцов, временное сопротивление которых не соответствует установленному значению, составляет 20% от общего количества образцов (96 штук), подвергнутых механическим испытаниям. Снижение значений временного сопротивления имело место главным образом при смещении свариваемых кромок.

Следует отметить некоторое несоответствие между данными рентгеновского просвечивания и испытаниями на излом. Есть случаи, когда рентгеноконтроль характеризует сварной шов как соответствующий требованиям ОСТ, и в то же время в изломе темплетов, вырезанных из этих образцов, обнаружены окисные скопления, способствовавшие снижению механических характеристик шва. На такое расхождение обращено внимание в работе [222]. Авторы отметили, что около 20–30% дефектов по длине рентгенопросвечиванием не выявляются.

На рис. 5.4 представлен характер дефектов в металле шва образцов с различными сроками выдержки на воздухе кромок, зачищенных магнитно-абразивным способом. Максимальные по площади дефекты появляются после 30 суток выдержки зачищенных образцов. Микроструктура сварных швов показана на рис. 5.5. Зависимость микроструктуры шва от разных сроков выдержки зачищенных пластин между моментом зачистки и моментом сварки не обнаружено.

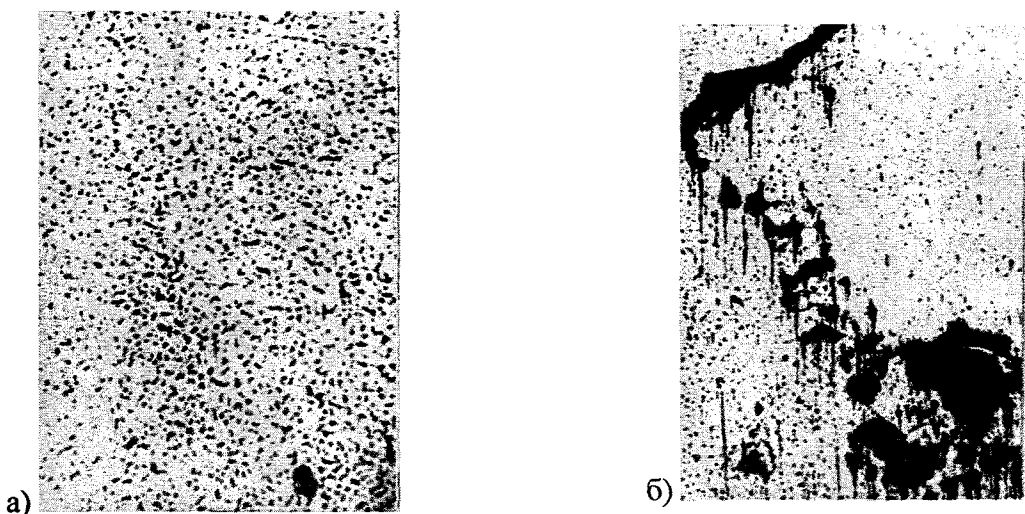


Рис. 5.4. Характер дефектов шва, сваренного после магнитно-абразивной обработки через 2 суток (а) и через 30 суток (б)

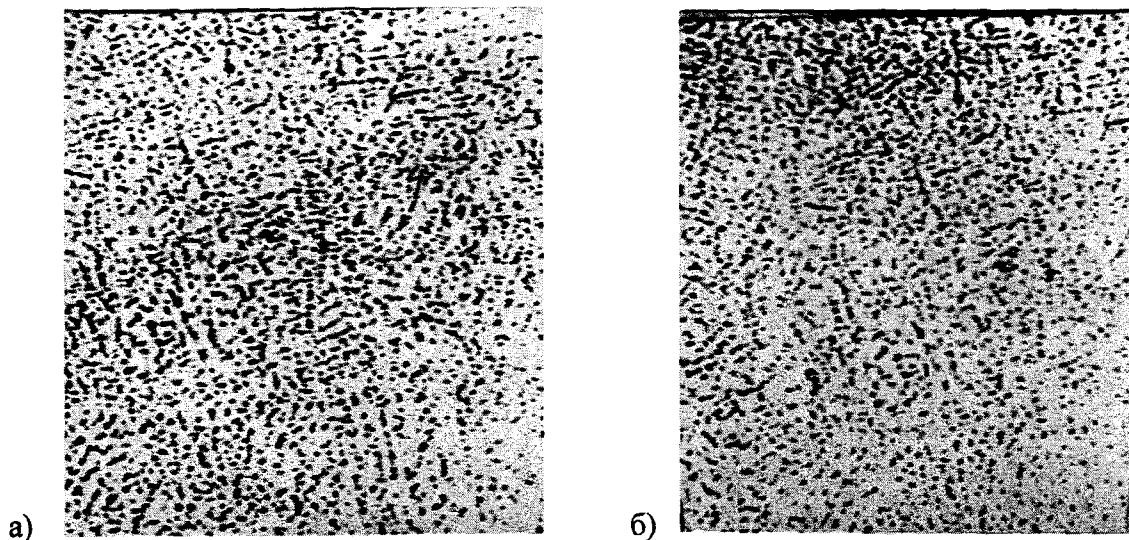


Рис. 5.5. Микроструктура шва (x640), сваренного через 2 суток (а) и через 30 суток (б) после магнитно-абразивной зачистки поверхности от первичной окисной пленки

Таким образом, на основании проведенных экспериментов и оценки качества сварных соединений доказана перспективность применения магнитно-абразивной обработки на операции подготовки под сварку кромки листа из алюминиевого сплава. Качественные сварные швы, удовлетворяющие требованиям ОСТ 92-1114-80, можно получать даже через 30 суток после зачистки в магнитном поле. Определены некоторые качественные и количественные параметры MAO, обеспечивающие желательное состояние подготавливаемой к сварке поверхности. В области качественных факторов лучшие результаты при магнитно-абразивной зачистке кромок изделий из сплава АМг-6 позволяют получить порошки на основе сплава Fe-Al-Si. Применение СОЖ, содержащей триэтаноламин (1%), глицерин (1%), олеиновую кислоту (1%), воду (остальное), а также СОЖ группы «Синма» способствует формированию светлой с равномерным блеском поверхности. Магнитно-абразивная обработка кромок пластин из сплава АМг-6 с производительностью 0,08 м/мин обеспечивает равномерную зачистку поверхностей при следующих режимах: скорость резания – 2,9 м/с, магнитная индукция в зазоре – 0,5 Тл, величина (на сторону) рабочего зазора – 1,5 мм, зернистость ФАП – 315...100 мкм.

Однако определить технологические режимы магнитно-абразивной зачистки, обеспечивающие во всех отношениях требуемое качество сварного соединения, как и надо было предполагать, сразу не удалось. Если данные рентгенконтроля можно считать в известной степени обнадеживающими, то результаты механических испытаний настораживают. Была выявлена часть образцов, причем сварка их осуществлена без технологических отклонений, у которых прочность и пластические свойства ниже принятых условий. На поверхности излома таких образцов обнаружены различные по площади окисные включения, не зафиксированные, однако, рентгеновским просвечиванием.

Появление окисных включений во всех случаях может быть обусловлено:

- 1) вторичной окисной пленкой, появившейся после недопустимого срока выдержки зачищенных образцов до момента сварки;
- 2) гидратной окисной пленкой, возникающей при промывке обработанных образцов в воде;
- 3) отклонениями от нормального процесса сварки.

Магнитно-абразивная зачистка свариваемых кромок по данной схеме позволяет удалить с боковой поверхности слой металла толщиной 1...4 мкм, с торца кромки – около 10...15 мкм. Обе величины гарантируют полное удаление слоя окислов. По этой причине обнаруженные окисные включения не могли быть связаны с неполной очисткой поверхности от первичной окисной пленки.

Основной интерес представляет установление причин появления вторичной окисной пленки на образцах, обработанных магнитно-абразивным способом. При этом остается невыясненным влияние различных технологических факторов МАЗ на интенсивность этого процесса. Известно лишь, что чем меньше давление ФАП на обрабатываемую поверхность, тем меньше энергетический уровень поверхностных слоев, что соответствует замедленному росту окисных пленок [213].

Что касается появления пор (см. табл. 5.7) в отдельных образцах, то его можно объяснить образованием вторичной окисной пленки. Механизм такого влияния известен из литературы [215, 218]. Поверхность образцов из сплава системы Al-Mg-Mn покрыта сложной окисной пленкой, включающей наряду с окислами Al ( $Al_2O_3$ ) и окислы Mg (MgO). Такая пленка характеризуется пористостью (рыхлостью), что обуславливает ее способность удерживать большое количество не реагирующей с основным металлом влаги. Попадая в сварочную ванну, частицы такой пленки заносит с собой и влагу, которая под действием высокой температуры дуги диссоциирует, образуя атомарный водород. Не вышедший из сварочной ванны в атмосферу водород скапливается в металле шва, образуя пузыри (поры). Поверхность начинает покрываться слоем окислов сразу после зачистки. После 10 суток выдержки обработанных образцов на воздухе толщина выросшей пленки становится такой, что при определенных отклонениях в процессе сварки она частично сохраняется и попадает в сварочную ванну, становясь источником вредных включений. При сварке без отклонений окисная пленка даже после 30 суток выдержки легко удаляется действием флюсов и сварочной дуги.

Сказанное выше еще раз подчеркивает необходимость исследования процессов, связанных с образованием вторичной окисной пленки.

В результате проведенных экспериментов было замечено подтверждающее известные данные снижение механических свойств при увеличении площади дефектов (окисных включений) в металле швов (изломе образцов). Следует отметить, что на изменение механических свойств сварных соединений внедренные остатки абразива не влияют. Отрицательная сущность внедрений может проявиться на коррозионной стойкости шва. В этом случае внедрения могут стать очагами начала межкристаллитной коррозии, что ускорит процесс окисления всего сварного шва. В этой связи возрастает необходимость определения условий формирования поверхности без внедрений. Общей характеристикой искомых условий является обеспечение минимального давления ферромагнитного абразивного порошка на обрабатываемую поверхность. Нижняя граница этого давления устанавливается из условий полного удаления первичной окисной пленки.

Из проведенного анализа вытекают цели дальнейших исследований: во-первых, получение механически чистой (без внедрений) поверхности; во-вторых, установление причин появления вторичной окисной пленки.

#### **5.4. Создание оборудования**

Приведенный выше анализ схем обработки, а также поисковые исследования выполнены применительно к плоским поверхностям. Однако большинство деталей-элементов корпусных конструкций летательных аппаратов имеют радиус кривизны в пределах 0,3...1,75 м. Поэтому необходимо проанализировать возможное влияние радиуса кривизны на формирование характеристик качества обработанных поверхностей.

Наличие кривизны приводит к тому, что кромка изделия, помещенная между полусными наконечниками, образующими плоскопараллельный рабочий зазор, на разных участках будет испытывать неодинаковый характер воздействия ферромагнитно-абразивного порошка. Для более детального анализа рассмотрим схему, изображенную на рис. 5.6. Как видно, в точках 1 и 5 по наружному и в точке 4 по внутреннему диаметру изделия зазор имеет максимальное значение, соответственно в точках 2, 3, 6 – минимальное.



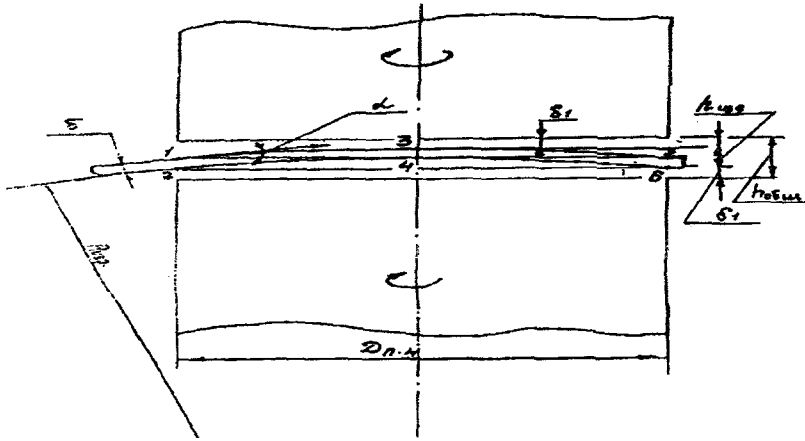


Рис. 5.6. Схема магнитно-абразивной обработки криволинейных поверхностей

Соответственно будет изменяться и угол касательной  $\alpha$ , определяющий направление действия ферромагнитно-абразивного порошка на поверхность изделия.

Рассчитаем общую высоту рабочей зоны полюсных наконечников диаметром  $D_{п.н.}$  для изделия радиусом  $R_{изд.}$

Высота дуги изделия в пределах диаметра полюсных наконечников без учета толщины стенки изделия составит:

$$h_{изд} = R_{изд} - \sqrt{R_{изд}^2 - \frac{D_{п.н.}^2}{4}},$$

с учетом толщины стенки изделия  $\delta$ :

$$h_{изд} = R_{изд} - \sqrt{R_{изд}^2 - \frac{D_{п.н.}^2}{4}} + \delta.$$

Задаваясь величиной рабочего зазора  $\delta_1$ , т.е. минимальным расстоянием между торцом полюсного наконечника и обрабатываемой поверхностью, можем определить общую величину рабочей зоны

$$h_{общ} = 2\delta_1 + h_{изд},$$

подставляя значение  $h_{изд}$ , получим следующее:

$$h_{общ} = R_{изд} - \sqrt{R_{изд}^2 - \frac{D_{п.н.}^2}{4}} + \delta + 2\delta_1.$$

Например, при диаметре изделия, равном 600 мм, толщина стенки изделия 4 мм, диаметре полюсного наконечника 100 мм, рабочем зазоре  $\delta_1 = 2$  мм общая высота зоны составит 12,2 мм.

Теперь рассчитаем угол контакта ферромагнитно-абразивной щетки с обрабатываемой поверхностью. Как видно из рис. 5.6 в точках 3, 4, т.е. в центре изделия, касательная параллельна рабочей поверхности полюсных наконечников. В этих точках условия резания наиболее благоприятные. Наибольшее значение угла  $\alpha$  будет по краям полюсных наконечников в точках 1, 2 и 5, 6, где возможна вероятность шаржирования поверхности изделия ферроабразивными частицами.

В общем случае максимальное значение угла  $\alpha$  можно рассчитать по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{D_{\text{п.н.}}}{2\sqrt{R_{\text{изд}}^2 - \frac{D_{\text{п.н.}}^2}{4}}}. \quad (5.1)$$

Так, для наиболее неблагоприятного случая, т.е. минимального диаметра изделия (600 мм), значение угла  $\alpha$  составит  $9^\circ$ .

Однако следует заметить, что рассматриваемая схема справедлива для случая, когда кромка изделия заводится в рабочую зону на глубину  $D_{\text{п.н.}}/2$ ; в реальных условиях, согласно техническим требованиям, эта глубина составляет 12...15 мм, что равно  $(0,12...0,15) D_{\text{п.н.}}$ . Соответственно уменьшается и максимальная величина угла  $\alpha$ . Как показывают расчеты, его значение для вышеприведенных условий составляет  $3^\circ \dots 4^\circ$ .

Анализ формулы (5.1) показывает, что для избежания условий, способствующих шаржированию поверхностного слоя, необходимо по возможности уменьшить диаметр полюсных наконечников. По мере возрастания диаметра обрабатываемого изделия возможность шаржирования также снижается.

С учетом многочисленных экспериментов на макете М398 и на основании расчетов параметров рабочей зоны при МАЗ кромок цилиндрических обечаек разработана конструкторская документация и изготовлен ряд экспериментальных образцов установок модели М377.01. Схематически общий вид установки и ее узлы представлены на рис. 5.7 [221].

Установка состоит из устройства 1 с приспособлением для закрепления изделия и привода подачи (не показаны) с закрепленным на нем обрабатываемым изделием 2, и станины 3 на кронштейне 4 каретки 5, на которой закреплены штанги 6, на которых с возможностью свободного перемещения установлена обрабатывающая головка 7 и две пружины 8, обеспечивающие постоянный прижим опорного ролика 9 к обрабатываемой поверхности изделия 2.

Обрабатывающая головка 7 выполнена из корпусов 10 и 13, в которых расположены электромагнитные катушки 17 и 24, несущие сердечники 18 и 25, соединенные между собой стержнем 14 из магнитного материала. Стержень 14 жестко закреплен в сердечнике 25 и свободно входит в отверстие сердечника 18. При этом он снабжен пазом, охватывающим штифт 30, установленный в сердечнике 18, посредством которого передается вращение от сердечника 18 сердечнику 25. Сердечники 18 и 25 снабжены сменными полюсными наконечниками 19 и 26. Катушки 17 и 24 соединены между собой магнитопроводом, состоящим из плит 28 и 29, гильзы 15, несущей гайки 16, и скалки 21, несущей винт 22 с маховичком 23. К плите 28 прикреплен кронштейн 31, на котором смонтирован электродвигатель 11, приводящий во вращение сердечник 18. Сердечник 18 снабжен осевым отверстием, а стержень 14 осевым и четырьмя радиальными отверстиями, служащими для подвода СОЖ непосредственно в зону обработки от муфты 20, установленной с возможностью вращения на сердечнике 18. На корпусе 10 катушки 17 смонтирован второй опорный ролик 12. Причем оси вращения роликов 9 и 12 перпендикулярны оси вращения сердечников 18 и 25, а их рабочие поверхности выступают над торцовыми поверхностями полюсных наконечников на величину зазора  $\delta$ , что обеспечивает его постоянство независимо от конфигурации и точности обрабатываемого изделия. В штангах 6 смонтированы регулируемые упоры 27, причем расстояние  $\Delta$  от касательной к рабочим поверхностям упоров 27 до оси сердечников 18 и 25 должно находиться в пределах

$$\Delta = (0,86 \dots 0,95) R,$$

где  $R$  – радиус полюсных наконечников.

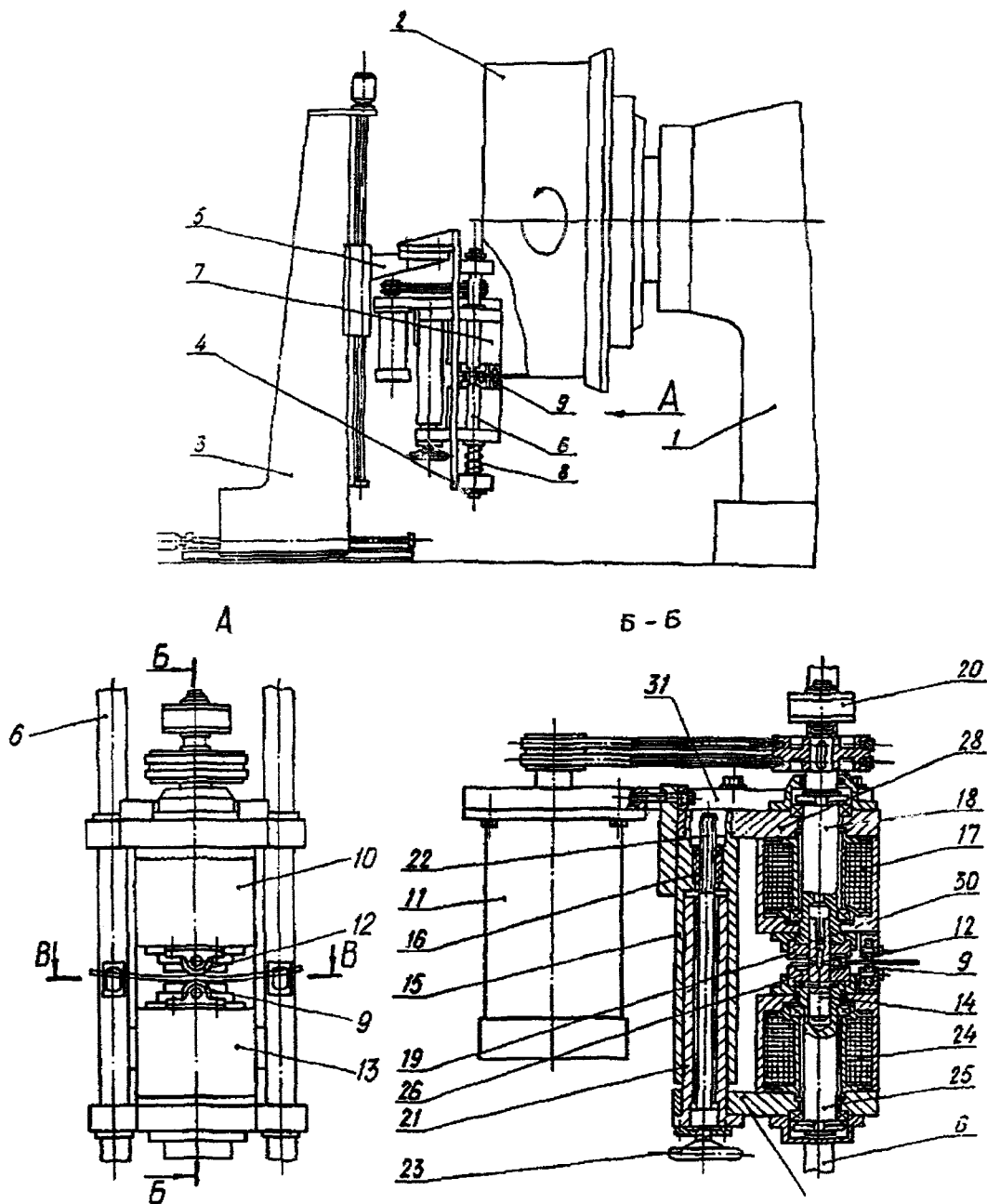


Рис. 5.7. Конструкция установки М377.01 для магнитно-абразивной зачистки кромок

Такое расположение упоров позволяет размещать торцовую поверхность обрабатываемой кромки в зоне с лучшими режущими свойствами рабочей щетки, сформированной из ферроабразивного порошка между торцами полюсных наконечников, и позволяет получать номинальную, необходимую для последующей сварки, ширину обработки боковых поверхностей кромки с обеспечением величины шероховатости торца кромки, идентичной величине шероховатости ее боковых поверхностей. Испытания показали, что при расположении кромки на расстоянии меньшем, чем  $0,86R$ , ширина обработки боковых поверхностей больше номинальной, а величина шероховатости торца кромки на порядок или два выше шероховатости боковых поверхностей. При расположении торца на расстоянии большем, чем  $0,95R$ , величина шероховатости торца меньше чем на боковых поверхностях, но ширина обработки получается меньше номинальной, что приводит к браку при сварке.

Установка работает следующим образом.

В приспособлении устройства 1 закрепляют обрабатываемое изделие 2. Маховиком 23 разводят катушки 17 и 26 полировальной головки 7 на расстояние между торцами по-

люсных наконечников 18 и 25 значительно большее, чем толщина обрабатываемого изделия 2. Подводят станину 3 до контакта упоров 27 с торцом кромки изделия 2 и сводят катушки 17 и 24 до контакта опорных роликов 9 и 12 с боковыми поверхностями обрабатываемой кромки. На полусные наконечники 19 и 26 подается ферроабразивный порошок, а на электромагнитные катушки 17 и 24 – питание. Включается подача СОЖ, движение подачи изделия и вращение полюсных наконечников.

На установке М377.01 произведена зачистка кромок оболочки из сплава АМг-6 диаметром 2,0 м с толщиной стенки 5 мм, имеющих радиальное биение 4 мм и некруглость 5 мм.

Округлость оболочки была разбита на пять участков, которые обрабатывались в пяти положениях, отличающихся расстоянием торца кромки до оси вращения полюсных наконечников. Обработка производилась при следующих, одинаковых для всех случаев, условиях:

Скорость резания, м/мин	120
Диаметр полюсных наконечников, мм	100
Скорость подачи, мм/мин	300
Магнитная индукции, Тл	1,5
Боковой зазор, мм	1,0
Ферроабразивный порошок Fe-Al-Si-P, зернистость	200/100 мкм
Смазочно-охлаждающая жидкость	водный раствор "Синма-2"(20%)
Исходная шероховатость, мкм	2,5

Оптимальная ширина обработки боковых поверхностей кромки 10...15 мм.

Данные испытаний сведены в табл. 5.8. Как видно из таблицы, при положении торца на расстоянии меньшем указанного предела, шероховатость торца выше шероховатости боковых поверхностей, а при расстоянии большем – ширина обработки боковых поверхностей меньше оптимальной. В том и другом случае пробная сварка показала брак.

Таблица 5.8

Результаты МАЗ кромок обечайки диаметром 2 метра

№ опыта	Положение торца кромки	Результаты обработки			Результаты пробной сварки
		ширина, мм	Ra, мкм		
			На торце	на боковой поверхности	
1	0,77R	25	1,0	0,06	Точечные дефекты в виде пор
2	0,86R	16	0,07	0,06	Без дефектов
3	0,92R	14	0,06	0,06	Без дефектов
4	0,95R	12	0,06	0,06	без дефектов
5	1,0R	8	0,05	0,06	Точечные дефекты в виде пор

Предложен и реализован в конструкции экспериментального образца установки М377.05 вариант устройства для МАЗ кромок [222]. На рис. 5.8 схематически представлены общий вид и основные узлы устройства.

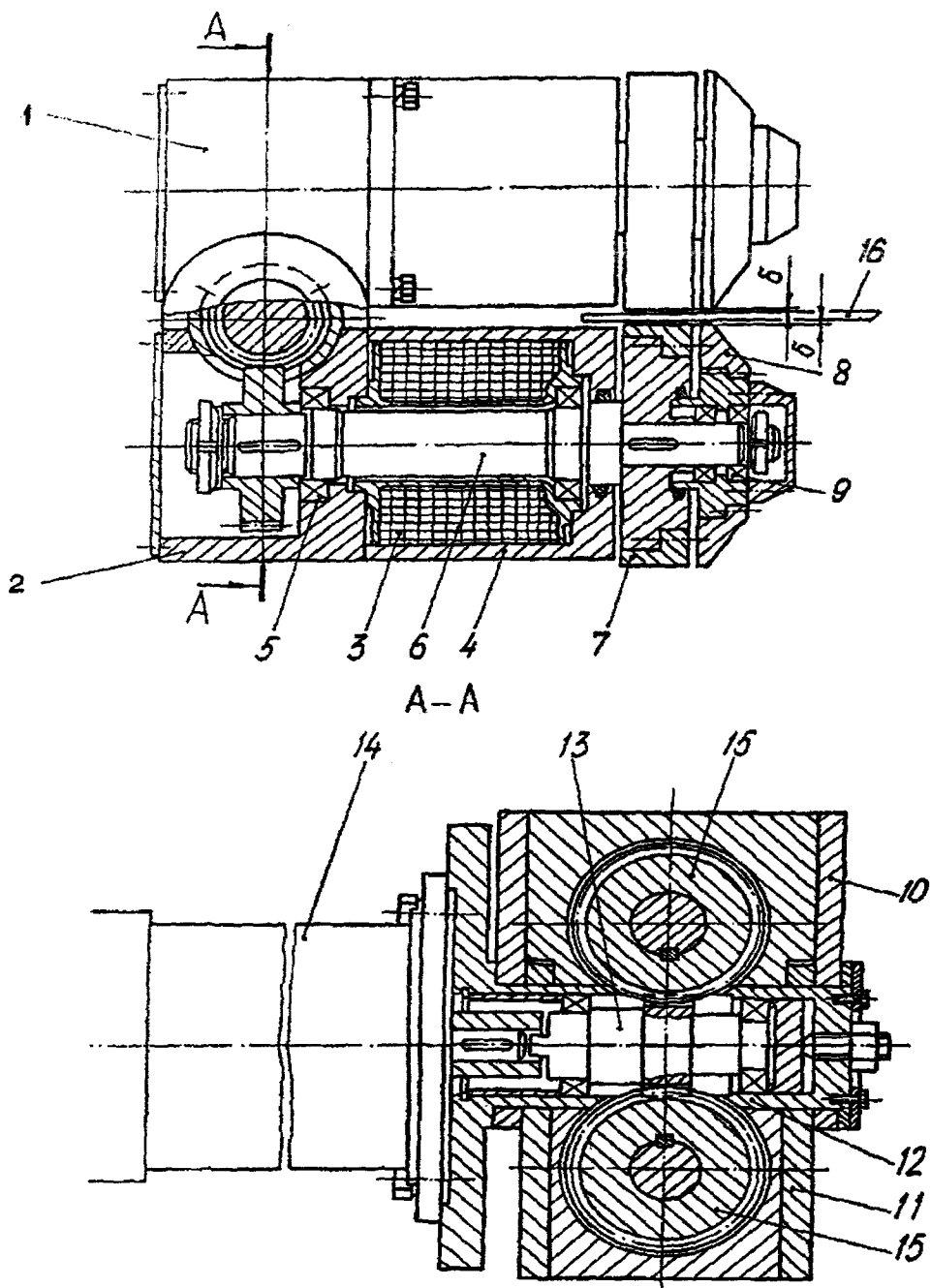


Рис. 5.8. Конструкция устройства М377.05 для магнитно-абразивной зачистки кромок

Устройство состоит из магнитопровода, выполненного из блоков 1 и 2, несущего электромагнитные катушки 3, защищенные кожухами 4. В катушках 3 на подшипниках 5 установлены сердечники 6, несущие сменные полюсные наконечники 7, выполненные в виде валков. Концы полюсных наконечников 7 снабжены опорными роликами 8, установленными на подшипниках 9. Блоки 1 и 2 посредством щек 10 и 11, шарнира 12 соединены между собой подвижно. Это шарнирное соединение позволяет изменить расстояние между полюсными наконечниками 7 за счет проворота блоков 1 и 2 с электромагнитными катушками 3 и сердечниками 6 вокруг оси шарнира 12 и обеспечивает постоянную беззазорную связь блоков 1 и 2 между собой, что предотвращает потери магнитной индукции и упрощает конструкцию магнитопровода. Внутри шарнира 12 установлен ведущий элемент 13 раздаточного механизма, связанный с электродвигателем 14, а на сердечниках 6 установлены ведомые элементы 15, имеющие возможность обкатывания без разрыва потоков мощности вокруг ведущего элемента 13 при изменении расстояния между полюс-

ными наконечниками 7. На рис. 5.8 показан вариант устройства, у которого раздаточный механизм выполнен в виде цилиндрической винтовой зубчатой передачи, т.е. ведущий элемент 13 и ведомые элементы 15 выполнены в виде цилиндрических винтовых зубчатых колес [223].

Возможен вариант устройства, у которого ведущий элемент 13 будет выполнен в виде несамотормозящего, например, многозаходного червяка, а ведомые элементы 15 в виде червячных колес.

Устройство работает следующим образом. Между полюсными наконечниками 7 помещают обрабатываемое изделие 16, которому сообщают движение подачи (прямолинейное, если лист, и вращательное, если тонкостенная оболочка из листового материала, например, цилиндрическая, коническая или овальная обечайка). К электромагнитным катушкам 3 подается питание, сердечники 6 приводятся во вращение, а на полюсные наконечники 7 подается ферромагнитный порошок, который уплотняется в рабочих зазорах  $\delta$  создавая обрабатывающую щетку. Электромагнитные катушки 3 соединены электрически таким образом, что полюсные наконечники 7 имеют противоположную полярность, поэтому при подаче напряжения на катушки 3 полюсные наконечники 7 притягиваются друг к другу и обжимают обрабатываемое изделие 16 опорными роликами 8. Постоянство рабочего зазора  $\delta$  обеспечивается разностью в диаметрах наконечников полюсных и опорных роликов, а колебания в толщине обрабатываемого изделия автоматически выбираются за счет притяжения полюсных наконечников 7 друг к другу.

Консольное расположение полюсных наконечников позволяет проводить обработку не только листов, но и различных изделий из листового материала, а наличие опорных роликов обеспечивает автоматическую настройку устройства на толщину обрабатываемого изделия и автоматическое слежение за колебанием толщины в процессе обработки.

Лабораторные испытания предлагаемого устройства дали положительные результаты при обработке листов, и особенно, при подготовке кромок под сварку цилиндров большого диаметра из листов сплава АМг-6, имеющих местные утолщения в виде сварных швов с направлением, перпендикулярным направлению вращения.

Обработке подвергается цилиндр  $D = 2000$  мм, сваренный из листа толщиной 5 мм сплава АМг-6 при скорости резания  $V = 2$  м/с, величине магнитной индукции  $B_{\max} = 1,5$  Тл, с величиной подачи 400 мм/мин, ферромагнитным порошком Fe-Si-Al-P зернистостью 200/100 мкм с применением 20%-го водного раствора "Синма-2" в качестве СОЖ. Обработывались полосы шириной 25 мм по контуру внутренней и наружной поверхностей цилиндра на расстоянии 50 мм от торца. Цилиндр имел сварной шов вдоль образующей шириной до 10 мм и высотой над образующей до 1 мм на наружной поверхности цилиндра под приварку ребер жесткости. На всей поверхности  $Ra = 0,1$  мкм.

Эксперименты показали, что устройство с полюсными наконечниками в виде валков недостаточно эффективно зачищает торцовую поверхность кромок. Резервы повышения качества обработки следует искать, прежде всего, в оптимизации геометрических параметров наконечников. Целесообразно использование такого типа устройств для зачистки перед сваркой участков поверхности, отстоящих на некотором расстоянии от края листа.

С учетом номенклатуры подлежащих зачистке и сварке элементов корпусных конструкций создан экспериментальный образец установки модели СФТ2.107 для МАЗ кромок (по боковым сторонам и торцу) плоских листов толщиной 2...22 мм из конструкционных сплавов на основе алюминия, титана и др. [224]. Конструкция установки СФТ2.107 близка конструкции устройства М377.01, однако имеет более мощную электромагнитную систему, поскольку должна обеспечить эффективную зачистку кромок в межполюсном пространстве длиной до 28 мм.

Основные технические данные установки СФТ2.107:

частота вращения полюсов, $\text{с}^{-1}$	15,8
мощность электродвигателя, кВт	0,37
число электромагнитных катушек, шт.	1

максимальная сила тока, А

1,5

магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл

0,2...0,9

Выполненные расчеты параметров электромагнитной системы использованы при проектировании установки. Для определения технологических возможностей процесса МАЗ необходимо установить зависимость величины магнитной индукции в рабочем пространстве от расстояния между полюсами и силы тока в катушке электромагнита. Схема измерения магнитной индукции в зоне обработки установки СФТ2.107 представлена на рис. 5.9.

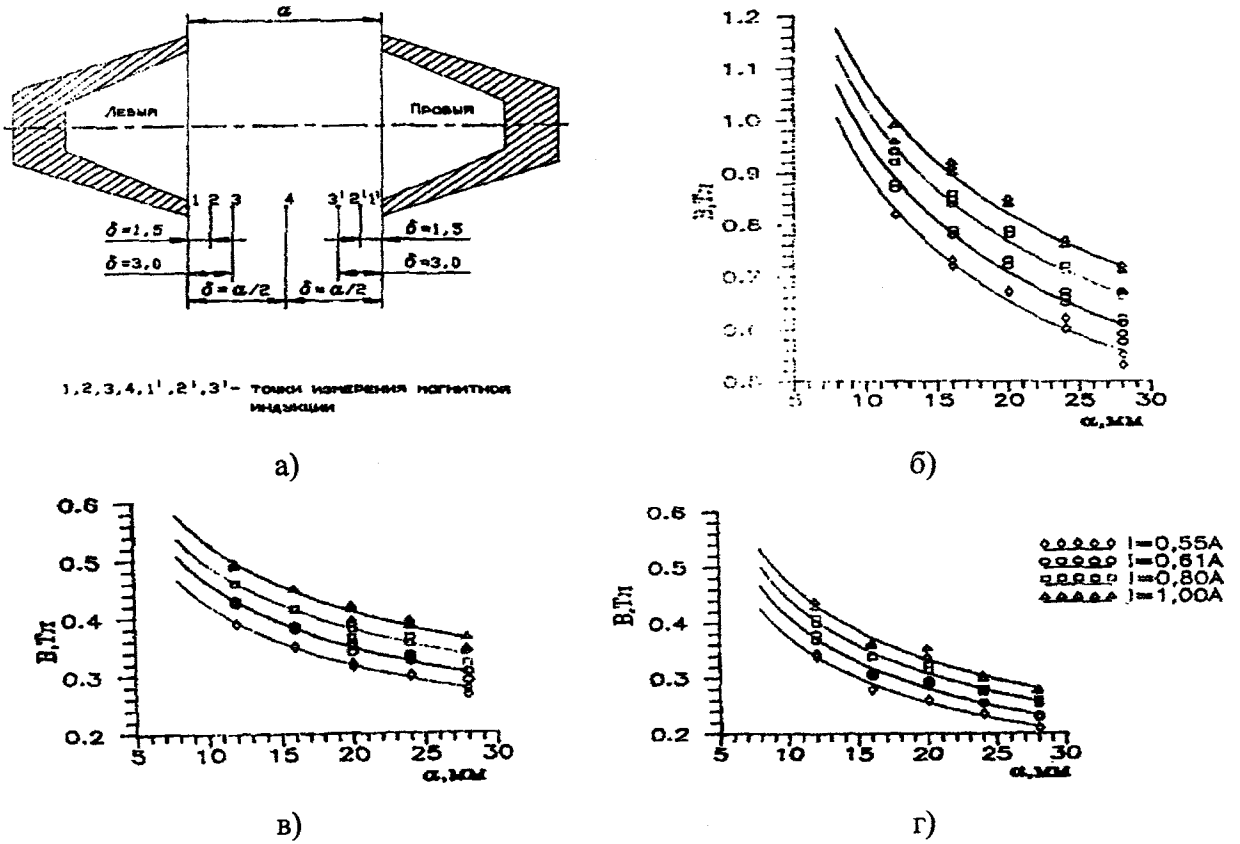


Рис. 5.9. Схема измерения (а) и величина магнитной индукции  $B$  в точках 1 (б), 2 (в) и 3 (г) межполюсного пространства шириной  $\alpha$  (СФТ 2.107)

На рис. 5.9 приведены графики зависимости величины индукции от расстояния до рабочей поверхности полюсного наконечника при значениях тока в электромагнитной катушке  $J = 0,55 \dots 1,0$  А. Расчеты и измерения показывают, что величина магнитного потока достаточна для зачистки кромок толщиной до 25 мм.

#### 5.4.1. Создание опытно-промышленного образца установки для МАЗ кромок деталей

Процесс магнитно-абразивной зачистки кромок изделий может быть реализован, как правило, на специальном оборудовании. Ранее проведены работы по созданию макетного М398 и экспериментального М377.01 образцов [225, 226]. Впоследствии был спроектирован и изготовлен опытно-промышленный образец установки СФТ2.126. Ее общий вид представлен на рис. 5.10 [227].

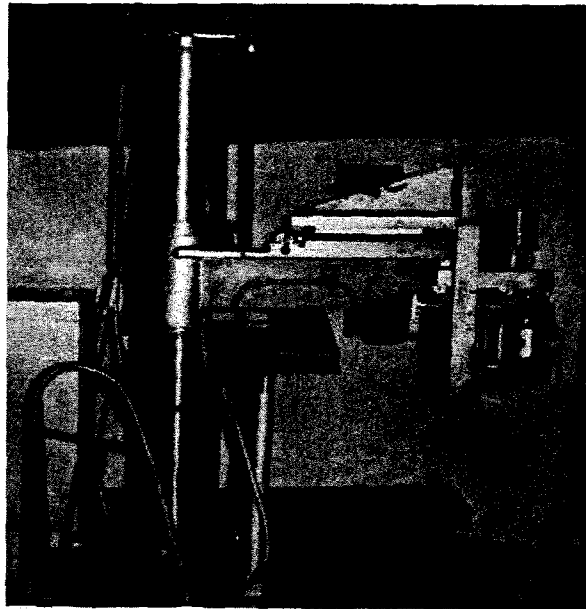


Рис. 5.10. Общий вид опытно-промышленного образца установки модели СФТ2.126 для магнитно-абразивной зачистки кромок деталей

Установка СФТ2.126 предназначена для механизированной магнитно-абразивной зачистки свариваемых кромок (по боковым сторонам и торцу) на деталях корпусных конструкций диаметром 1000...4000 мм с толщиной стенки 2...10 мм из конструкционных материалов (сплавов на основе алюминия, титана, железа и др.). Исполнение рабочего модуля СФТ2.126 подобно устройству М377.01. Уточнены и видоизменены отдельные технические решения узлов и механизмов с учетом результатов экспериментов и эксплуатации устройства [25]. Установка снабжена рычажно-грузовым и пружинным механизмами центрирования обрабатываемой кромки при наличии ее радиального биения и погрешностей геометрической формы и базирования.

Технические характеристики установки СФТ2.126:

частота вращения сердечников, $c^{-1}$	11,5; 14,5; 18,5
мощность электродвигателя, кВт	0,75
число катушек, шт.	2
максимальная сила тока, А	6
магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл	0,4...1,0
способ уравнивания головки	рычажно-грузовой с пружинным центрированием
габаритные размеры, мм	2200x1450x2645
напряжение электрической питающей сети, В	380/220

Рабочий модуль СФТ2.126 установлен на горизонтальном столе, имеющем наладочные перемещения вдоль и вокруг оси вертикальной колонны в виде цилиндрической трубы. Колонна с модулем размещена на тележке, предназначенной для перемещения установки и ее фиксации в рабочем положении. Крепление и движение подачи детали в процессе зачистки осуществляются устройствами-манипуляторами, не входящими в состав установки СФТ2.126. Такие манипуляторы, как универсальное технологическое оборудование, используются на предприятиях при сварке деталей и узлов.

Выполнены измерения магнитной индукции в рабочей зоне установки СФТ2.126 по схеме, представленной на рис. 5.9, а. Расчеты и измерения подтверждают обеспечение магнитной индукции  $B = 0,25...1,0$  Тл в межполюсном пространстве длиной до 25 мм.

Опытный образец установки для зачистки кромок изделий СФТ2.126 прошел межведомственные испытания и рекомендован приемочной комиссией для постановки на производство.



## 5.5. Освоение технологии магнитно-абразивной зачистки кромок деталей

Ранее при исследовании эффективности применения магнитно-абразивной обработки на операции зачистки кромок изделий из сплава АМг-6 под сварку обнаружено явление микрошаржирования [228], при котором размер внедрившихся частиц ферромагнитного абразивного порошке (ФАП) не превышал 5 мкм. Проведенные исследования позволили установить, что микрошаржирование не влияет на механические свойства шва и его микроструктуру.

Эксплуатация сварных соединений в экстремальных условиях обуславливает более высокие требования к их коррозионной стойкости. В этой связи проведены коррозионные испытания зачищенных кромок и сварных швов. Методика их включила [227]:

1) магнитно-абразивную зачистку (МАЗ) 4 партий пластин (всего 64 шт.) размером 300x100x2 мм и 4 партий пластин (всего 16 шт.) размером 100x50x2 мм. Режимы МАЗ приведены в табл. 5.9;

2) автоматическую аргодуговую сварку встык пары образцов. Режимы сварки:  $V = 18$  м/ч;  $I = 140$  А; присадочная проволока СвАМг-6 (ГОСТ 7871-75) диаметром 2 мм;

3) испытания зачищенных кромок и сварных швов на общую коррозионную стойкость (по ГОСТ 9.017-74). Испытания проводили в условиях временного погружения в 3%-й водный раствор NaCl в течение 90 суток. Коррозионные свойства зачищенных кромок оценивали по внешнему виду, сварных швов – по внешнему виду, потерям прочностных свойств и результатам металлографического анализа;

4) испытания сварных швов на межкристаллитную коррозию (по ГОСТ 9.021-74). Склонность к межкристаллитной коррозии оценивали металлографически на шлифах, вырезанных из сварного шва после выдержки его в течение 24 часов в растворе 3% NaCl + 10 мл HCl (удельный вес 1,19);

5) испытания сварных швов на склонность к коррозионному растрескиванию. Испытания проводили в условиях полного погружения в 3%-й водный раствор NaCl. Напряжения, создаваемые методом постоянной растягивающей нагрузки, составляли 15 кгс/мм<sup>2</sup>. Склонность к коррозионному растрескиванию определяли по средней продолжительности испытаний до растрескивания. При отсутствии растрескивания в течение 45 суток испытания прекращали, после чего определяли снижение прочностных свойств сварного соединения и металлографическим путем устанавливали характер коррозии по ГОСТ 9.019-74.

Таблица 5.9

Режимы МАЗ кромок пластин из сплава АМг-6 толщиной 2 мм

№ режимов	V, Гл	S, мм/мин	ФАП	
			Фракция, мкм	Наименование, тип
1	0,80	205	630/315	17В Al-8%, Si-2,5% P-0,4%, Fe-осн
2	0,75	125	630/315	10С Al-8%, Si-5% Fe-осн
3	0,85	165	315/100	СЧ
4	0,85	165	630/315	ЭФ

Примечание: постоянные параметры МАЗ: зазор на сторону – 2,5 мм;  $V_{рез} = 2,9$  м/с; доза ФАП – 75 см<sup>3</sup>, число проходов – 1; СОЖ – водный раствор триэаноламина (1%), олеиновой кислоты (1%) и лапрола 3003 (1%).

Как показали коррозионные испытания зачищенных кромок, на обработанной поверхности образцов наблюдается коррозия (рис. 5.11) в виде отдельных точек, язв, ямок травления и микротрещин (рис. 5.12). Коррозия имеет межкристаллитный характер (рис. 5.13). Боковая поверхность и торец покрыты окисной пленкой и продуктами коррозии.

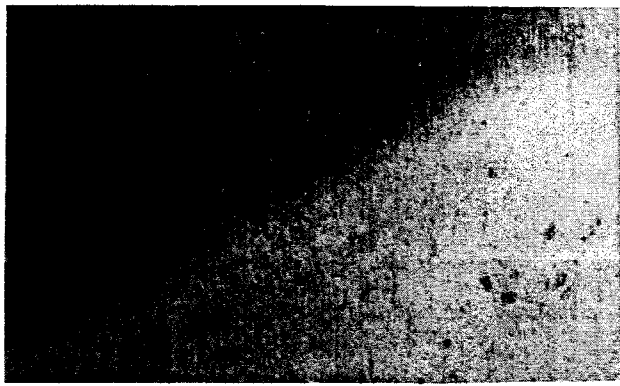


Рис. 5.11. Характер коррозии на зачищенных образцах после снятия продуктов коррозии

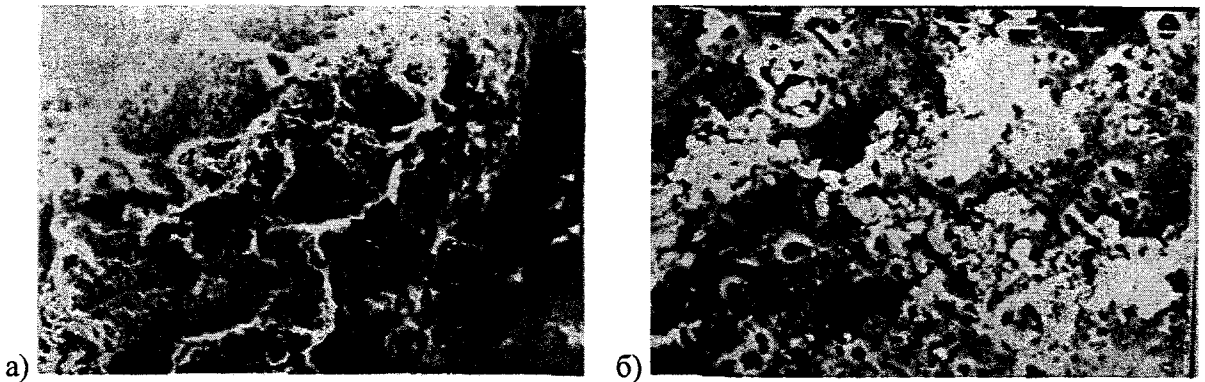


Рис. 5.12. Результаты испытаний зачищенных кромок на общую коррозию:  
*а* – коррозионное поражение в виде пятна; *б* – боковая поверхность после испытаний

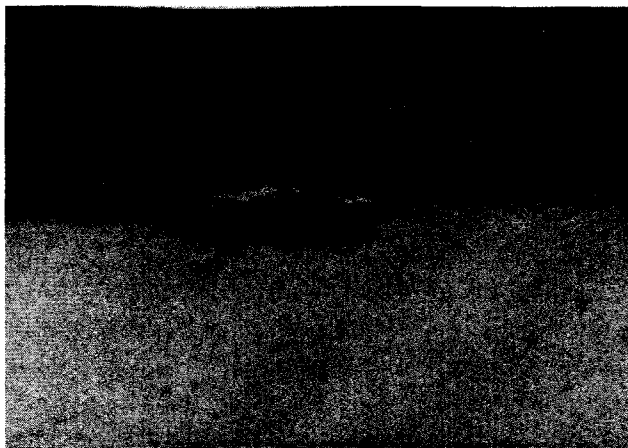


Рис. 5.13. Результаты испытаний зачищенных кромок на межкристаллитную коррозию

В табл. 5.10 и 5.11 приведены результаты коррозионных испытаний сварных соединений. Средние значения этих результатов сравниваются с обработкой кромки шабренем (табл. 5.12).

После испытаний сварных соединений на общую коррозию (табл. 5.10) поверхность образцов светло-серого цвета, матовая, без существенных коррозионных поражений (незначительная коррозия и потемнение поверхности вдоль линии сплава со стороны проплава на ширину 2...8 мм). Потери прочностных свойств колеблются для разных режимов в диапазоне от 0 до 12,6%. Результаты металлографических исследований после коррозионных испытаний показывают, что величина растрова находится в пределах 0,035...0,21 мм.

Исследования на склонность к межкристаллитной коррозии показали (см. табл. 5.10), что все сварные соединения, выполненные после разных режимов МАЗ склонны к межкристаллитной коррозии. Во всех швах обнаружен растрав, глубина которого колеблется от 1,14 до 1,24 мм. Существенного влияния реализованных режимов МАЗ на склонность к межкристаллитной коррозии не наблюдается.

Таблица 5.10

Общая коррозионная стойкость и склонность к межкристаллитной коррозии сварных соединений с МАЗ кромок на режимах табл. 5.9

№ режима	Общая коррозионная стойкость				Результаты металлографических исследований после коррозионных испытаний	Склонность к межкристаллитной коррозии
	внешний вид после испытаний	до испытаний	после испытаний	потери		
		$\sigma_{в}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{в}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\Delta\sigma_{в}$ , %		
1	Поверхность образцов светло-серого цвета, матовая со стороны усиления	35,7	31,2	12,6	Растрав по зоне сплавления и проплава до 0,035...0,084 мм	Растрав по зоне сплавления и проплава глубиной до 0,14 мм, в сварном шве – до 0,09 мм
2	Вдоль линии сплавления полоса темно-серого цвета, шириной 2-8 мм	36,4	35,8	1,6	Растрав по зоне сплавления и проплава до 0,21 мм	Растрав по зоне сплавления со стороны усиления и проплава до 0,21 мм
3	Со стороны проплава незначительная коррозия вдоль линии сплава	36,5	33,9	7,1	Растрав по зоне сплавления и проплава до 0,1 мм	Растрав в зоне сплавления со стороны усиления и проплава до 0,14 мм
4	Со стороны проплава незначительная коррозия вдоль линии сплава	35,8	36,9	–	–	Растрав по зоне сплавления со стороны усиления и проплава до 0,245 мм

Результаты исследований склонности к коррозионному растрескиванию сварных соединений приведены в табл. 5.11. Большинство образцов, зачищенных на разных режимах, не испытали растрескивания в течение более 45 суток. Прочностные свойства сварных соединений после испытаний уменьшились на 23...48%. Следует отметить, что независимо от метода подготовки свариваемых кромок разрушение контрольных образцов при механических испытаниях происходило по основному металлу, а после коррозионных испытаний – по зоне сплавления.

Результаты исследования склонности к коррозионному растрескиванию сварных соединений с МАЗ кромок на режимах табл. 5.9

№ режима	Продолжительность испытаний до растрескивания, сутки	Механические свойства		
		без испытаний $\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	после испытаний $\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	потери $\Delta\sigma_B$ , %
1	45, 45, 45↑, 45↑, 45↑	35,6	24,6	30,0
2	33, 45↑, 45↑, 45↑, 45↑	36,3	26,7	26,0
3	20, 45↑, 45↑, 45↑, 45↑	37,2	19,0	48,0
4	45↑, 45↑, 45↑, 45↑, 45↑	36,9	28,4	23,0

Сравнение коррозионной стойкости образцов, зачищенных магнитно-абразивным способом и шабрением, показало, что характерной особенностью образцов с магнитно-абразивной зачисткой кромок являлась склонность их к межкристаллитной коррозии. В то же время потери прочности сварного шва после МАЗ почти в 2 раза меньше, чем после шабрения (табл. 5.12).

Таблица 5.12

Коррозионные свойства сварных соединений при очистке свариваемых кромок магнитно-абразивным способом и шабрением

Вид испытаний	МАЗ	ШАБРЕНИЕ
Общая коррозия	Наличие продуктов коррозии, растрав в зоне сплавления глубиной до 0,1 мм	Отдельные точки коррозии, растрав в зоне сплавления глубиной до 0,04 мм
Склонность к межкристаллитной коррозии	Растрав в зоне сплавления глубиной до 0,14 мм	—
Склонность к коррозионному растрескиванию	Продолжительность испытания до растрескивания >45 суток, $\Delta\sigma_B = 23\%$	Продолжительность испытания до растрескивания >45 суток, $\Delta\sigma_B = 40\%$

Полученные результаты дают основание для неудовлетворительной характеристики коррозионной стойкости зачищенных на данных режимах МАЗ кромок и сварных швов. Такую коррозионную стойкость следует рассматривать как единственное отрицательное последствие явления микрошаржирования. Действительно, очаги коррозии образуются в местах внедрения частиц ФАП: чем интенсивнее микрошаржирование, тем больше продуктов коррозии на зачищенной кромке после испытаний. Кроме того, чем больше количество внедрений на единицу поверхности, тем меньше временное сопротивление  $\sigma_B$  сварного шва.

Таким образом, частицы порошка, внедрившиеся в поверхность кромки, являются инициаторами коррозии с вытекающими отсюда отрицательными последствиями. В этой связи первостепенное значение приобретает вопрос об исключении микрошаржирования, т.е. определение таких условий магнитно-абразивной зачистки изделий из алюминиевых сплавов, которые позволили бы сформировать поверхность без внедрений. Далее удовлетворяющую такому требованию МАЗ будем называть эффективной, а режимы эффективной МАЗ – эффективными.

Отметим, что понятие «эффективная МАЗ» включает в себя также обеспечение полного удаления окисной пленки и формирование светлой блестящей поверхности.

Режимы МАЗ условно можно разделить на количественные – скорость резания, подача, магнитная индукция и др., и качественные – СОЖ, ФАП.

Вначале изучалось влияние на микрошаржирование такого уровня количественных режимов, который отвечает требованиям полирования и который мы назвали «жесткие режимы». В табл. 5.9 приведены 4 режима МАЗ, выбранные на основании следующих соображений:

1) ферромагнитные абразивные порошки, обладая высокими механическими и магнитными свойствами, должны формировать светлую блестящую поверхность. Предварительные эксперименты, результаты которых приведены в [209], показали, что такими свойствами обладают следующие ФАП: 17В (Fe-Al-Si-P), 10С (Fe-Al-Si), серый чугуи (СЧ) и электрокорунд ферромагнитный (ЭФ);

2) СОЖ на основе триэтаноламина, лапрола и олеиновой кислоты также отвечает условию обеспечения светлой блестящей поверхности [221];

3) предполагалось, что на операции «зачистка поверхности под сварку» следы предшествующей обработки должны быть удалены полностью.

Это требование может быть удовлетворено при увеличении силового воздействия инструмента на деталь, т.е. при реализации более жестких режимов.

Каждым типом ФАП обработано 4 образца, причем каждый из ФАП не добавлялся и не заменялся на протяжении обработки всех 4 образцов. Результаты зачистки (табл. 5.13) оценивались по количеству внедрившихся на единицу поверхности частиц абразива, подсчитанному по микрофрактограммам поверхности зачищенных кромок, полученных на сканирующем электронном микроскопе PS EM-500. Подсчет проводили по 5 участкам микрофрактограмм размером 10x10 мм, что при увеличении х640 соответствует участку образца размерами 18x18 мкм.

Таблица 5.13

Результаты «жесткой» магнитно-абразивной обработки кромок пластин из АМг-6 (размеры 100x50x2 мм)

№ режима (по табл. 5.9)	Результаты обработки		
	Кол-во внедрений, шт./см <sup>2</sup>	Максимальный размер внедрений, мкм	Элементный состав внедрившейся частицы
1	4400...10450	3,0	Fe, Al, Si
2	1100...3300	3,0...5,5	Fe, Al, Si
3	2200...3850	3,0...4,5	Fe, Al, Si
4	550...2750	2,5...5,0	Fe, Al, Si

На рис. 5.14 представлены микрофрактограммы, характеризующие каждый режим МАЗ. Микрофрактограммы приведены только для тех образцов, количество внедрений у которых ближе всего к среднему уровню этого параметра для всех 4 образцов.

Основными результатами эксперимента можно считать тот факт, что выбранный уровень количественных режимов – "жесткие режимы" – обуславливает микрошаржирование. Результаты рентгеноспектрального микроанализа подтверждают магнитно-абразивную природу внедрившихся частиц. Из этого, в частности, следует, что подготовка кромки под сварку не может иметь целью формирование того или иного микро-рельефа. Задача формирования микро-рельефа решается при таких режимах обработки, при которых изделие из алюминиевого сплава, как видно, испытывает микрошаржирование. Целями МАО в рассмотренном аспекте ее приложения необходимо считать полное удаление окисной пленки, обеспечение светлой блестящей поверхности и отсутствие микро-шаржирования.

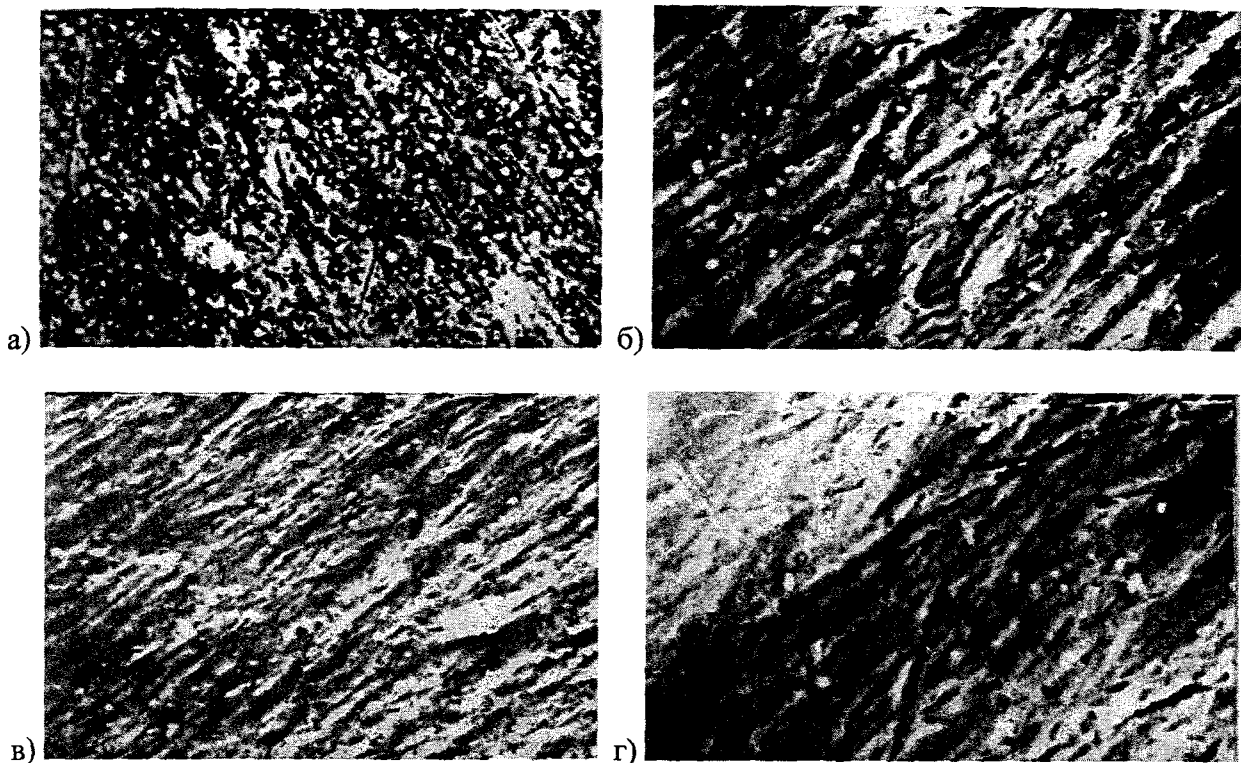


Рис. 5.14. Поверхность зачищенных кромок (режимы зачистки соответствуют табл. 5.9):  
 а – 1 режим, образец 4; б – 2 режим, образец 2; в – 3 режим, образец 3;  
 г – 4 режим, образец 1 (увеличение  $\times 640$ )

Далее отметим следующее. Наиболее «жесткий» уровень количественных режимов реализован при обработке электрокорундом ферромагнитным (режим № 4 в табл. 5.13), однако количество внедрений на этом режиме минимально. Это позволяет сделать вывод о существенном влиянии на интенсивность микрошаржирования двух факторов – «мягкие» режимы зачистки и тип применяемого ФАП.

Таким образом, анализ результатов проведенного эксперимента позволил определить направление поиска эффективных режимов МАЗ. Суть его в снижении интенсивности воздействия режущей «щетки» на поверхности кромок. Причем нижняя граница этого снижения должна быть установлена из условия полного удаления первичной окисной пленки.

Правильность выбранного направления поиска полностью подтверждает следующий эксперимент. Различными типами ФАП были обработаны кромки листов размером  $50 \times 50 \times 2$  из сплава АМг-6. Обработка осуществлялась на двух уровнях количественных режимов – «мягкий режим» (М. Р.) и «жесткий режим» (Ж. Р.). Мягкому режиму соответствовали следующие значения параметров: магнитная индукция  $B = 0,35$  Тл, величина рабочего зазора  $\delta = 3$  мм, доза ФАП  $V = 7$  см<sup>3</sup>, жесткому режиму –  $B = 0,90$  Тл,  $\delta = 1,5$  мм,  $V = 20$  см<sup>3</sup>. Оба уровня реализованы при скорости резания  $V_{рез} = 2,9$  м/с, подаче  $S = 300$  мм/мин, одном проходе, фракции ФАП  $\Delta = 315/160$  мкм, СОЖ – водный раствор триэтилоламина (1%), лапрола (1%), олеиновой кислоты (1%). Все образцы зачищены порошком, отработавшим перед этим 600 мм вспомогательного образца. Полученные результаты представлены в табл. 5.14.

Влияние уровня количественных режимов на интенсивность микрошаржирования для разных типов ФАП при МАЗ кромок из сплава АМг-6 толщиной 2 мм (в скобках приведен максимальный размер внедрившихся частиц)

Уровень количественных режимов	Количество «внедрений», шт./см <sup>2</sup>					
	тип ФАП					
	ЗС	КСФЗ	№75	№106	№112	ПЖРВ
М. Р.	единичные (1,0)	3010 (3,5)	единичные (1,5)	2736 (3,5)	3990 (1,5)	единичные (3,5)
Ж.Р.	2890 (1,5)	6079 (94,5)	3870 (2,5)	7980 (3,5)	9804 (1,5)	1630 (3,5)

Из табл. 5.14 видно, что МАЗ на мягких режимах обеспечивает снижение интенсивности микрошаржирования в сравнении с обработкой на жестких режимах при использовании всех типов ФАП. Для разных ФАП величина уменьшения различна.

Результаты обоих последних экспериментов приводят к еще одному выводу. Из табл. 5.13 и 5.14 видно, что зачистка при одних и тех же значениях количественных режимов (табл. 5.14) или с незначительным колебанием их значений (см. табл. 5.13), но с различными типами ФАП, обуславливает существенно разное количество «внедрений». Например, зачистка на жестких режимах в последнем эксперименте дала колебание этого показателя в диапазоне от единичных внедрений до 9804 «внедрений» на см<sup>2</sup>. С одной стороны, диапазон этот весьма широк, с другой стороны, даже жесткие режимы позволяют при определенном типе ФАП формировать поверхность с единичными «внедрениями». Это говорит о том, что поиск эффективного уровня количественных режимов имеет второстепенное значение, поскольку более существенное влияние на микрошаржирование оказывает ферромагнитный абразивный порошок.

Это обстоятельство послужило основанием для проведения исследований влияния ФАП на явление микрошаржирования.

Ферромагнитные абразивные порошки являются своеобразным инструментальным материалом, сочетающим в себе магнитные и режущие свойства. В этой связи к наиболее важным характеристикам ФАП следует отнести индукцию насыщения, магнитную проницаемость, механическую твердость и прочность, морфологию и линейно-геометрические параметры частиц, химический состав, способ изготовления и др. [86].

Изучалось влияние морфологии (т.е. формы) способа изготовления и химического состава ФАП на микрошаржирование. С этой целью проведены сравнительные испытания 31 ФАП, отличающихся способом получения, химическим составом, геометрией частиц и физико-механическими свойствами. Характеристики этих порошков приведены в разделах 3 и 7, а также в работах [5, 86, 229].

Методика исследования указана выше, результаты подробно изложены в работах [176, 230, 231].

Анализ полученных данных свидетельствует, что при МАЗ кромок изделий из алюминиевых сплавов возможно гарантированно исключить явление шаржирования зачищаемых поверхностей. Такой эффект достигается применением порошковых частиц повышенной прочности, имеющих близкую к сферической форму с выглаженным или умеренно развитым микрорельефом. Этим условием наиболее полно удовлетворяют порошки состава Fe-Al(2...4)-Si(5...8)-Cr(6...9%), полученные распылением струи расплава воздухом. Технология изготовления и свойства этих ФАП рассмотрены в главе 7.

На рис. 5.15 в качестве примера показана морфология поверхности порошковых частиц, а на рис. 5.16 – поверхность кромки листа из сплава АМг-6, зачищенная в магнитном поле без шаржирования.



Рис. 5.15. Морфология частиц ФАП Fe-Al-Si-Cr (увеличение  $\times 160$ )

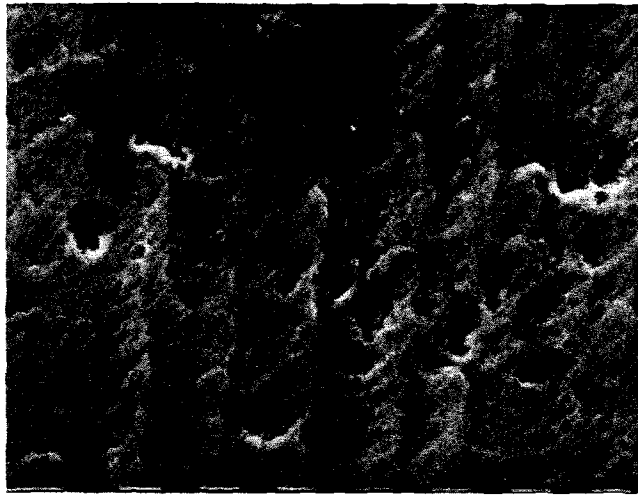


Рис. 5.16. Поверхность кромки, зачищенной магнитно-абразивным способом (увеличение  $\times 640$ )

На основании результатов комплекса исследований по проблеме магнитно-абразивной зачистки кромок изделий перед сваркой получены следующие основные выводы.

1. Создан, испытан и рекомендован к постановке на серийное производство опытный образец установки СФТ2.126 для МАЗ кромок толщиной 2...10 мм изделий диаметром 1,0...3,0 м из алюминиевых и других сплавов.

2. Создан, испытан и освоен в производстве экспериментальный образец установки М377.01 для МАЗ кромок толщиной 2...20 мм цилиндрических и плоских изделий из алюминиевых и других сплавов.

3. Созданы, исследованы и освоены в производстве НПО «Энергия», УКБМ и других предприятий оборудование и технологические процессы магнитно-абразивной зачистки перед сваркой кромок изделий из алюминиевых и других сплавов с производительностью до 1,5 м/мм на следующих режимах: скорость резания  $V_{рез} = 2,9$  м/с; величина рабочего зазора  $\delta = 2...4$  мм; магнитная индукция в рабочей зоне  $B = 0,3...0,9$  Тл; ферроабразивный порошок Fe-Al-Si-Cr; зернистость порошка  $\Delta = 315/100$  мкм; СОЖ – водный раствор триэтанолamina (1%), олеиновой кислоты (1%) и олигомера – лапрола (1%).

4. Зачищенные магнитно-абразивным способом кромки изделий из алюминиевых сплавов типа АМг-6 пригодны к сварке в течение 30 суток и более.



## **ГЛАВА 6. СОЗДАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЕ И ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПРОВОЛОКИ**

### **6.1. Анализ технической и патентной информации по теме**

Применение проволоки в отраслях общего и специального машиностроения, как в виде изделий различного назначения, так и в качестве технологического материала, обуславливает необходимость обеспечения широкого диапазона свойств поверхности и приповерхностных слоев металла изделия. Требования к качеству поверхности проволоки определяются также ее местом в технологическом процессе изготовления: в прокатно-волочильном производстве, перед нанесением покрытий и т.п.

Особенно актуальна проблема обработки проволоки в сварочном производстве изделий из химически активных алюминиевых, титановых и других сплавов. В главе 5 приведено решение сложной задачи зачистки кромок изделий перед сваркой. Требования к качеству зачистки поверхности сварочной проволоки значительно выше, поскольку при формировании сварного шва площадь поверхности расходуемой проволоки на несколько порядков выше, чем площадь зачищенных кромок. Качественно подготовленная поверхность проволоки должна быть химически чистой, без загрязнений, влаги и смазок различного типа, иметь блестящий вид.

Сварочная проволока относится к технологическим изделиям, используемым с разрушением формы путем плавления, что обуславливает повышенные требования, как к качеству основного металла, так и его поверхностного слоя. Состояние поверхности сварочной проволоки оказывает существенное влияние на стабильность процесса плавления металла проволоки, характера капельного переноса и последующего охлаждения и затвердевания ванны жидкого металла. Тугоплавкий и неэлектропроводный окисный слой, различного рода загрязнения на поверхности сварочной проволоки затрудняют токоподвод, нарушают стабильность горения дуги, увеличивают разбрызгивание электродного металла и ухудшают формирование швов [232]. Обладая, как правило, очень высокой температурой плавления, окисная пленка не расплавляется в процессе сварки и покрывает металл, затрудняя образование общей ванны.

Вследствие высокой адсорбционной способности к газам и парам воды окисная пленка является источником газов, растворяющихся в металле, и косвенной причиной возникновения в нем различного рода несплошностей [211, 232]. Количество адсорбированных поверхностью газов зависит от состояния поверхности металла [233, 234] и тем выше, чем выше его удельная поверхность [235]. Попадая в сварочную ванну, содержащаяся в окисной пленке адсорбированная влага взаимодействует с металлом с выделением водорода. Накопление водорода в расплавленном металле приводит к образованию пор, микротрещин, разветвленных микропустот и т.п. [211, 218].

Оксидные включения в металле швов приводят к снижению пластичности и ударной вязкости. Особенно чувствительны к наличию кислорода в сварочной ванне низко- и среднелегированные стали [236].

Низкое качество зачистки поверхности проволоки приводит к попаданию в ванну жидкого металла неметаллических включений, шлаков [211]. Неметаллические включения в металлах и сплавах располагаются преимущественно по границам зерен, нарушают связь между ними и понижают прочность изделий [235], снижают механические свойства и герметичность сварных соединений [211, 237].

Таким образом, наличие чрезмерного количества газов в поверхностных слоях проволоки, загрязнение, увлажнение ее поверхности являются причиной пор (газовых включений) и других наиболее часто встречающихся и опасных дефектов сварных соединений, оказывающих отрицательное влияние на их свойства. Они снижают плотность и прочность сварных швов, их коррозионную стойкость, способствуют концентрации внутренних напряжений и являются очагами разрушения соединений [211].

Известно также, что вновь образованная поверхность металла, благодаря наличию свободных связей атомов поверхностного слоя (поверхностной энергии), активно взаимодействует с окружающей средой и покрывается тончайшей пленкой газов, паров или растворенных веществ [238]. Внешний слой поверхности состоит из загрязнений, попавших на поверхность при обработке, и адсорбированных газов и паров. Толщина этой пленки 0,1...2,5 нм. Расположенный под ним слой, возникающий под влиянием атмосферного кислорода, имеет на стали толщину около 2 нм, на алюминии – до 15 нм [239]. По другим данным, конечная толщина образующейся в естественных условиях окисной пленки на алюминии составляет 5...20 нм [212] и в зависимости от влажности и температуры окружающей среды может увеличиваться в 10 раз [214].

Скорость образования оксидной пленки на поверхности металла исчисляется долями секунды. Так, для возникновения слоя толщиной 1,4 нм достаточно 0,05 с. Кинетика процесса окисления, толщина и свойства оксидной пленки определяется площадью эффективной поверхности, контактирующей с внешней средой, и гетерогенностью (химической, механической, геометрической и др.) поверхностного слоя, которые существенно зависят от способа образования поверхности [233]. То есть скорость образования пленки на зачищенной поверхности сварочной проволоки, ее толщина для разных методов подготовки различна. Это и определяет разное время выдержки проволоки до сварки без заметного снижения качества сформированных с ее использованием сварных швов после различных способов обработки. Так, например, длительность хранения до сварки после механической обработки шабрением или металлическими щетками составляет 16...24 часа [211], после химического травления не должна превышать трех суток, после электрохимической очистки увеличивается до нескольких месяцев [240].

Таким образом, задача подготовки сварочной проволоки сводится к ее зачистке и созданию на поверхности компактной (тонкой и плотной) окисной защитной пленки, не склонной к дальнейшему утолщению и гидратации, т.е. предохраняющей основной материал от дальнейшего окисления в течение продолжительного времени вылеживания после формирования поверхностного слоя до использования проволоки в технологическом процессе сварки.

В настоящее время в промышленности очистка поверхностей металла достигается различными методами: механическими, физическими, химическими, термическими, комбинированными [15]. Для зачистки сварочной проволоки наиболее широкое распространение получили механические и химические методы обработки с использованием разных способов интенсификации процесса [211].

Механические способы очистки поверхности являются наиболее простыми и универсальными. Однако применяемые способы механической зачистки проволоки (наждачной бумагой, шабером, шлифованием, полированием или с помощью металлических проволочных щеток и иглофрезерования) не обеспечивают стабильного качества, приводят к появлению на поверхности местных дефектов-прижогов, трещин, глубоких рисок и др. Механическая зачистка является малопроизводительной и трудоемкой операцией и предусматривает немедленное использование проволоки при сварке, что не всегда удобно в производственных условиях. После же хранения проволоки со свежечищенной поверхностью в обычной атмосфере неизбежно увеличение толщины оксидной пленки и количества имеющейся в ней влаги [232]. Применяемое рядом зарубежных фирм [241, 242] механическое скалпирование поверхности алюминиевой сварочной проволоки алмазным инструментом предусматривает удаление слоя металла толщиной 0,1...0,2 мм, что приводит к безвозвратным потерям в стружку большого количества металла [243].

Наиболее широкое распространение получил способ химической обработки проволоки, заключающийся в травлении в водном растворе щелочи с последующим осветлением в водном растворе азотной кислоты. Обработанная таким образом поверхность характеризуется наличием неоднородного рыхлого слоя переменной толщины, склонного к последующему утолщению и гидратации. Поэтому срок хранения проволоки после химического травления ограничен и не превышает несколько часов.

Более высокое качество поверхности проволоки обеспечивает электрохимическая очистка (ЭХО) в ваннах электролита на основе фосфорной кислоты [243]. В этом случае на поверхности образуется компактная плотная оксидная пленка с незначительным количеством поверхностных дефектов. Срок хранения такой проволоки увеличивается до нескольких месяцев практически без заметного снижения качества сформированных с ее использованием сварных швов. Недостатком ЭХО присадочной проволоки является применение большого количества электролитов, что требует решения ряда сложных технологических, технических и экономических проблем, связанных с вредностью производства и утилизацией токсичных отходов.

На основании вышеизложенного представляет интерес проверка возможностей зачистки сварочной проволоки магнитно-абразивным способом [227]. Анализ патентно-технической информации показал, что в настоящее время известно несколько схем магнитно-абразивной обработки проволоки. На рис. 6.1 приведены наиболее типичные схемы обработки, рассмотрение которых дает достаточно полное представление об уровне технических решений поставленной задачи.

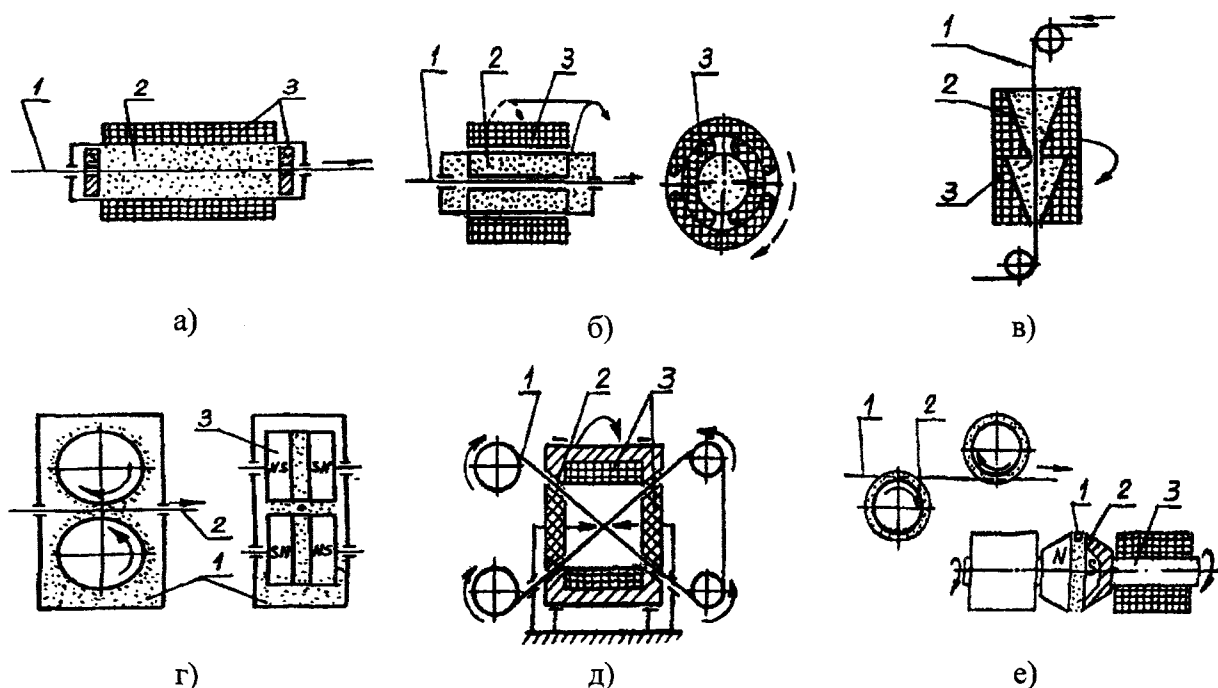


Рис. 6.1. Схемы магнитно-абразивной обработки проволоки:  
1 – проволока; 2 – ферромагнитный абразивный порошок;  
3 – магнитная система

Процесс обработки проволоки в устройствах на рис. 6.1, а–в заключается в протягивании ее через массу ферроабразивного порошка: неподвижную и уплотненную постоянными магнитами [244] (рис. 6.1, а); вращающуюся от воздействия бегущего электромагнитного поля совместно с контейнером с ребристой внутренней поверхностью [245] (рис. 6.1, б); вращающуюся при вращении конусной воронки с внутренней ребристой поверхностью [246] (рис. 6.1, в). Общими недостатками этих схем являются низкие показатели производительности и качества. При перемещении в рабочей зоне проволока увлекает за собой порошковые частицы, и они концентрируются у выхода из рабочей камеры. Образовавшаяся масса порошка уплотняется и оказывает сильное давление на поверхность проволоки. В результате контактирующие с ней частицы внедряются в материал проволоки, шаржируют поверхностный слой и увеличивают шероховатость поверхности. В процессе очистки проволоки не происходит интенсивного перемешивания порошка, прилегающего к обрабатываемой поверхности (особенно это характерно для схемы рис. 6.1, а),

контактирующие с поверхностью частицы теряют режущую способность и производительность процесса снижается. Кроме того, скорость резания по схеме обработки [244], равная скорости протягивания проволоки, явно недостаточна для высокопроизводительной зачистки поверхностей. Учитывая замечание автора [4], а также результаты пробных испытаний, проведенных в лаборатории, реальность движения порошковой массы по рис. 6.1, в [244] представляется весьма сомнительной.

Обеспечение необходимой скорости резания по схеме рис. 6.1, в [246] требует приведения во вращение достаточно громоздкой магнитной системы с катушками и магнитопроводом.

В устройстве [247] обработка проволоки осуществляется при протягивании ее через кольцевые конические зазоры магнитной системы с вращающимся ферроабразивным порошком (рис. 6.1, з). Движение резания сообщается магнитопроводу с катушкой, который увлекает за собой порошок и постоянные магниты. Схема резания обеспечивает интенсивную обработку поверхности проволоки путем преимущественно ударного воздействия порошковых частиц на обрабатываемое изделие, что вызывает интенсивную вибрацию последнего в зоне обработки. В результате не обеспечивается равномерность съема металла на поверхности и необходимое качество обрабатываемой поверхности. Кроме того, устройство нетехнологично и затруднительно в реализации.

Основных недостатков предыдущего технического решения лишено устройство, описанное в [248]. Обработка проволоки осуществляется двумя щетками порошка, образованными на поверхности дисков, установленных с возможностью вращения на параллельных осях (рис. 6.1, д). В рабочей зоне между дисками порошок сжимается (дополнительное уплотнение обеспечивается постоянными магнитами) и интенсивно очищает поверхность проволоки. Однако при обработке проволоки из мягких и вязких материалов в результате механического заклинивания порошковой массы в рабочем зазоре происходит внедрение частиц порошка в материал проволоки и шаржирование абразивом обрабатываемой поверхности, что существенно снижает ее качество. Следует также отметить возможную неравномерность обработки по диаметру проволоки, более интенсивную обработку верхней и нижней поверхностей по сравнению с боковой.

Таким образом, анализ патентно-технической информации по зачистке проволоки подтвердил перспективность применения для этих целей магнитно-абразивной обработки. Однако известные технические решения по различным причинам недостаточно эффективны, что явилось основанием для поисковых исследований в этой области [249, 250].

## **6.2. Создание оборудования, проведение экспериментов**

Накопленный опыт и поисковые исследования позволили разработать оригинальный способ магнитно-абразивной зачистки (МАЗ) проволоки [251]. Схема МАЗ представлена на рис. 6.1, е и реализована в конструкции экспериментального образца станка модели СФТ2.111, общий вид которого показан на рис. 6.2, а.

Станок СФТ2.111 предназначен для обработки проволоки диаметром 0,5...3 мм из черных и цветных металлов и сплавов с перематкой ее на кассеты. Схема работы станка представлена на рис. 6.2, б. Обрабатываемая проволока 1 сматывается с бухты 2 в виде нитки, протягивается между двумя парами оппозитно установленных полюсных наконечников 3, образующих рабочую зону станка, и наматывается на кассету 4. Для ориентации проволоки при движении служат направляющие 5 и сходящий 6 ролики. Ферромагнитный абразивный порошок 7 под действием магнитного поля, создаваемого электромагнитными катушками 8, формируется в кольцевую эластичную щетку, которая, вращаясь совместно с наконечниками 3, производит обработку поверхности проволоки. В зону обработки подается смазочно-охлаждающая жидкость. Изменением параметров магнитного поля в рабочей зоне производится регулирование жесткости инструмента (порошка) и степени его воздействия на обрабатываемую поверхность.

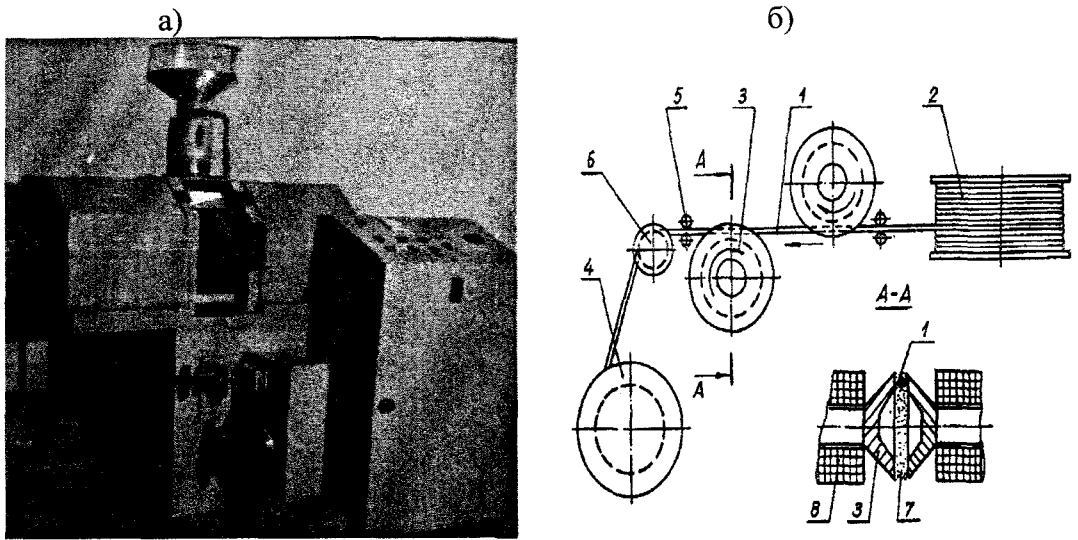


Рис. 6.2. Общий вид (а) и схема работы (б) станка СФТ2.111:  
 1 – обрабатываемая проволока; 2 – бухта; 3 – полусные наконечники;  
 4 – катушка; 5 – направляющие ролики; 6 – сбегаящий ролик;  
 7 – ферромагнитный абразивный порошок; 8 – катушки электромагнитов

#### Технические характеристики станка СФТ2.111:

Диаметр обрабатываемой проволоки, мм	05...3,0
Скорость протягивания проволоки, м/мин	2...6
Частота вращения полусных наконечников, об/мин	800...1300
Величина рабочих зазоров, мм	1...5
Магнитная индукция в рабочей зоне, Тл	0,3...1,0
Параметры электрической питающей среды:	
напряжение, В	380/220
частота, Гц	50
потребляемая мощность, кВт	2,5
Габариты (длина x ширина x высота), мм	1400x360x1736
Масса, кг	1200

Станок состоит из следующих основных узлов: станины, обрабатывающего блока, механизма подачи проволоки, правки и натяжения проволоки, протяжки и укладки проволоки, бункера-дозатора, станции и системы охлаждения, электрошкафа-пульта управления.

Обрабатывающий блок представляет собой магнитопровод с электромагнитными катушками и двумя парами полусных наконечников, расположенными по обе стороны от оси обработки с возможностью синхронного вращения. Блок выполнен в виде двух головок, приводной и неприводной, причем подвижная часть каждой головки установлена с возможностью поворота вокруг центральной оси и перемещения вдоль нее. Головки установлены таким образом, что полусные наконечники расположены соосно друг другу с зазором между ними и образуют рабочую зону станка. Регулирование рабочего зазора между торцами полусных наконечников производится за счет изменения расстояния между подвижными частями головок. Поворотом головок устанавливается необходимая величина погружения проволоки в рабочую зону. С целью передачи вращения от приводной головки к неприводной, сердечники электромагнитных катушек оппозитных полюсов соединены между собой муфтами, что обеспечивает синхронный поворот подвижных частей головок. Регулировка расстояния между торцами полусных наконечников (установка необходимых рабочих зазоров) производится вручную.

Конструкция станка обеспечивает выполнение необходимых для обработки проволоки функций: создание магнитного поля в рабочей зоне (включение электромагнитных катушек); движение подачи (продольное перемещение проволоки); движение резания

(вращение порошковой абразивной массы совместно с полюсными наконечниками); подача в рабочую зону ферроабразивного порошка и подвод смазочно-охлаждающей жидкости. Управление кнопочное с пульта.

Станок СФТ2.111 использован для проведения технологических экспериментов по магнитно-абразивной зачистке сварочной проволоки.

При магнитно-абразивной зачистке проволоки на станке СФТ2.111 основными факторами и параметрами, влияющими на эффективность процесса, являются: величина магнитной индукции в рабочем зазоре, расстояние между полюсными наконечниками, глубина погружения проволоки в рабочий зазор, доза ФАП – объем порошка, подаваемый в рабочую зону одной пары полюсов, фракция (зернистость) ФАП, скорость резания, скорость подачи проволоки.

Принятая схема обработки, расположение и форма полюсных наконечников обеспечивают формирование под действием сил магнитного поля из частиц ферромагнитного абразивного порошка режущего инструмента – кольцевой абразивной щетки. При вращении сформированного инструмента на частицы ФАП действуют центробежные силы, которые в комплексе с другими силами механического и магнитного происхождения прижимают зерна порошка к обрабатываемой поверхности и создают необходимые силы резания. При достаточно больших значениях центробежных сил может иметь место выброс порошка из рабочего зазора между полюсными наконечниками. Поэтому минимальное значение магнитной индукции в рабочем зазоре должно обеспечивать создание необходимых сил магнитного поля, удерживающих порошок в межполюсном пространстве. Это значение индукции определяется геометрическими и кинематическими параметрами инструмента, т.е. его размерами и скоростью вращения.

Рабочая зона станка для магнитно-абразивной обработки проволоки имеет следующие параметры, определяющие геометрию порошкового инструмента:

наружный диаметр полюсных наконечников  $D = 110$  мм;

внутренний диаметр  $d = 100$  мм;

расстояние между торцами полюсных наконечников  $b = 6...10$  мм;

теоретическое значение толщины кольцевого инструмента  $H = (D-d)/2 = 5$  мм.

Однако, учитывая, что порошок распределяется в соответствии с линиями магнитной индукции в несколько большем объеме, действительное значение толщины инструмента  $H = 6...8$  мм в зависимости от ширины рабочего зазора  $b$ . При указанных параметрах инструмента и рабочей частоты вращения полюсных наконечников  $n = 794...1261$  об/мин (линейная скорость вращения порошка  $V = 4,1...6,4$  м/с), минимальное значение магнитной индукции  $B_{\text{мин}} = 0,20...0,25$  Тл. При расстоянии между полюсами  $b = 6...10$  мм такое значение индукции обеспечивается при пропускании через электромагнитные катушки постоянного тока силой  $I = 1,2...1,6$  А. Рабочее значение магнитной индукции должно находиться в пределах  $B_{\text{раб}} = 0,3...0,5$  Тл.

В табл. 6.1 приведены значения магнитной индукции в рабочей зоне станка СФТ2.111 в зависимости от силы тока и расстояния между полюсами-наконечниками. Сплошной толстой линией выделена оптимальная, а штриховой – допустимая области значений индукции. Параметры этой области ( $I, b, B$ ) позволяют в широких пределах изменять характеристики обработки. Уменьшение индукции  $B$  (увеличение  $b$  и уменьшение  $I$ ) существенно снижает интенсивность съема материала, уменьшается производительность обработки. Увеличение  $B$  (уменьшение  $b$  и увеличение  $I$ ) приводит к формированию жесткого инструмента. Обрабатываемая проволока выталкивается из рабочего зазора, вследствие чего на боковых поверхностях возможны необработанные участки, т.е. имеет место несплошность очистки поверхности при обработке проволоки из немагнитных материалов.

Магнитная индукция в рабочей зоне станка СФТ2.111

Сила тока $I$ , А	Значения магнитной индукции $B$ , Тл		
	$b = 6$ мм	$b = 8$ мм	$b = 10$ мм
1,0	0,26	0,20	0,16
1,2	0,31	0,25	0,19
1,4	0,36	0,29	0,22
1,6	0,41	0,32	0,25
1,8	0,45	0,36	0,28
2,0	0,49	0,40	0,31
2,2	0,53	0,43	0,33
2,4	0,56	0,46	0,35
2,6	0,59	0,48	0,37
2,8	0,62	0,50	0,39
3,0	0,64	0,52	0,40

Ширина рабочей зоны, т.е. расстояние между торцами полюсных наконечников, является важным параметром, определяющим зависимость между характеристиками инструмента (жесткость, плотность) и дозой ФАП, подаваемого в рабочий зазор между полюсами. Характеристикой плотности инструмента является степень заполнения зазора порошком, т.е. отношение объема порошка в состоянии свободной засыпки, подаваемого в рабочую зону, к объему инструмента

$$K_3 = V_{\text{пор}} / V_{\text{ин}},$$

Оптимальное значение степени заполнения зазора порошком для принятой схемы обработки  $K_3 = 0,8 \dots 1,1$ .

При определении объема инструмента учитывается увеличение теоретического объема рабочей зоны вследствие распределения порошка в соответствии с силовыми линиями магнитного поля, т.е.

$$V_{\text{ин}} = V_{\text{р.з.}} K,$$

где  $K$  – коэффициент увеличения рабочей зоны,  $K = 1,1 \dots 1,3$ .

В табл. 6.2 приведены значения объемов рабочей зоны инструмента и необходимые дозы ФАП, в зависимости от ширины рабочего зазора. Следует также отметить, что в процессе зачистки происходит уплотнение порошка обрабатываемой проволокой, в результате чего коэффициент заполнения  $K_3$  возрастает до значений порядка 1,2...1,3. Чрезмерное уплотнение порошка увеличивает жесткость щетки и приводит к выталкиванию проволоки из рабочего зазора. Это вызывает необходимость увеличения ее натяжения до 20...30 кгс.

## Параметры формирования порошкового инструмента

Параметры рабочего инструмента	Ширина рабочей зоны $b$ , мм		
	5	8	10
Рабочая площадь полюсного наконечника $F$ , см <sup>2</sup>	16,5		
Расчетный объем рабочей зоны $V_{р.з.}$ , см <sup>3</sup>	9,9	13,2	16,5
Коэффициент увеличения рабочей зоны $K$	1,1	1,2	1,2
Объем порошкового инструмента $V_{ин.}$ , см <sup>3</sup>	10,9	15,8	21,5
Коэффициент заполнения $K_3$	0,9...1,1		
Доза ФАП, см <sup>3</sup>	9...12	13...18	17...25

Проводились технологические исследования с целью установления зависимости эффективности обработки от расстояния между полюсами и зернистости ФАП. Обрабатывалась проволока Св АМг-6 на станке СФТ2.111. Ферромагнитный порошок – кремнистый сплав, смазочно-охлаждающая жидкость – водный раствор триэтаноламина (0,6%), олеиновой кислоты (0,8%) и ПАВ на основе лапрола (0,25%). Скорость резания (вращение полюсных наконечников) – 5 м/с, скорость протягивания проволоки – 3 м/мин [227, 252, 253].

При обработке проволоки с различной шириной рабочей зоны использовали кремнистый сплав фракции 315/160 мкм, а обработку порошками различной зернистости осуществляли при  $b = 8$  мм.

Результаты экспериментов представлены в виде графических зависимостей удельного весового съема  $\Delta q$ , шероховатости  $Ra$  и отражательной способности  $O_c$  обработанной поверхности от ширины рабочей зоны и зернистости ФАП (рис. 6.3). Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы. Увеличение ширины рабочего зазора незначительно влияет на изменение шероховатости (уменьшается) и отражательной способности (увеличивается) обработанной поверхности. Более существенно влияние  $b$  на удельный съем металла, зависимость которого носит экстремальный характер. Так, с увеличением  $b$  от 7 мм до 11 мм наблюдается снижение съема на 40–50%. Объясняется это уменьшением магнитной индукции в зазоре, а следовательно, сил резания и жесткости щетки порошка. Снижение съема при уменьшении  $b$  до 5 мм происходит вследствие выталкивания проволоки из рабочего зазора и снижения интенсивности обработки на ее боковых поверхностях. При этом осуществляется неравномерная обработка поверхности проволоки по диаметру.

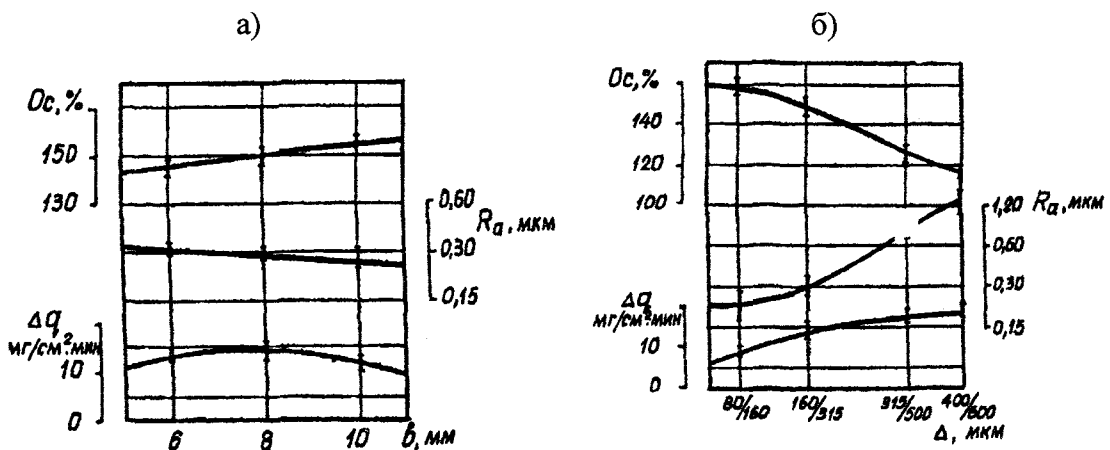


Рис. 6.3. Зависимость удельного съема ( $\Delta q$ ), шероховатости ( $Ra$ ) и отражательной способности ( $O_c$ ) от ширины рабочей зоны (а) и зернистости порошка (б)



Увеличение зернистости ФАП приводит к повышению удельного съема и шероховатости поверхности. В пределах изменения зернистости порошка, принятой для экспериментальных исследований, съем изменяется в 2,5–3 раза, а показатель шероховатости  $Ra$  в 4–6 раз, т.е. на 2–3 класса. Отражательная способность при этом соответственно снижается с 155–160% до 110–115%. Весовой съем наиболее интенсивно увеличивается при изменении зернистости ФАП от 80/40 до 500/315 мкм. Как и следовало ожидать, имеет место связь между шероховатостью поверхности и ее блеском, причем заметнее выражена обратнo-корреляционная зависимость для более шероховатых поверхностей. При малой зернистости порошка шероховатость поверхности снижается незначительно, так как в этом случае не обеспечивается достаточный для формирования собственного микрорельефа съем металла с поверхности проволоки. Происходит полирование исходного микропрофиля, что увеличивает отражательную способность.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить оптимальные значения параметров обработки сварочной проволоки.

### 6.3. Исследование процесса зачистки проволоки и качества сварных соединений

Для оценки эффективности магнитно-абразивной зачистки сварочной проволоки проводились исследования по обработке проволоки различными методами и изучению свойств наплавленного металла\*. Поверхность проволоки СвАМг-6 (ГОСТ 7871-75) перед сваркой обрабатывали тремя способами: химическим травлением; электрохимической очисткой (ЭХО) и магнитно-абразивной обработкой.

Химическое травление и осветление проволоки производили в следующем порядке:

– натр едкий технический 45...55 г/л или натр технический 45...55 г/л и натр фтористый технический 45...55 г/л при температуре 60...70°C; продолжительность травления для удаления окисной пленки 1...2 мин;

– промывка в горячей проточной воде (температура не ниже 50°C), а затем в холодной проточной воде;

– осветление в растворе азотной кислоты (350...425 г/л) в течение 1...3 мин. Температура ванны комнатная. Допускается увеличение выдержки до 10 мин;

– промывка в горячей проточной воде с последующей сушкой.

Электрохимическую очистку проволоки проводили в две стадии:

– обезжиривание в щелочном растворе;

– последующая электрохимическая очистка в электролите на основе фосфорной кислоты. Скорость очистки проволоки составляет 10...15 м/мин.

Магнитно-абразивную зачистку проволоки осуществляли на следующих режимах: скорость резания (линейная скорость вращения полусных наконечников) – 5 м/с; скорость подачи проволоки – 3 м/мин; магнитная индукция в рабочем зазоре (без порошка) – 0,4 Тл; ширина рабочего зазора – 8 мм; фракция порошка – 315/100 мкм. Ферромагнитный абразивный порошок на основе сплавов Fe-Al, Fe-Al-Si-Cr. СОЖ – водный раствор триэтаноламина (1%), олеиновой кислоты (1%) и ПАВ типа полиоксипропиленгликоль (1%).

Эффективность подготовки поверхности проволоки по каждому из трех вариантов оценивали по отражательной способности поверхности  $O_s$  и размерному съему материала  $h$ . Показатель отражательной способности поверхности выражали в процентах по отношению к эталону интенсивности блеска пластины из увиолевого стекла, равный 65% (табл. 6.3).

Магнитно-абразивная обработка обеспечивает необходимый для полного удаления оксидных пленок и дефектного слоя съем обрабатываемого материала. При этом поверхность проволоки имеет блестящий вид с высоким уровнем отражательной способности (в 2,5...3 раза превышающий блеск поверхности проволоки после химического травления),

\* Исследования проводились в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

сохраняющийся в течение длительного времени. Это свидетельствует о высоком качестве сформированного поверхностного слоя и наличии на поверхности проволоки тонкой и плотной защитной пленки [254, 255].

Таблица 6.3

Результаты обработки проволоки

Вид обработки проволоки	Отражательная способность поверхности $O_c$ , %	Съем материала $h$ , мкм
МАО	130...150	3,5...6,1
ЭХО	110...120	3...5
ХТ	40...45	10...20

Для оценки влияния состояния поверхности сварочной проволоки на качество шва применили метод многоваликовой пробы.

Эксперименты проводились на пластинах из сплава АМг-6 толщиной 10 мм. Наплавку валиков производили неплавящимся электродом при переменном токе в среде аргона на режиме:  $I_{св} = 300...350$  А,  $V_{св} = 5$  м/ч, расход аргона  $V_a = 30$  л/мин. Наплавка высотой 50...60 мм состояла из 7...10 слоев, каждый последующий из которых наносился после полного остывания предыдущего. Раскладку валиков производили из расчета гарантированного сплавления между ними. Снимки макрошлифов наплавки приведены на рис. 6.4. Из многослойных наплавки вырезали образцы для механических испытаний, определения плотности, содержания водорода и металлографических исследований (рис. 6.5). При этом влияние подложки, на которой была получена многослойная наплавка, полностью исключалась, так как все образцы вырезали выше первого ряда наплавленных валиков. Характеристики прочности и пластичности определяли на круглых образцах МИ-3,6К, тип III ГОСТ 1497-73. Диаметр рабочей части образца составил 3 мм.

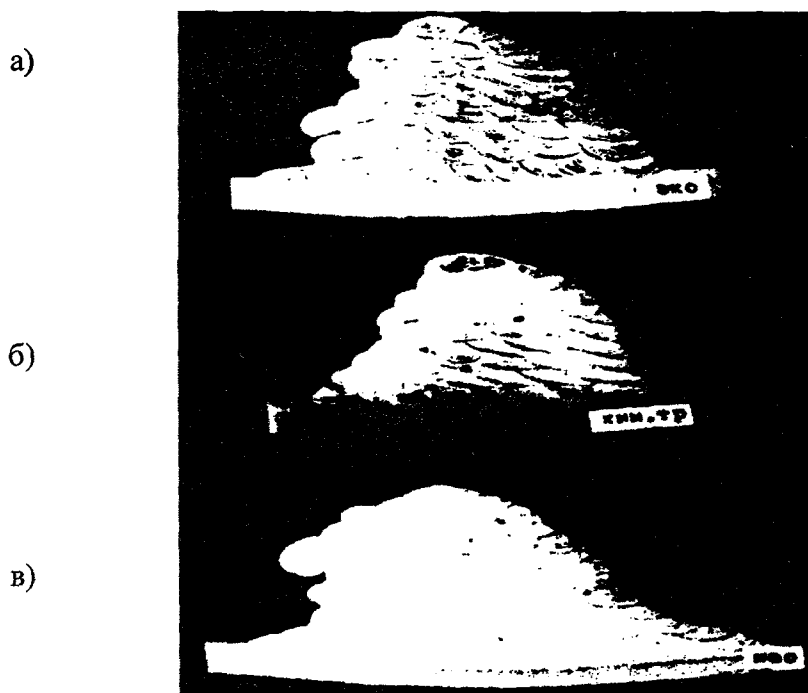


Рис. 6.4. Фотографии микрошлифов наплавки проволокой СвАМг-6:  
 а – электрохимическая очистка; б – химическое травление;  
 в – магнитно-абразивная обработка

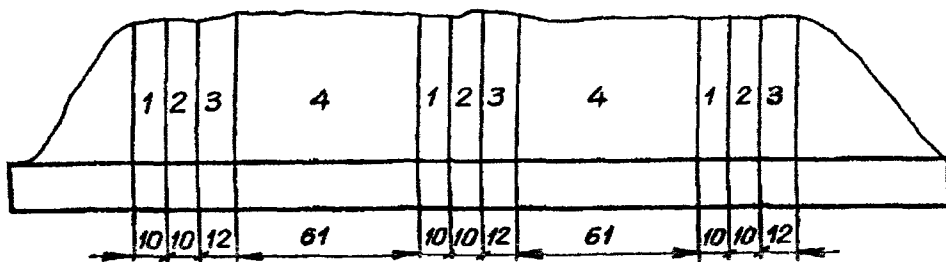


Рис. 6.5. Схема вырезки образцов для исследования наплавов проволокой СвАМг-6:  
 1 – макрошлифы; 2 – образцы на плотность; 3 – образцы на содержание водорода;  
 4 – образцы на механические испытания

Анализ результатов механических испытаний показал, что МАО сварочной проволоки благоприятно отражается на механических свойствах наплавленного металла (табл. 6.4). Значения механических характеристик в этом случае выше, чем для наплавов, выполненных проволокой после химического травления и ЭХО. В отличие от травления, МАО обеспечивает не только более высокие значения характеристики прочности и пластичности, но и значительно меньший их разброс, что объясняется отсутствием грубых дефектов в наплавленном металле [256].

Исследовали качество наплавленного металла на плотность и пористость с использованием метода гидростатического взвешивания темплетов. Использовали образцы толщиной 10 мм из многослойных наплавов с предварительно зачищенной поверхностью.

Плотность металла определяли по формуле

$$\gamma_M = \frac{P_{вз} \cdot \gamma_{вд}}{P_{вз} - P_{вд}},$$

где  $\gamma_{вд}$  – плотность воды при комнатной температуре;

$P_{вд}$  и  $P_{вз}$  – масса металла соответственно в воде и на воздухе.

Относительный объем пустот в наплавленном металле рассчитывали по формуле

$$\beta = \frac{v_{п}}{v_{п} + v_{м}} = 1 - \frac{\gamma_M}{\gamma_{пр}},$$

где  $v_{п}$  и  $v_{м}$  – соответственно объем пустот и наплавленного металла;

$\gamma_{пр}$  – плотность присадочной проволоки.

При этом плотность наплавленного металла (без пустот) принимали равной плотности присадочной проволоки. Результаты расчетов приведены в табл. 6.4.

Плотность наплавленного металла и содержание в нем пустот для магнитоабразивной обработки и электрохимической очистки находятся практически на одном уровне.

Механические свойства наплавленного металла

Вид обработки проволоки	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_5$ , %	Относительное сужение $\Psi$ , %
МАО	300	156	18,0	21,9
ЭХО	291	144	16,8	17,2
ХТ	277	168	12,0	18,4

По сравнению с химическим травлением применение магнитно-абразивной зачистки проволоки приводит к заметному повышению плотности металла шва и уменьшению пустот более чем в 2 раза.

Содержание водорода определяли методом вакуумного переплава образцов диаметром 8 мм и длиной 20 мм, взятых из различных участков наплавки. Для каждого способа обработки испытывали не менее трех образцов. Анализ результатов показывает, что МАО обеспечивает более низкое содержание водорода в металле наплавки по сравнению с химическим травлением, несколько уступает по этому показателю ЭХО (см. табл. 6.5).

Таблица 6.5

Физические свойства наплавленного металла

Вид обработки проволоки	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Объем пустот, %	Содержание водорода, см <sup>3</sup> /100г
МАО	2,6240	0,499	2,3...2,7
ЭХО	2,6236	0,529	1,6...2,4
ХТ	2,5902	1,361	2,6...3,1

Возможным источником повышенной газонасыщенности является образующаяся на поверхности проволоки пленка из компонентов смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), применяемой при МАО. Снижение газовыделения в этом случае достигается за счет рационального выбора компонентов СОЖ при снижении их концентрации в растворе [257].

Таким образом, выполненные исследования показали возможность и перспективность магнитно-абразивной обработки сварочной проволоки. При МАО проволоки достигается полное удаление загрязнений и формируется качественный поверхностный слой, сохраняющий свои свойства в течение длительного времени. Использование зачищенной магнитно-абразивным способом сварочной проволоки обеспечивает уровень физико-механических показателей качества металла шва, не уступающий традиционным методам обработки – химическому травлению и электрохимической очистке. При этом технология МАО отличается экологической чистотой и удовлетворяет санитарно-гигиеническим требованиям современного производства.

#### 6.4. Создание опытного образца станка

Положительные результаты технологических исследований по обработке сварочной проволоки на экспериментальном станке СФТ2.111 явились основанием для разработки опытного образца станка для магнитно-абразивной зачистки проволоки модели СФТ2.125. Общий вид станка представлен на рис. 6.6.

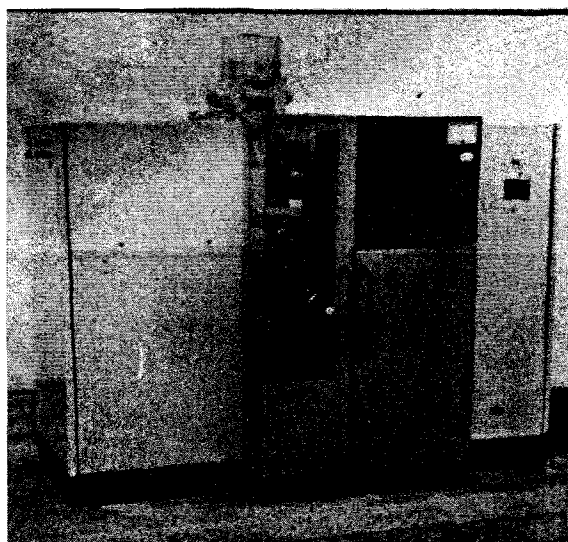


Рис. 6.6. Общий вид станка СФТ2.125

Станок СФТ2.125 создан на базе экспериментального станка, и в основу работы положена принципиальная схема обработки на станке СФТ2.111 (см. рис. 6.2, б). При разработке учтены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса МАО сварочной проволоки, направленные на повышение производительности и качества зачистки. Кроме того, приняты во внимание конструктивные и технологические недостатки базового станка, обнаруженные в процессе его эксплуатации и при лабораторных исследованиях [258].

Станок модели СФТ2.125 для магнитно-абразивной зачистки проволоки предназначен для использования в сварочном производстве и служит для зачистки от загрязнений и окисной пленки способом магнитно-абразивной обработки сварочной проволоки диаметром 0,5...3 мм с перематкой ее на кассеты.

При обработке проволока разматывается из бухты, закрепленной в бухтодержателе, проходит механизм натяжения и правки и попадает в зону обработки. Обработка производится вращающимися кольцевыми щетками из ферроабразивного порошка, сформированными магнитным полем между двумя парами противоположной полярности полюсных наконечников, с применением смазочно-охлаждающей жидкости. Обработанная проволока через направляющий механизм перематывается на кассеты сварочных агрегатов с порядной укладкой на них.

Технические характеристики станка СФТ2.125:

Диаметр обрабатываемой проволоки, мм	0,5...3,0
Скорость протягивания проволоки, м/с (м/мин)	0,048...0,159 (2,88...9,52)
Частота вращения полюсных наконечников, с <sup>-1</sup> (об/мин)	13,23...21,0 (749...1261)
Величина рабочих зазоров, мм	1...4
Магнитная индукция в рабочей зоне, Тл	0,3...1,0
Параметры электрической питающей сети:	
напряжение, В	380/220
частота, Гц	50
потребляемая мощность, кВт	2,5
Габариты (длина x ширина x высота), мм	1360 x 1400 x 1736
Масса, кг	1300

Станок СФТ2.125 состоит из следующих основных узлов: блока обрабатывающего, механизма протяжки и укладки, станины, привода, системы охлаждения, станции охлаждения, электрошкафа, пульта, электрооборудования, пневмооборудования, бункера.

Блок обрабатывающий состоит из двух головок, ведущей и ведомой, механизма натяжения проволоки. Каждая головка включает две электромагнитные катушки, магнито-

провод и два полюсных наконечника. Головки установлены полюсными наконечниками друг к другу так, что последние располагаются соосно, в парах имеют противоположную полярность и своими торцовыми поверхностями образуют рабочие зоны станка. Электромагнитная система станка имеет замкнутый через рабочие зазоры магнитный контур. Для регулирования расстояния между торцовыми поверхностями полюсных наконечников (при настройке на обработку проволоки различного диаметра, при регулировании величины рабочих зазоров, при замене полюсных наконечников) головки установлены с возможностью перемещения в направлении осей полюсных наконечников. Каждую головку можно отвести от исходного положения на величину до 20 мм. Максимальное расстояние между торцами полюсных наконечников – 25 мм. Величина погружения проволоки в рабочую зону регулируется за счет вертикального перемещения направляющих роликов. Вращение полюсных наконечников ведущей головки осуществляется от электродвигателя через клиноременную передачу и передается полюсным наконечникам ведомой головки через муфты, соединяющие сердечники электромагнитов. Сменные шкивы для вала электродвигателя обеспечивают три скорости вращения полюсных наконечников: 794, 1010 и 1261 об/мин, что соответствует скорости резания в пределах 4...6 м/с.

Механизм правки и натяжения состоит из роликов и двух срезанных призм, выполняющих правящую и натяжную функции, и служит для приема проволоки из бухтодержателя и выдачи ее в зону обработки. Величина усилия при правке и натяжении регулируется винтами, прижимающими подвижные ролики и призму к неподвижным. Ролики на выходе зачищенной проволоки из рабочей зоны служат для подачи ее на водило механизма протяжки и укладки.

Механизм протяжки и укладки проволоки состоит из привода, коробки переключения скорости протягивания и настройки на нужный диаметр проволоки, укладчика, шпинделя, на котором устанавливается кассета, и выключателя станка при заполнении кассеты. Привод укладчика осуществляется копримом, профиль которого образован расходящейся и сходящейся спиралями Архимеда. Скорость протягивания проволоки  $V = \pi D n_k$ , где  $D$  – диаметр витка намотки (возрастает от 0,170 до 0,255 м),  $n_k$  – частота вращения кассеты ( $n_k = 5,4; 8,1; 12,1$  об/мин). Скорость проволоки по мере намотки возрастает и составляет в м/мин:

для первой ступени	–2,88...4,23;
для второй ступени	–4,32...6,35;
для третьей ступени	–6,48...9,52.

Механизм подачи проволоки включает бухтодержатель и выключатель станка, срабатывающий от нажатия упора при застревании проволоки.

Система охлаждения и станция охлаждения, включающие трубопровод, бак, насос и магнитный сепаратор, служат для подачи СОЖ в зону обработки и очистки от ФАП.

Пневмооборудование служит для подачи воздуха к цилиндру бункера (осуществляется подача порошка в рабочую зону) и в зону намотки для обдува обработанной проволоки.

Бункер предназначен для дозирования подачи порошка в рабочую зону. Представляет собой емкость объемом 2 дм<sup>3</sup> и обеспечивает пределы дозирования от 5 до 40 см<sup>3</sup>. Срабатывание производится через определенные промежутки времени по команде реле, с предварительно установленным временем срабатывания.

Станок работает в наладочном и полуавтоматическом режимах.

Станок модели СФТ2.125 для магнитно-абразивной зачистки проволоки обеспечивает качественную обработку сварочной проволоки и эффективно используется на операциях подготовки проволоки перед сваркой в сварочном производстве машиностроительных предприятий.

На основании выполненных исследований получены данные, позволившие разработать технологические рекомендации по магнитно-абразивной зачистке проволоки из различных материалов применительно к обработке на станках СФТ2.111 и СФТ2.125. В табл. 6.6 приведены рекомендуемые значения технологических факторов и параметров процесса.

Рекомендуемые значения технологических факторов процесса магнитно-абразивной зачистки сварочной проволоки на станках СФТ2.111 и СФТ2.125

Материал проволоки	Алюминиевый сплав (АМг-6)	Углеродистая сталь	Нержавеющая сталь (ЭП659-ВИ)
Диаметр проволоки $d$ , мм	1,6...3,0		
Диаметр полюсных наконечников $D/d$ , мм	110/100		
Частота вращения полюсных наконечников $n$ , об/мин	794...1261		
Магнитная индукция в рабочем зазоре $B$ , Тл	0,3...0,4	0,4... 0,5	
Расстояние между полюсными наконечниками $b$ , мм	7...9	6... 8	
Глубина погружения проволоки в рабочий зазор $a$ , мм	4...6	5...6	5...7
Доза ФАП (в расчете на одну пару полюсов) $V$ , мл	15... 20		20...25
Фракция (зернистость) ФАП $\Delta$ , мкм	100...315	100...500	315...800
Скорость резания $V$ , м/с	5		
Скорость подачи (протягивания) проволоки $S$ , м/мин	до 10	до 6	до 3

### 6.5. Проведение технологических исследований

Станки СФТ2.111 и СФТ2.125 хорошо себя зарекомендовали в промышленном производстве, обеспечивая качественную зачистку проволоки. Однако их эксплуатация выявила несколько особенностей конструкции, требующих дополнительной проработки. Например, при избытке количества порошка в межполюсном пространстве может формироваться жесткая с выпуклым контуром «щетка», которая при слабом натяжении проволоки выдавливает ее из рабочей зоны. Это приводит к нарушению стабильности процесса МАЗ и равномерности обработки поверхности проволоки. Точная регулировка дозы и периодичность подачи ФАП в рабочую зону и настройка механизма натяжения особенно важны при зачистке проволоки малого диаметра ( $d = 0,5...1,0$  мм) с пониженными характеристиками прочности.

В целях решения этой проблемы и стабилизации процесса МАЗ предложена новая схема устройства (рис. 6.7) [259]. Полюсные наконечники установлены попарно напротив друг друга и своими рабочими элементами – зубцами введены в зацепление с гарантированным зазором. Между парами полюсов протягивается проволока, поверхность которой зачищается порошком, формируемым магнитным полем в виде отдельных сегментов противоположащими разнополярными зубцами пары полюсов. Привод вращения обеих пар полюсов синхронизирован.

Оптимизация параметров этой схемы магнитно-абразивной обработки, решение вопросов производительности процесса и качества обработки поверхности, работоспособности и износа режущих элементов требуют изучения физической сущности процесса, его динамики и механизма съема обрабатываемого материала.

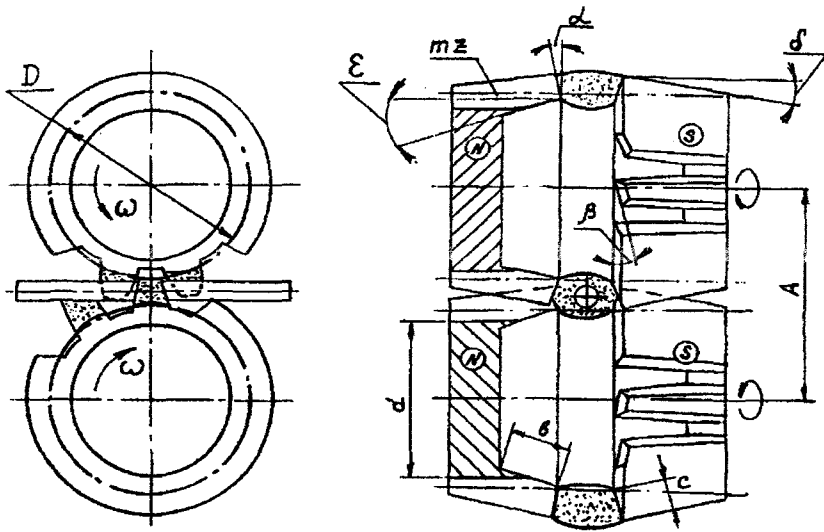


Рис. 6.7. Схема МАЗ проволоки с чашечными зубчатыми полюсными наконечниками

Анализ процессов магнитно-абразивной обработки и абразивного изнашивания [260, 261] свидетельствует об определенном подобии их физической сущности. В основу такого подхода были положены предпосылки, вытекающие из сопоставления данных процессов [253].

Как при магнитно-абразивной обработке, так и при изнашивании механическое воздействие порошковых частиц на поверхность детали сопровождается механическим, химическим, физическим или тепловым разрушением материала поверхностного слоя. В реальных условиях перечисленные процессы могут протекать одновременно, смешиваясь в различных сочетаниях, определяющих долю их участия в суммарном разрушении материала. Однако, несмотря на большое число факторов, оказывающих влияние на интенсивность разрушения и удаления материала, общим для процессов МАО и изнашивания является механический характер удаления поверхностного слоя.

Процесс механического разрушения при МАО и изнашивании содержит элементы резания (диспергирования) и элементы упругопластических деформаций отделяемого слоя (микростружка) и материала детали (обрабатываемая поверхность).

Для процесса МАО и изнашивания абразивом существенной частью механического процесса, определяющего съем материала, является микрорезание, т.е. отделение от материала микроскопической стружки в результате царапающего действия абразивной частицы.

Съем материала при МАО, как и в процессе изнашивания, происходит при определенной нормальной нагрузке, от которой зависит величина снимаемого материала; в отличие от шлифования, которое ведется при определенной толщине снимаемого слоя, определяющей силовую нагрузку процесса. Эта особенность имеет существенное значение также и относительно качественной стороны процесса, т.к. определяет температурный и тепловой режимы в зоне резания, от которых зависит состояние поверхностного слоя материала.


Процесс магнитно-абразивной обработки имеет и определенные отличия от процесса изнашивания, обусловленные спецификой МАО: наличие магнитного поля как особой связки ферроабразивных частиц, определяющей особенности силового воздействия частиц на поверхность детали и взаимодействия частиц между собой; воздействие энергии магнитного поля непосредственно на материал детали, весьма высокая твердость, износостойкость и особая геометрия зерен специально созданного ферромагнитного абразивного материала и другие специфические особенности. Эти различия могут вызвать расхождения в некоторых закономерных зависимостях двух процессов. Однако такие факторы, как влияние на съем материала поверхностного слоя его физико-механических свойств, технологических сред, геометрических и кинематических параметров процесса взаимодействия частиц абразива с поверхностью, соотношения их твердостей, являются общими для обоих процессов.



Тождественность явлений, происходящих при МАО и изнашивании абразивом позволяет, в соответствии с основными видами абразивного изнашивания, по аналогии с классификацией видов трения, предложенной Г. Фляйшуром [262] дифференцировать виды резания, реализуемые при магнитно-абразивной обработке (табл. 6.7).

Таблица 6.7

Особенности резания при МАО

Отличительные признаки видов резания	Вид воздействия (процесс резания)		
	Динамический (Д)	Кинематический (К)	Магнитно-статический (МС)
Характер движения порошка относительно поверхности детали в нормальной плоскости, соотношение между компонентами скорости	удар $\frac{V_d^s}{V_d^n} = \text{ctg}\alpha < f$	перемещение $\frac{V_K^s}{V_K^n} = \text{ctg}\alpha > f$	движения нет $V_{МС}^n \Rightarrow 0$ $\alpha \cong 0$
Характер взаимодействия частицы порошка с поверхностью в пределах одного цикла контактирования (акта резания)	кратковременный локальный удар с давлением $P_{\text{имп}}$	продолжительное скольжение с переменным давлением $P_{\text{var}}$	длительное скольжение с постоянным давлением $P_{\text{const}}$
Условное графическое изображение процесса резания			$\alpha = 0$
	$\alpha$ – угол наклона вектора скорости к обрабатываемой поверхности (угол атаки); $f$ – коэффициент трения абразивного зерна по обрабатываемой поверхности;  – зона воздействия порошка на поверхность изделия; $F_1, F_2$ – соответственно магнитные и механические силы		

Критерием разделения динамического и кинематического процессов разрушения является соотношение между углом атаки  $\alpha$  и коэффициентом трения  $f$  абразивного зерна по обрабатываемой поверхности. Это соотношение является одним из граничных условий перехода от микрорезания к многоцикловым процессам разрушения [260].

Классификация схем МАО по совокупности реализованных видов резания позволяет рассматривать механизм взаимодействия системы порошок-поверхность отдельно для каждого вида резания независимо от конструктивного оформления устройств и геометрии обрабатываемой поверхности.

Принятые схемы МАО проволоки (см. рис. 6.2, б и 6.7) реализуют преимущественно процесс резания, характеризующийся высокими показателями производительности и качества зачистки. Обработка проволоки осуществляется кольцевым инструментом при ее перемещении в зазорах соответствующих полюсных наконечников. Процесс обработки по схеме с зубчатыми полюсными наконечниками (см. рис. 6.7) отличается симметричным силовым воздействием на изделие массы порошка, уплотненного магнитным полем.

Реализованная кинематика взаимодействия ферропорошка с поверхностью изделия удовлетворяет условию ( $\text{ctg } \alpha > f$ ) перехода от многоцикловых процессов разрушения к микрорезанию

$$[\operatorname{ctg}\alpha]_{\min} = 2,1 \dots 2,5 \gg f,$$

где  $\alpha$  – угол атаки,  $\operatorname{ctg}\alpha = V^{\text{II}}/V^{\text{I}}$  (возможные значения составляющих скорости движения порошка относительно обрабатываемой поверхности:  $V^{\text{II}} = 4 \dots 12$  м/с,  $V^{\text{I}} =$  от 0 до 2 ...5 м/с),  $f$  – коэффициент трения порошка по металлу, равный 0,2... 0,32 /4/.

Таким образом, для реализованных процессов МАО характерна значимость фрикционной составляющей разрушения, обусловленной скольжением частиц, и незначительна роль ударной составляющей.

Расположение и геометрия полюсных наконечников обеспечивают формирование, под действием сил магнитного поля, режущего инструмента кольцевой (зубчатой) абразивной щетки. Эффективная рабочая область инструмента представляет собой наружный кольцевой слой порошка, состоящий из отесненного  $h_{\text{отт}}$  и  $h_{\text{упл}}$  слоев. Величина  $h_{\text{отт}}$  определяется глубиной внедрения изделия в инструмент, т.е. их относительным расположением. Глубина уплотненного слоя  $h_{\text{упл}}$  зависит от отесненного объема порошка, т.е. от  $h_{\text{отт}}$  исходной плотности инструмента и определяется по формуле

$$h_{\text{упл}} = k_{\text{мех}} [h_{\text{отт}}/\delta + 1] d,$$

где  $k_{\text{мех}} = \gamma_{\text{отт}} / \gamma_{\text{раб}}$  – коэффициент механического взаимодействия, показывающий при какой относительной рабочей плотности инструмента  $\gamma_{\text{раб}}$  осуществимо механическое взаимодействие между зёрнами, получен при теоретическом моделировании абразивной массы частиц среднего размера  $d$

$$\delta \approx d \left[ \frac{-1}{\varepsilon^3} - 1 \right],$$

где  $\varepsilon = \gamma_n / \gamma_m$  – коэффициент концентрации зёрен порошка в инструменте,  $\gamma_n$  – плотность порошка в инструменте.

Учитывая полученные соотношения:

$$h_{\text{раб}} = h_{\text{от}} \left[ 1 + k_{\text{мех}} \frac{\sqrt[3]{\varepsilon}}{1 - \sqrt[3]{\varepsilon}} \right].$$

Очевидно, что толщину формируемого кольцевого инструмента нецелесообразно принимать больше глубины рабочего слоя, т.е.

$$h = R - r \leq h_{\text{раб}},$$

где  $R$  и  $r$  – наружный и внутренний радиусы инструмента, соответственно.

Интенсивность абразивного воздействия частиц порошка на обрабатываемую поверхность изделия определяется физико-механическими свойствами порошкового инструмента, которые в свою очередь зависят от действующих в порошковой среде сил и, прежде всего, сил магнитного поля, формирующего инструмент.

Давление зёрен порошка на обрабатываемую поверхность от действия сил магнитного поля определено из предположения, что нарушение равновесия порошковой массы компенсируется силами давления поверхности изделия на частицы порошка. То есть давление порошка численно равно сумме элементарных магнитных сил в объеме отесненного порошка. Составляющие элементарных магнитных сил определяются на основе расчета магнитного поля в диаметральной плоскости инструмента методом конечных элементов по разработанным программам [73].

Возникающие при деформации инструмента напряжения бокового распора, создающие на поверхности изделия давления механического и магнитного "заклинивания", представляется возможным определить по методике, предложенной в работе [4].

Для определения давления порошка от действия инерционных сил, возникающих при кинематическом контакте частиц порошка с обрабатываемой поверхностью, движущаяся масса условно принималась за гидродинамический поток, и рассчитывалось нормальное гидродинамическое давление потока, на поверхность

$$f_{ин}^n = \left[ \omega^2 \gamma_n / r_n^2 \right] \rho^2 \cos^2 \varphi (H - \rho \sin \varphi)^2.$$

Нормальная составляющая давления порошка от действия центробежных сил определяется исходя из действующей рабочей области инструмента

$$f_{цб} = \left[ \omega^2 R \gamma_n / r_n^2 \right] \eta_{раб} \sin^2 \varphi (H - \rho \sin \varphi)^2.$$

Для принятых схем обработки и рекомендуемых режимов процесса

$$f_{цб}^n = 0,015 \dots 0,06 \text{ МПа}; \quad f_{ин}^n = 0,020 \dots 0,10 \text{ МПа}.$$

Давление порошкового инструмента на поверхность изделия в станке, т.е. от действия магнитных сил и напряжений бокового распора достигает величины 1,2...1,8 МПа.

На основе исследования механизма формирования порошкового инструмента, его кинетики и действующих в зоне обработки сил установлены критерии выбора оптимальной геометрии полюсных наконечников:

- максимум магнитного потока в рабочей зоне (через торцовую кольцевую поверхность) и минимальные потери в центральной части полюсов (через внутреннюю полость) и вне полюсов;

- максимальное значение радиальной составляющей сил магнитного поля (и их градиента) по границе торцовой рабочей поверхности и полости, т.е. создание "запирающей зоны", которая, за счет сил магнитного поля, удерживает порошок от попадания внутрь полюсов при контактировании инструмента с изделием;

- непрерывный плавный рост сил магнитного поля в радиальной плоскости инструмента от периферии к центру и в тангенциальной плоскости в направлении обратном вращению (для зубчатых полюсов);

- непрерывное безударное контактирование зубчатого порошкового инструмента с поверхностью изделия.

В результате выполненных расчетов магнитного поля и многокритериальной оптимизации полученной математической модели с применением  $L_{\pi c}$  последовательности определены основные геометрические параметры рабочей зоны систем MAO проволоки (см. рис. 6.7):

- углы между осью полюсного наконечника и образующими наружной поверхности и полости  $(\delta, \epsilon) = 1 \dots 8^\circ$ , причем величина угла между осью и образующей полости не менее величины угла между осью и образующей наружной поверхности, т.е.  $\epsilon \geq \delta$ ;

- угол между осью и образующей торцовой рабочей поверхности  $\gamma = 50 \dots 85^\circ$ ;

- отношение ширины рабочей поверхности к длине образующей плоскости  $c/b = 1 : 1,5 \dots 5$ ;

- отношение длины образующей полости к диаметру дна полости  $b/d = 1 : 1, 2 \dots 4$ .

Непрерывный безударный процесс резания зубчатым инструментом обеспечивается при условии постоянного контактирования с изделием не менее двух зубьев порошка каждой пары полюсов одновременно. Для полюсных наконечников с модульными зубьями данное условие выполняется при соотношении

$$\frac{m(z+1)}{2} \cos \left[ \frac{2\pi}{z} \right] \geq A,$$

где  $m$  и  $z$  – модуль и число зубьев,  $A$  – межосевое расстояние.

Магнитная система с предлагаемой геометрией рабочей части и расположением полюсных наконечников обеспечивает оптимальное, с точки зрения энергозатрат производительности и качества обработки, распределение магнитного поля в рабочей зоне. Сформированный инструмент позволяет при интенсивном силовом воздействии на обрабатываемую поверхность обеспечить непрерывность и плавность процесса резания.

Схема MAO с зубчатыми полюсными наконечниками реализована в конструкции экспериментального станка модели 922.

На основании экспериментального изучения технологических и эксплуатационных возможностей модуля 922 создан и изготовлен станок для магнитно-абразивной обработки проволоки диаметром 0,5...3,0 мм модели 8,013 (общий вид станка на рис. 6.8).

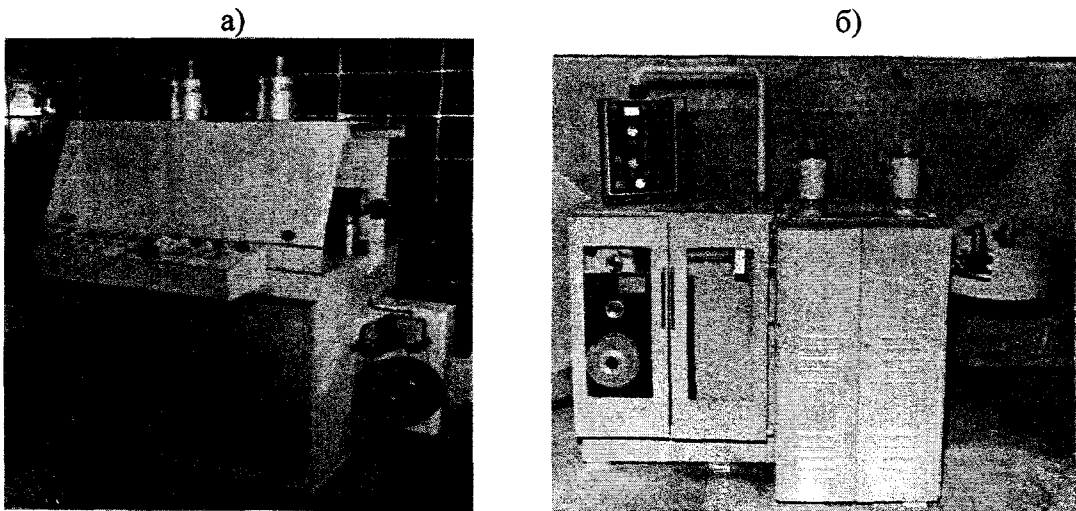


Рис. 6.8. Общий вид станков для магнитно-абразивной обработки проволоки модели 922 (а) и 8.013 (б)

Технические характеристики станка 8.013:

частота вращения полюсных наконечников, об/мин	794,1010,1261
мощность двигателя, кВт	1,5
число катушек	4
сила тока (макс.), А	6
магнитная индукция в рабочих зазорах, Тл	0,2...0,8
скорость протягивания проволоки, м/мин	7...23

С учетом имеющейся информации о механике формирования порошкового инструмента в магнитном поле полюсных наконечников предварительно определены основные геометрические параметры рабочей зоны станка 8.013 (см. рис. 6.7). Угол наклона торцевой рабочей поверхности зубьев полюсных наконечников в радиальной плоскости выбран равным  $\alpha = 5...40^\circ$ , то же в тангенциальной плоскости  $\beta = 5...20^\circ$ . С целью оптимизации этих параметров и определения их влияния на показатели процесса MAO был поставлен следующий эксперимент.

Исследование проводилось с использованием математического планирования эксперимента. Переменными факторами эксперимента являются: углы наклона торцевой рабочей поверхности зубьев полюсных наконечников в радиальной и тангенциальной плоскостях  $\alpha$  и  $\beta$ ; ширина рабочей зоны  $b$ ; скорость резания  $V$ . В качестве функции отклика принята производительность обработки – удельный съём материала  $\Delta g$ . Из анализа результатов предварительных экспериментов и литературных данных известно, что искомую

зависимость производительности процесса можно выразить многомерным полиномом второго порядка. Поэтому для экспериментального определения параметров математической модели производительности был принят некомпозиционный план второго порядка – полностью насыщенный план Рехтшафнера. Выбор этого плана объясняется минимальным содержанием опытов, необходимых для получения регрессионной модели второго порядка, что в данном случае сокращает количество требуемых для проведения эксперимента полусных наконечников с отличающимися углами торцевой поверхности зубьев. Условия эксперимента и матрица плана представлены в табл. 6.8.

Таблица 6.8

Матрица плана и результаты эксперимента

Уровни варьирования	Факторы /обозначение/				Функция отклика
	Угол наклона торцов зубьев, градус		Ширина рабочей зоны $b$ , мм	Скорость резания $V$ , м/с	
	в радиальной плоскости ( $\alpha$ )	в тангенц. плоскости ( $\beta$ )			
1	2	3	4	5	6
Основной уровень	15	10	8	5,8	Удельный съем материала, $\Delta g$ , мг/см <sup>2</sup> · мин
Шаг варьирования	15	10	2	1,7	
Верхний уровень (+1)	30	20	10	7,5	
Нижний уровень (-1)	0	0	6	4,1	
1	–	–	–	–	
2	–	+	+	+	11,28
3	+	–	+	+	8,68
4	+	+	–	+	11,78
5	+	+	+	–	6,18
6	+	+	–	–	10,07
7	+	–	+	–	7,42
8	+	–	–	+	14,14
9	–	+	+	–	9,64
10	–	+	–	+	18,38
11	–	–	+	+	13,54
12	+		0	0	12,46
13	0	+	0	0	14,09
14	0	0	+	0	14,78
15	0	0	0	+	15,85

Обработка проволоки проводилась на модуле 922 при скорости протягивания проволоки  $V = 10$  м/мин. В качестве ферроабразивного порошка использовался порошок марки СП-17 фракции 160...100 мкм. Состав смазочно-охлаждающей жидкости – водный раствор триэтаноламина (0,3%), олеиновой кислоты (0,6%), дикалевая соль олигоуретанбисмочевинуюксусной кислоты (0,3%).

В результате математической обработки экспериментальных данных получена следующая теоретическая регрессионная модель производительности обработки (в натуральных значениях факторов процесса):

$$\Delta g = 17,72 - 0,09\alpha + 0,15\beta - 5,11b + 8,88V + 0,22b^2 - 0,67V^2 - 0,05bV.$$

Путем оптимизации (максимизации) регрессионной модели методом последовательности  $L_{пт}$  определены оптимальные значения факторов эксперимента:

- угол наклона торцевой поверхности зуба в радиальной плоскости  $\alpha = 0 \dots 6^\circ$ ;
- то же в тангенциальной плоскости  $\beta = 4 \dots 12^\circ$ ;
- ширина рабочей зоны  $b = 6,0 \dots 6,4$ ;
- скорость резания  $V = 5 \dots 7$  м/с.

В качестве геометрических интерпретаций результатов исследований на рис. 6.9 и 6.10 приведены графики зависимости производительности от каждого фактора процесса для нескольких значений, охватывающих диапазон исследования, другого фактора при фиксированных в области оптимума значениях двух остальных факторов.

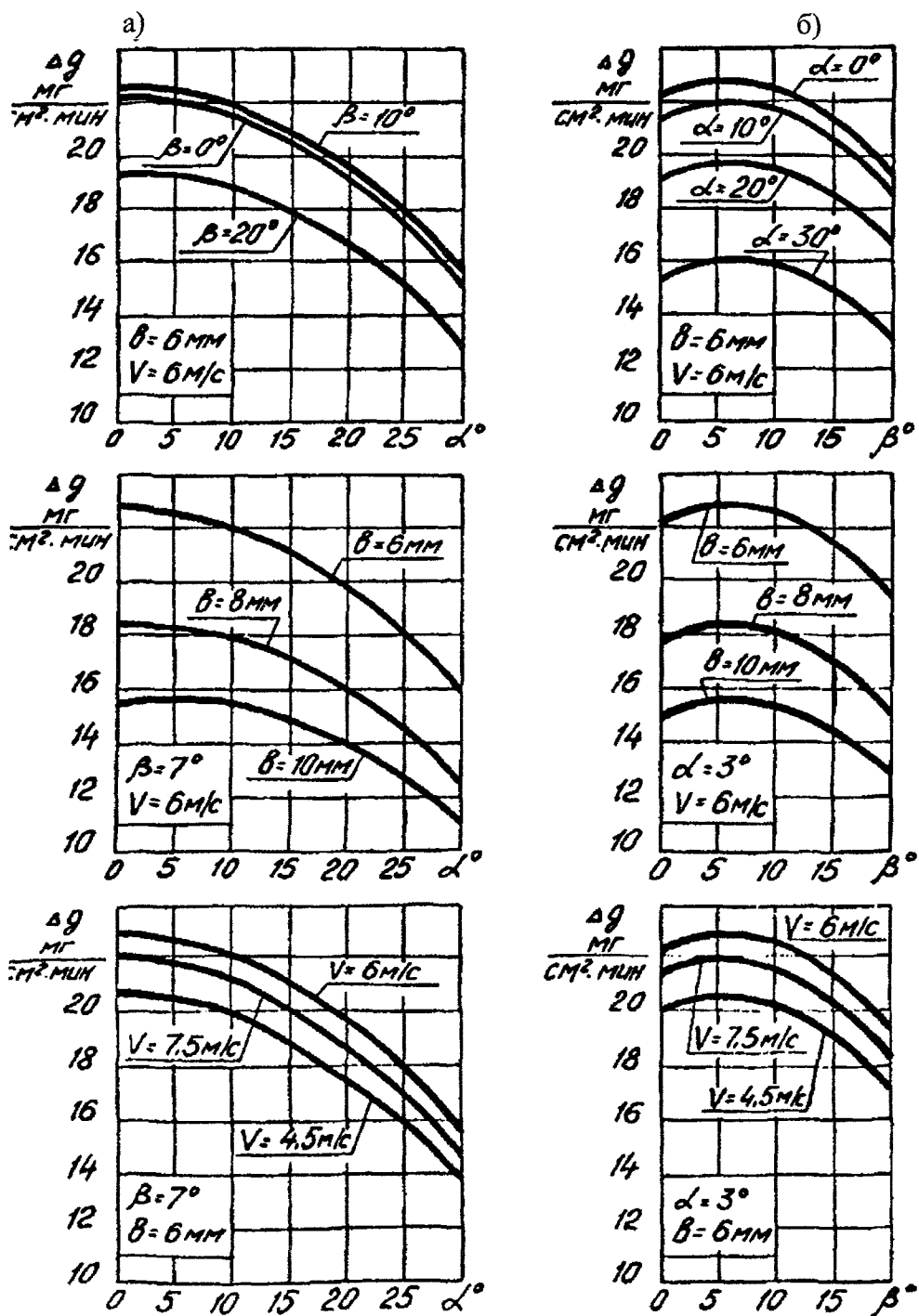


Рис. 6.9. Зависимость производительности процесса МАО проволоки от геометрических параметров рабочей зоны

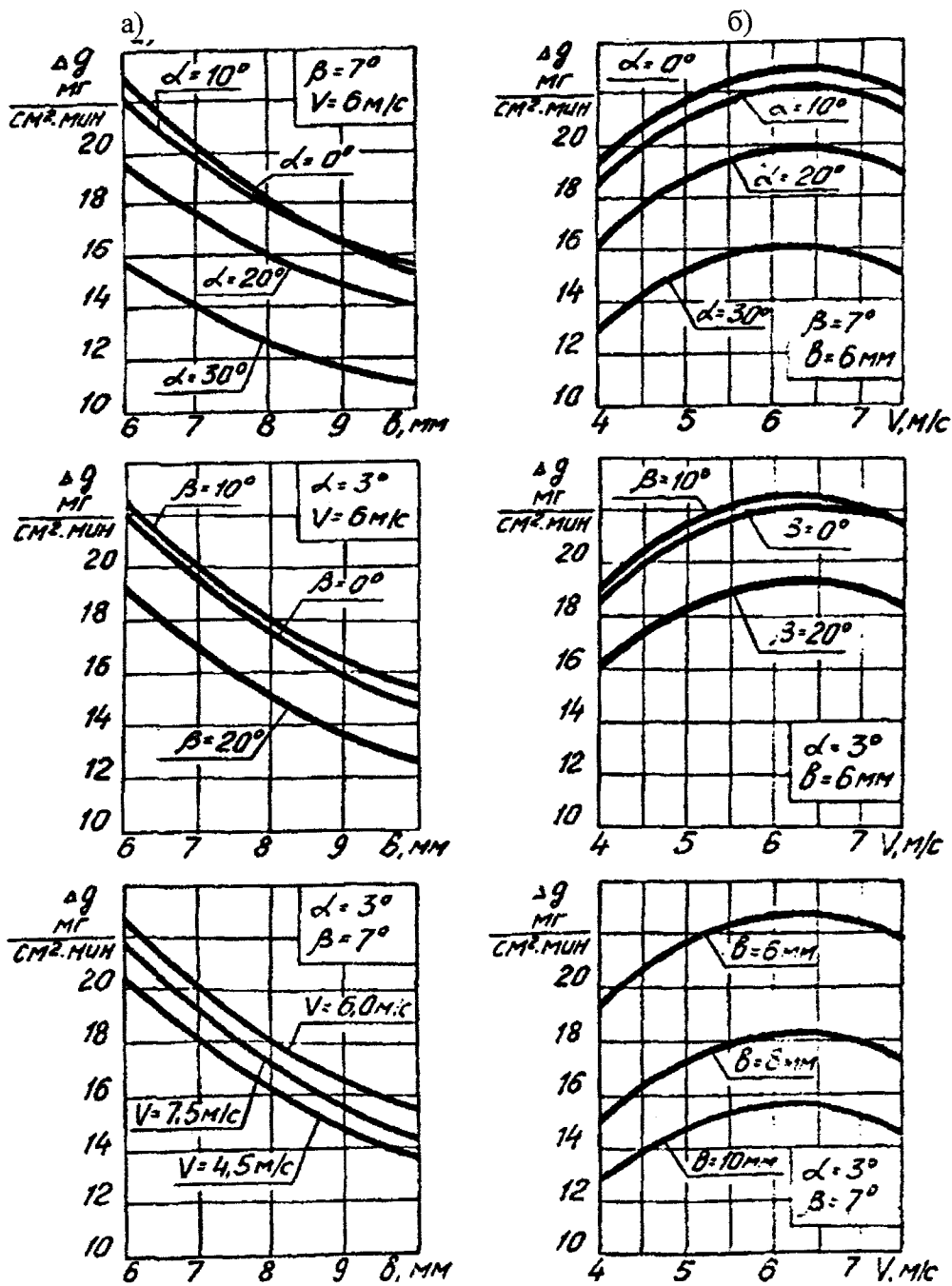


Рис. 6.10. Зависимость производительности процесса МАО проволоки от ширины рабочей зоны (а) и скорости резания (б)

Вид кривых для каждого исследуемого параметра, их близкое к эквидистантному расположение иллюстрирует малую значимость совместного влияния параметров, что определяется сравнительно небольшими значениями коэффициентов регрессии при парных произведениях факторов. Более значимо совместное влияние  $b$  и  $V$ , а также углов  $\alpha$  и  $\beta$  с шириной рабочей зоны  $b$ . Последнее объясняется тем, что с изменением углов наклона рабочей поверхности зубьев изменяется и ширина рабочей зоны, т.е. с увеличением  $\alpha$  и  $\beta$  в значительной части рабочего зазора увеличивается расстояние между торцами полусных наконечников. Зависимость производительности от скорости резания  $V$ , угла  $\beta$  и в некоторой области факторного пространства (в частности, при больших значениях  $b$ ) от угла  $\alpha$  носит экстремальный характер. Аналогичная зависимость интенсивности удаления материала от скорости относительного движения абразивных частиц отмечается также в других процессах взаимодействия порошка с поверхностью металла, в частности при ударно-абразивном изнашивании, турбо- и струйно-абразивной обработке и т.п.

Наблюдаемое смещение и сужение границ области оптимума углов наклона рабочей поверхности по отношению к рассчитанным значениям объясняется следующими причинами. Расчет магнитного поля производился с учетом допущения о соответствии характера распределения магнитного поля в зазоре полюсов с ферромагнитным порошком и в воздушном зазоре. Однако в действительности при заполнении порошком рабочего зазора полюсных наконечников с углами  $\alpha$  и  $\beta$  отличными от нуля происходит некоторое изменение распределения магнитного поля, которое имело место в воздушном зазоре. Наличие порошка в зазоре приводит к перераспределению магнитного поля и смещению основного магнитного потока (а вместе с ним смещается и порошок) в область наименьшего расстояния между торцами зубьев. Смещение ферромагнитного порошка в область наименьшего расстояния приводит к снижению эффекта «заклинивания», а, следовательно, к уменьшению производительности процесса резания. Устранить явление смещения порошка возможно при выполнении зубьев с накладками из диамагнитного материала, в которых и формируется торцовая поверхность с необходимыми значениями углов  $\alpha$  и  $\beta$  [262].

Подготовка сварочной проволоки обычно включает операции расконсервации, очистки от загрязнений, удаления оксидной пленки, промывки, сушки и намотки на кассеты. Для выполнения этих работ создан автоматизированный комплекс «Струна» (рис. 6.11), содержащий бухтодержатель 1, расположенный на станине 2, механизм натяжения 3, блок предварительной плазменной очистки 4, блок магнитно-абразивной обработки 5, блок окончательной плазменной очистки от СОЖ 6 и механизм протягивания и укладки очищенной проволоки в кассету 7 [263].

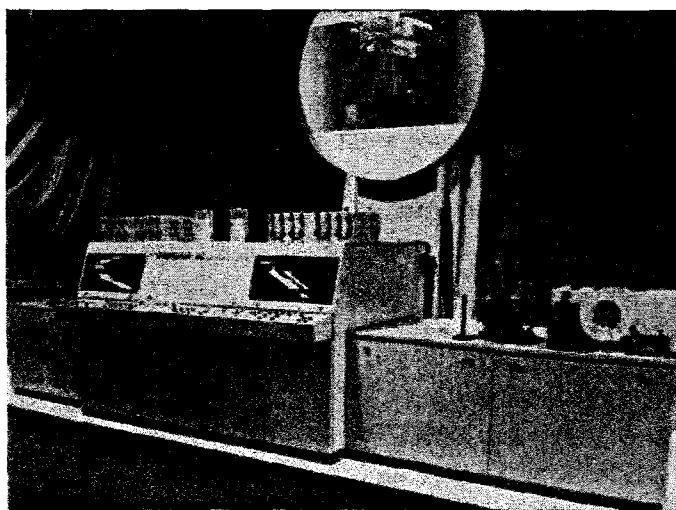
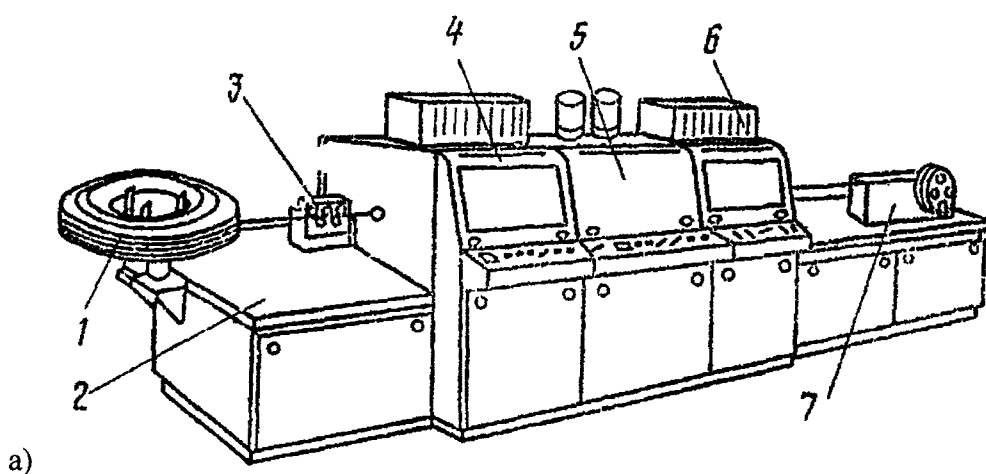


Рис. 6.11. Схема устройства (а) и общий вид (б) комплекса «Струна»



Блок динамической плазменной обработки формирует набегающий непрерывный стационарный плазменный поток с энтальпией торможения  $I \geq 10^7$  Дж/кг при помощи двух плазменных головок, закрепленных на каретках по обе стороны очищаемой проволоки [264].

Модуль предварительной плазменной очистки 4 предназначен для очистки поверхности проволоки от консервации путем испарения последней в потоке плазмы.

Модуль магнитно-абразивной обработки 5 предназначен для очистки проволоки от механических загрязнений и оксидной пленки, формирования выглаженного микрорельефа поверхности. Принцип его работы и конструкция основных узлов те же, что и у станка модели 922. Модуль состоит из двух обрабатывающих головок, имеющих приводы вращения. Головки содержат электромагнитные системы и полюсные наконечники, несущие ферро-магнитный абразивный порошок. Предусмотрены механизмы натяжения и демагнетизации для размагничивания проволоки. Имеется устройство для подачи смазочно-охлаждающей жидкости в зону обработки с целью интенсификации процесса зачистки и повышения ее качества. Модуль окончательной плазменной очистки 6 осуществляет удаление остатков СОЖ путем их испарения в потоке плазмы. Механизм 7 состоит из привода протягивания и порядной намотки и укладки проволоки в кассету, устройства регулирования скорости протягивания и фиксации окончания намотки.

Комплекс «Струна» производит очистку проволоки из стали и цветных сплавов диаметром 1...4 мм со скоростью 12...18 м/мин. Предварительная плазменная обработка, магнитно-абразивная зачистка и окончательная плазменная обработка обеспечивают качественную очистку и сушку проволоки. На ее поверхности формируется тонкая и плотная оксидная пленка, предохраняющая основной металл от дальнейшего окисления. Шероховатость поверхности проволоки после зачистки в 2...3 раза ниже исходной и имеет значения  $Ra = 0,63...0,16$  мкм. В результате обработки удаляется слой металла толщиной 5...20 мкм. При хранении кассеты в герметичной упаковке срок годности проволоки к сварке не менее года.

Имеются значительные резервы снижения энергосиловых затрат для обеспечения работы комплекса «Струна». При реализации этих резервов один комплекс «Струна» может эффективно решать задачи целого участка электрохимической очистки сварочной проволоки из различных материалов [265].

Повышению производительности МАЗ проволоки способствовали оптимизация параметров зачистки и оригинальные технические решения [266, 267], направленные на переориентацию ферроабразивных частиц в зоне обработки, восстановление режущего контура «порошковой щетки» и интенсификацию процессов резания и выглаживания обрабатываемой поверхности.

Для удаления остатков СОЖ и частиц порошка с зачищенной поверхности, а также для ее интенсивной сушки в станках для МАЗ проволоки может эффективно использоваться оригинальное устройство с пневматическим приводом [268].

Приводим значения оптимальных технологических параметров процессов магнитно-абразивной зачистки проволоки из различных материалов на станке 8.013 (см. табл. 6.9). Съем металла составляет 3...5 мкм на сторону. Характеристики применяемых ферроабразивных порошков приведены в табл. 3.12. В опытах использованы СОЖ двух составов.

Состав №1: триэтаноламин (1%), олеиновая кислота (1%), лапрол 3003 (1%) и вода (97%).

Состав №2: триэтаноламин (1,3%), олеиновая кислота (2%), кальцинированная сода (0,04%), 25%-й раствор аммиака (1%), вода (95,66%).

Отражающая способность проволоки из сплава АМг-6 в исходном состоянии поставки  $O_c = 35...40\%$ , после травления  $O_c = 40...50\%$ .

## 6.6. Исследование электрохимических характеристик поверхности

Выполненные многочисленные эксперименты подтверждают повышение сопротивления коррозии изделий после их абразивной обработки в магнитном поле. Для количественной оценки этого явления исследованы электрохимические характеристики проволоки из сплава АМг-6 после МАЗ и после химического травления [176].

Методика проведения электрохимических исследований заключается в следующем. Исследуемая поверхность проволоки из сплава АМг-6 диаметром 2 мм составляет 1 см<sup>2</sup>, остальная поверхность изолировалась лаком. Обезжировали образцы в ацетоне в течение 5...10 минут. При измерении электролитической емкости поверхности в качестве электролита использовали раствор, не растворяющий металл и его оксид. В данном случае – 3%-й раствор лимонной кислоты, нейтрализованный нашатырным спиртом до pH=5,5.

Для сравнения исследовались образцы из этого же материала после травления. Травление производили следующим образом [269]:

– травление в 10%-м растворе NaOH, температура травления 70°C, время травления 2 мин;

– промывка в горячей воде;

– осветление в 10%-м растворе HNO<sub>3</sub>. Температура комнатная, время выдержки 1 мин;

– промывка в горячей воде;

– просушка при температуре 40...70°C до полного удаления влаги.

Таблица 6.9

Результаты МАЗ проволоки из различных материалов

№ опы- тов	Проволока		ФАП	СОЖ	Результаты МАЗ		
	материал	диаметр, мм			производи- тельность, м/мин	отражающая сп-сть O <sub>c</sub> , %	
						до МАЗ	после МАЗ
1	АМг-6	2,0	ПРЖ-8Ю	№1	15	38	128
2	АМг-6	2,0	ФАД-9К	№1	20	38	127
3	АМг-6	2,0	ПРЖ-8Ю	№2	15	38	123
4	АМг-6	2,0	ФАД-9К	№2	20	38	123
5	08Г2С	1,6	ФАД-9К	№1	20	33	85
6	08Г2С	1,6	ФАД-9К	№2	20	33	80
7	08А	4,0	ФАД-9К	№1	10	29	77
8	08А	4,0	Fe-TiC	№1	15	29	72
9	08ХМ	4,0	ФАД-9К	№1	10	10	96
10	08ХМ	4,0	Fe-TiC	№1	15	10	88
11	09Х16	4,0	ФАД-9К	№1	7	15	119
12	09Х16	4,0	Fe-TiC	№1	10	15	106
13	12Х13	2,0	ФАД-9К	№1	7	11	54
14	12Х13	2,0	Fe-TiC	№1	10	11	52
15	ЭП 659-ВИ	1,6	ФАД-9К	№1	7	15	57
16	ЭП 659-ВИ	1,6	Fe-TiC	№1	10	15	120
17	BT1-00	2,5	ФАД-9К	№1	7	14	66
18	BT1-00	2,5	ФАД-9К	№2	7	14	59
19	BT1-00	2,5	Fe-TiC	№1	7	14	60
20	BT1-00	2,5	Fe-TiC	№2	7	14	58

Для коррозионных испытаний в качестве агрессивной среды использовали 3%-й раствор NaCl + 0,1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Электролитическую емкость измеряли при помощи электролитической ячейки. Вспомогательным электродом служила пластина циркония значительно большей поверхности. Измерения проводили с помощью моста переменного тока Р-5021 на частоте 1 кГц.

Для изучения процесса образования анодных оксидных пленок с помощью потенциостата П-5827, работающего в гальваностатическом режиме, снимали кривую «напряжение-время». По достижении напряжения 20 В ток выключали и проводили измерения токов утечки образованной анодной пленки и емкости. По наклону кривой зависимости «напряжение-время» рассчитывали скорость образованной анодной пленки  $S = \Delta V / \Delta t$ , как отношение прироста напряжения к изменению времени. Возможная начальная задержка роста потенциала представляет инкубационный период, величина которого также характеризует состояние исходной поверхности.

При малых напряженностях поля через анодные и коррозионные оксидные пленки протекает ток утечки, величина которого зависит от предварительной обработки поверхности и количества дефектов в оксидной пленке. Величину тока утечки измеряли с помощью потенциостата как функцию напряжения на ячейке. Зависимость «ток утечки-напряжение» выражается кривой экспоненциального вида с выделяющимся начальным прямолинейным участком. Наклон этого участка  $\alpha = \Delta I / \Delta V$ , мкА/В·см<sup>2</sup>, определяет омическую составляющую проводимости системы и, по некоторым данным, пропорционален количеству сквозных дефектов оксидного слоя.

Таблица 6.10

Электрохимические характеристики проволоки из сплава АМг-6 после обработки

№ п/п	Вид обработки	Срок выдержки после обработки	Электролитическая емкость после обработки C <sub>0</sub> , мкф/см <sup>2</sup>	Потенциал пробоя $\Psi_{пр}$ , В	Скорость формирования пленки В/мин	Анодирование до 20В		
						Инкубационный период л, мин	Электролитическая емкость после обработки C <sub>0</sub> , мкф/см <sup>2</sup>	Электропроводность $\alpha$ , мкА/В
1	МАЗ	1 сут	1,794	220	—	8,0	—	178,6
2	МАЗ	7 сут	2,482	230	20,2	3,0	0,994	66,6
3	МАЗ	14 сут	2,703	230	22,3	3,0	0,93	105,1
4	МАЗ	1 мес.	1,442	230	—	6,0	—	113,6
5	МАЗ	полгода	0,881	200	25,5	2,0	0,695	210,5
6	химтравл.	1 сут	1,90	228	—	3,0	—	20,0
7	химтравл.	1 мес.	0,360	228	—	2,0	—	7,7

Образцы исследуемой проволоки зачищали магнитно-абразивным способом на станке 8.013 на следующих режимах: скорость резания – 5 м/с, скорость подачи – 10 м/мин, рабочий зазор – 2 мм, магнитная индукция в зазоре – 0,6 Тл, ФАП – ФАД-9К, СОЖ – водный раствор ТЭА (1%) – ОК (1%) – ПАВ-лапрол (1%). Электрохимические характеристики снимали, выдержав образцы проволоки в течение периода от 1 суток до полгода после зачистки. Подробно результаты исследований изложены в работе [176]. В табл. 6.10 приведены отдельные значения исследуемых параметров.

## ГЛАВА 7. МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Проблема финишной обработки плоских поверхностей актуальна во всех областях техники. В машиностроении она, как правило, решается применением операций тонкого шлифования. Они обеспечивают высокий уровень точности, однако сформированная поверхность имеет свойственные шлифованию пониженные значения характеристик качества поверхностного слоя. Так как каждый из известных способов финишной отделки плоскостей (полирование абразивными лентами и пастами, суперфиниш, доводка, притирка и др.) имеет ограниченные технологические возможности, то поиск новых технических решений в этом направлении целесообразен. Необходимо отметить, что процесс полирования плоскостей технологически более сложно осуществить, чем процесс полирования поверхностей тел вращения.

Основные схемы реализации процессов магнитно-абразивной обработки плоскостей представлены на рис. 1.3 *з, и*. Первая из них нашла применение на операциях зачистки поверхностей кромок изделий перед сваркой. Технологические возможности и особенности процессов МАЗ плоских поверхностей кромок изложены в главе 5. В настоящей главе рассмотрены вопросы применения MAO для полирования и зачистки плоских поверхностей листов, лент и корпусных изделий.

### 7.1. Изучение эффективности МАЗ листовых материалов

Возможности управления эффективностью МАЗ листов и лент рассмотрены на примере решения конкретной технологической задачи.

Совершенствование техники неразрывно связано со все более широким распространением электронных приборов и устройств. Использование в таких приборах печатных плат носит повсеместный характер. Одной из сложных проблем в приборостроительной промышленности является технология изготовления плат и, в частности, подготовка их поверхностей под операцию нанесения фоторезиста. Операция подготовки (зачистки) поверхности имеет целью удаление окислов меди с поверхности заготовки и формирование развитого микрорельефа этой поверхности для прочного сцепления покрытия с подложкой [270]. На предприятиях эта операция выполняется либо вручную, либо с использованием дорогостоящего импортного оборудования.

Выполненные поисковые эксперименты показали перспективность применения способа MAO для указанных целей. В связи с этим было создано устройство для обработки ферромагнитных листовых материалов [271] и изготовлен ряд специальных станков модели «Ферромаг». На рис. 7.1 представлен общий вид одного из таких станков. Схема его работы показана на рис. 1.3, *и*. Технические характеристики станка «Ферромаг-012»: линейная скорость вращения полусов – 2 м/с, скорость подачи листов (лент) – 0...2 м/мин, ширина обрабатываемых деталей – не более 250 мм, их толщина – до 2 мм.

Магнитно-абразивная обработка листов и лент выдвинула проблему создания ферромагнитного абразивного порошка (ФАП). Применение для зачистки плат известных ФАП ( $\text{Fe-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe-TiC}$  и др.) оказалось невозможным, поскольку при контакте порошковых частиц с медной поверхностью они адгезионно и диффузионно насыщают ее углеродом и железом. Идеальным для данного случая представляется ФАП, гранулы которого имеют ферромагнитную сердцевину, покрытую прочной химически инертной абразивной оболочкой.

Результаты исследований, изложенные в главе 3, свидетельствуют о ряде достоинств способа получения ФАП распылением расплавов. Главным из них является высокая производительность и возможность эффективного управления геометрической формой и размерами частиц порошка в процессе его изготовления. Более того, использование в качестве распыляющего агента воздуха или азота способствует образованию на поверхности частиц оболочки, состоящей из высокотвердых окислов и нитридов элементов сплава  $\text{Fe-Al-Si-P-C}$ .

Для установления возможностей получения ФАП с оптимальным строением гранул был поставлен следующий эксперимент. Распылением расплавов получено 20 партий ФАП, химический состав которых выбран с учетом выводов главы 3. С целью сохранения высоких магнитных свойств, способности образовывать оболочку абразивного компонента и обеспечения частицам удлиненной осколочной формы в сплаве железо-алюминий-кремний-фосфор-углерод содержание алюминия принято в пределах 0,2...16,0 % мас., а содержание кремния – 0,2...8,0 % мас. [272, 273]. Опыты поставлены согласно матрице центрального композиционного рототабельного плана второго порядка, которая приведена в табл. 7.1.

С целью возможного получения карбидов и фосфидов в абразивной оболочке частиц, а также варьирования их физико-механическими свойствами в сплав Fe-Al-Si вводились фосфор (до 1,5 % мас.) и углерод (до 4 % мас.). Подверглась проверке и возможность получения ФАП на основе сплава железо-алюминий.

Режимы технологического процесса изготовления ФАП на основе сплавов Fe-Al-Si, Fe-Al и Fe-Al-Si-P, полученных распылением струи расплава воздухом, а также состав исходного сырья приведены в работах [5, 86].

Химический состав и магнитные свойства порошков приведены в табл.7.1.

Таблица 7.1

ФАП на основе сплава Fe-Al-Si-P-C и результаты MAO медного листа

№ п/п	Ферромагнитный абразивный порошок					Результаты MAO						
	№ партии	Содержание легирующих элементов, % мас.				$\mu$ (при $H = 200$ кА/м), мкГн/м	$q$ , г/м <sup>2</sup>	Характеристики обработанной поверхности				
		Al	Si	P	C			Ra, мкм	S, мкм	$\gamma$	$\Theta$ , мин	Особенности внешнего вида
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	9	4,5	0,75	–	–	3,92	8,28	0,23	190	0,28	39	слабое потемнение
2	8	4,5	4,25	–	–	3,45	7,88	0,38	220	0,26	59	
3	3	11,5	0,75	–	–	3,14	7,30	0,35	280	1,19	41	светлый матовый фон
4	2	11,5	4,25	–	–	2,26	6,96	0,26	150	0,45	61	
5	1	13,0	2,50	–	–	2,44	6,50	0,27	260	0,46	36	
6	10	3,0	2,50	–	–	3,53	7,70	0,14	230	0,56	10	слабое потемнение
7	4	8,0	5,00	–	–	2,99	8,16	0,30	220	0,20	46	светлый матовый фон
8	13	8,0	–	–	–	3,52	9,08	0,24	190	0,68	42	
9–11	5–7	8,0	2,50	–	–	3,18	8,74	0,21	220	0,30	31	светлый матовый фон
12	11	16	–	–	–	2,52	6,33	0,37	229	0,32	74	
13	12	12	–	–	–	3,08	8,12	0,30	215	0,50	36	
14	13	8	–	–	–	3,52	9,08	0,24	190	0,68	42	слабое потемнение
15	14	4	–	–	–	3,84	8,44	0,21	165	0,60	48	
16	15	8	2,5	1,2	–	3,07	7,66	0,28	155	0,60	66	светлый матовый фон
17	16	8	2,5	0,8	–	3,39	7,68	0,20	256	0,30	40	
18	17	8	2,5	0,4	–	3,28	7,70	0,15	288	0,24	30	
19	5–7	8	2,5	–	–	3,18	7,70	0,21	220	0,30	31	сильное потемнение
20	18	8	2,5	–	3	1,90	7,82	0,50	540	0,10	24	
21	19	8	2,5	–	2	2,55	7,89	0,33	710	0,08	16	
22	20	8	2,5	–	1	3,06	8,00	0,23	520	0,20	19	
23	5–7	8	2,5	–	–	3,18	7,70	0,21	220	0,30	31	светлый матовый фон

Выполненный рентгеноструктурный анализ этих порошков показал, что содержание в их частицах высокотвердых соединений – окислов, карбидов, нитридов и фосфидов алюминия, кремния и железа – составляет не более 5 % мас. [156].

Итак, целью настоящего эксперимента является установление возможностей формирования развитого микрорельефа поверхностей печатных плат (ПП) абразивной обработкой в магнитном поле порошками на основе сплава железо-алюминий-кремний-фосфор-углерод.

Согласно технологическим требованиям операция МАО поверхностей должна обеспечить:

- удаление пленки окислов меди с поверхности заготовки;
- формирование развитого микрорельефа поверхности с целью обеспечения необходимого адгезионного взаимодействия ее с фоторезистом;
- высокую степень смачиваемости поверхности;
- отсутствие абразивных и других инородных включений в сформированном поверхностном слое.

Обработку фольгированного стеклотекстолита СФ-2-35-1,5 ТУ 16-503-132-74 размерами 200x100 мм выполняли одновременно с двух сторон на станке модели «Ферромаг-012» [271], общий вид которого представлен на рис. 7.1, принцип работы поясняет схема на рис. 1.3, и. Электромагнитная система состоит из катушек и вращающихся полюсников в виде валков 2, установленных параллельно друг другу с зазором. Имеется механизм подачи, который протягивает обрабатываемую деталь 1 между валками 2. Ферромагнитный абразивный порошок 3 притягивается к вращающимся полюсникам 2, равномерно распределяется по их поверхности и образует рабочую «щетку», которая и осуществляет абразивную обработку детали 3. Режимы процесса: скорость вращения валков – 2 м/с; скорость подачи – 0,033 м/с; магнитная индукция в рабочей зоне – 0,7 Тл, зазор между валками – 4 мм. Обработка производилась без применения смазочно-охлаждающей жидкости.

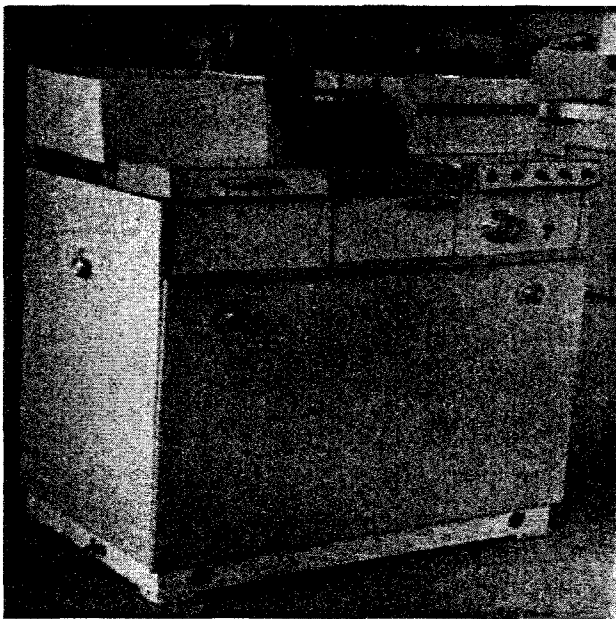


Рис. 7.1. Общий вид станка «Ферромаг-012»

Сформированному МАО микрорельефу поверхностей ПП свойственны частые, перекрывающие друг друга риски – царапины, вытянутые в направлении подачи. Для количественного определения характеристик микрорельефа записывались профилограммы в направлении, перпендикулярном рискам. Профилограммы подвергались обработке с использованием описанных в главе 2 приемов теории вероятностей, математической статистики и теории случайных процессов.

Производительность операции  $q$  оценивали массой меди и ее окислов, удаленной с  $1 \text{ м}^2$  поверхности заготовки ПП.

Математическая обработка результатов экспериментов позволила определить зависимость функций отклика ( $q, Ra, S, \gamma, \Theta$ ) от значений входящих факторов – содержания алюминия ( $x_1$ ) и кремния ( $x_2$ ). Зависимости в кодированном виде и двумерные сечения поверхностей функций отклика приведены в работах [5, 86]. На рис. 7.2 совмещены и соответственно заштрихованы области оптимума пяти вышеперечисленных функций отклика. Их анализ свидетельствует о следующем [274, 275]. Определяющее влияние на производительность MAO медного листа оказывает содержание алюминия в ФАП, причем максимальное значение  $q$  имеет при  $\text{Al} = 7 \dots 8 \%$  мас. и в отсутствие Si.

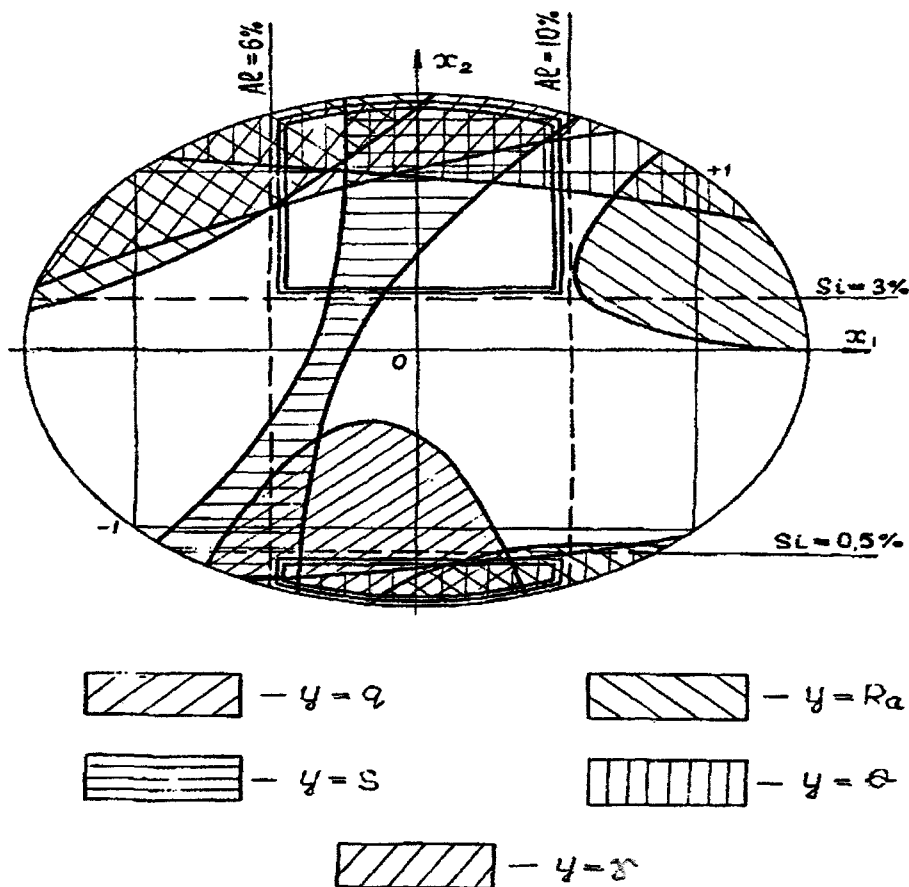


Рис. 7.2. Наложенные двумерные сечения поверхностей функций отклика  $y = F(x_1, x_2)$ , где  $x_1$  – % Al,  $x_2$  – % Si в ФАП

С увеличением количества Al характеристика  $Ra$  формируемой поверхности уменьшается. Принимая во внимание также и повышение производительности обработки  $q$  (см. рис. 7.2), можно утверждать, что с ростом содержания алюминия в ФАП усиливается эффект микрорезания при MAO. Влияние количества кремния в порошке на отклонение линии профиля по высоте ( $Ra$ ) носит более сложный характер, а минимальное значение  $Ra$  имеет место при  $\text{Si} = 2\%$ . Графики рис. 7.2 свидетельствуют о том, что управлять величиной  $Ra$  можно в одинаковой степени эффективно как увеличением, так и уменьшением содержания Si в ФАП.

Повышенное (более 10 % мас.) содержание алюминия в ФАП приводит к увеличению шага  $S$  между микронеровностями медного листа. Процесс микрорезания в этом случае менее эффективен (см. рис. 7.2), по-видимому, вследствие пониженных магнитных свойств частиц ФАП. Минимальному значению  $S$  соответствует и минимальное значение

содержания кремния в ФАП. Увеличение содержания кремния усиливает эффект сфероидизации частиц порошка в процессе их получения. Использование таких частиц при МАО, как установлено нами ранее, способствует образованию сглаженного микрорельефа обрабатываемой поверхности. Минимальному значению шага между ее микронеровностями отвечает использование ФАП с содержанием алюминия (7 % мас.) и кремния (не менее 1,5 % мас.).

Средний угол  $\Theta$  наклона сторон микронеровностей поверхности тем больше, чем выше содержание алюминия в применяемом ФАП. Минимальному значению  $\Theta$  соответствует количество кремния в порошке, равное 2,5 % мас. Отклонение содержания Si от этого значения ведет к увеличению  $\Theta$ .

Необходимая прочность соединения фоторезиста с подложкой обеспечивается созданием равномерного развитого микрорельефа поверхности фольги печатной платы. Критерием равномерности обработки может служить коэффициент случайности профиля  $\gamma$ . Чем величина его меньше, тем регулярнее и стабильнее микрорельеф поверхности. При относительно большом количестве алюминия (более 8 % мас.) и кремния (более 2,5 % мас.) в ФАП можно достигнуть значения  $\gamma < 0,1$  (см. рис.7.2). Однако следует иметь в виду, что коэффициент случайности профиля  $\gamma$  сам по себе не может служить мерой развитости микро-рельефа. Об этой особенности поверхности следует судить по совокупности значений  $Ra$ ,  $S$ ,  $\gamma$  и  $\Theta$ .

При анализе графиков на рис. 7.2 необходимо принимать во внимание ограничение содержания алюминия в ФАП (в пределах 6...10 % мас.), достаточного для обеспечения удлиненной осколочной формы и образования абразивной оболочки частиц в процессе их изготовления. Более высокое содержание Al в ФАП нежелательно, поскольку ухудшает его магнитные свойства и повышает хрупкость порошковых частиц.

С учетом всех перечисленных условий на рис. 7.2 двойной сплошной линией выделены две примечательные области. Первая из них характеризуется содержанием алюминия в пределах 6...10 % мас. и кремния – 3...5 % мас. Для второй области содержание алюминия то же при минимальном (менее 0,5 % мас.) количестве кремния. Именно ФАП такого состава дает наилучшие результаты при МАО поверхностей печатных плат.

Рассмотрим в общих чертах особенности влияния содержания алюминия в сплаве Fe-Al и добавок фосфора и углерода в сплав Fe-Al(8 % мас.)-Si(2,5 % мас.) на результаты МАО медного листа. Анализируемые зависимости графически представлены на рис. 7.3.

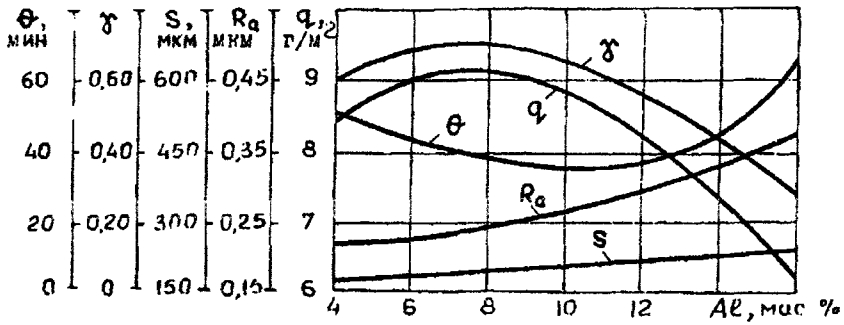
Сплаву Fe-Al(8 % мас.) свойственна наивысшая производительность ( $q = 9,08 \text{ г/м}^2$ ) из всех двадцати исследуемых ФАП (табл. 7.1). Введение P и C практически не сказывается на абразивной способности порошков. Тенденция уменьшения отклонения линии профиля по высоте ( $Ra$ ) с уменьшением содержания легирующего компонента присуща всем трем группам рассматриваемых сплавов.

Количество Al, P и C в ФАП весьма существенно влияет на параметры  $S$ ,  $\gamma$  и  $\Theta$  сформированной поверхности деталей. причем первые два компонента способствуют образованию развитого микрорельефа, характеризуемого коэффициентом случайности профиля  $\gamma = 0,24...0,60$ . Присутствие углерода в ФАП, наоборот, обеспечивает высокую регулярность рельефа медной поверхности ( $\gamma = 0,08...0,20$ ) и сглаженный ее микрорельеф –  $S = 520...720 \text{ мкм}$  и  $\Theta = 16...24 \text{ мин}$  против  $S = 165...229 \text{ мкм}$  и  $\Theta = 36...74 \text{ мин}$  в случае использования ФАП Fe-Al (4...16 % мас.).

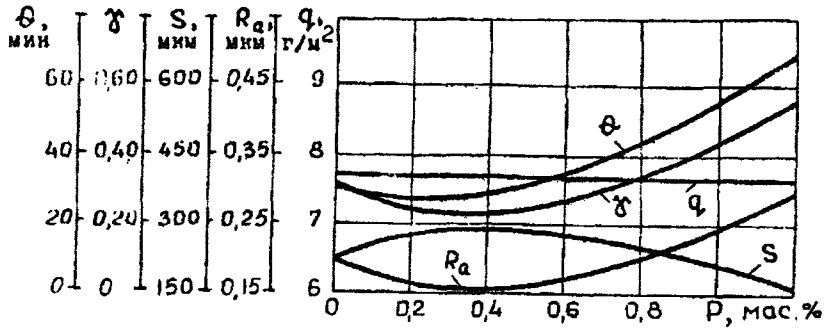
Относительно внешнего вида полученных поверхностей следует отметить появление на них темного налета при МАО с использованием ФАП, содержащих небольшое (менее 6 % мас.) количество алюминия и кремния. Можно предположить, что это явление происходит по двум основным причинам. Во-первых, частицы ФАП с пониженным содержанием Al и Si имеют тонкую и непрочную абразивную пленку, которая не в состоянии исключить явление диффузии железа из ферромагнитной основы зерен в медь. Во-вторых, способность сплавов Fe-Al-Si насыщать медь железом уменьшается с увеличением содержания в них легирующих компонентов. Эффект потемнения медной поверхности наблюдается и при обработке порошками Fe-Al-Si-C(1...3 % мас.).



а)



б)



в)

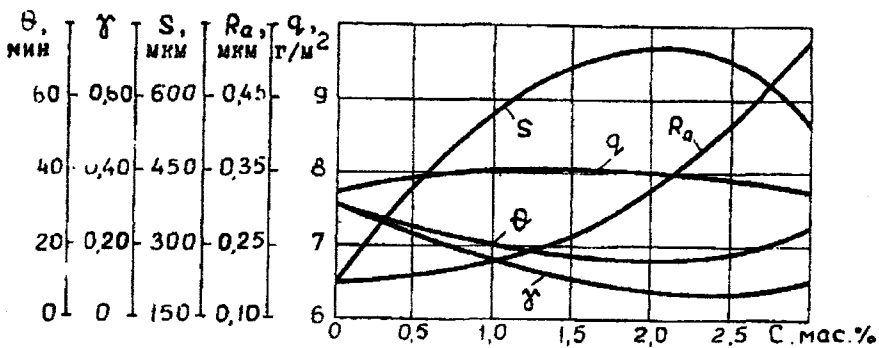


Рис. 7.3. Зависимости результатов MAO медного листа от содержания компонентов в ФАП на основе сплавов: а – Fe-Al; б – Fe-Al(8%)-Si(2,5%)-P; в – Fe-Al(8%)-Si(2,5%)-C

В зависимости от назначения, особенностей технологии изготовления и других факторов поверхность заготовок плат перед печатным монтажом должна иметь определенную высоту микронеровностей. При соблюдении оптимальной топографии поверхности после MAO показатель ее шероховатости  $Ra$  зависит от гранулометрической фракции используемого ФАП.

Таблица 7.2

Результаты зачистки печатных плат порошком различного гранулометрического состава

ФАП		Показатели MAO		
Обозначение	Гранулометрическая фракция, мкм	Величина удаляемого слоя меди и окислов, мкм	Шероховатость поверхности	
			$Ra$ , мкм	класс
ТУ 6-02-7-114-78	315...100	3,0	0,50...0,15	$\Delta 8... \Delta 10$
	630...315	4,0	0,80...0,35	$\Delta 7... \Delta 8$
	1000...630	5,2	1,25...0,69	$\Delta 7$
	1400...1000	6,5	2,00...1,00	$\Delta 6... \Delta 7$

На основании вышеизложенных результатов исследований разработан технологический регламент на распылительную установку и освоен технологический процесс

производства ферроабразивного порошка. Согласно ТУ6-02-7-114-78 изготовлена партия ФАП распылением расплава Fe-Al (6...10 % мас.)-Si(3...5 % мас.) табл. 7.2. На Ереванском опытно-промышленном заводе чистого железа введена в эксплуатацию технологическая линия по производству распылением расплава Fe-Al (7...9 % мас.) ферроабразивного порошка ПРЖ-8Ю ТУ-14-1-3336-82.

## 7.2. Разработка и исследование процесса МАО ПЭТФ-пленки

Создание новых сигнализационных приборов летательных аппаратов выдвинуло проблему обеспечения заданных значений светотехнических характеристик некоторых их деталей из полимерного материала полиэтилентерефталата (ПЭТФ). Разрешить ее способами химического воздействия на пленку [276] не удалось. Применение для этих целей механических способов обработки (в том числе и потоком свободного абразива) оказалось неэффективным. В то же время пробный эксперимент по использованию магнитно-абразивного способа для обработки пленки дал обнадеживающие результаты, что явилось основанием для выполнения поисковых исследований [86].

В результате МАО ПЭТФ – пленки толщиной 175 мкм должны быть обеспечены следующие ее светотехнические характеристики: коэффициент пропускания света –  $\tau \geq 70\%$ , коэффициент отражения –  $\rho \leq 22\%$ , коэффициент блеска –  $\lambda \leq 10\%$ . Эти параметры определялись согласно ОСТ 100669-74 при помощи шарового фотометра ФМШ-56 и визуального фотометра ФМ-56.

Поисковый эксперимент по установлению возможностей и условий МАО ПЭТФ-пленки выполнялся согласно математическому плану, представляющему собой гипергреколатинский квадрат 4x4. Матрица плана представлена в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Результаты МАО ПЭТФ-пленки (матрица математического плана эксперимента)

Входные факторы		Буквенные обозначения и численные значения уровней			
Гранулометрическая фракция ФАП Δ, мкм Скорость вращения полюсников V, м/с Зазор между полюсниками f, мм		A	B	C	D
		1200/1000	1000/630	630/315	315/100
		a	b	c	d
		3,23	2,77	2,1	1,47
		α	β	γ	δ
		7	6	5	4
№ опыта	Уровни	1Aαα	2Bbβ	3Cсγ	4Ddδ
Выходные параметры	Rz	3,50	4,45	6,70	6,50
	ς	76,3	77,6	76,5	76,5
	ρ	23,1	23,5	24,0	24,6
	λ	53	22	17	20
№ опыта	Уровни	5Bdγ	6Acδ	7Dbα	8Caβ
Выходные параметры	Rz	4,80	7,10	3,35	5,20
	ς	74,8	75,5	80,4	81,0
	ρ	23,5	25,0	22,8	23,2
	λ	40	30	37	15
№ опыта	Уровни	9Cbδ	10Dαγ	11Adβ	12Bсα
Выходные параметры	Rz	7,40	4,60	5,05	2,70
	ς	75,0	80,0	76,2	81,0
	ρ	23,2	23,4	23,7	22,0
	λ	13	13	56	45
№ опыта	Уровни	13Dсβ	14Cdα	15Baδ	16Aby
Выходные параметры	Rz	3,40	3,00	6,75	6,35
	ς	81,9	77,7	75,0	75,9
	ρ	24,0	24,0	23,5	23,8
	λ	14	48	20	28

Обработку пленки производили на станке модели «Ферромаг-012» (см. рис. 7.1). На основании пробного эксперимента постоянными опыта приняты: подача – 0,025 м/с, магнитная индукция в рабочей зоне (при зазоре 3 мм) – 0,7 Тл, доза ферромагнитного абразивного порошка (ФАП ТУ 6-02-7-114-78) – 100 см<sup>3</sup>. Входными переменными факторами эксперимента являются: скорость вращения полюсников, величина зазора между ними и гранулометрическая фракция порошка. Числовые значения и соответствующие буквенные обозначения уровней этих факторов приведены в табл. 7.3.

Известно, что светотехнические характеристики детали существенно зависят от особенностей ее микрорельефа [53, 277]. Это обстоятельство предопределяет необходимость обстоятельного исследования топографии поверхности, однако вследствие повышенной деформируемости ПЭТФ-пленки записать профилограммы не удалось. По этой причине о состоянии поверхности возможно судить лишь по величине средней высоты микронеровностей ( $R_z$ ), определяемой при помощи инструментального микроскопа МИИ-4.

Согласно результатам эксперимента значения коэффициента пропускания света  $\zeta$  соответствуют предъявленным требованиям, а значения коэффициента отражения  $\rho$  во всех опытах близки к заданному и отличаются между собой незначительно. В противовес этому значения коэффициента блеска  $\lambda$  колеблются в весьма широких пределах – от 13 до 56.

Необходимо отметить отсутствие корреляционной связи между средней высотой микронеровностей  $R_z$  и всеми светотехническими характеристиками  $\tau$ ,  $\rho$  и  $\lambda$ . Очевидно, что параметр  $R_z$  недостаточно полно характеризует особенности микрорельефа поверхности пленки. Дисперсионный анализ и ранжирование значений выходных факторов по критерию Дункана показали, что все входные факторы эксперимента существенно влияют на величину коэффициента блеска  $\lambda$ . Зависимость этих факторов подтверждается величинами расчетного критерия Фишера  $F_{расч}$ , которые соответственно равны 13,63; 6,57; 10,74 при  $F_{табл} = 4,76$ .

Уменьшение гранулометрической фракции ФАП и величины зазора между полюсниками приводит к интенсификации процессов микро- и субмикрорезания при МАО пленки, поскольку возрастает количество режущих элементов на единицу площади обрабатываемой поверхности. В результате последняя приобретает микрорельеф с частыми, пересекающими друг друга следами обработки и имеет лучшие значения  $\lambda$  [86].

Во время эксперимента по обработке ПЭТФ-пленки было замечено, что при повышенных скоростях вращения полюсников ( $V > 2,0$  м/с) отдельные порошковые частицы отрывались от их поверхности и выбрасывались в окружающее пространство. Интенсивность выброса с увеличением скорости повышалась. Дополнительные опыты и расчеты позволили создать новый способ магнитно-абразивной обработки [278], заключающийся в комбинированном (абразивное царапание и удар) воздействии порошковых частиц на обрабатываемую поверхность. Такой эффект обеспечивают специальные экраны, ограждающие зону обработки, отражающие оторвавшиеся от полюсов частицы порошка и направляющие их на обрабатываемую поверхность [86].

Ферромагнитные абразивные частицы, выполняя ударные воздействия на пленку, практически не осуществляют диспергирование ее приповерхностного слоя, а, главным образом, производят процесс «шерования», т.е. образование лунок и кратеров на поверхности, чем способствуют получению ее развитого микрорельефа со случайным расположением неровностей.

С учетом вышеприведенных результатов был поставлен эксперимент по определению оптимальных режимов технологического процесса МАО ПЭТФ-пленки. Математическим планом эксперимента предусмотрены два переменных фактора: гранулометрическая фракция ФАП (менее 400 мкм) и величина зазора между полюсниками, изменяемая в пределах от 1,5 до 4,5 мм. Скорость вращения полюсников стабилизирована на оптимуме – 2,5 м/с. Остальные технологические параметры имеют те же значения, что и в поисковом эксперименте. В качестве контролируемых факторов приняты светотехнические характеристики пленки –  $\tau$ ,  $\rho$  и  $\lambda$ . Эксперимент выполнен согласно матрице центрального композиционного плана второго порядка. Результаты опытов представлены в табл. 7.4.

Матрица математического планирования эксперимента по определению оптимальных режимов МАО ПЭТФ-пленки

№ опыта	Входные параметры				Выходные параметры		
	$x_1$		$x_2$		$y_1$	$y_2$	$y_3$
	Гранулометрическая фракция ФАП	Зазор между полюсниками	коэффициент пропускания света $\tau$ , %	коэффициент отражения света $\rho$ , %	коэффициент блеска, $\lambda$		
код	натуральное значение, мкм	код	натуральное значение, мкм				
1	+1	315...200	+1	4,0	79,3	23,6	14
2	+1	315...200	-1	2,0	76,0	20,2	7
3	-1	100...63	+1	4,0	81,1	23,0	25
4	-1	100...63	-1	2,0	78,9	17,3	9
5	+ $\alpha$	400...315	0	3,0	74,6	22,4	22
6	- $\alpha$	63...0	0	3,0	80,1	20,8	17
7	0	200...100	+ $\alpha$	4,5	78,0	24,8	23
8	0	200...100	- $\alpha$	1,5	75,3	18,5	10
9...13	0	200...100	0	3,0	76,6	21,1	9

Во всех опытах получены значения выходного параметра  $\tau$ , удовлетворяющего предъявляемым требованиям.

Уравнение регрессии для факторов  $\rho$  и  $\lambda$  в кодированном виде соответственно:

$$y_2 = \rho = 22 + 0,8x_1 + 2,2x_2 - 0,8x_1x_2 - 1,2x_1^2 - 1,4x_2^2;$$

$$y_3 = \lambda = 9 - 1,5x_1 + 5,1x_2 - 2,2x_1x_2 + 2,2x_1^2 - 3,4x_2^2.$$

Корреляционная связь между характеристиками  $\rho$ ,  $\lambda$  и  $\tau$  в данном эксперименте не установлена.

Для определения оптимальных значений входных факторов построены изолинии двумерных сечений поверхностей отклика для  $y_2$  и  $y_3$  (рис. 7.4).

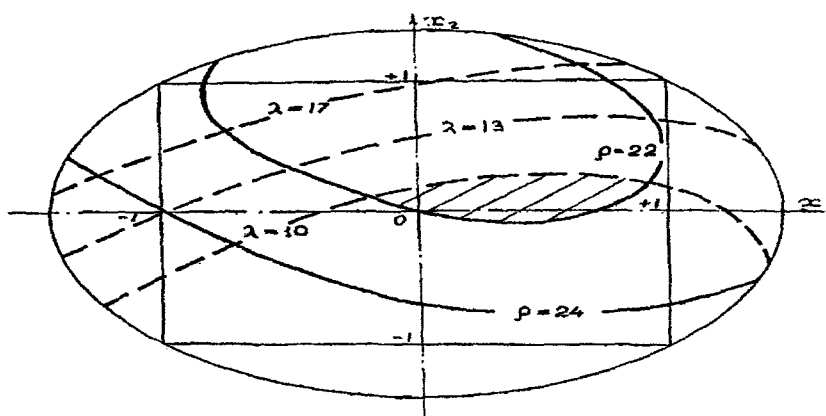


Рис. 7.4. Наложенные двумерные сечения поверхностей отклика функций  $y_2 = \rho = F(x_1, x_2)$  и  $y_3 = \lambda = F(x_1, x_2)$

Из всей исследуемой области оптимума заданным значениям  $\rho$  и  $\lambda$  отвечает лишь заштрихованный участок, которому соответствуют гранулометрическая фракция порошка 315...160 мкм и величина зазора между полюсниками, равная 3,0...3,2 мм. Партия контрольных образцов (60 шт.), обработанная на этих режимах, показала 100% соответствие предъявляемым требованиям светотехники.

### 7.3. Процессы и оборудование для МАО плоскостей

Схема с вращающимися валками-полюсами, реализованная в конструкции станка «Ферромаг-012», достаточно эффективна при магнитно-абразивной обработке немагнитных листов и лент толщиной до 2 мм и шириной до 250 мм при размерном съеме до 10 мкм. Создан вариант устройства для МАО рулонных листов и лент, обеспечивающий дозированную подачу ферроабразивного порошка в рабочую зону, равномерную обработку длинномерных изделий в автоматическом режиме [279].

Попытки модернизировать станок «Ферромаг-012» и обеспечивать интенсивную обработку изделий шириной до 350 и 500 мм, воплощенные в конструкциях станков «Ферромаг-350» и ОБ 2370, не дали ощутимых результатов. Причина в том, что удлинение рабочей зоны приводит к значительному увеличению магнитного сопротивления валков-магнитопровода и, как следствие, к пониженным значениям магнитной индукции в рабочей зоне (0,2...0,4 Тл), что недостаточно для эффективной МАО. Простое увеличение катушек (увеличение количества ампер-витков) не решает проблему, поскольку ведет к увеличению размеров катушек, магнитопроводов, полюсов, т.е. магнитной системы в целом и ее магнитного сопротивления. Обработка на станке «Ферромаг» ферромагнитных листов и лент затруднительна, поскольку изделие (лист или лента) притягиваются к одному из намагниченных валков-полюсов и стабильность процесса обработки нарушается.

Предложен оригинальный вариант модернизации устройства с вращающимися валками-полюсами для удаления излишков припоя в процессе изготовления печатных плат и подобных им изделий [280].

Возможность полирования и зачистки в магнитном поле широкополосных листов и лент исследованы в работе [281]. Повысить величину магнитной индукции в рабочей зоне предлагается при помощи основных потоков и потоков выпучивания, формируемых валками-полюсами специальной конструкции. Выполненные экспериментальные исследования подтвердили возможность использования таких устройств для МАО крупногабаритных плоскостей, однако рекомендации по их эффективному промышленному использованию не приведены.

Во всех случаях применения процессов МАО эффективность выше, если предусмотрены условия постоянного возобновления режущего контура щетки из ФАП и переориентации частиц порошка в процессе обработки изделий. Для МАО плоскостей предложены два варианта решения этой задачи [282, 283]. Суть их сводится к возвратно-поступательному перемещению одного полюса магнитной системы относительно другого, что дает эффект осцилляции порошковых частиц и их перемешивания. Сложность обеспечения кинематики этих устройств затрудняет их промышленное применение.

Экспериментальный образец станка МСЛ-100 создан для исследования возможностей и условий применения магнитно-абразивной обработки на операциях зачистки от оксидных пленок немагнитных листов и лент из цветных металлов после их межоперационного отжига в процессе прокатки. Целью работы поставлена замена операций химического травления листов и лент на операцию магнитно-абразивной обработки. Общий вид станка МСЛ-100 показан на рис. 7.5. Принцип реализации схемы МАО поясняет рис.1.3, з. Шесть пар полюсных наконечников с торцевыми рабочими поверхностями расположены по обе стороны обрабатываемого изделия, приводятся во вращение и движение осцилляции в направлении перпендикулярном подаче изделия.

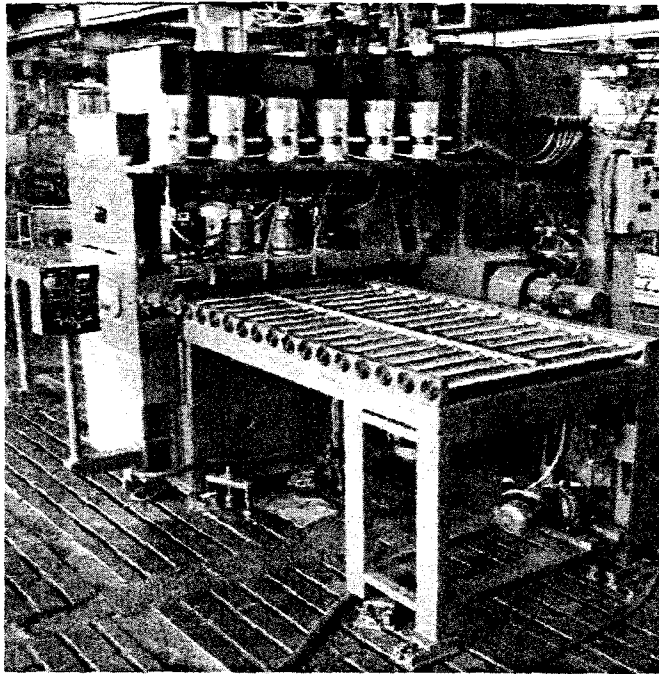


Рис. 7.5. Общий вид станка МСЛ-100

Технические характеристики станка МСЛ-100:

толщина обрабатываемых листов, мм	0,5...10
лент, мм	0,2...4
ширина обрабатываемых листов и лент, мм	до 900
скорость подачи, м/мин	0,4...1
частота вращения полюсов, $c^{-1}$	6,6...10
частота осцилляции полюсов, $c^{-1}$	0,5
амплитуда осцилляции полюсов, мм	0...20
магнитная индукция в рабочей зоне, Тл	0,4...1,0
потребляемая мощность, кВт	18
габариты станка, $L \times B \times H$ , м	4x4x2,9
масса станка, кг	8000

Процесс МАО на станке МСЛ-100 обеспечивает при скорости зачистки 1 м/мин снижение шероховатости поверхности в 2...3 раза и съем металла в пределах 3...15 мкм на сторону. Эксперименты подтвердили перспективность работ в этом направлении. Для успешного промышленного использования технологии МАО листов и лент требуются продолжение работ по оптимизации технологических параметров процесса обработки и совершенствованию конструкции оборудования.

В машино- и аппаратостроении при изготовлении крупногабаритных металлических конструкций часто возникает необходимость полирования или зачистки локальных участков поверхностей, например, перед операциями сварки, нанесения покрытий и др. В таких случаях финишную обработку производят либо вручную (шабрение, зачистка абразивной шкуркой), либо механизированным инструментом (зачистка абразивными щетками и лентами). При этом продукты диспергирования распределяются по поверхности обрабатываемого изделия, обеспечить их сбор и полное удаление затруднительно, что может отрицательно повлиять на качество выполнения последующих технологических операций.

Для локального полирования и зачистки поверхностей создан оригинальный способ магнитно-абразивной обработки, суть которого состоит в следующем [284]. Компактный индуктор на постоянных магнитах приводит во вращение распределенный на них ферро-абразивный порошок, гранулы которого содержат органический компонент, например, эбонит или бакелит [285, 286]. Абразивная составляющая гранул порошка диспергирует

поверхностный слой изделия, а органический компонент за счет трения о поверхность изделия приобретает электростатический заряд и притягивает к себе диспергированные частицы обрабатываемого материала.

При насыщении ФАП продуктами обработки дозу порошка заменяют. При необходимости отработавшую дозу ФАП размагничивают, подвергают деэлектризации и отделяют от нее продукты диспергирования.

Для осуществления способа локальной магнитно-абразивной обработки поверхностей [284] предложена конструкция индуктора на постоянных магнитах с торцевой рабочей поверхностью. Такого типа индукторы эффективно работают при МАО ферромагнитных изделий [4], когда ферроабразивный порошок уплотняется магнитным полем, наводимым между поверхностями индуктора и обрабатываемого изделия. Порошковые частицы при вращении индуктора под действием сил трения, резания и магнитного притяжения постоянно переориентируются в рабочем зазоре, перемешиваются, возобновляют режущий контур – и процесс обработки стабилен. Однако в случае МАО немагнитных изделий порошковые частицы выстраиваются вдоль магнитных силовых линий на торце индуктора, уплотняются в малоподвижную массу, вращаются совместно с индуктором, не склонны к переориентации и перемешиванию, поэтому их режущее и полирующее воздействие на обрабатываемую поверхность малоэффективно и нестабильно.

Для активизации ферроабразивных частиц в процессе МАО предложена оригинальная конструкция устройства, схема которого представлена на рис. 7.6, а [287]. Устройство состоит из корпуса 1, на верхнем торце которого закреплен привод вращения 2 магнитного индуктора 3 с постоянными магнитами 4. К нижнему торцу корпуса 1 крепится мембрана 5 посредством болтов с шаровыми опорами 6. На мембране 5 магнитными полями магнитов 4 удерживается ферроабразивный порошок 7 в виде щеток, которые воздействуют на обрабатываемое изделие 8. Устройство устанавливают опорами 6 на обрабатываемую поверхность детали 8, задают движение подачи, а индуктору 3 – вращение от привода 2. Порошок 7 увлекается магнитными полями магнитов 4 и вращается, полируя обрабатываемую поверхность. При движении порошковых частиц по мембране происходит их перемешивание и переориентация, что способствует стабилизации процесса обработки.

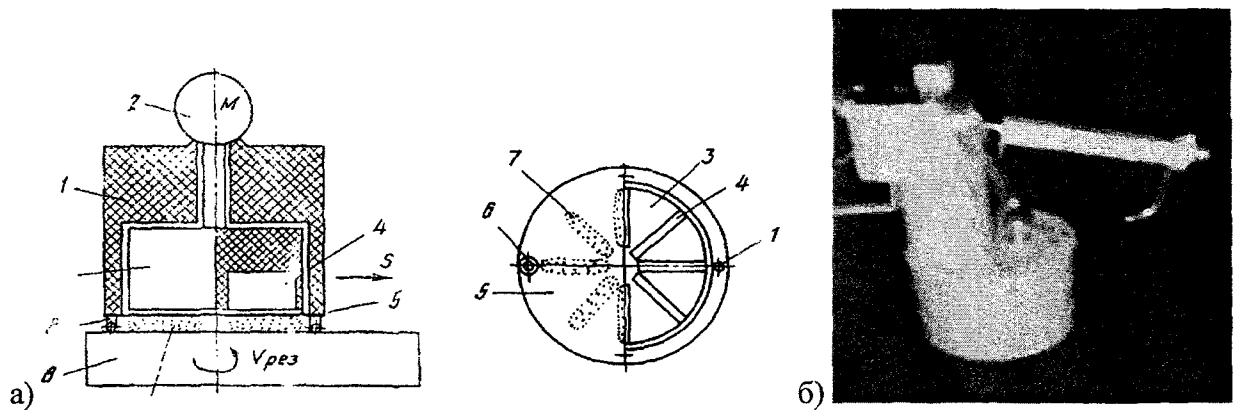


Рис. 7.6. Схема работы (а) и общий вид (б) устройства «Роса»

При работе индуктора такой конструкции с линейной скоростью вращения 2...5 м/с имеет место нежелательное явление интенсивного трения порошка о поверхность мембраны, в результате которого абразивному износу подвержены и порошковые частицы и мембрана.

Экспериментально установлено, что порошок достаточно эффективно перемешивается при скорости перемещения по мембране в пределах 0,1...0,4 м/с. Именно такую задачу решает введение в конструкцию устройства механизма вращения мембраны от привода 2 [288]. Разность линейных скоростей вращения индуктора и мембраны составляет 0,2 м/с.

Повысить производительность работы индуктора можно путем нанесения на рабочую поверхность мембраны спиралевидных выступов и канавок, увеличивающих интенсивность

переориентации порошковых частиц [289]. Этой же цели служит и введение в конструкцию индуктора специального зубчато-кулачкового механизма дополнительного периодического проворачивания мембраны относительно индуктора во время его работы [290].

Универсальность метода магнитно-абразивной обработки, возможность полирования и зачистки поверхностей с минимальным температурным и силовым воздействием на поверхностный слой изделия явились основанием для проверки его применения в космических исследованиях. При эксплуатации орбитального комплекса «Мир» возникла проблема очистки от загрязнений поверхностей стекол иллюминаторов. Двигатели ориентации станции и коррекции ее траектории, по необходимости эпизодически включаясь, расходуют ракетное топливо, продукты сгорания которого в безвоздушном космическом пространстве тянутся шлейфом за станцией. Она обладает сильным электростатическим зарядом и притягивает к поверхности частицы продуктов сгорания топлива. В результате поверхность комплекса, в том числе и стекла иллюминаторов покрываются пленкой сложного химического состава органических соединений и минералов. Под действием прямых солнечных лучей и циклического перепада температуры от  $-90^{\circ}\text{C}$  до  $+110^{\circ}\text{C}$  в пленке происходят структурные преобразования, она значительно ухудшает оптические свойства стекол иллюминаторов и существенно затрудняет визуальные и телеметрические наблюдения объектов и явлений с борта станции. Две попытки очистки стекла подручными средствами, предпринятые космонавтами при выходах в открытый космос, успеха не имели. Появилась идея опробовать для этих целей способ магнитно-абразивной обработки. Реализация технических решений [285–290] и проведение лабораторных исследований на образцах-имитаторах стекол иллюминаторов явились основанием для создания специального устройства «Роса» для магнитно-абразивной очистки оптических поверхностей от загрязнений. Общий вид устройства «Роса» представлен на рис. 7.6, б. Эксперименты и исследования по очистке образцов стекол, испытания в летающей лаборатории и гидробассейне дали положительные результаты. Принято решение о проведении испытаний устройства «Роса» на орбите в условиях открытого космоса при очистке от загрязнений поверхностей стекол иллюминаторов орбитальной космической станции.

Сложной технической проблемой является тонкая финишная обработка поверхностей немагнитных материалов, например, стекла и керамики. Для ее решения предложены схемы магнитно-абразивного полирования с наложением электрического тока на зону обработки в целях интенсификации процессов диспергирования материала и выглаживания микрорельефа формируемой поверхности [291, 292]. Технологические возможности этих схем обработки не изучены.



## ГЛАВА 8. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В настоящей работе и других публикациях [5, 293–298] рассмотрен комплекс вопросов по назначению метода магнитно-абразивной обработки (МАО), выбору и анализу схем осуществления, изучению возможностей и условий их промышленного использования. В плане обобщения рекомендаций по практическому применению МАО целесообразно исследовать обрабатываемость различных конструкционных материалов в магнитном поле ферроабразивными порошками (ФАП).

### 8.1. Обрабатываемость материалов магнитно-абразивным способом

Обрабатываемость материалов абразивным способом в магнитном поле является весьма сложной функцией их физико-механических свойств, технологических режимов процесса, параметров ФАП и СОЖ. Целью данного исследования является разработка обобщенных технологических рекомендаций по рациональному применению разработанных ФАП и СОЖ при МАО наиболее распространенных в промышленности конструкционных и инструментальных черных и цветных сплавов.

Методика исследования обрабатываемости, оборудование и режимы те же, что и при испытаниях ферроабразивных порошков (см. раздел 3.2).

Для получения возможно более обширной информации использован математический план с качественными факторами, представляющий собой гипергреко-латинский квадрат 4x4 [299]. Матрица плана составлена таким образом, что каждая ее строка несет информацию о свойствах определенных СОЖ, а каждый столбец содержит сведения об отдельном виде ФАП. Четыре вида обрабатываемых материалов распределены по ячейкам матрицы таким образом, что встречается по одному разу в строке или столбце. Этим приемом исключается повторяемость опытов и обеспечивается систематизация результатов.

О влиянии свойств СОЖ, ФАП и обрабатываемого материала на эффективность МАО судили по суммам ( $\sum \Delta G$  и  $\sum Ra$ ) и средним значениям ( $\Delta G$ ,  $Ra$ ) результатов, приведенных соответственно в строках, столбцах и ячейках с одинаковыми заглавными латинскими буквами.

Подвергаемые магнитно-абразивной обработки материалы условно разбиты на три группы (табл. 8.1): нетермообработанные стали, стали в закаленном состоянии и цветные диамагнитные сплавы.

Таблица 8.1

Характеристики качественных факторов эксперимента по исследованию обрабатываемости материалов

Фактор	Марка (состав)		Кодовое обозначение	Механическая твердость	Магнитная проницаемость (при $H = 20 \text{ кА/м}$ ) мкГн/м	
1	2		3	4	5	
Обрабатываемый материал	Стали (в состоянии поставки)	Ст.10 ГОСТ 1050-74	A	118...130 НВ	9,72	
		У10 ГОСТ 1365-74	B	170...190 НВ	8,75	
		40x13 ГОСТ 5632-72	C	185...220 НВ	8,20	
		P6M5 ГОСТ 19265-73	D	220...242 НВ	7,25	
	Закаленные стали	ШХ 15 ГОСТ 800-55 з.850°C, отп.150°C		K	58...62 HRC	7,94
		У10 ГОСТ 1365-74 з.800°C, охл. в масле	L	59...62 HRC	8,10	
		40X13 ГОСТ 5632-72 з.1000°C, отп.250°C	M	46...49 HRC	7,46	
		P6M5 ГОСТ 19265-73 з.1220°C, отп.580°C	N	60...64 HRC	6,88	
	Цветные сплавы (в состоянии поставки)	Бронза БрАЖ9-4 ГОСТ 18175-72		S	90...98 НВ	1,26
		Латунь Л60 ГОСТ 15527-70		T	82...87 НВ	1,26
		Сплав алюминия Д1 ГОСТ 4787-74		V	65...72 НВ	1,26
		Сплав титана ОТ4 ГОСТ 14807-78		W	240...270 НВ	1,26

1	2	3	4	5
ФАП	Ж-15КТ ТУ 88 УССР 147.602-75	a	—	3,98
	Ферромагнитный электрокорунд	b	—	2,26
	Кремнистый сплав ФАД-9К	c	—	4,20
	ТУ 2.036.0222227.154-88	d	—	2,85
	Fe-TiC ТУ 6-09-03-483-81	e	—	3,05
	ФАП-II ТУ 6-02-7-114-78	f	—	3,54
СОЖ	ФАП на основе сплава Fe-Al(8%)			
	Аквол 10/1	α	—	—
	Триэтанолламин (1%), керосин (1,5%), вода (остальное)	β	—	—
	Триэтанолламин (1%), глицерин (1%), вода (остальное)	γ	—	—
	Водный раствор эмульсола Э-2 (7%)	δ	—	—

В качестве ФАП использованы порошки, описанные в главах 3 и 7 и показавшие перспективность их применения при MAO (см. табл. 6.1). При выборе ФАП для данного эксперимента учитывались их абразивные свойства, технологичность изготовления, стоимость, дефицитность сырья для их производства.

Смазочно-охлаждающие жидкости выбраны исходя из рекомендаций работы [30] и результатов исследований. При назначении СОЖ следует учитывать ее способность интенсифицировать процесс MAO, ее моющий эффект, стоимость, срок годности к эксплуатации и соответствие санитарно-гигиеническим требованиям.

На основании дисперсионного анализа [299] и ранжирования величин уровней выходных факторов по критерию Дункана [300] представляется возможным дать общую оценку полученным результатам.

Сопоставление значений характеристики производительности MAO ( $\Delta G$ ) свидетельствует о том, что стали ст.10, У10, 40x13 в состоянии поставки достаточно хорошо обрабатываются в магнитном поле. Несколько уступает им сталь Р6М5. Средние значения характеристики качества обработки  $Ra$  для этих материалов близки по значению и находятся в пределах  $\Delta 10$ - $\Delta 11$  классов шероховатости (табл. 8.2).

Таблица 8.2

## Результаты MAO незакаленных сталей

						Итоги по строкам
1	2	3	4	5	6	7
$y_i$	1 Aαα	2 Dβα	3 Bαα	4 Cδα	$\sum y_i$	$y_i$
$\Delta G$	161	257	114	165	697	176
$Ra$	0,07	0,09	0,11	0,09	0,36	0,090
	5 Cαβ	6 Bββ	7 Dсβ	8 Adβ		
$\Delta G$	234	282	18	461	1015	254
$Ra$	0,06	0,12	0,13	0,10	0,41	0,103
	9 Dαγ	10 Aβγ	11 Cсγ	12 Bδγ		
$\Delta G$	50	131	33	207	421	105
$Ra$	0,11	0,05	0,09	0,09	0,34	0,085

1	2	3	4	5	6	7
	13 Baδ	14 Cbδ	15 Acδ	16 Ddδ		
$\Delta G$	158	357	75	198	788	197
$Ra$	0,06	0,12	0,11	0,09	0,38	0,095
	603	1027	360	1021	$\Sigma \Delta G$	Итоги по столбцам
	151	257	90	255	$\Delta \bar{G}$	
	0,30	0,38	0,44	0,37	$\Sigma Ra$	
	0,075	0,095	0,110	0,093	$Ra$	
	A	B	C	D		Итоги по буквам A, ... ,D
	828	761	789	583	$\Sigma \Delta G$	
	207	190	197	136	$\Delta \bar{G}$	
	0,33	0,38	0,36	0,41	$\Sigma Ra$	
	0,083	0,095	0,090	0,103	$Ra$	

Наибольшую производительность обработки незакаленных сталей показали порошки псевдоплавленного Fe-TiC. Хуже в этом отношении выглядит Ж-15КТ, но обеспечивает самое высокое значение  $Ra$ , равное 0,075 мкм. Порошок кремнистого сплава несколько уступает другим ФАП в эффективности МАО нетермообработанных сталей.

Стали в состоянии поставки наилучшим образом обрабатываются при использовании СОЖ, содержащей триэтаноламин и керосин. Хорошие результаты обеспечивает Аквол 10/1 и раствор эмульсола Э-2 в воде. Меньше значения  $\Delta G$  в случае применения СОЖ, включающей керосин.

В отношении производительности МАО незакаленных сталей наивысшие результаты получены в опытах 8 и 14. Минимальные значения характеристики шероховатости  $Ra$  получены в опытах 5, 10 и 13.

Высокая производительность свойственна процессу МАО стали У10 в закаленном состоянии –  $\Delta G = 231$  мг. Существенно ниже этот показатель у сталей ШХ15, 40Х13 и особенно Р6М5, хотя значения  $Ra$  у них также отвечают Δ10 классу (табл. 8.3).

Отличные результаты магнитно-абразивного полирования термообработанных сталей дает применение порошка псевдоплавленного Fe-TiC –  $\Delta G = 221$  мг при  $Ra = 0,073$  мкм. Несколько хуже эти величины у ФАП Ж-15КТ и ферромагнитного электрокорунда. Низкая производительность ( $\Delta G = 84$  мг) при достаточно высоком значении  $Ra = 0,108$  мкм свидетельствует о том, что порошок кремнистого сплава при МАО закаленных сталей работает преимущественно в режиме микровыглаживания.

Лучшие показатели эффективности МАО имеет СОЖ в виде водного раствора эмульсола Э-2, однако при ее использовании на сформированной поверхности детали образуется трудноудаляемая темного цвета масляная пленка с мелкодисперсными включениями продуктов полирования и применяемых порошков. Это явление объясняется низкими моющими свойствами СОЖ [30].

Самая высокая производительность наблюдается при МАО закаленной стали У10 (опыты 12 и 13 табл. 8.3), а наилучшим образом полируется сталь ШХ15 (опыты 1, 8 и 15).

Интенсивность МАО цветных сплавов уменьшается в такой последовательности: латунь Л60, сплав титана ОТ4, бронза БрАЖ9-4 и сплав алюминия Д1. Последний имеет такие и худший показатель шероховатости поверхности –  $Ra = 0,25$  мкм (табл. 8.4).

## Результаты МАО закаленных сталей

						Итоги по строкам
$y_i$	1 Ка $\alpha$	2 Nb $\alpha$	3 Lc $\alpha$	4 Md $\alpha$	$\sum y_i$	$y_i$
$\Delta G$	160	170	64	205	599	150
$Ra$	0,06	0,14	0,12	0,10	0,42	0,105
$y_i$	5 Ma $\beta$	6 Lb $\beta$	7 Nc $\beta$	8 Kd $\beta$	$\sum y_i$	$y_i$
$\Delta G$	48	210	49	200	507	127
$Ra$	0,16	0,11	0,10	0,06	0,43	0,108
$y_i$	9 Na $\gamma$	10 Kb $\gamma$	11 Mc $\gamma$	12 Ld $\gamma$	$\sum y_i$	$y_i$
$\Delta G$	65	57	42	320	484	121
$Ra$	0,19	0,16	0,15	0,06	0,56	0,140
$y_i$	13 La $\delta$	14 Mb $\delta$	15 Kc $\delta$	16 Nd $\delta$	$\sum y_i$	$y_i$
$\Delta G$	330	280	180	180	950	237
$Ra$	0,08	0,09	0,06	0,07	0,30	0,075
	603	717	335	885	$\sum \Delta G$	Итоги по столбцам
	151	179	84	221	$\Delta \hat{G}$	
	0,49	0,50	0,43	0,29	$\sum Ra$	
	0,123	0,125	0,108	0,073	$Ra$	
	К	Л	М	Н		Итоги по буквам К, ..., N
	597	924	575	444	$\sum \Delta G$	
	149	231	166	111	$\Delta \hat{G}$	
	0,34	0,37	0,50	0,50	$\sum Ra$	
	0,085	0,093	0,125	0,125	$Ra$	

Если при обработке сталей эффективность применения порошка кремнистого сплава была наименьшей, то в случае МАО цветных сплавов он показывает высокую режущую способность ( $\Delta G = 309$  мг). Этот факт можно объяснить более высокими, чем у других ФАП, магнитными свойствами порошка кремнистого сплава, которые определяют более интенсивное силовое воздействие зерен на обрабатываемую деталь.

Использование ФАП на основе железа и тугоплавких карбидов переходных металлов, в частности – карбида титана, для магнитно-абразивной обработки цветных сплавов сопряжено с заметным потемнением формируемой поверхности детали в результате насыщения ее приповерхностного слоя углеродом и железом. По этой причине в данном эксперименте указанные порошки не применялись.

Все опробованные в эксперименте СОЖ близки друг другу по значениям характеристик производительности и качества обработки. Несколько предпочтительнее выглядит СОЖ в виде водного раствора эмульсола.

Выполненный анализ свидетельствует о том, что рассмотренные в эксперименте ФАП и СОЖ в большей или меньшей мере обеспечивают эффективную магнитно-абразивную обработку рассмотренных групп сплавов. При окончательном выборе необходимых ФАП и СОЖ следует исходить из технологических, экономических и других условий их применения.

## Результаты МАО цветных сплавов

						Итоги по строкам
$y_i$	1 Sea	2 Wba	3 Tca	4 Vfa	$\sum y_i$	$y_i$
$\Delta G$	98	55	512	98	763	191
$Ra$	0,09	0,14	0,11	0,36	0,70	0,175
$y_i$	5 Ve $\beta$	6 Tb $\beta$	7 Wc $\beta$	8 Sf $\beta$	$\sum y_i$	$y_i$
$\Delta G$	61	360	330	97	848	212
$Ra$	0,31	0,06	0,18	0,12	0,67	0,188
$y_i$	9 We $\gamma$	10 Sb $\gamma$	11 Vc $\gamma$	12 Tf $\gamma$	$\sum y_i$	$y_i$
$\Delta G$	109	227	104	228	668	167
$Ra$	0,11	0,06	0,16	0,07	0,40	0,100
$y_i$	13 Te $\delta$	14 Vb $\delta$	15 Sc $\delta$	16 Wf $\delta$	$\sum y_i$	$y_i$
$\Delta G$	170	171	290	382	1013	253
$Ra$	0,06	0,17	0,06	0,15	0,44	0,110
	438	813	1236	805	$\sum \Delta G$	Итоги по столбцам
	110	203	309	201	$\Delta \hat{G}$	
	0,56	0,43	0,52	0,70	$\sum Ra$	
	0,140	0,108	0,130	0,175	$Ra$	
	S	T	V	W		Итоги по буквам К, ..., N
	712	1270	434	876	$\sum \Delta G$	
	178	318	108	219	$\Delta \hat{G}$	
	0,33	0,30	1,00	0,58	$\sum Ra$	
	0,083	0,075	0,250	0,145	$Ra$	

## 8.2. Обобщение достижений в области магнитно-абразивной обработки

Всегда актуальна задача повышения важнейших эксплуатационных свойств изделий – сопротивления износу, коррозии и механическому разрушению. В этом плане огромными возможностями обладает процесс магнитно-абразивной обработки поверхностей [4, 5]. Его суть составляют три основных эффекта:

1) импульсное магнитное поле "встряхивает" атомно-молекулярную структуру металла, приводит в движение слабозакрепленные дефекты структуры и концентрирует их в поверхностном слое металла;

2) ферроабразивные частицы под действием магнитного поля диспергируют и удаляют дефектный поверхностный слой металла;

3) взамен удаленного дефектного слоя в магнитном поле формируется поверхностный слой с минимумом дефектов – потенциальных очагов коррозии и разрушения.

### 8.2.1. Структура металла и импульсное магнитное поле

Структура металлов и сплавов несовершенна и содержит в огромных количествах различные дефекты: точечные (атомные вакансии, атомы замещения и внедрения и др.), линейные (дислокации, дисклинации и др.) и объемные (винтовые дислокации, ротации и др.). Плотность дислокаций в отожженных чистых металлах составляет  $10^6 \dots 10^8$  на  $1 \text{ см}^2$ , в пластически деформированных –  $10^{10} \dots 10^{11}$  на  $1 \text{ см}^2$  [301].

Дефекты-неоднородности характеризуются атом-вакансионными связями (АВС) с близлежащими к ним элементами структуры. Абсолютное большинство АВС имеют низкий энергетический уровень, легко разрываются, вступают во взаимодействие с другими АВС, находятся в постоянном движении и способны легко мигрировать в объеме металла.

Внешнее физическое или тепловое воздействие приводит в возбужденное состояние атомно-молекулярную структуру прежде всего в зонах неоднородностей – у поверхностей раздела фаз и на границах кристаллов. Здесь возникают интенсивные взаимодействия с АВС мигрирующих дефектов, их концентрация растет, усиливает локальные напряжения и создает в приповерхностном слое металла потенциальные микроочаги коррозии и механического разрушения.

Известно, что импульсное магнитное поле (ИМП) способно активно воздействовать на атомно-молекулярную структуру металла. На практике этот эффект используется, например, для упорядочивания кристаллического строения инструментальных сталей, упрочнения и повышения эксплуатационных свойств инструментов [3, 4]. Автор этих работ предлагает физическую модель процесса перестройки реальной структуры металла под воздействием ИМП.

Процесс состоит из следующих стадий:

- 1) термофлуктуационный разрыв межатомных и междефектных связей;
- 2) электромагнитная активация разрыва связей при локальном поглощении энергии на неоднородностях строения;
- 3) повышение концентрации атом-вакансионных пар, латентный период образования АВС, структурная неустойчивость; релаксация АВС, возникновение диссипативных структур.

Металлическая матрица, содержащая возбужденные внешним воздействием АВС, представляет собой энергетически перенасыщенную систему. Дефекты в виде релаксаций АВС стремятся создать избыток энергии как путем упорядочивания структуры металла, так и взаимодействуя с локальными неоднородностями строения металла. Концентрация таких неоднородностей имеет место в поверхностном слое металла в виде поверхностей раздела фаз и образованных предшествующей обработкой микродефектов – трещин, сколов, прижогов, примесей, окислов и др.

Оптимальное сочетание процессов "встряхивания" и "залечивания" структуры металла импульсным магнитным полем и процесса удаления дефектного поверхностного слоя "эластичным" ферроабразивным инструментом-порошком обеспечивает магнитно-абразивная обработка.

### ***8.2.2. Магнитно-абразивная обработка и качество поверхности***

Процесс магнитно-абразивной обработки (МАО) осуществляется ферроабразивным порошком – инструментом, который под воздействием магнитного поля уплотняется, прижимается к обрабатываемой поверхности и полирует ее. Некоторые схемы реализации процессов обработки в магнитном поле различных изделий приведены на рис. 1.3. Степень уплотнения или "эластичность" порошка регулируется в широких пределах изменением величины магнитного потока в зоне обработки.

Среднее значение нормальной силы воздействия единичного зерна ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность составляет  $(10...12) \times 10^{-3}$  Н. При шлифовании эта величина равна 2...12 Н.

Вращающееся в магнитном поле металлическое изделие может нагреваться вихревыми токами до 50...70°C, а температура на поверхности изделия, вызванная контактом с порошком-инструментом во время работы, составляет обычно не более 110°C. При подаче в рабочую зону смазочно-охлаждающей жидкости в количестве не менее 0,01 л/с на 1 см<sup>2</sup>, установившаяся температура нагрева изделий в процессе магнитно-абразивной обработки не превышает 65°C. При шлифовании этот показатель составляет 800...1500°C.

Относительно малое давление порошка-инструмента на обрабатываемую поверхность и незначительный нагрев изделия во время магнитно-абразивной обработки способствуют формированию поверхностных слоев с минимальным количеством дефектов структуры. При полировании в магнитном поле с преобладанием процессов микро- и субмикрорезания глубина собственного нарушения слоя не превышает 1...2 мкм. Однако по необходимости можно обеспечить такие условия обработки, при которых имеют место преимущественно процессы микро- и субмикровыглаживания. В этом случае глубина наклепанного слоя достигает 10...12 мкм, а микротвердость приповерхностного слоя увеличивается на 10...20%. Остаточные напряжения 1-го рода являются сжимающими и составляют у поверхности изделия  $G_1 = 1,1...2,0$  ГПа. После операции шлифования эти напряжения являются растягивающими и составляют 0,1...0,6 ГПа.

Размерный съем металла при MAO, как правило, находится в пределах 3...30 мкм, а шероховатость поверхности снижается в 2...10 раз.

Силовое и температурное воздействие MAO на формируемую поверхность на 1...2 порядка меньше, чем при шлифовании. Уже по этим причинам качество поверхности, обработанной MAO, значительно выше, чем шлифованной. Благоприятное влияние импульсного магнитного поля на структуру металла делает это различие в качестве еще более существенным. Это обстоятельство, а также возможность управлять в широких пределах параметрами процесса позволили разработать и реализовать ряд эффективных технологических процессов обработки изделий в магнитном поле.

### 8.2.3. Технологические процессы магнитно-абразивной обработки

Технология заменяет ручные трудоемкие операции, а также экологически вредные процессы химической и электрохимической обработки. Повышает важнейшие эксплуатационные свойства изделий – сопротивление износу, коррозии и механическому разрушению.

Разработано оборудование и реализованы процессы MAO.

Наименование технологического процесса	Основные характеристики технологического процесса
Магнитно-абразивная зачистка кромок изделий под сварку	Толщина зачищаемой кромки до 20 мм, производительность зачистки 0,2...1,5 м/мин
Магнитно-абразивная зачистка сварочной проволоки (с порядной намоткой и укладкой в кассету)	Диаметр проволоки 0,5...3,0 мм, производительность зачистки 10...60 м/мин
Магнитно-абразивная зачистка концов эмальпровода	Диаметр провода 0,1...3 мм, время зачистки конца эмальпровода на длину провода 20 мм – 3...5 с
Магнитно-абразивное полирование (зачистка) прутков и труб	Диаметр изделия 3...14 мм, производительность полирования 1,0...3,6 м/мин, производительность зачистки 3...10 м/мин
Магнитно-абразивное полирование (зачистка) валов	Диаметр вала 15...200 мм, производительность полирования 0,1...0,5 м/мин, производительность зачистки 0,5...3,0 м/мин
Магнитно-абразивная зачистка листовых немагнитных материалов	Размеры изделия: ширина не более 350 мм, толщина 0,5...2,0 мм, длина не менее 170 мм, производительность 0,5...4,0 м/мин
Магнитно-абразивное полирование винтовых поверхностей	Диаметр изделия 10...150 мм, модуль 1...7 мм, производительность 30...120 изд./ч
Магнитно-абразивное полирование сферических поверхностей	Диаметр изделия 25...300 мм, производительность 15...90 изд./ч

Приведенные технологические возможности процессов МАО не являются предельными. Имеются значительные резервы повышения эффективности полирования и зачистки в магнитном поле изделий из разнообразных материалов – от органического стекла до различных металлических сплавов и керамики.

#### **8.2.4. Примеры практического применения процессов**

Широкие технологические возможности в сочетании со специально созданными составами смазочно-охлаждающих жидкостей и порошков-инструментов позволили реализовать на практике процессы магнитно-абразивной обработки (МАО) для решения задач:

1. Полирование контактирующих поверхностей деталей машин, подверженных значительным механическим нагрузкам и работающих на износ, контактную и циклическую прочность.

2. Зачистка поверхностей изделий перед сваркой.

3. Полирование поверхностей до и после нанесения покрытий.

4. Очистка поверхностей изделий от окисных пленок и дефектных слоев.

##### *8.2.4.1. Полирование в магнитном поле контактирующих поверхностей*

Показателен пример применения МАО для полирования рабочих дорожек колец подшипников качения привода вращения лопастей вертолета. 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% по сравнению со шлифованной поверхностью.

Также эффективно применение МАО для полирования поверхностей трения, скольжения, например, штоков-иглопроводителей швейных машин. Износ обработанных МАО 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 МАО штоков ниже на 30%.

Разработана технология МАО 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.

##### *8.2.4.2. Магнитно-абразивная зачистка поверхностей перед сваркой*

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 его прочность и 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 конструкций 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 МАО составляет не менее 30 суток, а для альтернативных операций – химического травления и механического шлифования – этот показатель составляет 0,33 и двое суток соответственно.



Испытания сварных швов 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 МАО не требует применения токсичных растворов кислот и щелочей, то и в экологическом, и в экономическом отношении эта технология предпочтительнее.

Хорошие результаты дает применение МАО для зачистки поверхностей листовых изделий из легированных (нержавеющих) сталей перед их термодиффузионной сваркой.

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.

#### *8.2.4.3. Полирование поверхностей до и после нанесения покрытий*

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°C. 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. Предпринятая попытка заменить электрохимическую обработку ТВЭлов на полирование в магнитном поле дала обнадеживающие результаты.

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.

Создан оригинальный процесс полирования внутренних поверхностей труб прямоугольного сечения размерами от 3x6 мм до 7x14 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  $Ra = 0,10...0,05$  мкм.

Имеется опыт магнитно-абразивного полирования хромовых и керамических покрытий различных изделий.

#### *8.2.4.4. Магнитно-абразивная очистка поверхностей от окисных пленок и дефектных слоев*

Очистке в магнитном поле подвергаются листы, ленты, прутки, проволока 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 м/мин. Возможна зачистка на станке листов и лент из немагнитных сплавов толщиной до 2 мм и шириной до 350 мм.

Создано малогабаритное устройство для магнитно-абразивной очистки концов эмалипровода 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 лакокрасочные покрытия 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 мм, время зачистки – 3...5 с.

### **8.2.5. Заключение**

Вышеприведенные результаты многолетних исследований и экспериментов позволяют сделать ряд выводов.

1. Уникальное сочетание совместного воздействия импульсов магнитного поля на структуру металла и "мягких" режимов удаления дефектного поверхностного слоя дает возможность магнитно-абразивным способом сформировать поверхность с минимальным количеством дефектов и высокими эксплуатационными свойствами – сопротивлением коррозии, износу и механическим нагрузкам.

2. Например, магнитно-абразивная обработка, по сравнению с другими способами обработки поверхностей изделий, перед сваркой обеспечивает повышение коррозионной стойкости поверхностей на порядок и более. Развитие и применение только этого достоинства МАО в промышленности позволяет сберечь громадные ресурсы:

- энергосбережение (снижение затрат на добычу, обработку металлов и сплавов);
- улучшение экологии (уменьшение объемов или полная замена экологически вредных производств).

3. Использование уникальных возможностей магнитной и абразивной обработки изделий в промышленности может служить основой новой нетрадиционной концепции обработки контактирующих поверхностей. Суть ее в выборе методов обработки, усиливающих фактор технологической наследственности и эффект воздействия энергии магнитного поля на уровень качества изделий промышленности [302, 303].

4. Технологические возможности метода магнитно-абразивной обработки реализованы не более чем на 3%. Резервы реализуемы путем совершенствования способов, оборудования и технологических сред.

## ГЛАВА 9. ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НАНОТЕХНОЛОГИИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

### 9.1. Обсуждение проблемы

Феномен магнитного поля имеет колоссальные возможности улучшить качество жизни человеческого общества. Например, отмеченные Нобелевской премией в 2003 году научно-технические достижения в области физики (сверхпроводимость, сверхтекучесть) и медицины (томография) основаны на использовании магнитного поля.

Накопленные знания и опыт показывают, что применение магнитного поля для обработки высокоточных поверхностей имеет огромный потенциал. Созданный для его реализации метод магнитно-абразивной обработки (МАО) предназначен для финишного полирования поверхностей и формирования их нанорельефа с уникальными свойствами. Практическое использование метода МАО будет эффективно способствовать развитию высоких технологий во всех областях техники (например, электроника, оптика, лазеры), в экологии, медицине и других сферах человеческой деятельности.

Открывается новая область широчайшего применения метода МАО нанотехнология. (Для справки приведем наиболее простое определение: нанотехнология – технология, оперирующая объектами нанометровых размеров и способами их получения и реализации.) Исследования и разработки в области нанотехнологий стремительно развиваются. Так, в 2001 году оборот мирового рынка нанопродукции составил около 40 млрд евро [304]. К 2015 году ежегодный оборот этого рынка составит около 1 триллиона долл. США, из них 300 млрд – в области полупроводниковой промышленности [305].

В качестве примера изложим перспективы применения метода МАО в электронной промышленности на операциях полирования пластин монокристаллов кремния, которые используются во всех электронных устройствах как подложки-носители интегральных схем (ИС).

Процесс компьютеризации современного общества требует решения многих сложнейших технологических проблем. Тенденция повышения объемов и скорости обработки информации ведет к предельному насыщению интегральных схем электронными элементами с одновременной их миниатюризацией.

Согласно материалам форума компании Intel IDF 2002, в приведенной табл. 9.1 показано, что размеры электронных затворов ИС измеряются в нанометрах и в течение ближайших лет должны уменьшиться на порядок [306].

Таблица 9.1

Данные о миниатюризации интегральных схем

Год внедрения	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2015
Технологический процесс, нм	250	180	130	90	65	45	32	10
Длина затвора, нм	200	130	70	50	35	25	15	5

При изготовлении ИС применяются технологии фотолитографии с использованием фотошаблонов-масок. Размеры их конструктивных элементов также измеряются в нанометрах [307].

Процесс миниатюризации элементов ИС требует решения ряда сложных технологических задач. Одной из них является задача повысить эффективность полирования поверхности пластин и снизить высоту их неровностей с 10 нм в 2005 году до 1 нм в 2015 году.

Сейчас кремниевые пластины полируют традиционным способом при помощи притиров – полировальников и алмазных паст. Эта технология трудоемкая и дорогостоящая.

Затраты на полирование составляют около 30% стоимости пластины. К тому же эта технология исчерпала свои технические возможности. Лучшие варианты ее исполнения обеспечивают рельеф поверхности с высотой неровностей в 8 нм.

На финишных операциях изготовления пластин применяются также процессы химического травления в концентрированных растворах агрессивных кислот. Эти процессы экологически ущербны, вредны для здоровья работающих, не имеют перспектив и требуют замены на более дружелюбные технологии.

В качестве альтернативы существующим процессам финишной обработки пластин монокристаллов кремния ученые и специалисты Научно-инженерного предприятия «Полимаг» (Беларусь, Минск) предлагают метод магнитно-абразивной обработки (МАО). В 2002–2004 гг. совместно с Fraunhofer Institute Productiontechnology (Германия, Аахен) выполнены поисковые исследования по полированию в магнитном поле кремниевых пластин [308].

Известно, что в современном производстве пластин кремния расходы на традиционные финишные операции механического и химико-механического полирования составляют около 30% от стоимости пластины. Замена этих операций на нанотехнологии МАО (помимо значительного повышения качества поверхности) позволит в 2...3 раза снизить затраты на финишную обработку. Если учесть, что стоимость одной пластины обычно составляет 15–50 дол. а в мире ежегодно изготавливаются миллиарды пластин, то экономия от использования нанотехнологий МАО в производстве пластин-подложек интегральных схем может составить огромные суммы.

Нужно отметить, что применение нанотехнологий МАО в производстве пластин позволит значительно улучшить условия труда работающих и экологическую обстановку, поскольку исключаются операции химико-механического полирования. Соответственно, отпадает необходимость в производстве, транспортировке, хранении, применении в промышленности и последующей утилизации больших объемов экологически вредных, опасных для здоровья людей концентрированных растворов кислот.

Применение нанотехнологий МАО в электронной промышленности может активно способствовать запланированной на 2006–2015 гг. миниатюризации электронных устройств (уменьшение размеров транзисторов в 40 раз – с 200 нм до 5 нм).

Это означает, что во много раз будут снижены:

- потребление электрической энергии электронными устройствами во всех сферах человеческой деятельности;
- вредное воздействие на здоровье человека при пользовании мобильными телефонами, компьютерами и другими приборами;
- расходы многих материалов в производстве электронных и других приборов;
- нагрузки на окружающую среду за счет энерго- и материалосбережения.

Или при существующих размерах электронных приборов и устройств в 40 раз будут увеличены их функциональные возможности – объем памяти, быстродействие и др.

В современной электронной промышленности актуальна еще одна сложная техническая проблема. Доказано, что экономически выгодно изготавливать кремниевые пластины-подложки интегральных схем возможно большего диаметра. Еще в начале XXI в. все предприятия выпускали пластины диаметром до 200 мм. В 2003 г. предприятия электроники США и Японии начали переход на выпуск пластин диаметром 300 мм. Согласно прогнозу International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), планируется к 2010 г. освоить производство кремниевых подложек диаметром 450 мм [309].

С увеличением диаметра пластин резко усложняется проблема их полирования. Если для пластин диаметром 200 мм затраты на полирование составляют 30% от стоимости пластины, то для пластины диаметром 300 мм затраты уже равны 50% от стоимости пластины. Для полирования пластин диаметром 450 мм существующие технологии мало пригодны и не имеют перспектив применения. Решение проблемы полирования пластин диаметром 450 мм может быть эффективным с использованием нанотехнологии МАО.

Со времен изобретения микроскопа Antony van Leeuwenhoek (1632–1723) в технологии полирования оптических линз до настоящего времени мало что изменилось. Линзы, как и прежде, обычно полируют при помощи абразивного порошка и притира. Эта технология трудоемкая, требует высокой квалификации оператора, поэтому дорого-стоящая. Затраты на полирование составляют около 40% стоимости линз. К тому же эта технология исчерпала свои технические возможности. Лучшие варианты ее исполнения обеспечивает показатель шероховатости поверхности  $Ra = 3$  нм при больших затратах времени и средств. Развитие оптики и электроники ставит задачу формировать нанорельеф поверхностей с  $Ra$  менее 2 нм.

Новым техническим решением в области финишной обработки поверхностей является созданный в Беларуси процесс гидродинамического полирования с использованием магнитно-реологической жидкости [310]. Работы в этом направлении получили развитие в США в компании QED, которая разработала технологию MRF (magnetorheological fluid) и оборудование для полирования сферических и асферических линз [311, 312]. Суть процесса MRF заключается в том, что струя магнитореологической жидкости направляется на обрабатываемую поверхность и полируют ее с обеспечением  $Ra = 2 \dots 5$  нм. Однако применение технологии MRF имеет ряд технических трудностей. MRF является сложной и легко разрушаемой субстанцией. В MRF во время работы необходимо постоянно поддерживать точное соотношение составляющих компонентов (ферромагнитные и абразивные частицы, поверхностно-активные вещества, вода). Срок службы MRF фирмы QED не превышает 2 месяцев. MRF является работоспособной, если содержит не более 5% абразивных частиц размером не более 2 мкм. Малое количество абразива не позволяет интенсивно вести процесс полирования, поэтому его производительность невысока. Перечисленные причины существенно снижают технологические возможности и эффективность технологии MRF.

В настоящее время компания QED является мировым монополистом по производству оборудования для высокого уровня финишной обработки оптических линз. QED реализует по сильно завышенным ценам оборудование (стоимость установки более 250 тыс. дол.) и рабочие жидкости MRF (стоимость 1 л более 300 дол.). Технология MRF является весьма дорогостоящей, что сильно ограничивает масштабы ее применения.

Технология MRF является частным вариантом метода magnet-abrasive machining (MAM) и реализует лишь около 5% его потенциальных возможностей.

Альтернативой технологии MRF может выступить универсальный и экономичный процесс магнитно абразивного полирования, использующий в качестве полирующего инструмента ферроабразивный порошок [313]. Весьма существенный вклад технологии и нанотехнологии MAO должны внести в оптическую промышленность и производство лазеров за счет снижения трудоемкости и повышения качества полированных поверхностей. В оптике появятся дополнительные возможности повысить разрешающую способность оптических систем, уменьшить их размеры и массу. Полирование в магнитном поле обеспечивает рельеф наноуровня и практически бездефектные поверхности активных элементов лазерных устройств. В результате на 1...2 порядка повышается лучевая прочность элементов, что дает возможность создавать компактные и мощные лазеры самого широкого применения – в технологиях, медицине, экологии, системах передачи информации и др.

## **9.2. Магнитно-абразивное полирование пластин монокристаллов кремния**

Для исследования процесса магнитно-абразивной обработки (MAO) пластин монокристаллов кремния – подложек интегральных схем диаметром до 150 мм создан действующий макет устройства модели 8.012 [314, 315]. Он содержит электромагнитную систему и смонтировано на рабочем столе серийного горизонтально-фрезерного станка модели 6P80Г (рис. 9.1). Установка 8.012 состоит из двух взаимосвязанных модулей: узла

магнитной системы, связанного с приводом вращения рабочего инструмента, а также механизма установки и крепления заготовки, связанного с независимым приводом ее вращения. Узел магнитной системы смонтирован на механизме линейных перемещений с трением скольжения типа «ласточкин хвост», заданное положение каретки которого устанавливается поворотом рукоятки. Магнитная система включает две катушки индуктивности, установленные на верхнем и нижнем сердечниках, связанных осью. В торцевой части двух сердечников закреплены верхний и нижний полюсные наконечники. При этом верхний полюсный наконечник является рабочим инструментом и предназначен для формирования щетки из магнитно-абразивного порошка в зоне обработки, а нижний полюсный наконечник служит для замыкания магнитного поля в воздушном зазоре между двумя элементами. Регулировка воздушного зазора обеспечивается подъемом или опусканием верхней части магнитной системы за счет вращения вертикально расположенной рукоятки. Рабочий инструмент приводится во вращение от асинхронного электродвигателя.

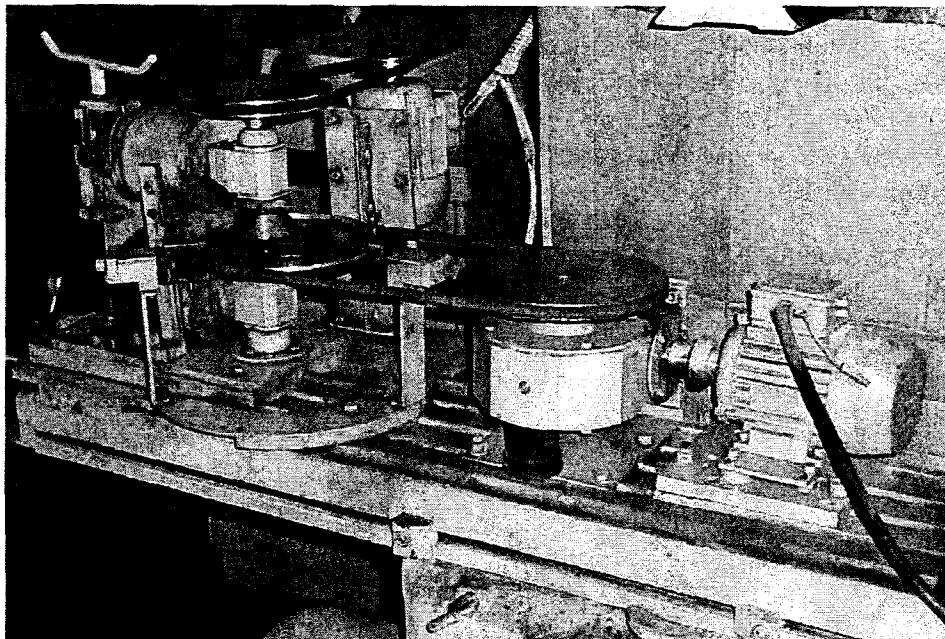


Рис. 9.1. Установка 8.012 для магнитно-абразивного полирования пластин

Обрабатываемая заготовка устанавливается в сепаратор, который опирается на подложку, расположенную на приводном колесе. Приводное колесо удерживается между полюсными наконечниками тремя опорными стойками, симметрично расположенными относительно его оси вращения. Приводное колесо получает вращение от второго электродвигателя через червячный редуктор и клиноременную передачу.

Установка работает следующим образом.

Перед началом обработки производится закрепление заготовки в сепараторе, который в дальнейшем присоединяется к тонкому круглому диску, установленному в приводном колесе. Поворотом рукоятки осуществляется подъем верхней части магнитной системы в крайнее верхнее положение. В образовавшийся зазор помещается собранное приспособление с заготовкой. Затем верхняя часть магнитной системы опускается вниз до образования необходимого рабочего зазора между инструментом и плоскостью заготовки. На обрабатываемую поверхность заготовки тонким слоем равномерно наносится магнитно-абразивный порошок и смазывающе-охлаждающая жидкость.

Включение электродвигателя вызывает движение червячного редуктора и соответственно приводного колеса с угловой скоростью  $\omega_{пл}$ . Одновременно производят включение второго двигателя, который вызывает вращение верхнего полюсного наконечника с угловой скоростью  $\omega_{и}$ .

Далее производят включение магнитной системы, в результате чего через обмотки катушек возбуждения начинает протекать ток, а в воздушном зазоре между полюсными наконечниками возникает магнитная индукция, которая приводит в движение свободные частицы магнитно-абразивного порошка и заставляет их концентрироваться на вершинах полюсного наконечника, образуя своеобразную щетку необходимой жесткости.

Для обеспечения равномерности съема припуска с заготовок различного типа-размера верхний полюсный наконечник имеет возможность настройки перемещения в продольном направлении на некоторое расстояние относительно механизма установки и крепления детали.

На стадии поисковых исследований магнитно-абразивному полированию подвергались пластины монокристаллического кремния диаметром 150 мм и толщиной 0,4 мм. Испытывались ферроабразивные порошки различных составов и СОЖ на основе ПАВ-олигомеров [316]. Магнитные полюса устройства 8.012 выполнены в виде дисков. Их торцовые рабочие поверхности обращены друг к другу с зазором 6...8 мм и образуют зону обработки пластины. На рабочих поверхностях полюсов в виде колец шириной 8...12 мм сформированы концентраторы магнитного потока. Они выполнены в виде усеченных пирамид с углом при вершине 110°, рабочая площадка каждого концентратора-пирамиды имеет средние размеры 3x10 мм. Высота концентраторов – 4 мм. Вращение заготовки осуществляется от двигателя через редуктор и ременную передачу. Вращение полюсных наконечников осуществляется от второго двигателя через ременную передачу.

Параметры процесса магнитно-абразивного полирования:

число оборотов пластины, 1/с	0,7
число оборотов полюса магнита, 1/с	6
диаметр полюса магнита, мм	80
рабочий зазор между полюсами магнита и пластиной, мм	2,5
магнитная индукция в середине рабочего зазора, Тл	0,8
частота импульсов магнитного поля, Гц	50

Результаты экспериментов приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

### Результаты МАО кремниевых пластин

№ опыта	Материал	Рабочая среда (ФАП)	Время обработки	Показатель шероховатости $Ra$ , нм	
1	Si	Fe-WC	30	160	38
2	–	Fe-MoC	30	160	40
3	–	Fe-NbC	30	160	44
4	–	FeTiC	30	160	32
5	–	FeTiC	30	320	19,19
6	–	FeTiC	30	160	10,61
7	–	FeTiC	30	160	14,63
8	–	Fe-алмаз	10	160	9,15

Пояснения к табл. 9.2:

- а) для опытов 1–4 карбиды получены прямым восстановлением из окислов металлов;
  - б) для опытов 5–7 частицы карбидов титана получены измельчением литого TiC.
- На рис. 9.2 представлен нанорельеф поверхностей пластин кремния после МАО.

Surface Statistics:

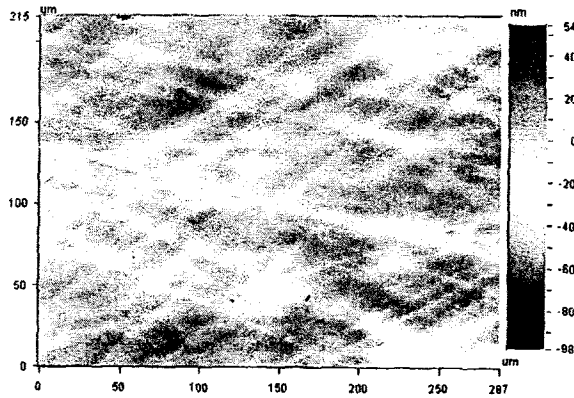
Ra: 10.61 nm  
Rq: 13.30 nm  
Rz: 89.43 nm  
Rt: 151.78 nm

Set-up Parameters:

Size: 368 X 238  
Sampling: 782.38 nm

Processed Options:

Terms Removed  
Tilt  
Filtering:  
None

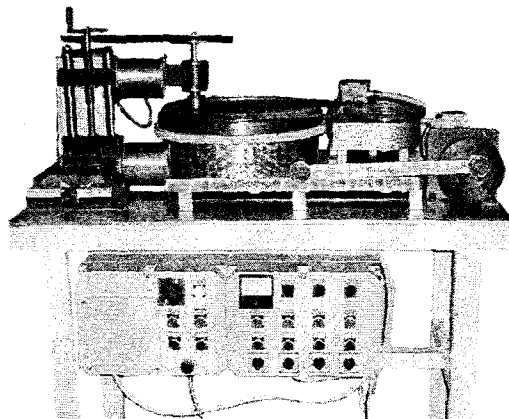


Title: SiO3

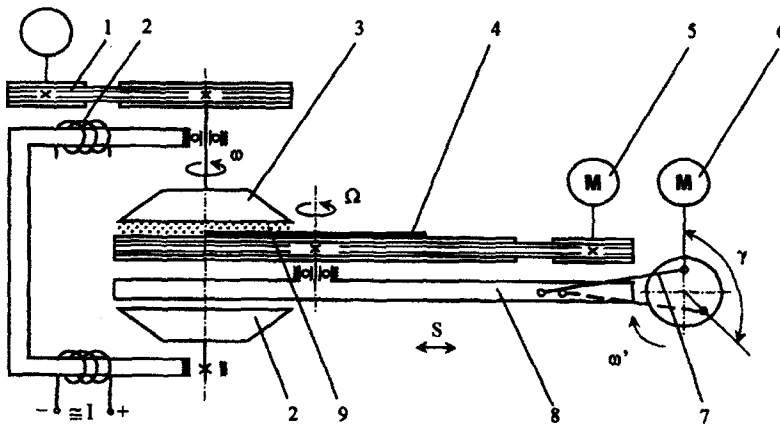
Note: Mittermessung

Рис. 9.2. Нанорельеф пластины кремния после MAO (см. опыт 6 в табл. 9.1)

Для проведения комплекса технологических исследований в целях совершенствования процесса МАП разработана конструкторская документация и изготовлена экспериментальная установка модели 3905 для полирования в магнитном поле плоских поверхностей оптической и электронной техники. Общий вид станка представлен на рис. 9.3, а, а кинематическая схема – на рис. 9.3, б.



а)



б)

Рис. 9.3. Общий вид (а) и кинематическая схема (б) станка модели 3905



Станок 3905 реализует три рабочих движения: вращение верхнего полюсного наконечника (3) с частотой  $\omega$ ,  $\text{с}^{-1}$ , вращение обрабатываемой пластины (4) вокруг собственной оси с частотой  $\Omega$ ,  $\text{с}^{-1}$  и возвратно-поступательное движение каретки (8) с амплитудой  $S$ , м.

Основные технические характеристики станка 3905:

диаметр обрабатываемых пластин, мм	25...300
толщина обрабатываемых пластин, мм	1...10
время обработки пластины, мин	2...60
количество полюсных наконечников, шт.	2
расположение полюсных наконечников – соосно друг напротив друга на регулируемом расстоянии, изменяемом в диапазоне от 5 до 30 мм	
частота вращения полюсных наконечников, $\text{с}^{-1}$	2...6
частота вращения изделия, $\text{с}^{-1}$	0,5...1,2
диаметр полюсного наконечника, мм	50...150
величина магнитной индукции в зазоре между полюсным наконечником и поверхностью обрабатываемого изделия, Тл	0,1...1,0
диапазон возвратно-поступательного перемещения изделия, мм	0...60
скорость подачи изделия, м/мин	0...0,2
величина одной рабочей дозы порошка, $\text{см}^3$	10...40
подача СОЖ в зону обработки, л/мин	0,2...2,0
подводимый ток:	
– к приводам движений – переменный	
– к электромагнитным катушкам – постоянный	
сила тока в катушке, А	0,5...6,0
параметры электрической питаемой сети:	
напряжение, В	380
частота, Гц	50

В технологических исследованиях ставилась задача удалить дефектный приповерхностный слой толщиной 5...15 мкм, сформированный на предшествующей операции тонкого шлифования с характеристикой шероховатости поверхности, равной 0,2 мкм.

На первой стадии – предварительном полировании – обработку ведут при более «жестких» режимах с использованием алмазных частиц размером 10/7 мкм. Это позволяет осуществлять МАП с преобладанием процессов микрорезания и абразивного изнашивания, которые сопровождаются разрушением и удалением непрерывно образующихся на обрабатываемой поверхности химических пленок, преимущественно оксидных, прочность которых ниже прочности основного материала. Кроме того, в зоне обработки имеет место явление охрупчивания приповерхностного слоя. Оно вызвано переналепом материала в микрообъемах в процессе образования микроцарапин – следов микрорезания. Под действием сил резания, трения и адгезии в этих микрообъемах металла создаются растягивающие напряжения и развиваются микротрещины, создаются благоприятные условия для миграции в них активных молекул. Ювенильное состояние поверхности металла после среза, наличие микротрещин и растягивающих напряжений в приповерхностном слое при сравнительно небольших скоростях осуществления процесса финишной обработки способствуют развитию адсорбирующего эффекта – снижения прочности металла в присутствии поверхностно-активных веществ – компонентов СОЖ. Действие адсорбции проявляется в том, что ПАВ снижая поверхностную энергию металла, способствует зарождению пластических сдвигов и развитию дефектов структуры реального твердого тела, непрерывно развивающихся в процессе упругой пластической деформации. В этих условиях при МАП стабильно обеспечивается снижение показателя шероховатости поверхности  $Ra$  с 0,2 мкм (200 нм) до 0,02 мкм (20 нм). При этом глубина нарушенного слоя составляет 1...2 мкм.

Параметры процесса магнитно-абразивного полирования:

число оборотов пластины, 1/с	0,7
число оборотов полюса магнита, 1/с	6

диаметр полюса магнита, мм	80
рабочий зазор между полюсами магнита и пластиной, мм	2,5
магнитная индукция в середине рабочего зазора, Тл	0,8
частота импульсов магнитного поля, Гц	50

В качестве полируемых образцов использованы пластины монокристаллов кремния диаметром 150 мм и толщиной 0,4 мм.

На второй стадии МАП – окончательном полировании – назначаются более «мягкие» режимы и используются алмазные частицы размером 1/0,5 мкм. Процесс удаления материала и формирования нанорельефа протекает с преобладанием явлений адгезионного взаимодействия и разрывов атомно-молекулярных связей на поверхности и в тончайшем приповерхностном слое. При полировании образцов монокристаллов кремния и флюоритов Ва, Са и Mg на установке 3905 в лучших экспериментах обеспечена шероховатость поверхности, характеризующаяся  $Ra = 0,7...2$  нм ( $7...20 \text{ \AA}$ ). Если принять во внимание размер постоянной кристаллической решетки кремния  $a = 5,4 \text{ \AA}$ , то очевидно, что полированием в магнитном поле можно обеспечить нанорельеф поверхности с высотой неровностей, соответствующей 3–10 атомным слоям.

Полированию в магнитном поле подвергнуты пластины монокристаллов кремния диаметром 150 мм и толщиной 0,4 мм, а также пластины монокристаллов фторидов бария, кальция и магния диаметром 25 мм и толщиной 5 мм. Исходная шероховатость поверхности всех образцов соответствовала  $Ra = 20...50$  нм. Режимы МАП приняты следующими:

число оборотов пластины, 1/с	2
число оборотов полюса магнита, 1/с	4
диаметр полюса магнита, мм	80
рабочий зазор между полюсами магнита и пластиной, мм	2,0
магнитная индукция в середине рабочего зазора, Тл	0,5
частота импульсов магнитного поля, Гц	50

В табл. 9.3 приведены результаты MAO образцов пластин монокристаллов кремния.

Таблица 9.3

#### Результаты MAO образцов пластин монокристаллов кремния

Монокристалл	Размер алмазных зерен в ФАП, мкм	Время полирования, мин	Характеристика нанорельефа $Ra$ , нм
Si	10 / 7	5	10...15
Si	1 / 0,5	10	0,7...2

Общий вид нанорельефа поверхности пластины монокристалла кремния после МАП представлен на рис. 9.4.

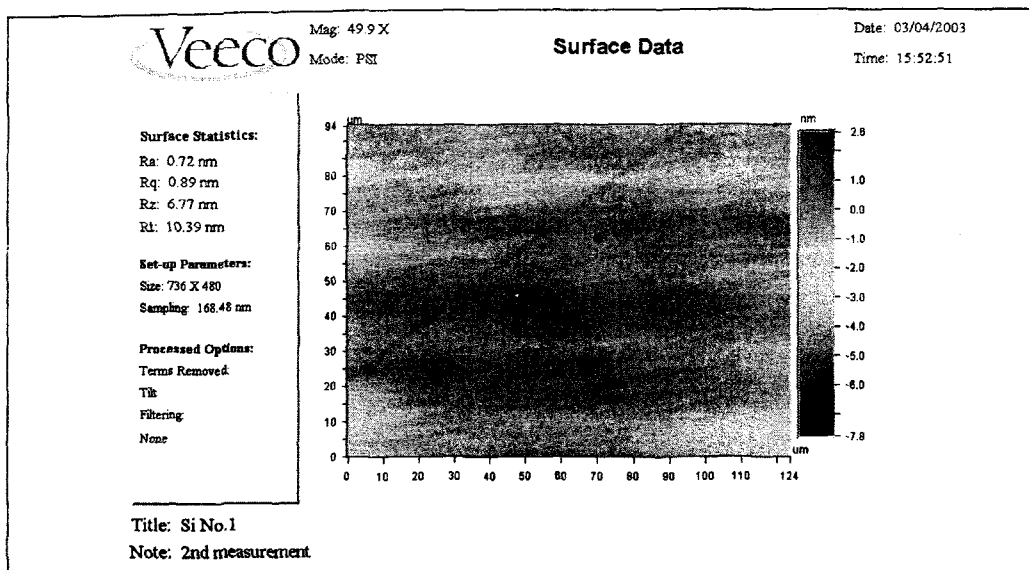


Рис. 9.4. Нанорельеф поверхности монокристалла кремния после МАП

Одним из важнейших показателей процесса финишной обработки прецизионных поверхностей является параметр TTV – отклонение от идеальной плоскости. В целях обеспечения минимальных значений параметра TTV выполнен комплекс исследований, включающий разработку методики расчета кинематики процесса МАО пластин, машинные и натурные эксперименты и оптимизацию технологических факторов [317–319].

На рис. 9.5 представлены результаты измерений и значения  $TTV < 2,9$  мкм для пластины кремния диаметром 150 мм после МАП, что отвечает предъявляемым требованиям.

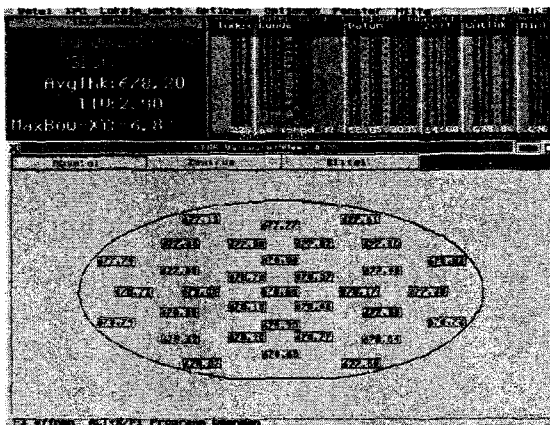


Рис. 9.5. Макрогеометрия поверхности пластины кремния после МАП

Исследования кристаллической структуры и химического состава приповерхностных слоев образцов монокристалла кремния с использованием сканирующего электронного микроскопа с микрозондовым рентгеновским анализатором показали, что состояние и состав приповерхностного слоя (искажения кристаллической структуры, наличие дефектов и примесей) имеют те же значения характеристик, что и основа-матрица образцов. То есть, в процессе МАП удаляются дефектные слои, сформированные на предшествующих операциях шлифования и механического полирования, и формируется поверхность и приповерхностный слой, в которых практически отсутствуют дефекты.

Таким образом, в перспективе представляется возможным в традиционном процессе изготовления пластин монокристаллов кремния [320, 321] частично или полностью заменить применяемые операции травления и химико-механического полирования на операции полирования в магнитном поле. Эти изменения технологии производства подложек интегральных схем целесообразны и эффективны с позиций экономики, экологии и охраны здоровья трудящихся.

### 9.3. Полирование в магнитном поле деталей оптики и лазерной техники

Проблема формирования поверхностей с рельефом наноуровня и приповерхностных слоев с минимальным количеством дефектов структуры чрезвычайно актуальна для ответственных изделий оптической и лазерной техники [322].

Например, в оптическом приборостроении исключительно важными являются задачи повышения чувствительности и разрешающей способности оптических устройств при одновременном уменьшении их размеров и массы. Как известно, параметры разрешающей способности любой оптической системы в первую очередь определяются значением апертуры и величиной пропускания входящих в нее оптических компонентов. Снижение уровня рассеяния света и минимизация коэффициента пропускания в ряде случаев становится возможной только за счет качественного изготовления самих оптических деталей. При этом на обрабатываемых изделиях должна быть обеспечена шероховатость поверхности, измеряемая в ангстремах.

Традиционный технологический процесс изготовления прецизионных оптических деталей включает в себя несколько стадий грубого, среднего и мелкого шлифования с последующим окончательным полированием [322]. Процесс полирования является весьма трудоемким (до 15 часов), при его осуществлении используются полировочные смолы, нагрев которых требует до 60% общих затрат энергоресурсов, и сопровождается загрязнением атмосферы вредными канцерогенными веществами фенольной группы. Закрепление заготовок с помощью наклеечных веществ также приводит к деформации их рабочих поверхностей и существенно затрудняет получение деталей с отклонением формы 50...100 нм от эталонной поверхности. С целью достижения стабильности показателей технологического процесса проводят сепарирование абразивных порошков, термостатирование пробного стекла и наклеечного блока и прочие мероприятия. Однако это не всегда обеспечивает достижение желаемого результата.

Аналогичная технологическая цепочка финишной обработки применяется и за рубежом (предприятия «Korth Kristalle» GmbH, Germany; «Rafael», Israel и др.) [323, 324]. Ее возможности исчерпаны и не обеспечивают требуемое качество полирования деталей оптических элементов лазеров с высокой плотностью излучения.

В течение последних 10 лет в нашей республике выполнен значительный объем исследований по полированию оптических поверхностей в магнитном поле с использованием магнитно-реологических жидкостей [310]. Разработки белорусских ученых получили развитие в США на предприятии QED [312, 325].

Фирма QED выпускает оборудование серии Q22-400X, Q22-400Y, в основе которого заложена технология магнито-реологического полирования (MRF). Установки компании предназначены для управляемой автоматизированной обработки сферических и плоских заготовок из оптического стекла, керамики (SiC), кремниевых пластин (SiO<sub>2</sub>) и изделий из других материалов диаметром до 400 мм. Обеспечиваемый при этом нанорельеф поверхности оптических деталей характеризуется параметром шероховатости  $Ra = 0,5 \div 2$  нм при практическом отсутствии дефектов в приповерхностном слое изделий. В результате лучевая прочность оптических элементов увеличивается в 10–50 раз по отношению к деталям, отполированным по традиционной технологии [326].

Очевидным недостатком технологии QED является высокая себестоимость готовых изделий (как правило, более 1000 дол.), которая в большинстве случаев позволяет использовать оптические детали в различных системах военного назначения, где цена зачастую не является определяющим фактором. Кроме того, ввиду отсутствия в настоящий момент альтернативной технологии на итоговую себестоимость оптических элементов влияет несравненно завышенная стоимость самого технологического оборудования фирмы QED и полирующих инструментов – магнитных реологических жидкостей.

В существующих оптических системах очень широко используются оптические кристаллы, на которых получение шероховатости поверхности такого уровня является

достаточно сложной задачей. По своим физическим свойствам кристаллические вещества имеют более низкие или более высокие значения показателей преломления, чем любые стекла. Диапазон спектральной прозрачности кристаллов далеко превосходит область прозрачности стекол. Изотропность свойств стекла, как правило, не позволяет создавать на его основе оптические элементы с резко выраженными электро- и акустооптическими свойствами. В частности, несравненно большее значение и применение имеют в оптике монокристаллы фторидов. Оптические материалы из фтористого лития марки ФЛУ имеют прозрачность до 105 нм в далекой ультрафиолетовой части спектра. Однако мощное лазерное излучение, характерное для лазеров работающих в ультрафиолетовом диапазоне, ограничивает срок службы оптических компонентов на их основе.

Особенно актуальна проблема качественной финишной обработки поверхностей оптических элементов лазерных устройств. Дефекты структуры в приповерхностном слое линзы, образовавшиеся в процессе шлифования и полирования, при пропускании излучения высокой плотности инициируют возникновение локальных очагов температурных и механических напряжений, способных вызвать разрушение линзы. Лучевая прочность оптических элементов, напрямую зависящая от качества их финишной обработки, является одним из важнейших факторов, определяющих прогресс в области создания и применения мощных и компактных лазерных устройств.

Оптические кристаллы ( $BaF_2$ ,  $CaF_2$  и  $MgF_2$ ) находят также применение в качестве окон прозрачности для активных элементов газоразрядных лазеров ( $CO_2$ ), в приборах и комплексах экологического мониторинга атмосферы и контроля чрезвычайных ситуаций (на расстоянии до 5 км). Достижение высоких показателей точности таких систем в ряде случаев связано с высокой добротностью лазера и малой величиной расходимости выходного пучка. С технологической точки зрения это обеспечивается высоким качеством обработки рабочих поверхностей оптических деталей.

На сегодняшний день в мире существует лишь несколько крупных компаний, располагающих достаточными производственными мощностями, а также квалифицированным персоналом, которые способны решить поставленные выше задачи.

В целях изучения технологических возможностей метода магнитно-абразивного полирования (МАП) был поставлен пробный эксперимент для сравнения метода с современной технологией магнитно-реологического полирования (MRF), разработанной белорусскими и американскими учеными [310, 325].

На установке модели 3905 были обработаны образцы монокристаллов фторидов бария, кальция и магния. Образцы представляли собой пластины диаметром 25 мм и толщиной 5 мм с шероховатостью поверхности, характеризуемой  $Ra = 1,65...3,9$  нм [327]. Результаты пробных сравнительных экспериментов представлены в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Результаты полирования монокристаллов фторидов

Фторид	Технология					
	MRF			МАП		
	$Ra$ , нм		(+) – лучше (–) – хуже	$Ra$ , нм		(+) – лучше (–) – хуже
	до	после		до	после	
$BaF_2$	1,82	3,0	– 1,65	2,17	2,63	– 1,23
$CaF_2$	3,9	1,93	+ 2	3,68	2,36	+ 1,56
$MgF_2$	1,87	2,3	– 1,23	1,65	1,95	– 1,18

Из данных табл. 9.4 следует, что оба технологических процесса в 1,5–2 раза снижают шероховатость поверхности образцов из фторида кальция, что подтверждает примерно

равные возможности испытываемых технологий улучшать нанорельеф поверхности. Факт ухудшения значений  $Ra$  после полирования образцов фторидов бария и магния свидетельствует о том, что выбранные режимы не являются оптимальными для этих материалов.

На рис. 9.6 представлен нанорельеф поверхности образца монокристалла фторида кальция после МАП. Топограмма получена при помощи измерительной системы Veeco на базе атомного силового микроскопа [328].

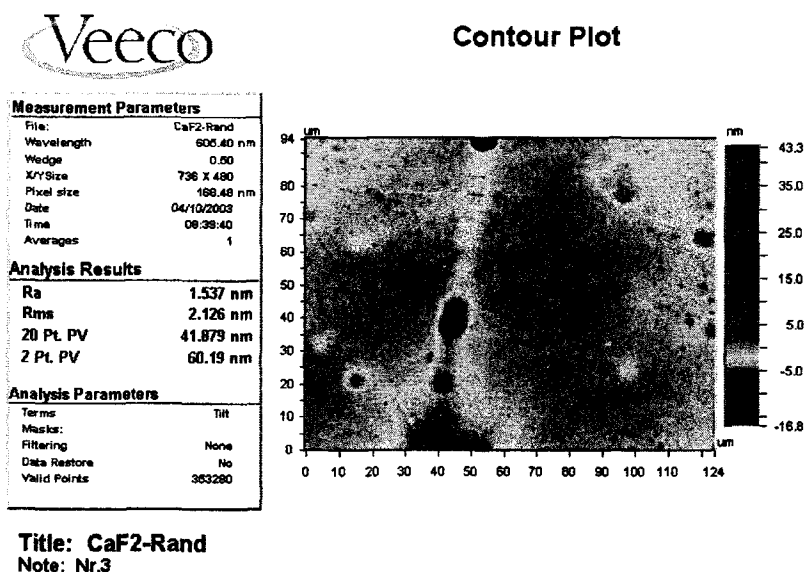


Рис. 9.6. Нанорельеф поверхности флюорита после МАП

Магнитно-абразивное полирование (МАП) оптических деталей производили на станке модели 3905 в течение 30 минут. В качестве образцов для обработки использовали оптические стекла ЛК103 (легкий крон) и БК-10 (баритовый крон) соответственно диаметром 18,5 и 20 мм, толщиной 4,4 и 2,6 мм. Полирование осуществляли ферроабразивными порошками различного состава [318]. Порция порошка для обработки одного образца составляла 10 мл.

Результаты МАП стекол приведены в табл. 9.5.

Таблица 9.5

#### Результаты обработки образцов стекол

№ образца	Марка стекла	Ферроабразивный порошок	Размерный съем материала $h_i$ , мкм
85	ЛК103	Fe-ABS-пластик-алмаз	5,5954
86	ЛК103	Fe-Ni-B-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9074
87	БК-10	Fe-новолак-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1020
88	БК-10	Fe-новолак-фторопол	0,9182
89	БК-10	Fe-ABS-пластик-фторопол	0,9182

В результате эксперимента было установлено, что наиболее эффективен композиционный ферроабразивный порошок на основе железа и алмаза с использованием в качестве полимерной матрицы акрилонитрилбутадиен стирола (АБС-пластик). Композиционный ферроабразивный порошок на основе железа и фторопола показал плохие прочностные и режущие свойства. Это можно объяснить слабой адгезией фторопола к новолачной смоле и АБС-пластику.

Экспериментально установлено, что для МАП существуют предельно достижимые значения шероховатости в зависимости от зернистости используемых абразивных зерен. Существование такого предела обусловлено конечной глубиной оставляемых абразивными зернами следов микрорезания. На рис. 9.7 и 9.8 показаны изображения поверхности оптических деталей из оконного стекла 1с после МАП, полученные на атомном силовом микроскопе (АСМ) NT-206 [329, 330]. Как видно из рисунков, глубина следов микрорезания алмазными зернами зернистостью 2/0 составляет менее чем 20 нм. Данная обработка позволяет получить поверхность с шероховатостью  $Ra$  около 3 нм. В связи с этим, целесообразно проводить обработку абразивом с наименьшей зернистостью, обеспечивающей приемлемый размерный съем, либо осуществлять ее в несколько стадий по пути понижения зернистости абразива.

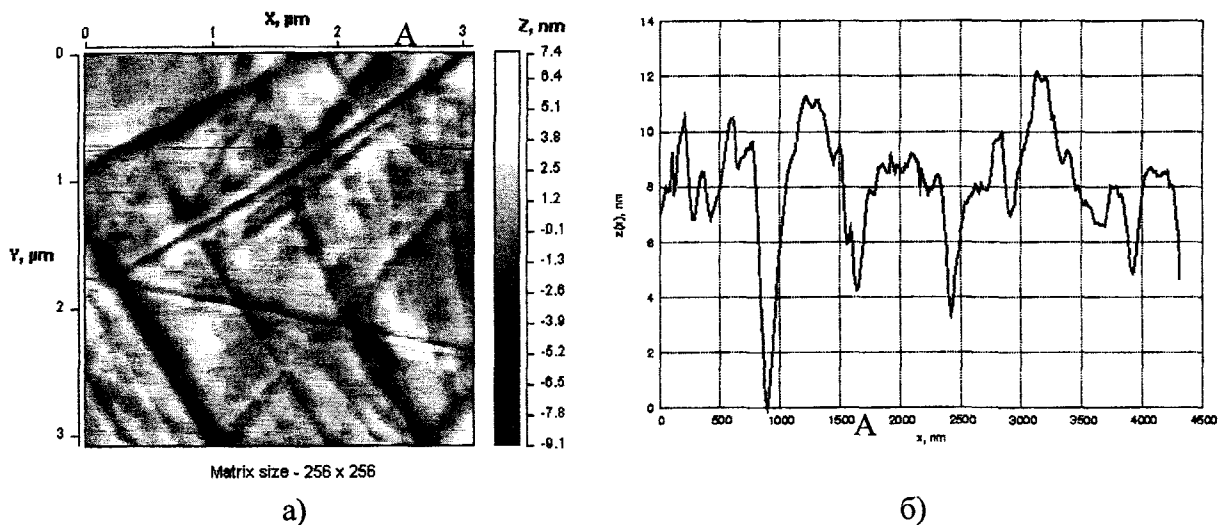


Рис. 9.7. Полученное на АСМ изображение участка поверхности стекла 1с размером 3х3 мкм после МАО (а) и графическое изображение диагонального профиля (б)

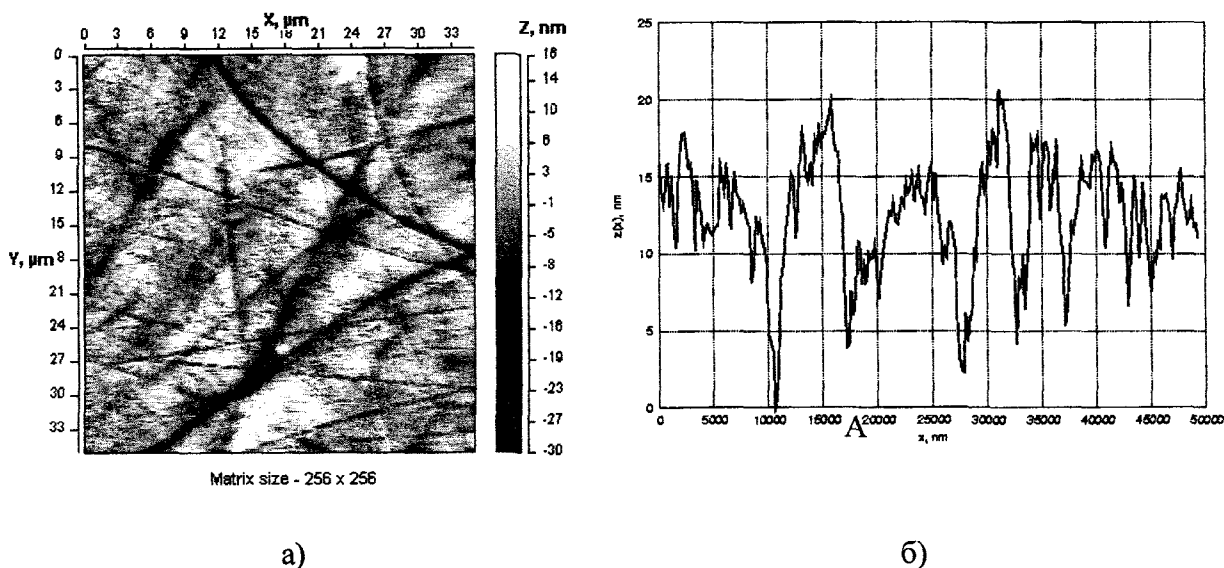


Рис. 9.8. Полученное на АСМ изображение участка поверхности стекла 1с размером 35х35 мкм после МАО (а) и графическое изображение диагонального профиля (б)

На основании результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В процессе магнитно-абразивной обработки (МАО) представляется возможным в широких пределах управлять механизмами микрорезания, упруго-пластического деформирования и атомно-молекулярного массопереноса, что позволяет оптимизировать соотношение между производительностью обработки, характеристиками нанорельефа поверхности и глубиной нарушенного слоя.

2. Разработана компьютерная модель, описывающая кинематику взаимодействия детали и инструмента в схемах со сложной планетарной кинематикой, имитирующая реальный процесс обработки. Модель позволяет рассчитывать скорости обработки для любой точки поверхности детали в любой момент времени.

3. Для полирования в магнитном поле поверхностей пластин монокристаллов кремния и оптических стекол разработаны ферроабразивные порошки на основе железа и алмаза с размером алмазных частиц менее 10 мкм.

4. Выполнен комплекс исследований и экспериментов по изучению влияния технологических факторов процесса МАО на характеристики формируемого рельефа и состояния приповерхностного слоя полируемых деталей электроники, оптики и лазерной техники.

5. Разработана методика, позволяющая давать количественную и качественную оценку распределения съема материала при магнитно-абразивном полировании кремниевых пластин. Технология МАП плоских прецизионных поверхностей пластин монокристаллов кремния – подложек интегральных схем диаметром 150 мм обеспечивает значения показателя TTV (отклонение от идеальной плоскости) менее 3 мкм.

6. Метод магнитно-абразивной обработки позволяет эффективно формировать поверхности наноуровня с характеристикой шероховатости  $Ra = 8...20 \text{ \AA}$ , т.е. высота неровностей нанорельефа соответствует 2...5 атомным слоям.

7. В результате магнитно-абразивного полирования в тонком приповерхностном слое отсутствуют дефекты, а структура и состояние слоя и основы монокристалла имеют одинаковые характеристики.

8. Экспериментально проверены возможности нанотехнологии МАО при обработке поверхностей деталей номенклатуры НПО «Интеграл» и РУП «ММЗ им. С.И. Вавилова». Финишное магнитно-абразивное полирование пластин монокристаллов кремния (подложки интегральных схем), оптических стекол и фторидов бария, кальция и магния (оптически активные элементы силовых лазерных устройств) обеспечивает формирование нанорельефа поверхностей с высотой неровностей менее 2 нм (20  $\text{\AA}$ ), что соответствует лучшим мировым образцам.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе изложены результаты комплексного решения важной научно-технической проблемы финишной обработки деталей и конструкций путем создания, исследования и практического использования эффективных технологических процессов магнитно-абразивной обработки, повышающих важнейшие эксплуатационные свойства изделий, сберегающих энергетические и материальные ресурсы, улучшающих экологические и экономические показатели промышленного производства.

Приведенные результаты многолетних исследований и экспериментов позволяют сделать ряд выводов:

1. Анализ возможностей традиционных методов финишной обработки изделий (механическое полирование и зачистка, химическое травление, электрохимическое полирование и др.) показывает, что большинство из них не отвечает требованиям современного производства по производительности и качеству формируемых поверхностей, экономическим и экологическим показателям.

2. Метод магнитно-абразивной обработки (МАО) обладает колоссальным технологическим потенциалом. Уникальное сочетание совместного воздействия импульсов магнитного поля на структуру материала и "мягких" режимов удаления дефектного поверхностного слоя дает возможность магнитно-абразивным способом сформировать поверхность с минимальным количеством дефектов и высокими эксплуатационными свойствами – сопротивлением коррозии, износу и механическим нагрузкам.

3. В процессе магнитно-абразивной обработки (МАО) представляется возможным в широких пределах управлять механизмами микрорезания, упругопластического деформирования и атомно-молекулярного массопереноса, что позволяет оптимизировать соотношение между производительностью обработки, характеристиками нанорельефа поверхности и глубиной нарушенного слоя.

4. Выполненные исследования основаны на классических методах изучения технологических процессов обработки материалов, их структуры и физико-механических свойств. При изучении микро- и нанорельефа поверхностей и свойств приповерхностных слоев использованы современные научные приборы – сканирующий электронный и атомный силовой микроскопы, лазерный интерферометр и др.

5. Созданы образцы оборудования, разработаны и освоены в производстве технологические процессы МАО деталей машин и приборов. Например:

а) полирование наружных поверхностей вращения деталей машин (тяжелонагруженные подшипники узла привода вращения винтов вертолета, штоки иглопроводителей швейных машин и др.). Достигнуто повышение износостойкости и срока службы деталей на 30% и более;

б) полирование наружных поверхностей труб из циркониевых сплавов – тепловыделяющих элементов атомных реакторов. МАО заменяет экологически ущербную технологию электрохимического полирования в растворах плавиковой кислоты;

в) полирование крупногабаритных (диаметром до 1,5 м) валов – каландров машин для производства лент и пленок из полимеров. МАО обеспечивает выглаженный микрорельеф поверхности валов (до и после нанесения хромового покрытия) с  $Ra$  менее 0,08 мкм;

г) полирование сферических и винтовых поверхностей деталей с обеспечением  $Ra$  менее 0,1 мкм и повышением износостойкости и контактной прочности на 30% и более;

д) зачистка в магнитном поле перед сваркой поверхностей и кромок листов и обечаек (элементы конструкций корпусов летательных аппаратов) из алюминиевых, титановых и других сплавов. Магнитно-абразивная зачистка повышает (по сравнению с химическим травлением) коррозионную стойкость изделий на порядок и выше;

е) зачистка сварочной и другой проволоки (очистка от ржавчины, пленок окислов и следов смазки) с производительностью 1...10 м/с и более.

6. Созданы экспериментальные образцы оборудования, разработаны основы нанотехнологии полирования в магнитном поле прецизионных поверхностей деталей электроники, оптики и лазерной техники.

7. Метод магнитно-абразивной обработки позволяет эффективно формировать поверхности наноуровня с характеристикой шероховатости  $Ra = 8...20 \text{ \AA}$ , т.е. высота неровностей нанорельефа соответствует 2...5 атомным слоям.

8. В результате полирования пластин монокристаллов кремния – подложек интегральных схем диаметром 150 мм – обеспечивается значение показателя TTV (отклонение от идеальной плоскости) менее 3 мкм. В приповерхностном слое пластин отсутствуют дефекты, а структура и состояние слоя и основы монокристалла имеют одинаковые характеристики.

9. Для обработки в магнитном поле поверхностей деталей из металлов и сплавов, пластин монокристаллов кремния и оптических стекол разработаны специальные рабочие технологические среды – ферроабразивные порошки-инструменты и смазочно-охлаждающие жидкости

10. Экспериментально проверены возможности нанотехнологии MAO при обработке поверхностей деталей номенклатуры НПО «Интеграл» и РУП «ММЗ им. С.И. Вавилова». Финишное магнитно-абразивное полирование пластин монокристаллов кремния (подложки интегральных схем), оптических стекол и фторидов бария, кальция и магния (оптически активные элементы силовых лазерных устройств) обеспечивает формирование нанорельефа поверхностей с высотой неровностей менее 2 нм ( $20 \text{ \AA}$ ), что соответствует лучшим мировым образцам.

11. Реализованные технические решения далеко не исчерпывают технологические возможности метода магнитно-абразивной обработки. Продолжается работа по повышению его эффективности путем совершенствования способов обработки, оптимизации конструкций оборудования и характеристик рабочих технологических сред.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын, П.И., Зайцев, А.Г. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущие свойства абразивно-алмазного инструмента. – Мн.: Наука и техника, 1972. – 478 с.: ил.
2. Прогрессивные методы абразивно-алмазной обработки (обзор) / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, Н.С. Хомич, В.И. Прибыльский // Материалы, технологии, инструменты. – 1997. – №2. – С. 44 – 52.
3. Сакулевич, Ф.Ю., Минин, Л.К., Олендер, Л.А. Магнитно-абразивная обработка точных деталей. – Мн.: Вышэйшая школа, 1977. – 288 с.: ил.
4. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. 1986. – 176 с.: ил.
5. Хомич, Н.С. Перспективные области применения абразивной обработки в магнитном поле. – Мн.: БелНИИНТИ, 1984. – 40 с.
6. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын [и др.]. – Мн.: ФТИ НАНБ, 1997. – 415 с.: ил.
7. Лурье, Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – М.: Машиностроение, 1981. – 52 с.
8. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
9. Кремень, З.И., Медведев, В.В., Дугин, В.Н. Качество поверхностного слоя металла при обработке абразивными брусками // Вестник машиностроения. – 1973. – №6. – С.73 – 75.
10. Чеповецкий, П.Х. Основы финишной алмазной обработки. – Киев: Наукова думка, 1980. – 468 с.
11. Маталин, А.А. Новые направления развития технологии чистовой обработки. – Киев: Техника, 1972. – 136 с.
12. Кремень, З.И. Качество поверхности высокоточных деталей после финишной абразивной обработки // Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. – Л.: Изд. Л. О. НТО Приборпром, 1969. – С. 27 – 32.
13. Бабичев, А.П. Вибрационная обработка деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 136 с.: ил.
14. Ящерицын, П.И., Мартынов, А.Н., Гридин, А.Д. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива. – Мн.: Навука і тэхніка, 1978. – 224 с.
15. Козлов, Ю.С., Кузнецов, О.К., Тельнов, А.Ф. Очистка изделий в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1982. – 264 с.
16. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. – Киев: Наукова думка, 1979. – 244 с.
17. Паньков, Л.А., Костин, Н.В. Обработка инструментами из шлифовальной шкурки. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 235 с.: ил.
18. Коновалов, Е.Г., Шулев, Г.С. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками. – Мн.: Наука и техника, 1967. – 125 с.
19. Минин, Л.К. Магнитно-абразивное полирование наружных поверхностей вращения высокоточных деталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Мн., 1975. – 24 с.
20. Хомич, Н.С. Повышение эффективности магнитно-абразивной обработки деталей применением новых ферромагнитных абразивных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Мн., 1981. – 24 с.
21. Ящерицын, П.И. Повышение эксплуатационных свойств шлифованных поверхностей. – Мн.: Наука и техника, 1966. – 384с.: ил.
22. Барон, Ю.М. Физические и технологические закономерности процесса магнитно-абразивной обработки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01, 05.02.08. – Л., 1987. – 419 с.
23. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка: технология и оборудование. – Мн.: БелНИИНТИ, 1991. – 48 с.

24. Ящерицын, П.И., Зайцев, А.Г., Барботько, А.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. – Мн.: Наука и техника, 1976. – 328 с.: ил.
25. Ящерицын, П.И., Жолнерович, Е.А. Шлифование металлов. – Мн.: Беларусь, 1970. – 462 с.
26. Martin, R. Neue Erkenntnisse über den Werkstoffabtragsvorgang beim Lappen // Fachher. Oberflächentechn., 1972, 10. № 6. – Pp. 197 – 202.
27. Богомолов, Н.И. Основные процессы при взаимодействии абразива и металла: автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Киев, 1967. – 43 с.
28. Ваксер, Д.Б. Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании. – Л.: Машиностроение, 1964. – 123 с.: ил.
29. Жданович, В.И. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Мн., 1974. – 24 с.
30. Скворчевский, Н.Я. Научные основы повышения эффективности магнитно-абразивной обработки созданием сверхсильных магнитных полей и новых технологических сред: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08, 05.03.01. – Мн., 1994. – 422 с.
31. Вонсовский, С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.: ил.
32. Рыжов, Э.В. Аверченков, В.И., Панченко, В.М. Формирование качества поверхности деталей при магнитно-абразивной обработке // Тез. докл. республ. науч.-техн. совещ. – Мн., 1976. – С. 14 – 19.
33. Панченко, В.М. Исследование технологических возможностей магнитно-абразивной обработки для повышения эксплуатационных свойств деталей машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Брянск, 1977. – 22 с.
34. Шнейдер, Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом // Передовая технология и автоматизация управления процессами обработки деталей машин. – Л.: Машиностроение, 1970. – С. 547 – 558.
35. Ящерицын, П.И., Рыжов, Э.В., Аверченков, В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. – Мн.: Наука и техника, 1977. – 255 с.
36. Блюмберг, В.А., Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная обработка // Передовая технология и автоматизация управления процессами обработки деталей машин. – Л.: Машиностроение, 1970. – С. 487 – 496.
37. Кремень, З.И., Дугин, В.И. Микрогеометрия поверхности и состояние приповерхностного слоя металла деталей, обработанных суперфинишированием // Передовая технология и автоматизация управления процессами обработки деталей машин. – Л.: Машиностроение, 1970. – С. 393 – 398.
38. Кожуро, Л.М., Чемисов, Б.П. Обработка деталей машин в магнитном поле. – Мн.: Наука і тэхніка, 1995. – 232 с.
39. Базарнов, Ю.А., Сакулевич, Ф.Ю. Оборудование для магнитно-абразивного полирования // Магнитно-абразивное полирование деталей. – Мн.: ФТИ АН БССР, 1976. – С. 95 – 99.
40. Нестеров, В.М. Магнитно-абразивная обработка отверстий с использованием индукторов на постоянных магнитах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Л., 1989. – 16 с.
41. Магнитно-абразивное полирование плоскостей деталей машин и приборов / Л.Н. Кравченко, Ю.М. Барон, Л.М. Кожуро, С.П. Приходько. – М.: Машиностроение, 1987. – 48 с.: ил.
42. Макушок, Е.М., Калиновская, Т.В., Белый, А.В. Массоперенос в процессах трения. – Мн.: Наука и техника, 1978. – 272 с.: ил.
43. Медеяев, И.А., Албагачиев, А.Ю., Сорокин, Г.М. Физическая природа разрушения материалов при абразивном изнашивании // Трение и износ. – 2004. Т. 25. – №2. – С. 148 – 154.
44. Рудзит, Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. – Рига: Зинатне, 1975. – 176 с.

45. Рыжов, Э.В. Влияние алмазно-абразивной обработки на несущую поверхность деталей // Синтетические алмазы в промышленности. – Киев: Наукова думка, 1974. – С. 139 – 142.
46. Хусу, А.П., Виттенберг, Ю.Р., Пальмов, В.А. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). – М.: Наука, 1975. – 343 с.
47. Коррозия и защита от коррозии / Под ред. И.В. Семенов. – М.: Физматлит, 2002. – 334 с.: ил., табл.
48. Погодин-Алексеев, Г.И. Динамическая прочность и хрупкость металлов. – М. Машгиз, 1966. – 244 с.: ил.
49. Ерофеев, А.И. О влиянии шероховатости на взаимодействие потока газов с поверхностью твердого тела // Механика жидкости и газа. – 1967. № 6. – С. 26 – 28.
50. Дунин-Барковский, И.В., Рузин, М.Я. О шероховатости пластмассовых труб // Водоснабжение и сантехника. – 1964. № 2. – С. 22 – 24.
51. Демкин, Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.: ил.
52. Хольм, Р. Электрические контакты. – М.: Изд. иностр. лит., 1961. – 464 с.: ил.
53. Топорец, А.С. Зеркальное отражение света от шероховатой поверхности // Оптика и спектроскопия. – Вып.1. – Т. XXIV. – М.: Наука, 1968. – С. 126 – 131.
54. Кремень, З.И. Влияние микро- и макрогеометрии измерительных поверхностей на их притираемость // Измерительная техника. – 1963. – № 2. – С. 31 – 33.
55. Кречмар, Э., Шварц, Г. Напыление металлов, керамики и пластмасс. – М.: Машиностроение, 1966. – 432 с.
56. Качуро, Ю.С. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки колец прядильных и крутильных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – М., 1976. – 22 с.
57. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П.И. Яцерицын, М.Т. Забавский, Л.М. Кожуро, Л.М. Акулович. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 270 с.
58. Колкер, Я.Д. Влияние методов обработки отверстий в чугунных деталях на износостойкость // Технологические методы повышения точности, надежности и долговечности в машиностроении. – М.: Изд. НТО Машпром, 1966. – С. 79 – 83.
59. Торбилло, В.М. Опорная площадь поверхностей, подвергнутых алмазному выглаживанию // Изв. высш. уч. завед. – Машиностроение, 1966. – № 1 – С. 33 – 36.
60. Виттенберг, Ю.Р. Оценка шероховатости поверхности с помощью корреляционных функций // Вестник машиностроения, 1969. – № 1 – С. 55 – 57.
61. Характеристики микрогеометрии, определяющие контактное взаимодействие шероховатых поверхностей (методика определения). Руководящие материалы НИИ машиноведения. – М.: Изд. НИИ информации по машиностроению, 1973. – 32 с.
62. Королев, А.В. Исследование процесса образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Изд. Саратовского ун-та, 1975. – 181 с.
63. О геометрической структуре шероховатости шлифованной поверхности / Л.Н. Филимонов, Ю.П. Приймак, В.И. Муцянюк, Г.А. Киселева // Труды ВНИИАШ. – 1970. – № 2. – С. 33 – 39.
64. Виттенберг, Ю.Р., Плис, Н.С. Обоснование методики выбора параметров для вычисления корреляционной функции шероховатости поверхности // Труды ВНИИАШ. 1968. – № 7. – С. 57 – 59.
65. Пугачев, В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. – М.: Физматгиз, 1962. – 883 с.
66. Крамер, Г.К., Лидбеттер, М. Стационарные случайные процессы. – М.: Мир, 1969. – 398 с.: ил.
67. Колмогоров, А.Н. Основные понятия теории вероятностей. – М.: Наука, 1974. – 119 с.
68. Линник, Ю.В., Хусу, А. П. Математико-статистическое описание неровностей профиля поверхности при шлифовании // Инж. сб. АН СССР. – 1954. – № 22 – С.142 – 151.

69. Виттенберг, Ю.Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки. – Л.: Судостроение, 1971. – 106 с.
70. Беляев, Г.С., Виттенберг, Ю.Р., Амбросова, Л.Г. Расчет и построение коррелограммы уплотнительных поверхностей деталей судовой арматуры // Судостроение, 1971. – № 6. – С. 20 – 23.
71. Ардашников, Б.Н., Виттенберг, Ю.Р. К понятию среднего шага между микронеровностями // Труды СЗПИ, 1971. – № 2. – С. 27 – 30.
72. Виттенберг, Ю.Р., Плис, Н.С. О методах определения углов наклона боковых сторон микронеровностей // Труды ВНИИАШ. – 1968. – № 8. – С. 113 – 125.
73. Чачин, В.Н., Хомич, Н.С., Прибыльский, В.И. Расчет геометрических параметров полюсных наконечников для магнитно-абразивной обработки // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1989. – № 3. – С. 72 – 77.
74. Соболев, И.М., Статников, Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах с многими критериями. – М.: Наука, 1981. – 110 с.
75. Поливанов, К.М. Электродинамика движущихся тел. – М.: Энергоиздат, 1982. – 192 с.: ил.
76. Трудношин, В.А., Пивоваров, Н.В. Системы автоматизированного проектирования. В 9 кн. – М., 1986. – Кн. 4: Математические модели технических объектов: учебное пособие для вузов / Под ред. И.П. Норенкова. – 1986. – 327 с.
77. Курбатов, П.А., Аринчин, С.А. Численный расчет электромагнитных полей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 167 с.
78. Демирчян, К.С., Чечурин, В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей: учебное пособие для электротехнических и энергических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1986. – 239 с.
79. Том, А., Эйплт, К. Числовые расчеты полей в технике и физике / Перевод с английского. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 208 с.
80. Привалов, И.И. Введение в теорию функций комплексного переменного. – М.: Наука, 1984. – 432 с.: ил.
81. Новик, Ф.С., Арсов, Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение: София: Техника, 1980. – 304 с.: ил.
82. Апанович, В.Н. Метод внешних конечноэлементных аппроксимаций. – Мн.: Вышэйшая школа, 1991. – 171 с.
83. Устинович, Д.Ф., Прибыльский, В.И. Моделирование силового взаимодействия между элементами порошковой ферромагнитной среды в магнитном поле // Весці НАНБ, сер. фіз.-тэхн. навук. – 2005. – №1.
84. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке изделий П.И. Ящерицын [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2004. – Т. 9. – №1. С. 15 – 19.
85. Хомич, Н.С., Тарасова, А.Ю., Хусид, Б.М. Реодинамика магнитно-абразивного материала в зазоре между параллельными плоскостями // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-энерг. навук. – 1991. – № 1. – С. 100 – 107.
86. Хомич, Н.С. Повышение эффективности магнитно-абразивной обработки деталей применением новых ферромагнитных абразивных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Мн., 1981. – 204 с.
87. Меськин, В.С. Ферромагнитные сплавы. – М.-Л.: Главная редакция литературы по черной металлургии, 1937. – 791 с.
88. Справочник по электротехническим материалам. Т. 2 / Под ред. К.А. Андрианова [и др.]. – М.-Л.: Гос.энергоиздат, 1960. – 511 с.: ил.
89. Иванько, А.А. Твердость: справочник. – Киев: Наукова думка, 1968. – 127 с.
90. Преображенский, А.А. Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы. – М.: Высшая школа, 1972. – 287 с.
91. Рейнбот, Г. Магнитные материалы и их применение. – Л.: Энергия, 1974. – 383 с.

92. Ящерицын, П.И. Повышение эксплуатационных свойств шлифованных поверхностей. – Мн.: Наука и техника, 1966. – 384 с.: ил.
93. Производство абразивных материалов / А.С. Полубелова [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1968. – 178 с.
94. Методы испытания дробленых искусственных абразивных материалов. – М.: 1963. – 129 с.: ил.
95. Артамонов, А.Я., Тутаков, О.В. Полирующая способность микропорошковых тугоплавких соединений в зависимости от способа получения // Порошковая металлургия. – 1966. – № 9. – С. 55 – 60.
96. Адамовский, А.А. Абразивные материалы из металлоподобных тугоплавких соединений // Порошковая металлургия. – 1974. – № 5. – С. 49 – 56.
97. Лоладзе, Т.Н., Бокучава, Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.
98. Шульман, П.А., Созин, Ю.И. Качество поверхности, обработанной алмазами. – Киев: Техніка, 1972. – 146 с.: ил.
99. Стасовская, В.В. Микротвердость и абразивная способность группы тугоплавких соединений // ФХММ, 1966. – Т. 2. – № 2. – С. 158 – 161.
100. Самсонов, Г.В. Тугоплавкие соединения. Справочник по свойствам и применению. – М.: Металлургиздат, 1963. – 398 с.
101. Стасовская, В.В. Измерение абразивной способности порошков карбидов и боридов тугоплавких металлов // Порошковая металлургия. – 1965. – № 11. – С. 52 – 54.
102. Кремень, З.И., Лавров, И.В., Кузнецова, Л.П. Геометрия зерен тонких и сверхтонких порошков и ее роль в процессе доводки // Абразивы. – Вып. 5 (37). – М., 1963. – С. 20 – 25.
103. Семко, М.Ф., Горопов, О.А. Рабочая поверхность абразивного зерна при микрорезании // Респ. межвед. темат. и науч.-техн. сб.: Резание и инструмент. Вып. 17. – Харьков: Вища школа, 1977. – С. 3 – 6.
104. Линейно-геометрические размеры эльборового шлифовального зерна Н.В. Беляев [и др.] // Науч.-техн. реф. сб.: алмазы. Вып. 3. – М., 1971. – С. 8 – 9.
105. Сагарда, А.А. О некоторых закономерностях работы зерна в алмазно-абразивном инструменте // Синтетические сверхтвердые материалы и твердые сплавы. – Киев: Наукова думка, 1973. – С. 72 – 78.
106. Ершов, Г.В., Лукин, Л.Н., Гончаров, В.Д. Исследование корреляционных связей линейных и геометрических параметров зерен синтетических алмазов // Станки и режущие инструменты. Вып. 7. – Харьков, 1968. – С. 20 – 23.
107. Зайцев, А.Г. Исследование линейно-геометрических размеров эльборового шлифовального зерна // Изв. Высш. уч. завед. – Л.: Машиностроение, 1971. – № 8. – С. 138 – 139.
108. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.: ил.
109. Рыбаков, В.А., Дроздова, О.Н. Влияние способов измельчения абразивных материалов на форму и физико-механические свойства полученных зерен // Абразивы. – 1963. – Вып. 4 (36). С. 15 – 28.
110. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1970. – 375 с.: ил.
111. Лавров, И.В. Закономерность геометрии частиц измельченных материалов // Абразивы и алмазы. Вып. 6 (50). – М., 1965. – С. 17 – 20.
112. Самсонов, Г.В., Артамонов, А.Я., Безыкорнов, А.И. Выбор новых абразивных материалов на основе тугоплавких соединений // Порошковая металлургия. – 1968. – № 6. – С. 86 – 94.
113. Самсонов, Г.В., Прядко, И.Ф., Прядко, Л.Ф. Конфигурационная модель вещества. – Киев: Наукова думка, 1971. – 230 с.

114. Самсонов, Г.В. Новые абразивные материалы для шлифования и доводки // Порошковая металлургия. – 1973. – № 7. – С. 73 – 82.
115. Степанчук, А.Н. Исследование условий получения и некоторых свойств плавных карбидов переходных металлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1971. – 21 с.
116. Исследование формы, прочности и абразивной способности зерен порошков тугоплавких соединений /А.И. Безыкорнов [и др.] // Порошковая металлургия. – 1971. – №5. – С. 63 – 69.
117. Бокучава, Г.В. Температура резания при шлифовании // Вестник машиностроения. – 1963. – № 11. – С. 62 – 66.
118. Дьяченко, П.Е. Исследование зависимости микрогеометрии поверхности от условий механической обработки. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1949. – 127 с.
119. Ясинская, Г.А. Смачиваемость тугоплавких карбидов, боридов и нитридов расплавленными металлами // Порошковая металлургия. – 1969. – № 7. – С. 53 – 56.
120. Самсонов, Г.В., Панасюк, А.Д., Козина, Г.К. Смачивание тугоплавких карбидов жидкими металлами // Порошковая металлургия. – 1968 – № 11. – С. 42 – 48.
121. Найдич, Ю.В., Еременко, В.Н. Смачивание жидкими металлами твердых поверхностей некоторых тугоплавких соединений // Вопросы порошковой металлургии и прочности материалов. Вып. IV. – Киев, 1958 – С. 53 – 64.
122. Букатов, В.Г., Третьяков, В.И. К вопросу о совместимости тугоплавких металлоподобных соединений и некоторых переходных металлов // Сборник трудов № 14 ВНИИТС. Твердые сплавы и тугоплавкие металлы. – М.: Металлургия, 1973. – С. 62 – 64.
123. Чапорова, И.Н., Кузнецова, К.Ф. Некоторые закономерности взаимодействия карбидов тугоплавких металлов с металлами подгруппы железа // Сборник трудов № 14 ВНИИТС. Твердые сплавы и тугоплавкие металлы. – М.: Металлургия, 1973. – С. 53 – 61.
124. Кифер, И.И. Испытание ферромагнитных материалов. – М.: Энергия, 1969. – 360 с.: ил.
125. Методы испытания дробленых искусственных абразивных материалов. – М.: 1963. – 129 с.: ил.
126. О роли адгезии при взаимодействии абразива и металла / Н.И. Богомолов [и др.] // ФХММ. – 1971. – № 3. – С. 42 – 45.
127. А.с. 165551 СССР МКИЗ В24В 31/10. Способ абразивной обработки изделий / Г.С. Шулев (СССР). Оpubл. в Б.И. – 1964. – №19. – 4 с.
128. А.с. 234184 СССР МКИЗ В24В 31/10. Абразивный материал для магнитно-абразивной обработки / В.А. Бломберг, Ю.А. Барон, З.И. Кремень, Б.П. Грохольский (СССР). Оpubл. в Б.И. – 1968. – №3. – 3 с.
129. Керметы / Под ред. Д.Р. Тинкшо и У.Б. Крэндалла. – М.: ИИЛ, 1962. – 367 с.: ил.
130. Хомич, Н.С., Наливка, Г.Д. Работоспособность композиционных материалов при МАП // Новые методы испытания и обработки материалов. – Мн.: Наука и техника, 1975. – С. 189 – 195.
131. Лататуев, Г.И., Ганай, Г.Н., Денисов, А.Д. Металлические покрытия химическим способом. – Барнаул, 1968. – 208 с.
132. А.с. 476970 СССР. МКИЗ В24В31/10. Материал для магнитно-абразивной обработки / Ю.А. Сидоренко, Я.А. Грейман, Ф.Ю. Сакулевич (СССР). – Оpubл. в Б.И. – 1975. – №26. – 3 с.
133. Новик, Ф.С., Арсов, Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение: София: Техника. – 1980. – 304 с.
134. Ящерицын, П.И., Махаринский, Е.И. Планирование эксперимента в машиностроении: справочное пособие. – Мн.: Вышэйшая школа, 1985. – 286 с.: ил.
135. А.с. 500975 СССР. МКИЗ В24Д3/34. Материал для магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич, Г.В. Самсонов, Н.С. Хомич, Г.Д. Наливка (СССР). – №1986052/25-8; Заявлено 11.01.74; Оpubл. 30.01.76, Бюл. №4. – 2 с.



136. Наливка, Г.Д., Хомич, Н.С., Кожуро, Л.М. Композиционные порошки на основе Fe-MeB // Магнитно-абразивное полирование деталей. Тез. докл. республ. науч.-техн. совещ. – Мн., 1976. – С. 107 – 108.
137. Хомич, Н.С. Определение оптимальных режимов изготовления и применения магнитно-абразивного материала на основе железа и карбида титана // Физические проблемы материаловедения и технологии обработки металлов. Тез. докл. конф. – Мн., 1979. – С. 3 – 4.
138. Хомич, Н.С., Кожуро, Л.М. Обрабатываемость материалов магнитно-абразивным полированием // Магнитно-абразивное полирование деталей. Тез. докл. республ. науч.-техн. совещ. – Мн., 1976. – С. 54 – 63.
139. Полищук, В.С., Наливка, Г.Д., Кисель, Н.Т. Композиционные магнитно-абразивные порошки на основе железа, карбидов титана, ванадия и хрома // Порошковая металлургия. – 1983. – №3. – С. 94 – 100.
- 140 А.с. 1162238 СССР. Материал для магнитно-абразивной обработки и способ его получения / В.С. Полищук, Н.С. Хомич, В.Н. Чачин (СССР). – №3605029; Заявлено 15.06.83; Опубл. 15.02.85. – 3 с.
141. Полищук, В.С. Интенсификация процессов получения карбидов, нитридов и композиционных материалов на их основе. – Севастополь: Вебер, 2003. – 327 с.
142. Филоненко, Н.Е. О фазовом составе ферросплава // Абразивы, ЦБТП ЭНИМС. – 1958. – №20. – С. 3 – 12.
143. Филоненко, Н.Е., Кузнецова, О.С. О ферросплаве электрокорунда // Абразивы. – 1963. – №3 (35). – С. 7 – 15.
144. Титов, А.К., Хомич, Н.С., Голованов, В.П. Магнитно-абразивный материал из сплава производства нормального электрокорунда // Проблемы научно-технического прогресса электротермии неорганических материалов: Тез. докл. респ. науч.-техн. конф. – Днепропетровск, 1989. – С. 96 – 97.
145. А.с. 891409 СССР, МКИЗ В24Д3/34. Материал для магнитно-абразивной обработки / Н.С. Климович [и др.] (СССР). – №2919684/25-08; Заявлено 05.05.80; Опубл. 23.12.81, Бюл. №47. – 2 с.
146. А.с. 891410 СССР, МКИЗ В24Д3/34. Материал для магнитно-абразивной обработки / А.Н. Парада [и др.] (СССР). №2919687/25-08; Заявлено 05.05.80; Опубл. 23.12.81, Бюл. №47. – 2 с.
147. Исследование и совершенствование ферромагнитных абразивов и технологии их получения: Отчет о НИР (заключит.) / Днепропетровский металлургический институт (ДМетИ); Руководитель работы В.К. Руденко; №ГР 01840075623. – Днепропетровск, 1985. – 75 с.
148. Титов, А.К., Калинушкин, Е.П., Хомич, Н.С. Микроструктура рельефа поверхностей излома зерен абразивов, полученных методами электротермии // Проблемы научно-технического прогресса электротермии неорганических материалов: Тез. докл. респ. науч.-техн. конф. – Днепропетровск, 1989. – С. 92.
149. Титов, А.К., Хомич, Н.С., Голованов, В.П. Ферромагнитный металлоабразив из карбидизированного попутного сплава производства электрокорунда // Проблемы металлургического производства. – Вып.108. – Київ, Техніка, 1992. – С. 119 – 123.
150. А.с.1502284 СССР, МКИЗ В24 Д3/34. Ферромагнитный абразивный материал и способ его получения / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – №4275113; Заявлено 27.04.87; Опубл. 23.08.89, Бюл. № 31. – 5 с.
151. Вязников, Н.Ф., Ермаков, С.С. Металлокерамические материалы и изделия. – Л.; Машиностроение, 1967. – 224 с.: ил.
152. Грацианов, Ю.Г., Путимцев, Б.Н., Силаев, А.Ф. Металлические порошки из расплава. – М.: Металлургия, 1970. – 245 с.: ил.

153. Крымский, М.Д., Картус, О.А., Дубов, А.Н. Оптимизация свойств магнитно-абразивного материала на основе железа и карбида кремния // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытаний. – Киев: ИПМ АН УССР, 1980. – С. 25 – 33.
154. А.с. 1096087 СССР, МКИЗ В24В31/14. Материал для магнитно-абразивной обработки / М.Д. Крымский [и др.] (СССР). – № 3368824; Заявлено 25.12.81; Оpubл. 07.05.84, Бюл. № 21. – 4 с.
155. Крымский, М.Д. Магнитно-абразивные материалы, полученные методами внутреннего азотирования // Порошковая металлургия. – 1983. – № 9. – С. 77 – 82.
156. А.с. 703321 СССР, МКИЗ В24Д3/34. Материал для магнитно-абразивной обработки / Н.С. Хомич, Ф.Ю. Сакулевич, Б.Н. Путимцев, В.А. Силаев (СССР). – № 2447807; Заявлено 28.01.77; Оpubл. 15.12.79, Бюл. № 46. – 2 с.
157. Оликер, В.Е. Разработка и свойства литых магнитно-абразивных порошков. – Киев: ИПМ АН УССР, 1984. – 58 с.
158. Chachin, V.N., Khomich, N.S. Composite magnetic abrasive powders from waste of tool production // Seventh international symposium on composite metallic materials. – CSSR, 1990. – S. 326 – 330.
159. Новый материал для магнитно-абразивной обработки / Е.С. Туровская, И.П. Габриелов, Ю.Г. Алексеев, Н.С. Хомич // Доклады на четверти научно-технически семинар с международно участие по неконвенционални технологии в машиностроено. Т 2. – Ботевград, 1989. – С. 36 – 45.
160. Біанкерні поврехнево-активні речовини / Ю.С. Липатов, А.Е. Файнерман, В.О. Шрубич, В.В. Шевченко // Доп. АН УРСР. Сер. Б. – 1989. – № 10. – С. 41 – 44.
161. Патент України 26889 МКИЗ С 10М111/02. Концентрат змащувально-охолоджуючої рідини для механічної обробки металів / П.М. Логвиненко [та інш.]. – № 93040384, Заявл. 26.02.98, Оpubл. 29.12.99, Бюл. № 8. – 5 с.
162. Патент України 26364. МКИЗ С 10М111/02. Концентрат мастилно-охолоджувальної рідини для механічної обробки металів / П.М. Логвиненко [та інш.]. – № 93040383, Заявл. 26.02.98, Оpubл. 30.08.99, Бюл. № 5. – 5 с.
163. Бинарные водные растворы олигомер-поверхностно-активные вещества – основа смазочно-охлаждающих жидкостей с высокими технологическими и ингибиторными свойствами П.П. Логвиненко, [и др.] / Физико-химическая механика материалов. Спец. вып. № 1. – Львов, 2000 – С. 540 – 545.
164. Пат. 3490700, ФРГ, МКИ С21Д10/00. Verfahren zur herstellung von metallischen Zylinderformigen Hohlkorpern / Gorsunov V.P., Bondarenko L.I., Cacin V.N. u.a. (СССР). – №W085/05128; Заявл. 08.05.84; Оpubл. 2.11.85. – 4 с.
165. Бондаренко, Л.И. Разработка прогрессивных базовых технологий изготовления деталей оборудования для производства двухосноориентированных полимерных пленок: Дис. ... д-ра техн. наук в форме науч. докл. – Мн., 1988. – 67 с.: ил.
166. Патон, Б.Е., Медовар, Б.И., Бойко, Г.А. Электрошлаковое литье. – Киев: Наукова думка, 1980. – 190 с.: ил.
167. Пат. 3490701, ФРГ МКИ В 24В31/112 Maschinen zur magnetischen Schleifbearbeitung / Cacin V.N., Bondarenko L.I., Comic N.S. u.a. (СССР). – №W085/0506; Заявл. 03.05.84; Оpubл. 19.06.87. – 3 с.
168. Хомич, Н.С. Высококачественное полирование крупногабаритных валов // Советский экспорт. – 1983. – № 5. – С. 5
169. А.с.1148208 СССР, МКИЗ В24 В 31/10. Способ магнитно-абразивной обработки / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – №3556552; Заявлено 25.02.83; Оpubл. 01.12.84. – 3 с.
170. Займовский, А.С., Никулина, А.В., Репетников, Н.Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1981. – 232 с.
171. Stehle, H., Kaden, W., Mansel, R. External corrosion of cladding in PWRs. – “Nuel Eng and Des”, 1975, 33. – №2. – Pp. 155 – 169.

172. Разработка и внедрение технологических процессов магнитно-абразивной обработки труб  $d$  9-15 мм и получение ферроабразивных порошков: Отчет о НИР (заключит.) / ФТИ АН БССР; Руководитель работы В.Н. Чачин; № ГРХ34089. – Мн., 1983. – 37 с.
173. А.с.197561 СССР. Способ магнитно-абразивной обработки /Л.К. Дружинин [и др.] (СССР). – № 30644210; Заявл. 18.04.83; Оpubл. 05.01.84. – 4 с.
174. А.с.1216907 СССР, МКИЗ В24 В31/112. Способ магнитно-абразивного полирования наружных цилиндрических поверхностей / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – №3752746; Заявлено 13.06.84; Оpubл. 08.11.85. – 3 с.
175. Нанков, М.М. Кинематика круглого шлифования торцом алмазного чашечного круга // Синтетические алмазы, вып.5. – 1978. – С. 36 – 38.
176. Комплексное исследование процессов импульсной обработки материалов и установление оптимальных режимов взаимодействия, основанных на использовании энергии удара и магнитного поля: Отчет о НИР (заключ.) / БГПА, руководитель работы Н.С. Хомич, № ГР 01860010405. Т. 3. – Мн., 1990. – 203 с.
177. Патент РФ 2200771, МКИЗ С23С26/00. Способ модификации поверхности металлов / К.Н. Никитин, В.К.Орлов, И.А. Шлепов (РФ). – 2001114427/02, Заявлено 30.05.2001, Оpubл. 20.03.2003. – 3 с.
178. Zhen-Bing, H., Komanduri, R. Magnetic Field Assisted Finishing of Ceramics. – Part III: On the Thermal Aspects of Magnetic Abrasive Finishing (MAF) of Ceramic Rollers // Journal of Tribology, 1998. – Vol.120. – Н. 660 – 667.
179. Мрочек, Ж.А., Кожуро, Л.М., Филонов, И.П. Особенности процесса магнитно-абразивной обработки поверхностей// Вестник БГПА, 2002. – №2. – С. 36 – 38.
180. Разработка и внедрение технологии и оборудования для магнитно-абразивного полирования (МАП) наружных поверхностей труб; Отчет о НИР (заключ.) / БГПА, Руководитель работы Н.С. Хомич, № ГР 01900056330. – Мн, 1990. – 23 с.
181. А.с.1990781 СССР, МКИЗ В21 В45/04. Устройство для магнитно-абразивной обработки прутков / Г.А. Рожанский, А.К. Куценко, Н.С. Хомич (СССР). – №4315193; Заявлено 12.10.87; Оpubл. 01.03.89. – 4 с.
182. Исследования, разработка и промышленное освоение технологии и станка для магнитно-абразивной зачистки (МАЗ) наружных поверхностей труб: Отчет о НИР (заключ.) / БГПА, Руководитель работы Н.С. Хомич. – № ГР 19942148. – Мн., 1994. – 24 с.
183. Разработка и внедрение технологии и станка для магнитно-абразивного полирования (МАП) наружных поверхностей труб: Отчет о НИР (заключ.) / БГПА, Руководитель работы Н.С. Хомич – № ГР 900056324. – Мн., 1991. – 29 с.
184. Создание и внедрение технологии и оборудования для магнитно-абразивного полирования (МАП) наружных поверхностей труб диаметром 3-14 мм: Отчет о НИР (заключ.) / БГПА, Руководитель работы Н.С. Хомич. – № ГР 900011671. – Мн., 1991. – 28 с.
185. Магнитно-абразивная обработка длинномерных деталей / П.И. Ящерицын [и др.] // Технология машиностроения. – 2003. – №3 (21). – С. 11 – 12.
186. А.с. 719046 СССР, МКИЗ В 24В 31/10. Устройство для магнитно-абразивной обработки / В.В. Смоляк, Ю.А. Базарнов, Ф.Ю. Сакулевич Н.С. Хомич (СССР). – № 2626438; Заявл. 12.06.78; Оpubл. 06.11.79. – 7 с.
187. А.с. 1106642 СССР, МКИЗ В 24 В 31/10. Устройство для магнитно-абразивной обработки / А.К. Титов, В.К. Руденко, Н.С. Хомич (СССР). – № 3574463; Заявл. 25.01.83, Оpubл. 08.04.84, Бюл. № 29. – 4 с.
188. А.с. 1060439 СССР, МКИЗ В 24В 31/10. Способ магнитно-абразивной обработки изделий / М.Д. Крымский, А.Н. Дубров, Л.Н. Тульчинский, Н. С. Хомич (СССР). – №3503343; Заявл. 04.08.82.; Оpubл. 15.08.83, Бюл. № 6. – 3 с.
189. Использование энергии магнитного поля для полирования деталей машин Ф.Ю. Сакулевич [и др.] // Создание и внедрение оборудования с использованием энергии электромагнитных и других полей для интенсификации технологических процессов: Тез. докл. Всес. науч.-техн. совещ. – Полтава, 1976. – С. 48 – 53.

190. Порошки для полирования в магнитном поле стержневого инструмента сложной формы для патронного производства / Ф.Ю. Сакулевич [и др.] // Вопросы оборонной техники. – 1975. – № 16. – С. 62 – 65.
191. Wantuch E., Zutze, H. Magnet- abrasive Bearbeitung // Neue Fertigungstechnologien, 2002. – №5. – S. 232 – 237.
192. А.с. 531715 СССР. Устройство для обработки сферических заготовок / И.А. Прусов [и др.]. – Оpubл. 15.10.76, Бюл. № 38. – 4 с.
193. А.с. 1310176 СССР, МКИЗ В 24В 31/112. Способ абразивной обработки / Н.П. Морозов [и др.] (СССР). – № 3834768 № Заявл. 03.01.85; Оpubл. 15.01.87, Бюл. № 18. – 5 с.
194. Проведение комплекса НИР по созданию оборудования, разработке и внедрению метода магнитно-абразивного полирования (МАП) червячных валов редукторов: Отчет о НИР (заключ.) / ФТИ АН БССР, Руководитель работы В.Н. Чачин. – № ГР 0186012812. – Мн, 1986. – 32 с.
195. А.с. 1440676 СССР, МКИЗ В 24В 31/112. Устройство для магнитно-абразивной обработки изделий / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – № 4227671; Заявл. 13.04.87; Оpubл. 01.08.88, Бюл. № 44. – 3 с.
196. А.с. 1707869 СССР, МКИЗ В 24В 31/112. Способ обработки червяков / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – № 4220536; Заявл. 05.12.86; Оpubл. 22.09.91 – 4 с.
197. Станок для магнитно-абразивного полирования червячных валов Н.С. Хомич [и др.] // Научно-технические достижения. Межотраслевой науч.-техн. сб. ВИМИ. – 1988. – Вып.1. – С. 17 – 18.
198. Патент 18344790 СССР, МКИЗ В24В 31/112. Устройство для обработки витков червяка / Н.С. Хомич, Е.Н. Демиденко, Г.З. Подсобей (СССР). – 4913627; Заявл. 25.02.91; Оpubл. 13.10.92; Бюл. № 30. – 3 с.
199. Патент 1774912 СССР, МКИЗ В24 В 31/112. Устройство для магнитно-абразивной обработки зубчатых колес / Н.С. Хомич (СССР). – №4907913; Заявл. 06.02.91; Оpubл. 08.07.92; Бюл. № 41. – 2 с.
200. Шлюко, В.Я., Майборода, В.С., Гридасова, Т.Я., Лапин, Н.А. Магнитно-абразивная полировка деталей типа лопаток // Технология и организация производства. – 1985. – № 3. – С. 35 – 36.
201. Изучение технических возможностей МАП титановых и других сплавов, создание и исследование ферромагнитных абразивов: Отчет о НИР (заключ.) / БГПА; Руководитель работы В.Н. Чачин, № ГР 01870081621. – Мн., 1987. – 70 с.
202. Разработка магнитных систем, выбор ферроабразивных порошков и технологических жидкостей для полирования пера лопаток: Отчет о НИР (заключ.) / БГПА; Руководитель работы В.Н. Чачин, № ГР 01880027762. – Мн., 1988. – 41 с.
203. Вайнер, Г.М., Хомич, Н.С. Лазерное упрочнение и магнитно-абразивное полирование некоторых материалов // Скоростные процессы при тепловом и механическом воздействии на металлические материалы: Тез. докл. научн.-технич. конф. – Мн., 1984. – С. 38 – 39.
204. Исследование технологических возможностей магнитно-абразивного и электролитно-импульсного методов для полирования внутренних поверхностей труб: Отчет о НИР (заключ.) / БГПА; Руководитель работы В.Н. Чачин. – Мн., 1988. – 23 с.
205. А.с. 1627383 СССР, МКИЗ В 24 В 31/112. Способ магнитно- абразивной обработки внутренних поверхностей немагнитных трубчатых изделий / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – № 4490808; Заявл. 10.10.85; Оpubл. 15.02.91, Бюл. № 6. – 3 с.
206. Yamaguchi, H., Shinmura, T., Takenada, M. Development of a new precision internal machi-ning process using an alternating magnetic field // Precision rngineering. – 2003. – №27, P. 51 – 58.
207. Ящерицын, П.И., Ракомсин, А.П., Сергеев, Л.Е., Сидоренко, М.И. Магнитно-абразивная обработка тонкостенных конусных отверстий // Весці НАНБ, сер. Фіз.-тэхн.навук. – 2005. №2. – С. 45 – 47.

208. Grajecki, Ch, Kramaschke, V. Korrosion bei Metallen-Ursache und Reaktionen. – Brauerei-Rdsch. – 1982.93. – №10. – S. 201 – 207.
209. Lee, W. Slainlees Steel Finishes // Metal Finich. – 1982. 80. – №11. – S. 45 – 49.
210. Лагутенок, В.И. Пути повышения эффективности сварочного производства. Обзорная информация БелНИИНТИ. – Мн.: БелНИИНТИ, 1984. – 44 с.
211. Гуревич, С.М. Справочник по сварке цветных металлов. – Киев: Наукова думка, 1981. – 608 с.
212. Рабкин, Д.М., Игнатъев, В.Г., Довбищенко, И.В. Дуговая сварка алюминия и его сплавов. – М.: Машиностроение, 1982. – 96 с.
213. Рязанцев, В.И., Федосеева, В.А., Елисеева, М.П. Оценка качества подготовки поверхности заготовок из алюминиевых сплавов по величине разности их потенциалов // Автоматическая сварка, 1984. – № 3. – С. 59 – 61.
214. Minuber, M., Mufnagel, W. Eigenschaften von Alumi-niumoberflächenubersicht // Metalloberfläche, 361198213, 98-100.
215. Газоэлектрическая сварка алюминиевых сплавов / Киселев С.Н. [и др.]. – М.: Машиностроение, 1972. – 176 с.
216. Von Max Auwarter. Geschichten auf Festkorpem und ihr Verhalten beim Schweißen // Oerlikon Schweissmitteilungen, Heft №72, August, 1975. – S. 4 – 10.
217. Герасимов, В.В. Коррозия реакторных материалов. – М.: Атомиздат, 1980. – 253 с.
218. Никифоров, Г.Д., Болдырев, А.М., Букуров, В.И. Механизм образования пор и влияние некоторых элементов технологии сварки на пористость швов из сплава АМг-6 // Сварочное производство, 1966. – № 3. – С. 2 – 6.
219. Клячкин, Я.Л. Сварка цветных металлов и их сплавов. – М.: Машиностроение, 1964. – 336 с.
220. Багрянский, К.В., Добробина, З.А., Хренов, К.К. Теория сварочных процессов. – Киев: Вища школа, 1976. – 424 с.
221. Исследование метода магнитно-абразивной обработки и оборудования для механизированной подготовки свариваемых кромок изделий и сварочной проволоки: Отчет о НИР (заключит.) / ФТИ АН БССР; Руководители работы П.И. Ящерицын и В.Н. Чачин, № ГР 0184001521. – Мн., 1986. – 88 с.
222. Моисеенко, И.Г., Столбов, В.И., Турченко, М.А. Оксидные включения при сварке сплава АМг-6 // Сварочное производство. – 1968. – № 5. – С. 23 – 24.
223. А.с. 1217637 СССР, МКИЗ В 24В 31/112. Устройство для двухсторонней магнитно-абразивной обработки / Н.П. Морозов [и др.] (СССР). – № 3706471; Заявл. 27.12.83; Опубл. 15.03.86, Бюл. № 10. – 4 с.
224. Создание и внедрение оборудования и технологии магнитно-абразивной зачистки кромок деталей и сварочной проволоки: Отчет о НИР (заключит.) / БПИ; Руководитель работы Н.С. Хомич, № ГР 01890033651. – Мн., 1990. – 53 с.
225. Магнитно-абразивная зачистка кромок изделий из сплава АМг-6 перед сваркой В.Н. Чачин [и др.] // Передовой технический опыт. – 1988. – № 8. – С. 21 – 24.
226. Хомич, Н.С., Романюк, С.И., Тарун, А.П., Прибыльский, В.И. Магнитно-абразивное полирование и зачистка поверхностей // Сб. докладов VIII междунар. конф. по шлифованию, абразивным инструментам и материалам «Intergrind, 91». – СПб., 1991. – С. 97 – 103.
227. Разработка и внедрение оборудования и процессов магнитно-абразивной зачистки сварочной проволоки и кромок изделий для постановки на серийное производство: Отчет о НИР (заключ.) / БПИ, Руководитель работы В.Н. Чачин, №ГР 01860029211. – Мн., 1988. – 87 с.
228. Особенности магнитно-абразивной обработки алюминиевых сплавов / С.И. Романюк [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1988. – № 2. – С. 78 – 84.

229. Создать и освоить новые порошковые материалы на основе тугоплавких соединений переходных металлов и железа для магнитно-абразивной обработки твердых поверхностей: Отчет о НИР (заключ.) / ФТИ АН БССР; Руководитель работы П.И. Ящерицын, № ГР 78001018. – Мн., 1980. – 167 с.
230. Романюк, С.И., Хомич, Н.С., Мамон, М.Д. Исследование явления микрошаржирования в процессе магнитно-абразивной обработки кромок изделий из алюминиевых сплавов // Физика и химия обработки материалов. – 1992. – № 5. – С. 136 – 143.
231. Романюк, С.И. Разработка процессов и оборудования для магнитно-абразивной обработки кромок и боковых поверхностей листов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Мн., 1989. – 211 с.
232. Никифоров, Г.Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. – М.: Машиностроение, 1972. – 264 с.
233. Обработка поверхности и надежность материалов / П. Парриш [и др.]; пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 192 с.
234. Грихилес, С.Я. Электрохимическое полирование. – Л.: Машиностроение, 1976. – 207 с.
235. Альтман, М.Б. Неметаллические включения в алюминиевых сплавах. – М.: Металлургия, 1965. – 127 с.
236. Потапов, Н.Н. Окисление металлов при сварке плавлением. – М.: Машиностроение, 1985. – 216 с.
237. Воропай, Н.М., Манжелей, Г.П. Выявление окисных включений в швах на алюминиевых сплавах // Автомат. Сварка. – 1971. – № 12. – С. 71 – 72.
238. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
239. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
240. Воропай, Н.М., Рева, А.А., Новиков, М.П. Электрохимическая очистка поверхности сварочной проволоки из алюминия и алюминиевых сплавов // Автомат. сварка, 1980. – № 9. – С. 69 – 70.
241. Die Fertigung von Aluminium-Schweißdraht // Draht welt. – 1970, 56. – № 8. – S. 446.
242. Miller, N.A. The effect on weld quality of surface oxides on aluminium welding rods // Weld J., 1979, 49. – № 8. P. 653 – 655.
243. Воропай, Н.М., Рева, А.А. Технология и оборудование электрохимической очистки поверхностей сварочной проволоки из алюминиевых сплавов // Автомат. сварка, 1984. – № 10. – С. 48 – 51.
244. А.с. № 975134 (СССР). Устройство для очистки проволоки или круглого проката / В.И. Кадошников. – Оpubл. в Б. И., 1982. № 43.
245. А.с. № 918055 СССР. Устройство для магнитно-абразивной обработки / В.Я. Спирин [и др.]. – Оpubл. в Б. И., 1982, № 13.
246. А.с. № 395143 СССР. Устройство для зачистки катанки от окалины / Л.Г. Делюсто. – Оpubл. в Б. И., 1973, № 35.
247. А.с. № 1024241 СССР. Устройство для магнитно-абразивной обработки / Ю.С. Кочура, А.А. Мизери. – Оpubл. в Б. И., 1983, № 23.
248. А.с. № 1061874 СССР. Устройство для очистки проволоки / А.И. Тищенко. – Оpubл. в Б. И., 1983, № 47.
249. Разработка способа магнитно-абразивной обработки листов и сварочной проволоки из алюминиевых сплавов: Отчет о НИР (заключ.) / БПИ, Руководитель работы В.Н. Чачин, № ГР 01870081622. – Мн., 1987. – 89 с.
250. Хомич, Н.С., Кульгейко, М.П., Дульгьер, Р.О., Коблова, О.И. Возможности магнитно-абразивной зачистки сварочной проволоки // Технология машиностроения. Научно-технический сборник ЦНТИ «Поиск». – 1987. – Вып. 10. – С. 59 – 68.

251. А.с. 1271607 СССР, МКИЗ В24В31/112. Устройство для магнитно-абразивной зачистки прутков и проволоки / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – № 3779930; Заявл. 14.08.84; Оpubл. 22.07.86. – 4 с.
252. Хомич, Н.С., Романюк, С.И., Кульгейко, М.П. Магнитно-абразивная зачистка кромок листов и проволоки перед сваркой // Доклады на четверти научно-технически семинар с международно участие по неконвенционални технологии в машиностроено. – Т. 2. – Ботевград, 1989. – С. 36 – 45.
253. Кульгейко, М.П. Разработка процессов и оборудования для магнитно-абразивной обработки проволоки: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Мн., 1989. – 197 с.
254. Хомич, Н.С., Кульгейко, М.П., Дульгиер, Р.О. Технология магнитно-абразивной обработки проволоки / Информ. листок о науч.-техн.достиж., Бел НИИНТИ, № 87-209. – 1987. – 2 с.
255. Магнитно-абразивная зачистка кромок изделий и проволоки из сплавов АМг-6 перед сваркой / Н.С. Хомич [и др.] // Сварочное производство. – 1987. – № 11. – С. 21 – 23.
256. Магнитно-абразивная зачистка сварочной проволоки из алюминиевых сплавов / А.А. Гайдук [и др.] // Автоматическая сварка. – 1990. – №5. – С. 64 – 66.
257. Хомич, Н.С., Кульгейко, М.П., Логвиненко, П.И. Обеспечение качества при магнитно-абразивной зачистке сварочной проволоки // Интенсификация и автоматизация отделочно-зачистной обработки деталей машин и приборов: Тезисы докладов. – Ростов н/Д: РИСХМ, 1988. – С. 37 – 39.
258. Хомич, Н.С., Кульгейко, М.П., Головчиц, И.М., Дульгиер, Р.О. Станок для магнитно-абразивной зачистки проволоки // Научно-технические достижения. Межотраслевой научно-технич.сб. ВИМИ, 1988, вып.1. – С. 17 – 18.
259. А.с. 1475012 СССР, МКИЗ В24В31/112. Устройство для магнитно-абразивной обработки прутков и проволоки / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – № 4244141; Заявл. 14.05.87; Оpubл.22.12.88. – 4 с.
260. Тененбаум, М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
261. Хрущев, М.М., Бабичев, М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 252 с.
262. А.с. 16030180 СССР, МКИЗ В24В31/112. Устройство для магнитно-абразивной обработки прутков и проволоки / Н.С. Хомич, М.П. Кульгейко, В.И. Прибыльский (СССР). – № 4636968; Заявл. 17.11.88; Оpubл. 22.10.90. – 4 с.
263. А.с. 1551504 СССР, МКИЗ В23К35/40. Устройство для очистки сварочной проволоки / А.И. Корушонков, В.А. Исаченко, В.П. Левин и др. (СССР). – № 4296950; Заявл. 02.07.87; Оpubл. 23.03.90, Бюл. № 11. – 5 с.
264. А.с. 1598340 СССР, МКИЗ В23К10/02. Способ динамической плазменной обработки поверхности / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – № 4383028; Заявл. 04.01.88; Оpubл. 08.06.90. – 3 с.
265. Участок электрохимической очистки сварочной проволоки из сплавов АМГ / Л.С. Астахов [и др.] – Технология судостроения, 1982, 10, С. 13 – 16.
266. А.с. 1640891 СССР, МКИЗ В24В31/112. Способ магнитно-абразивной обработки длинномерных изделий / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – № 4649532; Заявл. 13.02.89; Оpubл. 08.12.90. – 4 с.
267. А.с. 1689044 СССР, МКИЗ В24В31/12. Способ полирования поверхностей изделий магнитно-абразивным порошком / Н.С. Хомич, В.М. Яркович, А.П. Тарун (СССР). – № 4721624; Заявл. 31.05.89; Оpubл. 07.11.91, Бюл. № 41. – 4 с.
268. Патент 2008986 РФ, МКИЗ В 08В3/02. Установка для очистки длинномерных изделий / Н.С. Хомич, Г.З. Подсобей (СССР). – № 5002551; Заявл. 17.08.91; Оpubл. 15.03.94, Бюл. № 5. – 4 с.
269. Мельниченко, Н.Т. Монтаж и сварка конструкций из нержавеющей стали и алюминия. – Л.: Машиностроение, 1968. – 208 с.

270. Справочник по печатным схемам. – М.: Сов.радио, 1972. – 696 с.: ил.
271. А.с.781032 СССР, МКИЗ В24В31/10. Устройство для магнитно-абразивной обработки листовых материалов / Б.Н. Шихерев, Е.А. Магросов, И.А. Дереш (СССР). – № 2724252; Заявл. 14.02.79; Оpubл. 23.11.80, Бюл. № 43. – 3 с.
272. Хомич, Н.С. Исследование возможности получения ферромагнитных абразивных частиц с заданными линейно-геометрическими характеристиками // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев: ИПМ АН УССР, 1980. – С. 24 – 29.
273. Хомич, Н.С. Управление свойствами ферромагнитных абразивных порошков // Магнитно-абразивная обработка деталей машин: Тез. докл. науч.-техн. конф. – Мн., 1979. – С. 8 – 10.
274. Хомич, Н.С. Влияние свойств ферромагнитных абразивных порошков на результаты АОМП // Магнитно-абразивная обработка деталей машин: Тез. докл. науч.-техн. конф. – Мн., 1979. – С. 10 – 11.
275. Хомич, Н.С. Исследование влияния свойств ферромагнитных абразивных материалов на эффективность абразивной обработки в магнитном поле // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев: ИПМ АН УССР, 1980. – С. 30 – 37.
276. Поверхностная обработка пластмасс / Перевод с чешского под ред. Ш.Х. Лельчука. – Л.: Химия, 1972. – 184 с.
277. Полимерные пленочные материалы / Под ред. В.Е. Гуля. – М.: Химия, 1976. – 247 с.
278. А.с. 1006186 СССР, МКИЗ В24В31/10. Способ магнитно-абразивной обработки листовых материалов / П.И. Ящерицын [и др.] (СССР). – № 3311928; Заявл. 13.12.80; Оpubл. 23.03.83, Бюл. № 11. – 3 с.
279. А.с. 1198843 СССР, МКИЗ В24В1/10. Устройство для магнитно-абразивной обработки / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – №3676211; Заявл. 05.10.83; Оpubл. 15.08.85. – 6 с.
280. А.с. 1136903 СССР, МКИЗ В 23К 3/00. Устройство для удаления излишков припоя / И.П. Горчаков, Н.С. Хомич, В.Н. Чачин (СССР). – Оpubл. 30.01.85, Бюл. № 4. – 3 с.
281. Лепший, А.П. Магнитно-абразивная обработка крупногабаритных плоских поверхностей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Мн., 1992. – 193 с.
282. А.с. 1437197 СССР, МКИЗ В 24В 31/10. Способ односторонней магнитно-абразивной обработки поверхностей и устройство для его осуществления / Н.П. Морозов [и др.] (СССР). – № 4223975, Заявл. 06.04.87; Оpubл. 15.11.88, Бюл. № 42. – 4 с.
283. А.с. 1484641 СССР, МКИЗ В 24В31/112. Устройство для односторонней магнитно-абразивной обработки / Н.П. Морозов [и др.] (СССР). – № 4320249; Заявл. 06.04.87; Оpubл. 07.06.89, Бюл. № 21. – 3 с.
284. А.с. 1388743 СССР, МКИЗ G01N1/00. Способ отбора проб / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – № 4137375; Заявл. 20.10.86; Оpubл. 15.04.88, Бюл. № 4. – 3 с.
285. А.с. 1256337 СССР, МКИЗ В24Д3/34. Материал для магнитно-абразивной обработки / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – № 3646879; Заявл. 05.08.83; Оpubл. 08.05.86. – 3 с.
286. А.с. 1783715 СССР, МКИЗ В 24Д3/34. Композиционный материал для магнитно-абразивной обработки / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – № 42003434; Заявл. 05.12.86; Оpubл. 22.08.92. – 2 с.
287. А.с. 1563948 СССР, МКИЗ В 24В31/112. Устройство для магнитно-абразивной обработки / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – № 4385146; Заявл. 26.02.88; Оpubл. 05.05.90; Бюл. № 18. – 2 с.
288. А.с. 1662815 СССР, МКИЗ В24В31/112. Способ магнитно-абразивной обработки деталей из немагнитных материалов / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – № 4421983; Заявл. 12.05.88; Оpubл. 15.07.91, Бюл. № 26. – 3 с.
289. А.с. 1731606 СССР, МКИЗ В 24В31/112. Устройство для магнитно-абразивной обработки / В.М. Яркович, Н.С. Хомич, И.Н. Тозик (СССР). – № 4757971; Заявл. 30.08.89; Оpubл. 07.05.92, Бюл. № 17. – 3 с.



290. А.с. 1830341 СССР, МКИЗ В 24 В 31/112. Устройство для магнитно-абразивной обработки / В.М. Яркович, И.Н. Тозик, Н.С. Хомич (СССР). – № 4905106; Заявл. 25.01.91; Оpubл. 30.07.93, Бюл. № 28. – 3 с.

291. А.с. 1563878 СССР, МКИЗ В 23 Н 9/00. Способ магнитно-абразивной обработки / В.Н. Чачин [и др.] (СССР). – № 4394349; Заявл. 21.03.88; Оpubл. 15.05.90, Бюл. № 18. – 3 с.

292. А.с. 1673410 СССР, МКИЗ В 24 В 31/112. Устройство для магнитно-абразивной обработки / В.М. Яркович, Н.С. Хомич, И.Н. Тозик (СССР). – № 4736594; Заявл. 11.09.89; Оpubл. 30.08.91, Бюл. № 32. – 3 с.

293. Ящерицын, П.И., Сакулевич, Ф.Ю., Хомич, Н.С. Абразивная обработка в магнитном поле: возможности процесса, схемы реализации и применяемые инструменты // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев: ИПМ АН УССР, 1980. – С. 3 – 8.

294. Разработка физических основ некоторых рабочих процессов импульсной обработки материалов: Отчет о НИР (заключит.) / ФТИ АН БССР, Руководитель работы В.Н. Чачин, № ГР 01830018020. – Мн., 1985. – 80 с.

295. Чачин, В.Н., Хомич, Н.С. Достижения и проблемы в области магнитно-абразивной обработки // Доклады на трети научно-технически семинар по технологии за довършваща обработване. – Варна, 1988. – С. 17 – 23.

296. Khomich, N.S. Magnetabrasive machining: design and equipment / Magnetic fluids and powders-new technological materials. Scientific problems and application. – Minsk, 1991. – 44 p.

297. Chomitsch, N.S. Magnet-abrasive Bearbeitung von Drahtoberflächen // Metalloberfläche Beschichten von Metall und Kunststoff. – 1995. – №12. – p. 936.

298. Хомич, Н.С., Алексеев, Ю.Г., Нисс, В.С. Обработка поверхностей в магнитном поле: эффективность и экология // Металлургия в машиностроении. – 2005. – №6.

299. Маркова, Е.В. Руководство по применению латинских планов при планировании эксперимента с качественными факторами. – Челябинск, 1971. – 156 с.: ил.

300. Хикс, И. Основные принципы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1967. – 406 с.

301. Постников, С.Н. Физические основы обработки материалов и изделий последовательностью импульсов слабого магнитного поля // Доклады на трети научно-технически семинар с международно участие по технологии за довършваща обработване. – Варна, 1987. – С. 199 – 207.

302. Хомич, Н.С. О нетрадиционной концепции обработки контактирующих поверхностей // Тез. докл. XXI науч.-техн. конф. в рамках проблемы «Наука и мир». Ч. II. – Брест, 1994. – С. 46 – 47.

303. Разработка и промышленная проверка новой концепции обработки контактирующих поверхностей: Отчет о НИР (заключит.) / БГПА, Руководитель работы Н.С. Хомич, № ГР 1994632. – Мн., 1995. – 58 с.

304. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / Под ред. М.К. Роко, Р.С. Уильямса, П. Аливисатоса; пер. с англ. – Мир, 2002. – 292 с.: ил.

305. Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology / Eds. M.C. Roco, W.S. Bainbridge. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. – 384 p.

306. Пахомов, С.И. Эра трехмерных транзисторов // Компьютер-пресс. – 2003. – №1 – С. 34 – 38.

307. Bruning, J.H. Optical lithography below 100 nm / Solid State Technology. – 1998. №11. – P. 59 – 62.

308. Khomich M., Aliakseyev Y., Demmert A., Pähler D., Dambon O. and Schneider U. Magnetic-abrasive machining Of Silicon Wafers – A Novel Approach // Industrial Diamond Review, 2004. – №3. – Pp. 45 – 48.

309. <http://www.public.itrs.net>.

310. Патент РБ №2895. МКИЗ В 24В1/00. Метод гидродинамического полирования / В.И. Кордонский, Л.К. Глеб, Г.Р. Городкин, С.Р. Городкин. – №960087, Заявл. 27.02.96, Оpubл. 30.06.99. – 19 с.

311. <http://www.qedmrf.com>.

312. Pat. USA 5 449 313, B24B 31/112. Magnetorheological polishing devices and methods/ W.I. Kordonsky, I.V. Prochorov, S.R. Gorodkin etc. – Date of Patent 12.09/1995. – 22 p.

313. Нанотехнология полирования в магнитном поле поверхностей деталей оптики, электроники и лазерной техники / Порошковая металлургия: достижения и проблемы: сб. докл. междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 22-23 сентября 2005 г. Ред. кол.: А.Ф. Ильющенко (гл. ред.) и др. / Хомич, Н.С. [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2005. – С. 223 – 225.

314. Изучение физико-химических процессов при формировании нанослоев и нанорельефа поверхности в условиях воздействия ферроабразивных частиц и магнитного поля с применением поверхностно-активных веществ. Отчет по НИР (заключительный) / БНТУ; Рук. Н.С. Хомич. – № ГР 20022378. – Мн., 2003. – 52 с.

315. Апробация технологии полирования в магнитном поле деталей электронной и оптической техники / Е.П. Власенко, А.Ю. Луговик, Н.С. Хомич, Р.В. Федорцев // Сборник научных работ «НИРС-2002» / Первое республ. издание. – Мн., 2003. – С. 457 – 460.

316. Луговик, А.Ю., Власенко, Е.П. Композиционные ферроабразивные порошки для полирования в магнитном поле оптикоэлектронных деталей // Новые материалы и технологии их обработки: материалы конференции / БНТУ, МТФ, 22 – 23 апреля 2003 г. – Мн., 2003. – С. 115 – 117.

317. Моделирование кинематики макровзаимодействия магнитно-абразивного инструмента с поверхностью // Известия Белорусской инженерной академии / П.В. Кухто [и др.]. – 2005. – №1 (19)/1. – С. 147 – 150.

318. Разработать научные основы нанотехнологий полирования в магнитном поле поверхностей изделий оптической и электронной техники. Отчет по НИР (заключительный) / БНТУ; Рук. Н.С. Хомич. – № ГР 20031492. – Мн., 2005. – 82 с.

319. Магнитно-абразивная обработка – перспективный метод полирования кремниевых пластин / Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: Тез. докл. 6-й Междунар науч.-техн. конф... / Н.С. Хомич [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2005. – С. 56 – 57.

320. Klocke, F., Pahler, D. Fighting surface damages of silicon wafers – fine-tuned wafer processing with rotational grinding // Industrial Diamond Review. – 2002. P. 149 – 156.

321. Klocke, F., Gerent, O., Pähler, D. Effiziente Prozesskette zur Waferfertigung // Automatisierte Handhabung, ZWF. Carl Hanser Verlag, München / Jahrg. (2000). – Vol. 95. – №3. P. 79 – 82.

322. Зубаков, В.Г., Семибратов, Н.Н., Штандель, С.К. Технология оптических деталей. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.

323. <http://www.korth.de>.

324. <http://www.rafael.co.il>.

325. Shorey, A.B., Jacobs, S.D., Kordonski, W.I., Gans, R.F. Experiments and Observations Regarding the Mechanisms of Glass Removal in Magnetorheological Finishing / Appl. Opt. 40. – Pp. 20–33 (2001).

326. Fess, E. MRF Polishing of Microground Surfaces. Part II. Magnetorheological Finishing // Convergence May/June 2002. – Vol. 10. – №3. – P.1–4.

327. Разработать теоретические основы и технологические аспекты процесса магнитно-абразивного полирования поверхностей активных элементов лазерных устройств / Отчет по НИР (заключительный) / БНТУ; Рук. Н.С. Хомич. – № ГР 20033597. – Мн., 2004. – 49 с.

328. <http://www.veeco.com>.

329. Миронов, В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Нижний Новгород: Российская академия наук, Институт физики микроструктур, 2004. – 114 с.

330. Атомно-силовой микроскоп NT-206: руководство по эксплуатации. – Гомель: ОДО “Микротестмашины”, 2004. – 66 с.

Научное издание

ХОМИЧ Николай Степанович

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ  
ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ

Монография

---

Подписано в печать 28.08.2006.  
Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная.  
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 25,3. Уч.-изд. л. 10,0. Тираж 100. Заказ 846.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский национальный технический университет.  
ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.  
220013, Минск, проспект Независимости, 65.